

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ВОЛГОГРАДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

# ИЗВЕСТИЯ

ВОЛГОГРАДСКОГО  
ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО  
УНИВЕРСИТЕТА

Серия

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ,  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ  
И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Выпуск 22

---

№ 25(152)

Межвузовский сборник научных статей  
Издается с января 2004 г.

2014

---



Волгоград  
2014

УДК 881.3

Учредитель: ГОУ высшего профессионального образования  
«Волгоградский государственный технический университет»

Сборник зарегистрирован в Управлении регистрации и лицензионной работы в сфере массовых коммуникаций федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия ПИ № ФС77–25660 от 13 сентября 2006 г.

Главный редактор сборника «Известия ВолгГТУ»  
президент ВолгГТУ академик РАН И. А. Новаков

Редакционная коллегия серии:

засл. деят. науки РФ д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ В. А. Камаев (научный редактор)  
д-р техн. наук, профессор БрГТУ В. И. Аверченков  
д-р техн. наук, профессор ПензГУ А. М. Бершадский  
д-р физ.-мат. наук, профессор ВолгГТУ Е. С. Брискин  
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ А. С. Горобцов  
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ А. М. Дворянкин  
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ А. В. Заболеева-Зотова  
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ А. Г. Кравец  
д-р техн. наук, профессор ТагГРТУ В. М. Курейчик  
д-р техн. наук, профессор АИСИ И. Ю. Петрова  
д-р техн. наук, профессор АстрГТУ О. М. Проталинский  
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ А. Н. Шилин  
д-р техн. наук, профессор Юрген Баст (Технический ун-т Горной Академии, г. Фрайберг, Германия)  
д-р философии Ле Квет Тан (Университет г. Канто, Вьетнам)  
д-р техн. наук, профессор ВолгГТУ С. А. Фоменков (ответственный секретарь)

Печатается по решению редакционно-издательского совета  
Волгоградского государственного технического университета

**Известия** Волгоградского государственного технического университета : межвуз. сб. науч. ст.  
№ 25(152) / ВолгГТУ. – Волгоград : ИУНЛ ВолгГТУ, 2014. – 200 с. (Серия «Актуальные проблемы  
управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 22).  
ISBN 978–5–9948–1675–2

Содержит работы ученых высших учебных заведений России по следующей тематике: математическое моделирование и численные методы, системный анализ и обработка информации, управление в социальных и экономических системах, автоматизированное проектирование, построение сетей и защита информации, робототехника.

Ил. 136. Табл. 57. Библиогр.: 396 назв.

ISBN 978–5–9948–1675–2

© Волгоградский государственный  
технический университет, 2014

---

Научное издание

**ИЗВЕСТИЯ**  
**Волгоградского государственного технического университета**  
**№ 25 (152), 2014 г.**

С е р и я «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ  
И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»  
Выпуск 22

*Межвузовский сборник научных статей*

Редактор Л. Н. Рыжих  
Компьютерная верстка Е. В. Макаровой

Темплан 2014 г. (научные издания). Поз. № 15н.  
Подписано в печать 25.12.2014. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.  
Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 23,25. Уч.-изд. л. 23,65.  
Тираж 80 экз. Заказ

Волгоградский государственный технический университет.  
400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 1.

Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ.  
400005, г. Волгоград, просп. им. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

## СОДЕРЖАНИЕ

---

### Часть I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

|                                                                                                                                                                                          |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Брумштейн Ю. М.</i><br>Анализ возможных подходов к методам компьютерного моделирования<br>некоторых специальных задач геофльтрации.....                                               | 5  |
| <i>Чернышев В. В., Арыканцев В. В.</i><br>Моделирование динамики штамповой установки<br>при взаимодействии с подводным грунтом.....                                                      | 11 |
| <i>Элькин М. Д., Шагаутдинова И. Т., Лихтер А. М., Гречухина О. Н.</i><br>Моделирование адиабатических потенциалов биомолекул.<br>Кверцетин (3', 4', 3, 5, 7- Пентагидроксифлавоны)..... | 15 |
| <i>Элькин П. М., Алыкова О. М., Джалмухамбетова Е. А., Смирнов В. В.</i><br>Моделирование адиабатических потенциалов конформеров<br>гидроксиизофлавонов.....                             | 19 |
| <i>Элькин П. М., Лихтер А. М., Егоренкова Т. А., Гречухина О. Н.</i><br>Моделирование структуры позиционных<br>таутомеров моногидроксиизофлавонов.....                                   | 24 |
| <i>Яновский А. Г., Яновский Т. А.</i><br>О противопоставлении квазиньютоновских методов,<br>оперирующих аппроксимациями прямой и обратной матрицы Гессе.....                             | 30 |

### Часть II. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

|                                                                                                                                                                                            |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Алексеев А. В., Розалиев В. Л., Орлова Ю. А., Фоменков С. А.</i><br>Автоматизированное окрашивание полутонных изображений<br>на основе интеллектуального анализа сцены.....             | 35 |
| <i>Артамонов И. В.</i><br>Исследование надежности работы интернет-магазина<br>с помощью окрашенных сетей Петри.....                                                                        | 42 |
| <i>Афанасьев А. Н., Хородов В. С.</i><br>Агентный подход к построению системы распределенного проектирования<br>VHDL-объектов и ее моделирование на базе цветных сетей Петри.....          | 47 |
| <i>Байбурин В. Б., Терентьев А. А., Ершов А. С., Лазарев С. А.</i><br>Анализ магнитной и электростатической системы для приборов<br>магнетронного типа с увеличенным уровнем мощности..... | 53 |
| <i>Голованчиков А. Б., Курылева Л. В., Каблов В. Ф., Дулькин Б. А.</i><br>Анализ процессов очистки охлаждающей воды реакторов АЭС<br>от радиоактивных изотопов стронция и цезия.....       | 55 |
| <i>Дедов А. В., Попов Г. А.</i><br>Определение диагноза по сердечно-сосудистым заболеваниям<br>на основе использования набора формализованных моделей.....                                 | 60 |
| <i>Климов А. С., Розалиев В. Л., Орлова Ю. А.</i><br>Автоматизация построения объемной модели головы человека.....                                                                         | 67 |
| <i>Кравец А. Г., Ле Суан Куен</i><br>Протокол для сохранения конфиденциальности профиля<br>в социальных сетях.....                                                                         | 72 |
| <i>Пантелеев В. В., Кизим А. В.</i><br>Применение агентного подхода при моделировании процесса<br>технического обслуживания и ремонта оборудования.....                                    | 75 |
| <i>Солошенко А. Н., Орлова Ю. А., Розалиев В. Л.</i><br>Автоматизированный анализ новостного потока из сети интернет<br>с учетом семантики текстов.....                                    | 80 |
| <i>Сычев О. А., Пахомов Д. А.</i><br>Генерация описания регулярного выражения на естественном языке<br>как инструмент помощи составителю регулярного выражения.....                        | 86 |

## Часть III. УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

|                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Аверченков В. И., Якимов А. И., Борчик Е. М.</i><br>Многокритериальное управление технологическим процессом<br>с использованием принципа оптимальности Беллмана..... | 95  |
| <i>Хиноцкая Ю. И.</i><br>Качественный подход к оценке качества жизни населения.....                                                                                     | 102 |
| <i>Чан В. Ф., Алимов А. А., Шабалина О. А.</i><br>Анализ алгоритмов и методов управления группой<br>интеллектуальных агентов в динамической среде.....                  | 108 |

## Часть IV. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Асеева Е. Н., Авдеюк О. А.</i><br>Алгоритмический подход к построению твердотельных моделей<br>геометрических тел с вырезами.....                                                                                    | 113 |
| <i>Воронин Ю. Ф., Иванов Д. В., Матохина А. В.</i><br>Направления решения технологических и проектных вопросов<br>для получения качественного литья.....                                                                | 117 |
| <i>Голованчиков А. Б., Воротнева С. Б., Дулькин Б. А.</i><br>Влияние структуры потоков и термического сопротивления<br>на технологические параметры двухтрубного теплообменника.....                                    | 121 |
| <i>Гончаров А. А., Гончаров Ан. А., Калинин Я. В.</i><br>Влияние начальных радиальных зазоров в подшипниковом узле<br>на нагрузочную способность клинового механизма свободного хода.....                               | 126 |
| <i>Иванов Д. В., Матохина А. В., Воронин Ю. Ф.</i><br>Описание метода и комплекса средств выявления причин<br>возникновения дефектов отливок из железоуглеродистых сплавов<br>и определения способов их ликвидации..... | 132 |
| <i>Кандырин Ю. В., Кононов М. Е.</i><br>Методика и алгоритм выбора аналогов в Парето расслоениях.....                                                                                                                   | 139 |
| <i>Кравец А. Д.</i><br>Разработка методов генерации интеллектуальных мультиагентных систем....                                                                                                                          | 145 |

## Часть V. ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

|                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Гаевой С. В., Фоменков С. А.</i><br>Модели аппроксимации нагрузки кластера на примере LANL CM5<br>для стохастического имитационного моделирования.....                                       | 151 |
| <i>Гаевой С. В., Фоменков С. А., Аль-Хадша Ф. А. Х., Лукьянов В. С.</i><br>Сравнение эвристик распределения заданий в ГРИД-системе<br>путем детерминированного имитационного моделирования..... | 159 |
| <i>Камаев В. А., Финогеев А. Г., Нефедова И. С., Финогеев Е. А.</i><br>Инструментальные средства «облачного» мониторинга<br>распределенных инженерных сетей.....                                | 164 |
| <i>Кравец А. Г., Ле Суан Куен</i><br>Минимизация разглашения личной информации в социальных сетях.....                                                                                          | 177 |
| <i>Мулеев Э. З., Овчинников С. А.</i><br>Метод определения количества этапов проекта<br>при разработке программного обеспечения.....                                                            | 180 |

## Часть VI. РОБОТОТЕХНИКА

|                                                                                                                                                                    |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Беликов В. А., Жога В. В., Скакунов В. Н., Терехов С. Е., Шаманов И. В.</i><br>Системы машинного зрения мобильных роботов.....                                  | 184 |
| <i>Калинин Я. В., Устинов С. А., Шкутан Д. В.</i><br>Об энергетически оптимальном движении шагающей машины<br>«ВОСЬМИНОГ» с цикловыми движителями.....             | 191 |
| <i>Леонард А. В., Малолетов А. В., Гаврилов А. Е., Калинин Я. В.</i><br>Идентификация параметров привода курсового перемещения<br>шагающего аппарата «Циклон»..... | 196 |



# МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

УДК 51-7+681.3

*Ю. М. Брумиштейн*

## АНАЛИЗ ВОЗМОЖНЫХ ПОДХОДОВ К МЕТОДАМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕКОТОРЫХ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ ГЕОФИЛЬТРАЦИИ

Астраханский государственный университет

brum2003@mail.ru

Рассмотрены задачи геофильтрации со свободной поверхностью при наличии дренажей различных типов, в том числе вакуумируемых и вентиляционных. Дана характеристика процессов, происходящих в грунте при совместной фильтрации жидкости и воздуха. Предложен общий алгоритм моделирования совокупности процессов, в том числе перемещения свободной поверхности насыщенной зоны на основе специального кинематического условия для нее. Проанализированы варианты реализации алгоритмов моделирования с использованием гидродинамической и смешанной (гидродинамической+гидравлической) постановок задач. Показаны преимущества комплексных неявных схем перехода по времени, основанных на использовании матрицы Якоби.

*Ключевые слова:* геофильтрация, свободная поверхность, гидродинамическая и гидравлическая постановка, вакуумируемые и вентиляционные дренажи, математическое моделирование, жесткие дифференциальные уравнения, матрица Якоби, вычислительная эффективность.

*Ju. M. Brumshteyn*

## ANALYSIS OF POSSIBLE APPROACHES TO METHODS OF COMPUTER MODELLING FOR SOME SPECIAL GEOFILTRATION PROBLEMS

Astrakhan State University

In article are considered geofiltration problems with free surface in the presence of drainages of various types, including vacuumized and ventilating. The characteristic of processes, happening in soil at a joint liquid and air filtration is given. Author offered the general algorithm for set of modeling processes, including movements of free surface for saturated zone, on the basis of special kinematic condition for it. In article are analyzed options of algorithms for modeling realization with usage of hydrodynamic and mixed (hydrodynamic + hydraulic) statements of tasks. Advantages of complex implicit schemes for transition on time, based on Jacobi's matrix usage, are shown.

*Keywords:* geofiltration, free surface, hydrodynamic and hydraulic statement, vacuumized and ventilating drainages, mathematical modeling, rigid differential equations, Jacobi's matrix, computing efficiency.

Задачи моделирования геофильтрационных процессов (ГФП) интересны с практической точки зрения [1]; отношении оценки эффективности вычислительных алгоритмов. Цели данной статьи: общий анализ ГФП в грунте при наличии дренажей специальных типов; исследование возможных постановок таких задач для ГФП, подходов к их компьютерному моделированию; обоснование эффективности использования алгоритмов, в т.ч. «комплексных неявных схем» перехода по времени для отслеживания перемещений свободной поверхности (СП) грунтовых вод (ГВ).

### Проблематика строительного водопонижения и его моделирования

Задачи ГФП со СП включают в себя, как правило, водоносный горизонт, ближайший к поверхности грунта. При этом смещение СП «близко» к поверхности грунта приводит к подтоплению заглубленных частей зданий и сооружений; росту потенциальной опасности сейсмических воздействий; увеличению влажности в подземных помещениях. Важно, что ГВ иногда достаточно «агрессивны» к бетону, металлоконструкциям – это приводит к их ускоренному разрушению. Поэтому важно уметь прогнози-

ровать повышение СП, грамотно проектировать меры по его снижению.

Над зоной насыщенной фильтрации, ограничиваемой СП, имеется капиллярная кайма (КК) – ее высота в мелкозернистых грунтах может составлять до нескольких метров [5]. Эта КК может осуществлять «транспортировку» жидкости либо к поверхности грунта, либо к заглубленным частям зданий, к подземным трубопроводам и пр. Поэтому объекты, расположенные в пределах КК, также подвергаются воздействию ГВ.

Дренирование грунтов осуществляется для снижения уровней СП. Дефицит строительных площадок (особенно в городах) привел к расширению строительства на участках с высокими уровнями ГВ и на слабопроницаемых грунтах (СПГ), для которых высота КК велика. При этом использование гравитационных дренажей (ГД) для СПГ – малоэффективны. В связи с этим повысился интерес к нетрадиционным дренажам, включая вакуумируемые [7] и вентиляционные [15]. Однако для их проектирования необходимы адекватные методы расчета (моделирования) ГФП.

Практические потребности прогнозирования уровней ГВ и проектирования водопонижения при сложном строении пласта привели к разработке различных средств моделирования ГФП. Из них наиболее известной программой «общего назначения» является, видимо, MODFLOW. Для таких программ в рамках метода конечных разностей (МКР) расчетная область представляется в виде прямоугольных блоков для профильных (плоско-вертикальных) задач, а для трехмерных задач – параллелепипедов. При конечно-элементной (КЭ) дискретизации используются, соответственно, треугольные и тетраэдральные КЭ. Пространственная дискретизация нужна, в конечном счете, для расчета распределения напоров в области насыщенной фильтрации [10] и получения балансовых соотношений для «верхних» блоков, через которые проходит СП. Затем по «дисбалансу» для каждого из таких блоков определяется смещение СП за шаг по времени – при этом обычно применяется явная разностная схема перехода по времени первого порядка точности. Описанный подход к моделированию ГФП и программные средства его реализации имеют такие недостатки: не учитывается локальная «кривизна СП», что приводит к неточностям в определении кинематики ее перемещений во

времени [9]; есть методические сложности, связанные с некорректным учетом фильтрационных потоков вблизи дрена, особенно если размеры дрена малы по сравнению с размерами содержащих их блоков; сложно учесть «экранирование» отдельных частей периметров дрена в сечении; для представления «удаленных» в плане границ расчетной области нужно большое количество расчетных блоков – причем в случае МКР они часто «вытянуты» вдоль одной из осей; не удастся корректно моделировать специальные типы дренажей – в т. ч. вентиляционные и вакуумируемые). Поэтому актуален детальный анализ ГФП в грунте при наличии дренажей специальных типов и разработка эффективных подходов к их компьютерному моделированию.

#### **Феноменологический анализ ГФП в грунте при наличии дренажей специальных типов и трудностей их моделирования**

Повышение эффективности гравитационных дренажей в СПГ может достигаться так: применением специальных типов «обратных фильтров», позволяющих увеличить «эффективный» диаметр дрена; использованием «лучевых» дренажей, в т. ч. «заходящих» под здания; применением специальных средств интенсификации водопритока. С последней целью в вакуумируемых дренажах (ВД) используется вакуум – до нескольких десятых долей атмосферы [7]. Это приближенно может быть сопоставимо с «переносом» дренажа вниз на величину вакуума, выраженного в «метрах водного столба». Однако такой подход принципиально не применим при моделировании дрена, расположенных близко к водоупорам. В строительстве ВД применяются в основном для временного водопонижения (вакуумируемые иглофильтры). Однако иногда «постоянные» ВД (в т. ч. горизонтальные) могут быть эффективны и на этапах эксплуатации зданий/сооружений.

В вентиляционных дренажах [15] интенсификация их работы может достигаться принудительным притоком воздуха, т. е. работой при давлении выше атмосферного. Помимо защиты строительных сооружений они могут применяться для «подсушивания» газонов футбольных полей, травяных кортов и т. п. сооружений, в т. ч. с нагнетанием и подогрегого воздуха.

Таким образом, для ВД дренажей давление над СП вблизи мест их расположения ниже атмосферного, а для вентиляционных дренажей –

может быть выше при работе их с нагнетанием воздуха. Это влияет на кинематику перемещения СП.

Если в грунте или на его поверхности есть полностью или частично воздухонепроницаемые объекты (конструкции зданий, асфальтовые покрытия и пр.), то пути фильтрации воздуха значительно усложняются, а зона распространения над СП измененного давления расширяется.

В простейшем случае КК при моделировании заменяется эквивалентным «приведенным» слоем «насыщенной» фильтрации. При отсутствии дренажей специальных типов и близком расположении СП к свободной поверхности грунта КК обеспечивает интенсификацию испарения жидкости с СП. При моделировании это можно учесть уменьшением величины инфильтрационного питания СП или заданием его отрицательным.

Для ВД и вентиляционных дренажей с принудительным нагнетанием воздуха в отношении КК может быть необходимым учитывать такие «эффекты». (1) Дополнительное (по сравнению с сухим грунтом) сопротивление фильтрации воздуха. Оно переменное по высоте в силу разной водонасыщенности грунта в КК в зависимости от расстояния до СП – для однородного грунта. (2) Интенсификация извлечения воды из грунта за счет «влагообмена» воздуха, проходящего через грунт, с КК – если влажность воздуха менее 100 % (площадь контакта «воздух-вода» в этом случае достаточно велика). (3) «Потери» жидкости с СП за счет ее «капиллярного подъема» [5]. (4) Термоградиентные эффекты перемещения жидкости [15], связанные с разницей температур воздуха и ГВ/скелета грунта, потерей теплоты при фазовых переходах «жидкость-пар». (5) Изменение температуры скелета грунта при проходе через него воздуха с иной температурой. (6) Для ВД – возможность конденсации влаги в грунте – если атмосферный воздух имеет высокую влажность и температуру, более низкую, чем скелет грунта/ГВ (при этом может выделяться «теплота конденсации»). (7) Изменения коэффициента фильтрации воздуха через грунт в зависимости от его скорости. У воздуха она выше, чем у воды, а вязкость – многократно ниже. Поэтому турбулентный режим фильтрации воздуха более вероятен.

Особенности аппроксимация граничных условий для задач фильтрации воды в грунте,

в т. ч. на дренах, были подробно рассмотрены ранее автором в ряде работ – в т. ч. в [8]. Граничные условия для фильтрации воздуха в грунте при работе ВД и вентиляционных дренажей могут быть заданы так: на внутреннем контуре дрен – величина в них вакуума или давления нагнетания; на поверхности (контуре) свободного грунта – условие 1-го рода (атмосферное давление); при сплошном покрытии грунта (например асфальтом) – условие непроницаемости (частный случай условия 2-го рода); при «не сплошном покрытии» (например, асфальте с трещинами) – условие 3-го рода. При моделировании трехмерных задач для горизонтальных или наклонных дрен ВД и вентиляционного дренажа нужно учитывать распределение давлений по их длине.

Таким образом, модель, в общем случае может включать учет движения: жидкости в насыщенной зоне (ограниченной СП) и ненасыщенной зоне (КК, которая может доходить, а может и не доходить по поверхности грунта); воздуха, проходящего через ненасыщенную зону и над ней. Такая модель – достаточно сложна, а существующие программные средства имитационного моделирования ГФП не рассчитаны на такие задачи.

#### **Формализация задачи и алгоритмы ее моделирования**

Поскольку статья преимущественно методологическая и в ней рассматриваются ГВ (ненапорные пласты) примем такие упрощения: несжимаемость жидкости и скелета грунта; соблюдение для процессов фильтрации воды закона Дарси [19]; жидкость, инфильтрирующаяся с поверхности или из заглубленных водонесущих коммуникаций поступает непосредственно на СП ГВ. Будем учитывать такие факторы: наличие КК над СП; нелинейный характер интенсивности испарения со СП от глубины ее расположения; возможную фильтрационную анизотропию грунта; переменную по пространству и времени величину инфильтрационного питания СП; возможность изменения во времени давления в дренах; различия между коэффициентом недостатка насыщения грунта (при подъеме СП) и коэффициента водоотдачи (при ее опускании) – они входят в кинематическое условие (КУ) для СП, подробно рассмотренное в [8,9,11]. Также отметим, что в КУ может учитываться и «подсос» воды в КК (как альтернатива его учету через корректировку

инфильтрационного питания на СП).

Основная часть алгоритма моделирования

ГФП с учетом описанных выше процессов может быть представлена следующим образом.

Цикл в отношении шагов по модельному времени (ЦШМД).

Для текущего момента модельного времени (МВ):

- (1) расчет распределения давлений воздуха в зоне грунта над СП;
- (2) расчет за шаг по МВ (ШпМВ) вертикального перемещения жидкости в КК, связанного с капиллярным и термоградиентным эффектами;
- (3) определение полей температур и влажностей для воздуха в грунте при текущем МВ;
- (4) расчет «осушения» КК и грунта проходящим воздухом - с учетом его температуры и влажности;
- (5) определение градиентов давлений воздуха над СП, которые входят в КУ для свободной поверхности;
- (6) определение распределения напоров в зоне насыщенной фильтрации ГВ (ниже СП);
- (7) определение водопритоков в дрена;
- (8) определение поступления воздуха в дрена для ВД (или расхода воздуха из дрена для вентиляционного дренажа с принудительным нагнетанием);
- (9) вычисление «мгновенных» скоростей перемещения СП, соответствующих КУ для СП;
- (10) «смещение» СП ГВ в новое положение, соответствующее концу ШпМВ на основе конечно-разностных дискретизаций для КУ в отдельных точках СП;
- (11) наращивание модельного времени на величину ШпМВ.

Конец ЦШМД

Схема основной части алгоритма моделирования

Расчет распределения напоров в зоне насыщенной фильтрации оказалось необходимым проводить с использованием прямых методов для «ленточных матриц» [11, 18, 20]. Причина – использованные автором варианты экономичных по объемам памяти итерационных методов [10, 18, 21] не обеспечивали достаточную точность вычисления градиентов напоров (ГН) вблизи СП – даже в случае использования специальных приемов (одним из них было получение начальных приближений для распределения напоров на очередном ШпМВ путем «экстраполяции» по полям напоров на предыдущих ШпМВ). В свою очередь неточности в вычислениях ГН приводили к «кумуляции» ошибок в отношении определения смещений СП по мере увеличения МВ. Возможно, что применение для решения больших разреженных систем линейных уравнений новых видов компьютерного оборудования и методов вычислений (включая «параллельные вычисления») [2, 6, 12, 13, 14] могло бы изменить такую ситуацию.

Для представленного выше алгоритма (см. рисунок) кажется естественным использовать явную двухслойную разностную схему перехода (ЯДРСП) по МВ, в т.ч. и в отношении смещений СП. При этом величина ШпМВ должна ограничиваться с учетом максимальных (для расчетной области) скоростей движения: воздуха выше СП; перемещения жидкости в КК, обуславливаемого капиллярным и термоградиентным эффектами [15]; воды в насыщенной зоне. Априорно автор статьи считал, что поскольку скорости фильтрации воды малы, то и ШпМВ они ограничивать не должны. Однако проведение имитационного моделирования рассмотренных выше задач в упрощенных постановках (без учета КК в явной форме и ее влияния на движение воздуха) показало, что при использовании ЯДРСП возникают «пилообразные осцилляции» формы СП, которые носят чисто «вычислительный» характер и никак не соответствуют характеру задачи. Причина – набор значений для скоростей перемещений

в отдельных точках СП это «ансамбль», для которого в процессе выполнения ШпМВ нужно учитывать влияние изменения скоростей в одних таких точках на другие. Это вынудило нас перейти к использованию методов для систем жестких дифференциальных уравнений [2,17] – с их некоторой адаптацией.

Опишем такой метод для смешанной [11] профильной (плоско-вертикальной) модельной постановки задачи со СП. Для нее в рамках МКР вся расчетная область представляется в виде трех «подобластей»: для «центральной» части (подобласти) используется гидродинамическая постановка, двумерная расчетная сетки и КУ для СП; для «боковых» подобластей (левой и правой) – гидравлическая постановка, одномерные сетки, нелинейное уравнение Буссинеска для определения кинематики СП. Такой прием позволяет резко уменьшить общее количество расчетных узлов при определении распределения напоров, т. к. для «боковых» подобластей (расположенных далеко от дрен, зоны формирования купола ГВ или его растекания) гидродинамическими эффектами фильтрации для однородных однослойных пластов можно пренебречь. На границах боковых областей могут быть заданы различные условия, в т. ч. и 1-го рода. «Сращивание» решений на границах подобластей был рассмотрен автором ранее [11].

Таким образом, для текущего момента времени мы имеем набор «мгновенных» скоростей перемещений СП для всех трех подобластей в виде совокупности  $\{(\partial H / \partial \tau)_m\}_{m=1 \dots M}$ , где  $\{H_m\}_{m=1 \dots M}$  – безразмерные положения СП (они получаются нормировкой размерных положений на характерный «масштаб» задачи  $H_N$ ); а  $\tau$  – безразмерное МВ.

$$\tau = K'_z t / (\mu' H_N) \quad (1)$$

где  $K'_z$  – характерный для «центральной области» коэффициент фильтрации по z-оси;  $t$  – модельное время;  $\mu'$  – характерный для расчетной области коэффициент недостатка насыщения грунта (водоотдачи). Для однослойных однородных пластов как  $K'_z, \mu'$  берутся эти параметры для них.

При реализации «комплексных неявных схем» (КНС) перехода по МВ используется **матрица Якоби**, для положений СП в начале ШпМВ

$$[J] = [\partial(\partial H / \partial \tau) / \partial H] \quad (2)$$

Размерность матрицы  $[J]$  есть « $K \times K$ ». Величина  $K$  соответствует сумме количеств вертикалей сетки в центральной и дополнительных подобластях с перемещающейся СП – т. е. исключаются вертикали с  $H = \text{const}$ . Таким образом,  $K \leq M$ . Формирование  $[J]$  осуществляется по столбцам [8], при этом для численного определения коэффициентов  $[J]$  формула (2) аппроксимируется в конечных разностях в виде

$$J_{i,k} = ((\partial \tilde{H} / \partial \tau)_i - (\partial H / \partial \tau)_i) / \Delta H_k^* \quad (3)$$

где  $(\partial H / \partial \tau)_i$  соответствует положению СП в начале ШпМВ (невозмущенное/исходное положение СП), а  $(\partial \tilde{H} / \partial \tau)_i$  – введению «возмущения» (небольшого смещения) в положение СП для  $j^*$ -ой вертикали сетки – при сохранении исходного положения СП (в начале ШпМВ) для всех остальных вертикалей [8,9]. В общем случае номера индексов « $k$ » и « $j^*$ » не совпадают, т. к. для « $j^*$ » применяется сквозная нумерация [8] – включая вертикали сетки с фиксированным положением СП.

По смыслу формулы (3) возмущение должно вводиться в положение СП. Однако это неудобно для области с гидродинамическим решением, т. к. придется пересчитывать «сеточные коэффициенты» при расчете распределения напоров для «возмущенного» положения и с этой целью каждый раз заново осуществлять «разложение» соответствующей матрицы системы линейных уравнений. Поэтому, считая возмущение небольшим, будем осуществлять «снос» величины напора с «возмущенного положения» СП на «невозмущенное» ( $H_k$ )

$$\tilde{h}_k = \tilde{H}_k = H_k + \Delta H_k^* \quad (4)$$

при фактически расчете распределения напоров в центральной подобласти (т. е. возмущение вводится не по положению СП, а по величине напора на СП). Возмущение  $\Delta H_k^*$  выбирается пропорционально  $\partial H / \partial \tau_k$  (порядка  $0.05 * (\partial H / \partial \tau_k) * \Delta \tau$ ), но не менее задаваемого предельного значения – в виде доли от максимального ожидаемого смещения СП за шаг по времени для всех вертикалей сетки, вычисленного по ЯДРС. Это исключает «вычислительные ошибки» обработки разностей весьма близких чисел.

При расчетах  $\{\partial H / \partial \tau\}$  в КУ для СП фильтрационные параметры берутся по возмущенно-

му положению СП, а не исходному. Это, в сочетании со «сносом» напоров, позволяет с одной стороны удобно учесть наличие фильтрационных неоднородностей грунта, а с другой – «заморозить» положение «дополнительных» узлов на СП в центральной подобласти [10].

Для вычисления элементов  $k$ -ого столбца  $[J]$  возмущение  $\Delta H_k^*$  вводится в величину напора на СП на соответствующей  $j^*$  – ой вертикали сетки в центральной или дополнительной подобласти. Затем определяется полный набор  $\{\partial \hat{H} / \partial \tau\}$ , а по ним по (3) заполняются значения  $J_{i,k}$  для очередного «к»-ого столбца. Для положений СП близких к стационарным такой метод получения  $[J]$  иногда может приводить к осцилляции решений для рассматриваемых ниже КНС. Поэтому полезна «симметричная схема» введения возмущений для определения очередного столбца матрицы Якоби: (а) вычисляется набор  $J_{i,k}$  соответствующий возмущению со знаком «+»; (б) берется возмущение « $-\Delta H_k^*$ » и процедура вычисления «к»-ого столбца  $[J]$  повторяется; (в) итоговые значения в столбце матрицы  $[J]$  берутся как средние арифметические величин, полученных при введении «+» и «-» возмущений. При этом амплитуда осцилляций СП резко уменьшается. Описанные выше алгоритмы для двумерных задач обобщаются и на трехмерные.

Для двухслойной неявной КНС перехода по МВ по аналогии с (3) можно записать в конечно-разностной форме

$$\{(\partial \hat{H} / \partial \tau) - (\partial H / \partial \tau)\} / \{\Delta H\} = [J] \quad (5)$$

где  $\{\Delta H\}$  – смещение СП за ШпМВ ( $\Delta \tau$ );  $(\partial \hat{H} / \partial \tau); (\partial H / \partial \tau)$  – соответствуют  $(\tau + \Delta \tau)$  и  $(\tau)$ . Формула (5) – общая для центральной и дополнительной (ых) областей. Естественно считать, что

$$\{\Delta H\} = \{(\partial \hat{H} / \partial \tau) + (\partial H / \partial \tau)\}(\Delta \tau / 2) \quad (6)$$

Подставляя (6) в (5) имеем

$$\{\partial \hat{H} / \partial \tau\} - \{\partial H / \partial \tau\} = [J] \{\partial \hat{H} / \partial \tau + \partial H / \partial \tau\}(\Delta \tau / 2) \quad (7)$$

Итоговая формула для определения  $\partial \hat{H} / \partial \tau$  имеет вид

$$\{\partial \hat{H} / \partial \tau\} = [I - (\Delta \tau / 2)[J]]^{-1} [I + (\Delta \tau / 2)[J]] * \{\partial H / \partial \tau\} \quad (8)$$

где  $[I]$  – единичная матрица. Положение СП на верхнем временном слое

$$\{\hat{H}\} = \{H\} + \{\Delta H\} \quad (9)$$

где  $\Delta H$  вычисляется по (6). Эта схема – метод 2-ого порядка.

Внешне похожая на нее схема приводится в [16]

$$\{\hat{H}\} = [I - (\Delta \tau / 2)[J]]^{-1} [I + (\Delta \tau / 2)[J]] \{H\}, \quad (10)$$

но смысл ее несколько иной. Метод 2-ого порядка точности из [17] «с одним вычислением правой части» описывается как

$$\{\hat{H}\} = \{\bar{H}\} + \sum_{i=1}^2 P_i \{K_i\};$$

$$\{K_1\} = [[I] - [J]a\Delta\tau]^{-1} \Delta\tau \{\partial H / \partial \tau\}$$

$$\{K_2\} = [[I] - [J]a\Delta\tau]^{-1} \{K_1\}; \quad p_1 = a; \quad p_2 = 1 - a;$$

$$a = 1 - 0.5\sqrt{2} \quad (11)$$

Апробация на вычислительных экспериментах схем 3-го и 4-го порядка точности из [17], а также 4-го порядка из [3] показало, что они не дают существенных преимуществ по увеличению ШпМВ (вероятно потому, что матрица Якоби вычисляется приближенно – со «сносом» напоров).

Итак, **выводы**. 1. Исследование процессов совместной фильтрации воды и воздуха в грунте при работе дренажей специальных типов требует учета различных факторов и их взаимосвязей. 2. Обеспечение необходимой функциональности при моделировании таких процессов требует использования специальных алгоритмов и программных средств. 3. Для исключения «вычислительных осцилляций» формы СП при переходах по МВ целесообразно использование описанных КНС на основе матрицы Якоби.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев В.С., Аронштам М.Г., Астрова Н.В., Муфтахов А.Ж. Подтопление территорий грунтовыми водами при строительстве и их инженерная защита //Итоги науки и техники «Гидрогеология.Инженерная геология». Том 8. - М.:ВИНИТИ, 1982 - 112с
2. Андреев А.Н. Егунов В.А., Насонов А.А., Новокищев А.А. Применение векторных инструкций в алгоритмах блочных операций линейной алгебры //Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т.21. №12(139). С.5-11
3. Артемьев С.С., Демидов Г.В. Алгоритм переменного порядка и шага для численного решения жестких систем обыкновенных дифференциальных уравнений / Препринт /ВЦ СО АН СССР,Н.45-Новосибирск,1978- 20с.
4. Бандурин И.Г. Программа для автоматического решения жестких нелинейных задач //Известия Волгоградского государственного технического университета. (Сер. «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). - ВолГТУ.-Волгоград: ИКНЛ ВолГТУ, 2009.-с.5-8.
5. Берславский Э.Н., Захаренкова Н.В. Влияние капиллярности грунта и испарения со свободной поверхно-

сти грунтовых вод на фильтрацию из каналов // Инженерно-физический журнал. 2010. Т. 83. № 3. С. 470-477.

6. Богачев К.Ю., Жабицкий Я.В., Климовский А.А., Миргасимов А.Р., Семенко А.Е. Сравнение итерационных методов решения разреженных систем линейных уравнений в задачах фильтрации с распределенной памятью // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2011. Т. 12. № 1. С. 74-76.

7. Боголюбов К.С., Краковский Б.С. Вакуумное водопонижение. М.:ВНИИ ВОДГЕО.-2003г.-202с.

8. Брумитейн Ю.М. Особенности решения геофильтрационных задач со свободной поверхностью при наличии дренажей различных типов. Часть 3. Общая схема решения задач и алгоритмы прослеживания перемещения свободной поверхности во времени - Астрахань, 2001.-43с. Рукопись деп. в ВИНТИ 17.07.2001, № 1700-В2001.

9. Брумитейн Ю.М. Анализ возможных моделей фильтрации воды и воздуха к гравитационным и вакуумируемым дренажным системам (в рамках моделирования задач на ЭЦВМ). Астраханский социальный институт - Астраханский филиал Московского открытого социально-го университета - Астрахань, 2003.-96с.: ил.- Библиогр.: 100 назв. - Рус.-Деп. в ВИНТИ

10. Брумитейн Ю.М. Анализ эффективности методов определения распределений напоров в области насыщенной геофильтрации для задач со свободной поверхностью // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., г.Новочеркасск, 23 янв. 2004г.: В 4ч./ Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ).Новочеркасск:ЮРГТУ,2004. Ч.1. с.46-50

11. Брумитейн Ю.М. Устойчивые вычислительные алгоритмы для нестационарных геофильтрационных задач со свободной поверхностью в смешанных гидродинамическо-гидравлических постановках // Методы и алгоритмы прикладной математики в технике, медицине и экономике: Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., г.Новочеркасск, 23 янв. 2004г.: В 4ч. / Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). Новочеркасск: ЮРГТУ,2004. Ч.1. с. 50-52

12. Газизов И.И., Юлдашев А.В. Решение разреженных СЛАУ с использованием графических процессоров в задаче моделирования фильтрационных течений углеводородов в пористой среде. / В сборнике «Параллельные вычислительные технологии 2013» (ПаВТ'2013) - Труды международной научной конференции. 2013. С. 589.

13. Газизов И.И., Юлдашев А.В. Разработка параллельного линейного решателя для задачи гидродинамического моделирования нефтегазовых месторождений // Эвристические алгоритмы и распределенные вычисления. 2014. Т. 1. - № 1. - С. 88-96.

14. Краснопольский Б.И. Об особенностях решения больших систем линейных алгебраических уравнений на многопроцессорных вычислительных системах различной архитектуры // Вычислительные методы и программирование: новые вычислительные технологии. 2011. Т. 12. № 1. С. 176-182.

15. Куранов Н.П., Шевчик А.П. О схемах миграции влаги в неизолированных условиях при вентиляционном дренажном слабопроницаемых грунтов.-В сб.: Фильтрационные расчеты водозаборных и дренажных систем. Труды института «ВОДГЕО», 1981 - с.34-41

16. Молчанов И.Н. Машинные методы решения прикладных задач. Дифференциальные уравнения - Киев: Наукова Думка,1988 -344с

17. Новиков Е.А., Шитов Ю.А. Исследование (m,k) методов решения жестких систем с одним и двумя вычислениями правой части /Препринт/ВЦ СО АН СССР, №15-Красноярск,1987.-41с

18. Писсанецки С. Технология разреженных матриц. - М.:Мир, 1988 - 410с

19. Полубаринова-Кочина П.Я. Теория движения грунтовых вод - М.:Наука,1977 -664с

20. Уилкинсон, Райни. Справочник алгоритмов на языке АЛГОЛ - М.:Машиностроение,1976 - 389 с.

21. Zienkiewicz O.C., Lohner R. Accelerated «relaxation» or direct solution? Future prospects for FEM // Int. Journal for numerical methods in engineering.-1985 -V.21,N.1 - pp.1-13

УДК 629.369

*В. В. Чернышев, В. В. Арыканцев*

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ШТАМПОВОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ПОДВОДНЫМ ГРУНТОМ\*

Волгоградский государственный технический университет

dtm@vstu.ru

Обсуждаются результаты моделирования динамики электромагнитной штамповой установки, предназначенной для исследования компрессионного эффекта на подводных грунтах. Компрессионный эффект имеет место при шагающем способе передвижения на водонасыщенных грунтах. Предложена методика оценки компрессионной силы. Полученные результаты могут быть востребованы при внедрении новых промышленных технологий освоения ресурсов морского дна.

**Ключевые слова:** аппараты передвигающиеся по дну, шагающий движитель, взаимодействие с грунтом, компрессионный эффект, динамическое моделирование.

*V. V. Chernyshev, V. V. Arykantsev*

## MODELING THE DYNAMICS OF THE STAMP INSTALLATION IN CONTACT WITH UNDERWATER SOIL

Volgograd State Technical University

The results of simulation of the dynamics of electromagnetic stamping installation, which is designed to study the compressive effect on the underwater soils, are discussed. The compression effect occurs when walking on water-saturated soils. The method of estimating the forces arising when the compression effect was proposed. The results obtained can be called for the introduction of new industrial technologies for the development of seabed resources.

**Keywords:** vehicles moving across the bottom, walking propulsion, interaction with the soil, compression effect, dynamic modeling.

\*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 13-08-01144-а, № 14-08-10006-к).

Важная роль среди машин для освоения ресурсов морского дна отводится донным агрегатам, несущим на себе добычное или геолого-разведочное оборудование. Для передвижения по дну используются гусеничные и колесные машины. Однако условия эксплуатации, характеризующиеся низкой несущей способностью грунтов и сложным рельефом поверхности дна, делают малопригодными традиционные типы движителей. Для подводных условий более подходят шагающие движители, отличающиеся исключительно высокой грунтовой и профильной проходимостью [1–4].

В подводных условиях имеются специфические особенности взаимодействия шагающего движителя с грунтом [5–6]. В частности, на слабонесущих грунтах имеет место компрессионный эффект. Компрессионный эффект у шагающих машин возникает на водонасыщенных грунтах – при смене ног (при переступании), из-за разрежения под стопой находящейся в опорной фазе, возникает сила препятствующая отрыву стопы от грунта. На грунтах с низкими гидрофильными свойствами эта сила может достигать значительной величины. Предполагается, что с увеличением глубины компрессионная сила будет возрастать из-за роста давления внешней среды. Это предположение имеет косвенное подтверждение – достоверно известны случаи, когда на больших глубинах подводные аппараты, в частности аппараты «Мир», с трудом отрывались от донного грунта.



Рис. 1. Штамповая установка для исследования компрессионного эффекта на подводных грунтах:  
1 – рама; 2 – электромагнит; 3 – кабель-трос; 4 – подводная видеокамера; 5 – страховочный линь

Для исследования влияния глубины погружения на компрессионный эффект в Волго-

градском государственном техническом университете были проведены подводные штамповые испытания. Эксперименты проводились на глубинах до 100 м на грунтах с различными гидрофильными свойствами. Методика штамповых испытаний подводного грунта заключалась в погружении на дно на кабель-тросе специальной штамповой установки с электромагнитным приводом (рис. 1), разработанной исполнителями проекта. Непосредственное измерение компрессионной силы (например, динамометром) затруднено из-за упругости троса, что не позволяет обеспечить «быстрых» движений штампа (компрессионная сила существенно зависит от скорости). При «малой» силе отрыв стопы от грунта происходит только после фильтрации воды в зону разрежения под стопой.

Конструктивно штамповая установка выполнена в виде установленного на круглой раме мощного электромагнита (при испытаниях использовались длинноходовые электромагниты серии ЭМД 4-х типов) с подпружиненным якорем. Якорь присоединен к нажимному диску и снабжен штоком, к которому жестко крепится сменная стопа (использовались стопы различных типоразмеров). Упругий элемент прижимает нажимной диск к нижней крышке электромагнита, которая также является направляющей для штока. Рабочая полость электромагнита отделена от внешней среды эластичной мембраной. При испытаниях на раме, для оценки характера поверхности дна, также устанавливалась подводная видеокамера с инфракрасной подсветкой, работающая в автоматическом режиме.

При проведении экспериментов использовался следующий подход. Шагающая установка опускалась с борта судна на дно на кабель-тросе. После установки штампа на донном грунте на обмотку возбуждения электромагнита подавалось переменное напряжение (для постоянного тока требуется кабель существенно большего сечения и веса). Через некоторое время стопа отрывалась от грунта. Варьируя напряжение питающей сети и типоразмер электромагнита можно менять в широких пределах величину электромагнитной силы и, соответственно, время отрыва стопы от грунта.

Во время экспериментов непрерывно фиксировалось изменение тока в цепи электромагнита. В результате для каждого погружения штампа получены временные характеристики тока в обмотке электромагнита (рис. 2).



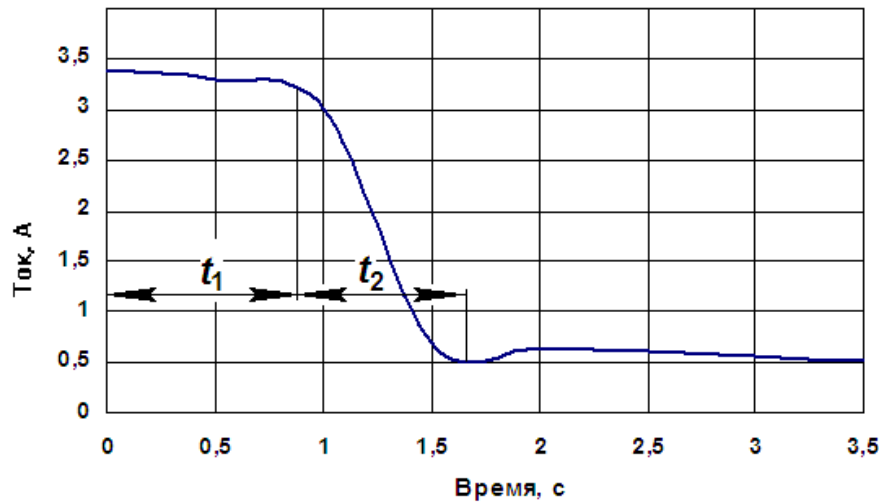


Рис. 2. Пример изменения тока в цепи электромагнита штамповой установки при проведении экспериментов

В работе, с целью разработки методики определения величины компрессионной силы по временным характеристикам тока электромагнита в цепи электромагнита, рассматривается динамика якоря электромагнитной штамповой установки в момент отрыва стопы от грунта. Расчетная схема установки представлена на рис. 3.

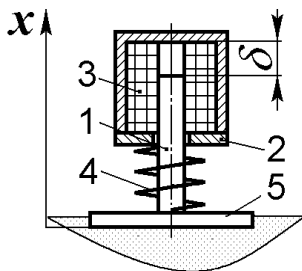


Рис. 3. Расчетная схема установки штамповой установки:  
1 – якорь электромагнита; 2 – магнитопровод; 3 – обмотка возбуждения электромагнита; 4 – упругий элемент; 5 – стопа

У рассматриваемой электромеханической системы влиянием гистерезиса и рассеяния магнитных потоков на механические колебания и токи можно пренебречь. Тогда, в случае питания от сети переменного тока и ненасыщенного магнитопровода уравнения Лагранжа-Максвелла [7] для рассматриваемой системы примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial W}{\partial i} \right) + \frac{\partial \Psi}{\partial i} &= U_a \cos pt, \\ \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial (T + W)}{\partial x} + \frac{\partial \Pi}{\partial x} &= Q_x, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $i$  – ток в цепи обмотки возбуждения;  $x$  – перемещение якоря отсчитываемое от статического его положения;  $U_a$  и  $p$  – амплитуда напряжения

и частота питающей сети;  $W = Li^2/2$  – энергия магнитного поля системы, где  $L = L(x)$  – индуктивность магнитопровода, являющаяся функцией положения якоря;  $\Psi = ri^2/2$  – электрическая диссипативная функция;  $r$  – активное сопротивление обмотки возбуждения;  $T = m\dot{x}^2/2$  и  $\Pi = c_x x^2/2$  – кинетическая и потенциальная энергия системы;  $c_x$  – жесткость пружины;  $m$  – масса якоря;  $Q_x$  – непотенциальная обобщенная сила, характеризующая компрессионный эффект.

Считая неупругое сопротивление линейным ( $Q_x = -\mu\dot{x}$ , где  $\mu$  – коэффициент сопротивления), приводим систему уравнений (1) к виду:

$$\begin{aligned} \frac{d(Li)}{dt} + ri &= U_a \cos pt, \\ \ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2x &= \frac{F(x,t)}{m}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n = \mu/2m$  – коэффициент демпфирования;  $k$  – собственная частота системы;  $F(x,t) = \frac{1}{2}i^2 dL/dx$  – вынуждающая электромагнитная сила.

При питании электромагнита переменным током его активное сопротивление мало по сравнению с индуктивным. Тогда из первого уравнения системы (2) находим закон изменения тока

$$i = (U_a / pL) \sin pt \quad (3)$$

Во время отрыва стопы от грунта происходит небольшое перемещение якоря. После отрыва стопы от грунта компрессионная сила пропадает и якорь практически мгновенно притягивается к сердечнику статора и замыкает

магнитопровод. В результате индуктивность системы резко увеличивается, а ток в соответствии с (3) падает. Поэтому по току можно судить о времени отрыва стопы от грунта. Так, например, в случае представленном на рис. 2, время отрыва стопы от грунта составляет около 1 секунды.

Из второго уравнения системы (2), с учетом (3), получаем дифференциальное уравнение движения якоря

$$\ddot{x} + 2n\dot{x} + k^2x = \frac{F(x)}{m} \sin^2 pt, \quad (4)$$

где 
$$F(x) = \frac{U_a^2}{2p^2 L^2} \frac{dL}{dx}. \quad (5)$$

Для удобства анализа позиционные силовые характеристики можно представить в виде

$$F(x) = F_a f(x), \quad (6)$$

где  $F_a$  – амплитуда электромагнитной силы, зависящая от амплитуды силы тока и параметров магнитопровода;  $f(x) = g(x)/g_{\max}$  – функция перемещения якоря, нормированная из условия  $\max f(x) = 1$ , отражающая только позиционную зависимость электромагнитной силы;  $g(x) = \frac{1}{L^2} \frac{dL}{dx}$ ;

$g_{\max}$  – максимальное значение функции  $g(x)$ .

Позиционные характеристики  $f(x)$  для электромагнитов определялись экспериментально. Для этого обмотки возбуждения электромагнита запитывались постоянным током и при фиксированных равноотстоящих положениях якоря измерялась электромагнитная сила. В результате для различных величин постоянного тока  $I$  было получено семейство кривых  $F^*(x) = \frac{1}{2} I^2 (dL/dx)$ . Тогда  $f(x) = g^*(x)/g_{\max}$ , где

$$g^*(x) = F^*(x) / \left( \int_{x_0}^x F^*(x) dx \right)^2, \quad g_{\max}^* - \text{максимальное}$$

значение функции  $g^*(x)$ .

Нелинейная позиционная зависимость вынуждающей силы обуславливает отличие динамики рассматриваемой колебательной системы от линейных систем с чисто гармоническим силовым возбуждением [8]. При обработке результатов экспериментов уравнения движения (4) решалось численно. Определялся закон движения якоря  $x(t)$  и закон изменения вынуждающей силы  $F(t)$ . Было выяснено, что для движения якоря характерно 2 этапа: «медленное» движение в течение времени  $t_1$  (рис. 2) вплоть до отрыва стопы от грунта и «быстрый» выбор за  $t_2$  оставшегося воздушного зазора электромагнита. Усредненные значения вынуждающей

силы на первом временном этапе, учитывая, что при малых деформациях сила упругости пренебрежительно мала, позволяют оценить величину компрессионной силы. Так например, для эксперимента представленного на рис. 2 максимальная компрессионная сила составила около 60 Н при средней скорости отрыва стопы от грунта  $v_{\text{ср}} = \delta/(t_1 + t_2) = 0,012$  м/с. Варьируя напряжение питающей сети можно менять время отрыва стопы от грунта, что позволяет по данным нескольких опытов получить зависимость компрессионной силы от скорости стопы и условий данного эксперимента (глубины погружения, площади и физического состояния опорной поверхности и др.).

По результатам моделирования динамики штамповой установки была разработана методика обработки экспериментальных данных штамповых испытаний. Математическое описание процессов, происходящих при отрыве стопы от вязкого грунта, позволяет оценить величину компрессионной силы на подводных грунтах при шагающем способе передвижения. Полученные результаты могут быть востребованы при разработке шагающих машин для новых технологий освоения ресурсов морского дна.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брискин, Е.С. Сравнительный анализ колесных, гусеничных и шагающих машин / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Малолегов А.В., Шаронов Н.Г. // Робототехника и техническая кибернетика. – 2013. – № 1. – С. 6-14.
2. Чернышев, В.В. Полевые исследования шагающих машин / Чернышев В.В. // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2004. №4. – С.20-22.
3. Chernyshev, V.V. Traction properties of walking machines on underwater soils with a low bearing ability / Chernyshev V.V., Gavrilov A.E. // Minerals of the Ocean – 7 & Deep-Sea Minerals and Mining – 4: abstracts of International Conference / VNIIOkeangeologia. – St. Petersburg, 2014. – С. 21-24.
4. On ground and profile practicability of multi-legged walking machines / Briskin E.S., Chernyshev V.V., Maloletov A.V and others // Climbing and Walking Robots. CLAWAR 2001: Proc. of the 4-th Int. Conf. – London, 2001. – С. 1005-1012.
5. Чернышев, В.В. Моделирование динамики взаимодействия движителя подводного шагающего аппарата с грунтом с низкой несущей способностью / Чернышев В.В., Шурьгин В.А. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 19 : межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – № 24 (127). – С. 82-86.
6. Брискин, Е.С. Моделирование динамики смены стоп шагающих машин / Е.С. Брискин, В.В. Чернышев // Искусственный интеллект. 2009. – № 3. – С. 293-299.
7. Вибрации в технике: Справочник. Т.2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана. М.: Машиностроение, 1979. 351 с.
8. Гудушаури, Э.Г. Резонансные режимы электромагнитных вибровозбудителей с сильно нелинейной позиционной зависимостью вынуждающей силы / Э.Г. Гудушаури, В.В. Чернышев // Машиноведение. – 1989. – №4. – С. 113-116.

УДК 539.193/.194;535/.33.34

*М. Д. Элькин, И. Т. Шагаутдинова, А. М. Лихтер, О. Н. Гречухина***МОДЕЛИРОВАНИЕ АДИАБАТИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ БИОМОЛЕКУЛ.  
КВЕРЦЕТИН (3', 4', 3, 5, 7- ПЕНТАГИДРОКСИФЛАВОН)****Астраханский государственный университет**

shagautdinova@list.ru

В рамках метода функционала плотности DFT/b3LYP осуществлены модельные квантовые расчеты геометрической структуры и спектра фундаментальных колебаний кверцетина. Выявлены признаки спектральной идентификации соединения.

*Ключевые слова:* флавоноиды, кверцетин, колебательные спектры, спектральная идентификация.

*M. D. Elkin, I. T. Shagautdinova, A. M. Lihter, O. N. Grechuhina***MODELLING OF ADIABATIC POTENTIAL FOR BIOMOLECULARS.  
QUERCETIN (3', 4', 3, 5, 7-PENTAHYDROXYFLAVON)****Astrakhan State University**

An analysis of vibrational spectra and geometric structure for flavones is carried out by the method DFT/B3LYP. The indications of spectral identification are revealed.

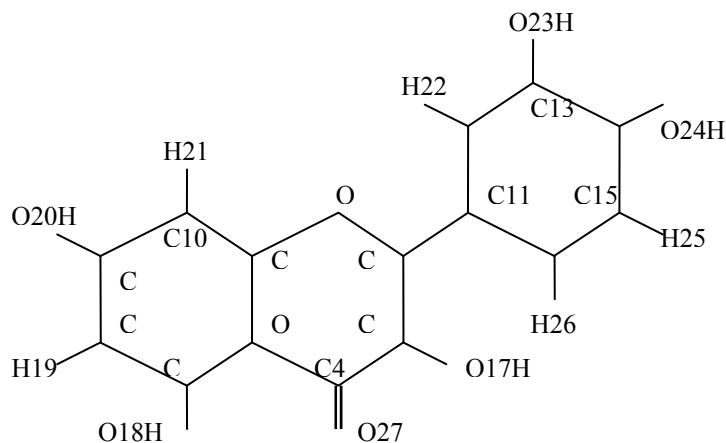
*Keywords:* flavonoids, quercetin, vibrational spectra, spectral identification.

**Введение**

Кверцетин (см. рисунок) принадлежит к классу полифенольных соединений растительного происхождения – флавоноидам. В научном мире интерес к флавоноидам (~ 8000 веществ) связан с изучением их влияния на сигнальные и регуляторные системы клеток, выяснения механизма их биохимического и биофизического действия [1].

Принято считать, что основные указанные физико-химические свойства молекулярных соединений определяются формой их адиабати-

ческого потенциала (строением электронной оболочки). В сложных молекулярных объектах, допускающих возможность существования различных таутомерных форм и конформационных особенностей, теоретический анализ формы адиабатического потенциала осуществляется в рамках квантовых расчетов их геометрической и электронной структуры [2]. Достоверность таких расчетов обосновывают, в первую очередь, возможностью интерпретировать реальный эксперимент по колебательным спектрам исследуемого соединения.



Молекулярная диаграмма кверцетина

Для кверцетина такими данными из периодической научной литературы мы не располагаем, поэтому воспользуемся тем фактом, что кверцетин отличается от лютеолина (3', 4', 5, 7-тетрагидроксифлавонола) замещением атома во-

дорода в положении 3 на гидроксильную группу OH. Для лютеолина, как и для 3', 4'- и 5, 7-дигидроксифлавонов, в периодической литературе приведены спектрограммы по спектрам КР в диапазоне 1800–200 см<sup>-1</sup> [3–5]. Эти данные,

наряду с данными по валентным ( $\nu_{\text{ОН}}$ ) и крутильным ( $\chi_{\text{ОН}}$ ) колебаниям гидроксильных фрагментов в дигидроксибензолах [6,7] послужили обоснованием достоверности структурно-динамических моделей лютеолина, кризина (5,7-) и 3', 4'- дигидроксифлавонов, предложенных нами в статьях [8–10]. При этом подтвердилось предположение об условном делении набора фундаментальных колебаний соединений на две группы. Первый набор относится к бензольному фрагменту, вторая группа связана с колебаниями сопряженных циклов. Делокализация формы нормальных колебаний между указанными фрагментами проявляется для валентных углов  $\beta_{\text{ССН}}$  и  $\beta_{\text{ССО}}$ . Этот факт имеет место в базовой молекуле – флавоне, а также в моногидроксифлавонах [11,12]. При этом внутреннее относительное вращение фрагментов вокруг связи  $\text{C}_2\text{-C}_{11}$  можно трактовать как свободное. Его влиянием на положение и интенсивность остальных полос можно пренебречь. Кроме того, проявилась и такая закономерность, как локальное влияние гидроксизамещения на силовое поле циклических фрагментов.

Сказанное выше дает основание при рассмотрении кверцетина воспользоваться распространенным в системном анализе теории колебательных спектров сложных молекулярных объектов приемом [13,14]. Будем сопоставлять результаты моделирования структуры и спек-

тров ряда тех гидроксизамещенных флавонов, которые соответствуют по признаку таутометрии кверцетину. Для конформеров каждого из гидроксифрагментов приняты следующие их обозначения. К конформерам типа А относятся те, для которых направление вектора ОН соответствует обходу атомов шестичленных фрагментов против часовой стрелки.

#### Результаты модельных расчетов и их обсуждение

В табл. 1–3 интерпретированы валентные и крутильные колебания ОН фрагментов в 3', 4'- и 5,7- дигидроксизамещенных и 5, 7, 3', 4' тетрагидроксифлавонов флавонов.

Соответствие между характеристиками указанных полос в дигидроксифлавонах и лютеолине налицо. Полная теоретическая интерпретация спектра фундаментальных колебаний соединений, позволяющая выявить дополнительные признаки спектральной идентификации конформеров, предложена в публикациях [8–10]. Параположение гидроксильных групп в 3', 4'-дигидроксифлавонов наглядно проявляется в разбросе частот крутильных колебаний трех возможных конформеров ( $210\text{--}450\text{ см}^{-1}$ ). Относительное метаположение ОН – фрагментов в 5, 7-дигидроксифлавонов, где реализуются четыре конформера, приводит к характеристичности валентных и крутильных колебаний фрагмента 7-ОН.

Таблица 1

#### Интерпретация валентных и крутильных колебаний гидроксильных фрагментов в конформерах 3', 4' дигидроксифлавонов

| Т-р | $\nu_{\text{эксп}}$ [9] | 3'a;4'a            |     |     | 3'a;4'b            |     |     | 3'b;4'b            |     |     |
|-----|-------------------------|--------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|
|     |                         | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  |
| 3'  | 3655                    | 3711               | 71  | 95  | 3694               | 120 | 252 | 3709               | 128 | 262 |
| 4'  | 3610                    | 3648               | 153 | 199 | 3696               | 44  | 120 | 3659               | 120 | 98  |
| 3'  | 310                     | 212                | 122 | 4   | 312                | 69  | 2   | 414                | 65  | 1   |
| 4'  | -                       | 458                | 50  | 3   | 360                | 106 | 3   | 251                | 132 | 1   |

Примечание. Частоты колебаний в  $\text{см}^{-1}$ , интенсивности в ИКС в  $\text{км/моль}$ , в СКР –  $\text{\AA/а.е.м.}$

Таблица 2

#### Интерпретация колебаний гидроксильных фрагментов в конформерах кризина (5, 7 дигидроксифлавонов)

| Т-р | $\nu_{\text{эксп}}$ [7,8] | 5a;7a              |     |     | 5a;7b              |     |     | 5b;7a              |     |     | 5b;7b              |     |     |
|-----|---------------------------|--------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|
|     |                           | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  |
| 5   | -                         | 3121               | 393 | 155 | 3147               | 409 | 130 | 3682               | 59  | 182 | 3679               | 68  | 186 |
| 7   | 3656                      | 3692               | 100 | 194 | 3695               | 73  | 132 | 3696               | 92  | 188 | 3694               | 71  | 125 |
| 5   | 842                       | 865                | 103 | 1   | 857                | 100 | 1   | 396                | 72  | 3   | 418                | 110 | 3   |
| 7   | 310                       | 369                | 103 | 3   | 363                | 102 | 3   | 332                | 112 | 4   | 362                | 87  | 3   |

Таблица 3

**Интерпретация валентных и крутильных колебаний гидроксильных фрагментов  
в конформерах лютеолина (5,7,3',4'-тетрагидроксифлавоны)**

| Кон-р | Т-р     | $\nu_{\text{эсп}}$<br>[13,14] | $\nu_{\text{выч}}$ | 5a;7a |     | 5a;7b |     | 5b;7a              |     |     | 5b;7b              |     |     |
|-------|---------|-------------------------------|--------------------|-------|-----|-------|-----|--------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|
|       |         |                               |                    | ИК    | КР  | ИК    | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  |
| K'    | 5       | -                             | 3122               | 434   | 148 | 437   | 165 | 3683               | 59  | 188 | 3680               | 68  | 192 |
| K'aa  | 3',7    | -                             | 3701               | 172   | 283 | 138   | 217 | 3706               | 161 | 277 | 3705               | 134 | 210 |
|       | 4'      | 3639                          | 3646               | 157   | 208 | 156   | 204 | 3648               | 148 | 186 | 3649               | 147 | 182 |
| K'ab  | 3',4',7 | -                             | 3696               | 271   | 573 | 238   | 503 | 3696               | 250 | 544 | 3698               | 224 | 472 |
| K'bb  | 3',7    | -                             | 3701               | 232   | 467 | 204   | 396 | 3704               | 214 | 440 | 3708               | 193 | 369 |
|       | 4'      | 3640                          | 3658               | 123   | 99  | 122   | 97  | 3659               | 119 | 97  | 3658               | 119 | 96  |
| K'    | 5       | 842                           | 865                | 104   | 1   | 103   | 1   | 392                | 70  | 3   | 414                | 108 | 3   |
|       | 7       | 310                           | 370                | 110   | 3   | 107   | 3   | 339                | 93  | 4   | 357                | 89  | 2   |
| K'aa  | 3'      | -                             | 211                | 130   | 1   | 137   | 3   | 209                | 142 | 1   | 198                | 131 | 3   |
|       | 4'      | 468                           | 458                | 55    | 3   | 55    | 3   | 454                | 42  | 2   | 453                | 44  | 2   |
| K'ab  | 3'      | 310                           | 319                | 68    | 2   | 66    | 2   | 316                | 46  | 2   | 312                | 45  | 2   |
|       | 4'      | 350                           | 361                | 91    | 3   | 92    | 3   | 358                | 138 | 1   | 357                | 106 | 2   |
| K'bb  | 3'      | -                             | 417                | 71    | 0   | 69    | 1   | 415                | 69  | 1   | 414                | 70  | 1   |
|       | 4'      | -                             | 239                | 99    | 1   | 78    | 0   | 229                | 100 | 0   | 230                | 86  | 0   |

Причиной смещения ( $\sim 500 \text{ см}^{-1}$ ) полос валентных и крутильных колебаний конформера 5a является внутримолекулярное взаимодействие между атомом водорода гидроксильного фрагмента и атома кислорода связи  $\text{C}_4=\text{O}$ . Механизм – сильная водородная связь ( $R_{\text{H}\cdots\text{O}} \sim 1.7 \text{ \AA}$ ). Как и в гидроксibenзолах [6,7] интенсивность полос крутильных колебаний в спектрах КР мала и не представляет интереса для задач спектральной идентификации конформеров.

Использование для этой цели энергетической щели  $\sim 50 \text{ см}^{-1}$  между частотами валентных колебаний связей ОН в 3', 4'-дигидроксифлавоне представляется затруднительным, хотя значения интенсивностей могут различаться вдвое.

Интерпретация валентных и крутильных колебаний связей ОН возможных конформеров кверцетина представлена в табл. 4. Верхняя часть таблицы соответствует конформеру 3a, нижняя – 3b.

Таблица 4

**Интерпретация валентных и крутильных колебаний гидроксильных фрагментов  
в конформерах кверцетина (3,5,7,3',4'-пентагидроксифлавоны)**

| Кон-р  | Т-р     | $\nu_{\text{выч}}$ | 5a;7a |     | 5a;7b |     | 5b;7a              |     |     | 5b;7b              |     |     |
|--------|---------|--------------------|-------|-----|-------|-----|--------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|
|        |         |                    | ИК    | КР  | ИК    | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  |
| K'     | 3a      | 3646               | 77    | 80  | 77    | 80  | 3644               | 73  | 91  | 3646               | 73  | 90  |
|        | 5       | 3140               | 413   | 141 | 408   | 128 | 3681               | 59  | 187 | 3679               | 68  | 191 |
| K'aa   | 3',7    | 3698               | 179   | 286 | 148   | 227 | 3698               | 167 | 178 | 3695               | 144 | 219 |
|        | 4'      | 3649               | 147   | 165 | 145   | 160 | 3651               | 140 | 147 | 3652               | 139 | 143 |
| K'ab   | 3',4',7 | 3693               | 269   | 534 | 238   | 467 | 3696               | 250 | 509 | 3694               | 236 | 443 |
| K'bb   | 3',7    | 3701               | 226   | 427 | 198   | 362 | 3704               | 210 | 405 | 3702               | 189 | 341 |
|        | 4'      | 3655               | 119   | 94  | 117   | 93  | 3655               | 115 | 92  | 3655               | 114 | 91  |
| K'(3a) | 5       | 855                | 84    | 1   | 80    | 1   | 410                | 68  | 3   | 421                | 125 | 2   |
|        | 7       | 371                | 105   | 3   | 96    | 3   | 338                | 113 | 4   | 360                | 89  | 3   |
| K'aa   | 3       | 426                | 36    | 9   | 32    | 8   | 430                | 31  | 4   | 431                | 44  | 5   |
|        | 3'      | 232                | 147   | 8   | 130   | 3   | 232                | 141 | 2   | 231                | 137 | 2   |
|        | 4'      | 446                | 118   | 10  | 123   | 10  | 442                | 118 | 7   | 442                | 103 | 7   |

Окончание табл. 4

| Кон-р  | Т-р     | $\nu_{\text{выч}}$ | 5a;7a |     | 5a;7b |     | 5b;7a              |     |     | 5b;7b              |     |     |
|--------|---------|--------------------|-------|-----|-------|-----|--------------------|-----|-----|--------------------|-----|-----|
|        |         |                    | ИК    | КР  | ИК    | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  | $\nu_{\text{выч}}$ | ИК  | КР  |
| K'ab   | 3       | 430                | 91    | 15  | 90    | 15  | 442                | 42  | 3   | 445                | 56  | 10  |
|        | 3'      | 338                | 89    | 1   | 113   | 1   | 362                | 48  | 2   | 318                | 21  | 0   |
|        | 4'      | 322                | 52    | 0   | 37    | 0   | 330                | 87  | 5   | 334                | 133 | 0   |
| K'bb   | 3       | 391                | 20    | 10  | 26    | 9   | 431                | 39  | 8   | 432                | 38  | 8   |
|        | 3,3'    | 428                | 147   | 18  | 149   | 17  | 423                | 35  | 1   | 423                | 39  | 1   |
|        | 4'      | 242                | 101   | 2   | 83    | 3   | 231                | 103 | 1   | 231                | 87  | 1   |
| K'     | 3b      | 3477               | 151   | 210 | 154   | 206 | 3385               | 177 | 243 | 3381               | 182 | 236 |
|        | 5       | 3259               | 351   | 118 | 347   | 116 | 3685               | 71  | 180 | 3682               | 81  | 186 |
| K'aa   | 3',7    | 3703               | 179   | 298 | 137   | 225 | 3707               | 168 | 287 | 3706               | 133 | 215 |
|        | 4'      | 3649               | 160   | 245 | 158   | 239 | 3652               | 150 | 219 | 3653               | 148 | 214 |
| K'ab   | 3',4',7 | 3695               | 278   | 624 | 238   | 554 | 3697               | 267 | 600 | 3698               | 222 | 520 |
| K'bb   | 3',7    | 3701               | 245   | 520 | 210   | 441 | 3703               | 227 | 487 | 3702               | 198 | 409 |
|        | 4'      | 3659               | 122   | 108 | 122   | 106 | 3661               | 119 | 105 | 3660               | 118 | 104 |
| K'(3b) | 3       | 595                | 98    | 3   | 92    | 3   | 672                | 60  | 3   | 676                | 63  | 3   |
|        | 5       | 797                | 85    | 2   | 105   | 2   | 380                | 77  | 2   | 409                | 66  | 2   |
|        | 7       | 370                | 106   | 3   | 96    | 3   | 339                | 97  | 3   | 368                | 60  | 3   |
| K'aa   | 3'      | 219                | 138   | 2   | 118   | 1   | 214                | 129 | 4   | 204                | 113 | 4   |
|        | 4'      | 454                | 47    | 4   | 47    | 4   | 431                | 48  | 0   | 435                | 50  | 3   |
| K'ab   | 3'      | 318                | 76    | 1   | 73    | 2   | 314                | 77  | 2   | 308                | 84  | 2   |
|        | 4'      | 358                | 112   | 3   | 137   |     | 353                | 115 | 2   | 352                | 102 | 3   |
| K'bb   | 3'      | 415                | 69    | 1   | 66    | 1   | 411                | 83  | 3   | 412                | 104 | 0   |
|        | 4'      | 234                | 111   | 1   | 92    | 1   | 222                | 102 | 0   | 222                | 83  | 0   |

Различие в положении полос валентных и крутильных колебаний указанного конформера ( $\sim 200 \text{ см}^{-1}$ ) обусловлено межмолекулярным взаимодействием между атомом кислорода связи  $\text{C}_4=\text{O}$  и атомом водорода гидроксильного фрагмента 3b конформера ( $R_{\text{O} \cdots \text{H}} \sim \text{\AA}$ ). Отметим, что в этом случае имеет место смещение полос валентных ( $\sim 100 \text{ см}^{-1}$ ) и крутильных ( $\sim 60 \text{ см}^{-1}$ ) колебаний 5a-ОН фрагмента по сравнению с лютеолином. Это связано с увеличением длины соответствующей водородной связи до величины  $\sim 1.77 \text{ \AA}$ .

Таким образом, характеристики полос, отнесенных к валентным и крутильным колебаниям гидроксильных фрагментов, позволяет использовать их в качестве исходных признаков спектральной идентификации конформеров рассмотренных флавоноидов. Имеющие место свойства характеристичности колебаний по частоте, форме и интенсивности позволяет обосновать достоверность результатов модельных расчетов структуры и колебательных спектров кверцетина.

Общим для рассмотренных флавоноидов является факт слабой интенсивности полос спектра КР, отнесенных к крутильным колебаниям гидроксифрагментов, и наличия сильных по интенсивности полос в спектрах ИК и КР в диапазоне выше  $1000 \text{ см}^{-1}$ . Полосы интерпретированы как валентные колебания связей  $\text{C}=\text{O}$  ( $\sim 1680\text{-}1630 \text{ см}^{-1}$ ), связей  $\text{C}-\text{C}$  циклических фрагментов ( $\sim 1630\text{-}1560 \text{ см}^{-1}$ ) и деформационные колебания валентных углов связей  $\text{CH}$  ( $\beta_{\text{CH}}$ ) и  $\text{OH}$  ( $\beta_{\text{OH}}$ ). Для последней группы естественных координат, как правило, имеет место делокализация формы колебаний. Этот факт не позволяет отнести соответствующие полосы к характеристическому признаку спектральной идентификации, как это сделано для валентных и крутильных колебаний связей  $\text{OH}$ . Однако интенсивность указанных полос можно использовать в качестве признаков спектральной идентификации таутомеров и конформеров флавоноидов. За подробностями отсылаем к публикациям [7–10].

### Заключение

На основании результатов проведенных модельных расчетов колебательных спектров конформеров гидроксизамещенных флавонов, их сопоставления с имеющимися экспериментальными данными можно сделать следующий вывод. Возможности информационной технологии «Gaussian» позволяют осуществлять достоверные предсказательные расчеты геометрической и электронной структуры флавоноидов, строить на их основе структурно-динамические модели соединений данного класса, создавать выявлять признаки их спектральной идентификации.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина / Ю.С. Тараховский, Ю.А. Ким, Б.С. Абдраимов, Е.Н. Музафаров. – Synchrobook. 2013. – 310 с.
2. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. 2003. Pittsburg PA.: Gaussian Inc.
3. Canamares, M.V. Raman and surface-enhanced Raman spectra of 7-hydroxyflavone and 3',4'-dihydroxyflavone / M.V. Canamares, J.R. Lombardi, M. Leona. // Morana RDD. 2008. – N.3. – P.81-88.
4. Sundaraganesun, N. Molecular structure and vibrational spectroscopic studies of chrysin using HF and density functional theory / N. Sundaraganesun, G. Mariappan, S. Monoharun. // Spectrochim Acta. –2012. –Vol.72A, №2. –P.67-76.
5. Raman and surface-enhanced Raman spectra of chrysin, apigenin and luteolin / C. Corredor [etc.] // Vibrational spectroscopy. – 2009. – V.49. – P.190-195.
6. Пулин, В. Ф. Моделирование адиабатических потенциалов гидроксизамещенных бензола / В.Ф. Пулин, П.М. Элькин, М.А. Эрман // Вестник СГТУ. – 2011. – № 3 (37). – С. 91–95.
7. Элькин, М. Д. Моделирование колебательных состояний гидроксизамещенных фенола / М.Д. Элькин, Е.А. Джалмухамбетова, А.Р. Гайсина // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. –2011. – №2 (14). – С.55 – 61.
8. Структурно-динамические модели кризина / М.Д. Элькин [и др.] // Естественные науки. –2013. – № 1 (42). – С. 105-111.
9. Моделирование структуры и спектров конформеров 3',4'-дигидроксифлавонов / М.Д. Элькин [и др.] // Естественные науки. – 2013. – № 1 (42). – С. 111-118.
10. Шагаутдинова, И. Т. Моделирование структуры и динамики конформеров лютеалина / И.Т. Шагаутдинова, Д.М. Нуралиева, М.Д. Элькин // Материалы международной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике SFM-2013. –Саратов –Новый ветер, 2013. – С 165-170.
11. Структурно-динамические модели флавоноидов.1. Флавоны C<sub>15</sub>O<sub>2</sub>H<sub>10</sub>. / М.Д. Элькин [и др.] // Естественные науки –2012. – №37(3). – С.161-167.
12. Структурно-динамические модели флавоноидов. Моногидроксифлавоны / М.Д. Элькин [и др.] // Естественные науки. –2012. – № 4 (41). –С.133 – 140.
13. Эрман, Е. А. Компьютерное моделирование внутри-молекулярного взаимодействия в эхинохроме / Е.А. Эрман, П.М. Элькин //Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. Сер. Актуальные проблемы управления, выч. техники и информатики в техн. системах. –2010. – № 6(66), вып. 8. – С.41-46
14. Математическое моделирование колебательных состояний молекулярных систем / П.М. Элькин, Е.А. Эрман, О.Н. Гречухина, М.В. Карташов //Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. Серия. Актуальные проблемы управления, выч. техники и информатики в техн. системах. – 2011. – № 9 (82), вып. 11. –С.50 - 55

УДК 539.193/.194;535/33.34

**П. М. Элькин, О. М. Алыкова, Е. А. Джалмухамбетова, В. В. Смирнов**

### МОДЕЛИРОВАНИЕ АДИАБАТИЧЕСКИХ ПОТЕНЦИАЛОВ КОНФОРМЕРОВ ГИДРОКСИИЗОФЛАВОНОВ

Астраханский государственный университет

kof@aspu.ru

В рамках метода функционала плотности DFT/B3LYP выполнены модельные квантовые расчеты геометрической структуры и колебательных спектров таутомеров и конформеров моно- и дигидроксизаифлавонов. Выявлены признаки спектральной идентификации соединений.

**Ключевые слова:** изофлавоноиды, колебательные спектры, спектроскопическая идентификация.

**P. M. Elkin, O. M. Alykova, E. A. Dzhalumukhambetova, V. V. Smirnov**

### MODELING ADIABATIC POTENTIALS CONFORMERS HYDROXYISOFLAVONES

Astrakhan State University

An analysis of vibrational spectra and geometric structure for mono- and dehydroxy isoflavones is carried out by the method DFT/B3LYP. The indications of spectral identification are revealed.

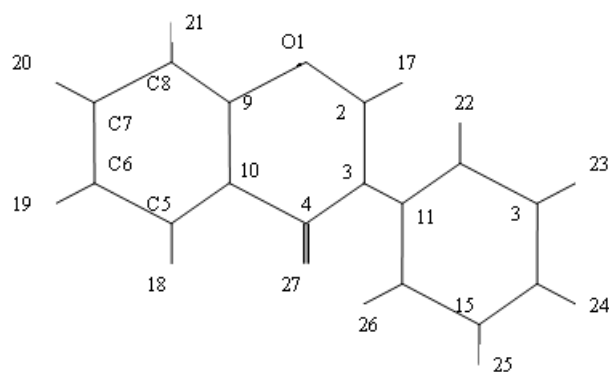
**Keywords:** isoflavones, vibrational spectra, spectroscopic identification

### Введение

Моногидроксизаифлавоны – полифенольные соединения растительного происхождения. Изучение их влияния на сигнальные и регуляторные системы клеток, выяснение механизма

их биохимического и биофизического действия вызывает интерес научном мире. Подробности приведены в монографии [1]. Однако отметим, что в указанной монографии вопросу использования методов оптической физики для исследо-

вания структуры и динамики флавоноидов уделено внимания явно недостаточно, если учитывать возможности и перспективы исследования свойств биомолекул на молекулярном уровне. Ведь, согласно современным научным воззрениям, основные физико-химические и медико-биологические свойства молекулярных объектов определяются формой их адиабатического потенциала (строением электронной подсистемы). Оценку параметров адиабатического потенциала можно получить из реального эксперимента по колебательным (ИК и КР) спектрам молекул в различных фазовых состояниях или из предсказательных квантовых расчетов структуры и динамики соединений. В последнем случае стоит задача обоснования достоверности результатов модельных расчетов. Особенно это касается ситуации, когда данные реального эксперимента по колебательным спектрам изучаемого молекулярного объекта ограничены.



Молекулярная структура изофлавона

Такая ситуация в периодической литературе имеет место для ряда флавоноидов – гидрокси-

флавонов. Исследуется, как правило, диапазон 1600–450 см<sup>-1</sup>. Сошлемся для примера на публикации [2–6].

Попытки интерпретировать имеющиеся спектральные данные, предсказать спектр фундаментальных колебаний, выявить признаки спектроскопической идентификации указанных соединений были предприняты нами в серии публикаций [7–9]. Там же описаны принятые физические приближения, обоснована достоверность представленных результатов. Для моногидроксиизофлавонов экспериментальными данными по колебательным спектрам мы не располагаем. Имеющая в нашем распоряжении работа [10] касается исследования конформационных свойств лишь нескольких полигидроксизамещенных изофлавонов. Поэтому предлагаемые нами структурно-динамические модели таутомеров и конформеров моногидроксиизофлавонов есть результат системного анализа параметров адиабатического потенциала соединений в рамках метода функционала плотности DFT/B3LYP [11], их сопоставления с подобными результатами для моногидроксифлавонов.

#### Обсуждение результатов модельных расчетов

Воспроизведение частоты относительного внутреннего вращения бензольного и сопряженного фрагментов (см. рисунок) достигается для неплоской конфигурации молекул (угол между плоскостями указанных фрагментов ~ 37–41°). Исключение имеет место для конформеров 2'(2'a) и 2(2b). Здесь значения углов соответственно ~ 46° и 52°. Причиной тому – отталкивание соседних атомов водорода связей ОН и СН (R~2,48 Å и 2,58 Å).

Таблица 1

Оценка длин связей (R Å) и валентных углов (в °) в флавоне (Ф) и изофлаване (ИФ)

|        | Ф    | ИФ   |          | Ф   | ИФ  |           | Ф   | ИФ  |
|--------|------|------|----------|-----|-----|-----------|-----|-----|
| R(1,2) | 1.36 | 1.35 | A(1,2,3) | 122 | 126 | A(3,4,5)  | 114 | 114 |
| R(1,6) | 1.37 | 1.37 | A(1,2,X) | 112 | 111 | A(3,4,27) | 123 | 124 |
| R(2,3) | 1.36 | 1.35 | A(3,2,X) | 126 | 123 | A(5,4,27) | 123 | 122 |
| R(3,4) | 1.46 | 1.48 | A(2,3,4) | 123 | 119 | A(1,6,10) | 117 | 117 |
| R(4,5) | 1.48 | 1.48 | A(4,3,X) | 117 | 122 | A(5,7,18) | 117 | 117 |

В табл. 1 сопоставлены результаты расчета геометрических параметров флавона и изофлавона. Приведены лишь данные для длин валентных связей и валентных углов, отличающихся от значений в бензоле на величины бо-

лее 0.02 Å и 2° соответственно. В табл. 2 дана оценка некомпланарности бициклического и фенольного фрагмента в моно- и дигидроксиизофлавах. Для ряда гидроксифлавонов такие оценки приведены в публикациях [7–9].



Таблица 2

**Оценка некомпланарности бициклического и фенильного фрагмента  
в моно- и дигидроксиизофлавонах**

| Двугранные<br>Углы (°) | 18   | 17_18 |      | 18_22 |      | 18_26 |      | 17   |      | 17-22 | 17-26 |      |
|------------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|------|------|-------|-------|------|
|                        |      | Kaa   | Kab  | Kaa   | Kab  | Kaa   | Kab  | Kaa  | Kbb  | Kab   | Kaa   | Kab  |
| D(2,3,11,12)           | 41   | 47    | 53   | 56    | 41   | 62    | 41   | 47   | 52   | 59    | 68    | 48   |
| D(2,3,11,16)           | -140 | -134  | -127 | -124  | -139 | -118  | -136 | -134 | -129 | -124  | -114  | -130 |
| D(4,3,11,12)           | -139 | -133  | -128 | -126  | -138 | -116  | -137 | -133 | -130 | -122  | -112  | -134 |
| D(4,3,11,16)           | 40   | 46    | 52   | 54    | 41   | 64    | 46   | 46   | 50   | 55    | 67    | 48   |

Представленные оценки дают основание полагать, что параметры адиабатического потенциала флавона и изофлавона сопоставимы, а изменение силовых констант носит локальный

характер. Данный факт подтверждается результатом теоретической интерпретации спектра фундаментальных колебаний соединений, предлагаемой в табл. 3.

Таблица 3

**Интерпретация валентных и крутильных колебаний гидроксильного фрагмента  
в конформерах позиционных таутомеров моногидроксиизофлавона**

| Таутомер | Валентные колебания( $\nu_{OH}$ ) |     |     |             |     |     | Крутильные колебания( $\chi_{OH}$ ) |     |    |             |     |    |
|----------|-----------------------------------|-----|-----|-------------|-----|-----|-------------------------------------|-----|----|-------------|-----|----|
|          | Конформер А                       |     |     | Конформер В |     |     | Конформер А                         |     |    | Конформер В |     |    |
|          | $\nu_{выч}$                       | ИК  | КР  | $\nu_{выч}$ | ИК  | КР  | $\nu_{выч}$                         | ИК  | КР | $\nu_{выч}$ | ИК  | КР |
| 2(17)    | 3664                              | 132 | 137 | 3597        | 187 | 99  | 346                                 | 83  | 3  | 496         | 86  | 2  |
| 5(18)    | 3188                              | 413 | 79  | 3677        | 62  | 172 | 839                                 | 88  | 1  | 410         | 65  | 7  |
| 6(19)    | 3694                              | 69  | 117 | 3700        | 86  | 204 | 360                                 | 115 | 3  | 306         | 107 | 3  |
| 7(20)    | 3694                              | 99  | 198 | 3692        | 85  | 173 | 362                                 | 109 | 3  | 375         | 116 | 4  |
| 8(21)    | 3696                              | 85  | 179 | 3668        | 76  | 61  | 332                                 | 90  | 3  | 392         | 111 | 5  |
| 2'(22)   | 3655                              | 90  | 89  | 3696        | 60  | 140 | 429                                 | 41  | 3  | 335         | 84  | 3  |
| 3'(23)   | 3697                              | 47  | 98  | 3697        | 68  | 175 | 333                                 | 103 | 3  | 333         | 105 | 4  |
| 4'(24)   | 3695                              | 76  | 201 | 3695        | 78  | 192 | 340                                 | 120 | 4  | 348         | 106 | 3  |
| 5'(25)   | 3697                              | 67  | 170 | 3692        | 52  | 91  | 327                                 | 100 | 3  | 356         | 105 | 2  |
| 6'(26)   | 3696                              | 60  | 140 | 3296        | 806 | 338 | 335                                 | 84  | 3  | 750         | 47  | 12 |

Примечание. Частоты колебаний  $\nu$  в  $\text{см}^{-1}$ , интенсивности в спектрах КР в  $\text{км/моль}$ , в спектрах КР в  $\text{Å/а.е.м.}$

Внутримолекулярная водородная связь для моногидроксиизовлавонов проявляется в конформерах 2а ( $R_{O...H} \sim 2.14 \text{ Å}$ ), 6'б ( $R_{O...H} \sim 1.69 \text{ Å}$ ), 5а ( $R_{O...H} \sim 1.7 \text{ Å}$ ). Механизм сильной водородной связи проявляется в смещении полос валентных колебаний связей ОН ( $\nu_{OH}$ ) в длинноволновый диапазон колебательного спектра ( $\Delta \sim 500 \text{ см}^{-1}$ ) для конформеров 6'б и 5а. Крутильные колебания гидроксильного фрагмента ( $\chi_{OH}$ ) смещаются в коротковолновый диапазон на величину  $\sim 400 \text{ см}^{-1}$ . Этот факт следует использовать в задаче спектральной идентификации конформеров моногидроксифлавонов. Подчеркнем также факт

слабой интенсивности полос в спектрах КР, отнесенных к крутильным колебаниям гидроксильных фрагментов, который также имеет место в фенолах, полигидроксибензолах, нафтолах [13–15]

В табл. 4 представлены результаты анализа деформационных колебаний связей ОН и СН в моногидроксиизофлавонов. Экспериментальными данными по подобным колебаниям заимствованы из моногидроксифлавонов и дизамещенных фенола. При этом ограничились полосами сильной интенсивности, позволяющими использовать их в качестве признаков спектральной идентификации конформеров.

Таблица 4

## Интерпретация деформационных колебаний ОН иСН в моногидроксиизофлаволах

| Та-<br>мер                            | V <sub>эсп</sub> | V <sub>выч</sub> | Ка               |     | Кб  |     | Та-<br>мер | V <sub>эсп</sub>                    | V <sub>выч</sub>  | Ка   |     | Кб  |     |
|---------------------------------------|------------------|------------------|------------------|-----|-----|-----|------------|-------------------------------------|-------------------|------|-----|-----|-----|
|                                       | [5-8,17]         |                  | ИК               | КР  | ИК  | КР  |            | [5-8,17]                            |                   | ИК   | КР  | ИК  | КР  |
| 2                                     |                  | 1308             | -                | -   | 99  | 139 |            | 1274                                | 1280              | 117  | 149 | 182 | 244 |
|                                       | 1278             | 1275             | 119              | 64  | -   | -   |            | 1239                                | 1237              | 213  | 39  |     |     |
| 5                                     | 1474             | 1477             | 112              | 11  | -   | -   | 6          | 1504                                | 1478              | 155  | 2   | 239 | 4   |
|                                       | 1210             | 1207             | -                | -   | 142 | 8   |            | 1460                                | 1451              | 219  | 6   | 29  | 2   |
| 6                                     | 1176             | 1180             | 152              | 2   | 46  | 23  |            | 1256                                | 1277              | -    | -   | 133 | 5   |
| 7                                     |                  | 1166             | 240              | 1   | 83  | 15  |            | 1185                                | 1219              | 139  | 52  | -   | -   |
| 8                                     | 1225             |                  |                  |     | 81  | 109 | 7          |                                     | 1322              |      |     | 167 | 64  |
|                                       | 1176             | 1185             | 59               | 13  |     |     |            | 1290                                | 1284              | 98   | 121 |     |     |
| 2'                                    | 1171             | 1173             | 82               | 4   | 55  | 6   | 8          | 1185                                | 1197              | 8    | 43  | 256 | 25  |
| 3'                                    |                  | 1175             | 120              | 9   | 96  | 5   |            | 1280                                | 1267              | 144  | 55  | 261 | 24  |
| 4'                                    |                  | 1167             | 246              | 28  | 202 | 27  |            |                                     | 1192              |      |     | 90  | 34  |
| 5'                                    |                  | 1186             | 56               | 4   | 133 | 5   |            | Для связей СН в фенольном фрагменте |                   |      |     |     |     |
| 6'                                    | -                | 1383             | 67               | 43  |     |     | 2'         | 1223                                | 1218              | 282  | 108 | 63  | 60  |
|                                       | 1159             | 1172             | 55               | 6   | -   | -   | 3'         | 1323                                | 1302              | 62   | 52  | 191 | 6   |
| Для связей СН в бициклическом фраг-те |                  |                  |                  |     |     |     |            |                                     | 1267              | 1285 | 173 | 64  | 121 |
| 2                                     |                  | 1409             | -                | -   | 341 | 12  | 4'         | 1182                                | 1159              | 36   | 5   | 118 | 13  |
|                                       | -                | 1376             | 538              | 90  | -   | -   | 5'         | 1458                                | 1446              | 20   | 3   | 121 | 3   |
|                                       | -                | 1283             | 175 <sup>3</sup> | 117 | 77  | 24  |            | 1316                                | 1292              | 314  | 54  | 155 | 57  |
|                                       | -                | 1220             | 27               | 25  | 198 | 43  | 6'         | 1500                                | 1460 <sup>2</sup> | 142  | 12  | 31  | 9   |
| 5                                     | 1460             | 1450             | 137              | 33  | 139 | 4   |            | 1380                                | 1343              | 142  | 2   | 64  | 5   |
|                                       | 1387             | 1386             | 117              | 37  |     |     |            | 1223                                | 11202             | 9    | 40  | 71  | 122 |
|                                       |                  | 1352             |                  |     | 173 | 11  |            | 1500                                | 1460 <sup>2</sup> | 142  | 12  | 31  | 9   |

Разделение указанных деформационных колебаний по форме на две группы является весьма условно. Факт делокализации по форме для них общеизвестен, как и спектральный диапазон, где проявляются соответствующие полосы. Прослеживаемая здесь закономерность, связанная со смещением полос в коротковолновый диапазон при наличии внутримолекулярного взаимодействия также является подтверждением достоверности представленных результатов. Аналогичная закономерность имеет место в флавоноидах [5–9], спиназарилах [12].

В табл. 5 дана интерпретация валентных и крутильных колебаний гидроксильных фрагментов в тех дигидроксиизофлаволах, для которых имеет место внутримолекулярное взаимодействие этих фрагментов с атомом кислорода связи C=O.

Налицо закономерности в смещении полос указанных колебаний и оценок их интенсивностей в спектрах ИК и КР, которые могут быть

использованы в качестве доминирующих признаков спектральной идентификации конформеров дигидроксиизофлавонов.

Из рассмотрения исключены валентные и деформационные колебания шестичленных циклических фрагментов молекул. Шесть полос валентных колебаний связей СС проявляются в диапазоне 1660–1560 см<sup>-1</sup>. Энергетические щели между ними не превышает величины ~ 20 см<sup>-1</sup>. Полосы интенсивны как в ИК, так и КР спектрах, но их использование в задачах спектральной идентификации моногидроксиизофлавонов следует считать затруднительным.

Общей закономерностью в флавоноидах и изофлавоноидах является слабая интенсивность полос в ИК и КР спектрах, отнесенных к неплюским колебаниям связей СН (диапазон 1000–700 см<sup>-1</sup>), крутильным колебаниям связей СС шестичленных циклических фрагментов (диапазон ниже 600 см<sup>-1</sup>) и колебаниям валентных углов шестичленных циклов (диа-

пазон 700–500 см<sup>-1</sup>). Для задач спектральной идентификации исследуемого класса соеди-

нений указанные полосы интереса не представляют.

Таблица 5

**Интерпретация валентных и крутильных колебаний гидроксильного фрагмента  
в конформерах позиционных таутомеров дигидроксифлавона**

| Тип таутомера | Каа  |     |     |     |     |    | Kab  |     |     |     |     |    |
|---------------|------|-----|-----|-----|-----|----|------|-----|-----|-----|-----|----|
|               | Чон  |     |     | Хон |     |    | Чон  |     |     | Хон |     |    |
| 18_17         | 3140 | 490 | 88  | 853 | 56  | 1  | 3162 | 473 | 96  | 846 | 81  | 1  |
| 18_19         | 3167 | 434 | 109 | 816 | 89  | 1  | 3197 | 402 | 88  | 830 | 94  | 1  |
|               | 3638 | 85  | 85  | 432 | 93  | 3  | 3701 | 89  | 210 | 282 | 86  | 2  |
| 18_20         | 3142 | 442 | 84  | 856 | 84  | 1  | 3167 | 438 | 83  | 848 | 73  | 0  |
| 18_21         | 3236 | 380 | 96  | 814 | 93  | 1  | 3271 | 329 | 93  | 805 | 71  | 1  |
|               | 3703 | 84  | 184 | 259 | 71  | 1  | 3680 | 68  | 65  | 332 | 99  | 2  |
| 18_22         | 3264 | 396 | 78  | 852 | 88  | 2  | 3236 | 432 | 80  | 861 | 86  | 1  |
|               | 3729 | 90  | 94  | 414 | 57  | 2  | 3767 | 63  | 142 | 334 | 84  | 3  |
| 18_23         | 3189 | 413 | 81  | 839 | 109 | 1  | 3187 | 418 | 83  | 838 | 77  | 1  |
| 18_24         | 3186 | 420 | 76  | 840 | 103 | 1  | 3187 | 419 | 75  | 840 | 103 | 1  |
| 18_25         | 3190 | 416 | 81  | 840 | 80  | 1  | 3194 | 412 | 80  | 841 | 103 | 1  |
| 18_26         | 3171 | 423 | 78  | 845 | 81  | 1  | 3259 | 512 | 40  | 815 | 101 | 12 |
|               | 3700 | 68  | 115 | 301 | 48  | 2  | 3371 | 572 | 359 | 711 | 47  | 4  |
| 17_19         | 3598 | 195 | 97  | 499 | 80  | 2  | 3597 | 196 | 98  | 499 | 78  | 2  |
| 17_20         | 3598 | 188 | 102 | 495 | 87  | 3  | 3598 | 187 | 100 | 493 | 91  | 3  |
| 17_21         | 3599 | 188 | 97  | 504 | 54  |    | 3594 | 192 | 95  | 500 | 60  | 2  |
|               | 3697 | 83  | 172 | 336 | 58  |    | 3665 | 79  | 54  | 403 | 62  | 2  |
| 17_22         | 3381 | 568 | 90  | 634 | 25  | 2  | 3378 | 570 | 90  | 635 | 24  | 2  |
|               | 3696 | 76  | 126 | 342 | 37  | 1  | 3696 | 76  | 126 | 343 | 35  | 1  |
| 17_23         | 3588 | 202 | 110 | 522 | 48  | 4  | 3582 | 215 | 119 | 523 | 67  | 3  |
| 17_24         | 3597 | 186 | 92  | 501 | 109 | 2  | 3599 | 186 | 91  | 500 | 112 | 2  |
| 17_25         | 3579 | 227 | 128 | 510 | 61  | 2  | 3567 | 232 | 122 | 517 | 42  | 1  |
|               | Kbb  |     |     |     |     |    | Kba  |     |     |     |     |    |
| 17_26         | 3560 | 242 | 80  | 534 | 65  | 14 | 3660 | 141 | 131 | 394 | 41  | 5  |
|               | 3257 | 723 | 310 | 767 | 120 | 2  | 3334 | 635 | 375 | 721 | 52  | 14 |

Представленные структурно-динамические модели изофлавонов, их моно- и гидроксизамещенных выполнены в рамках методики, представленной в публикации [16] с использованием программного приложения, описанного в работе [17].

#### Заключение

Представленные в работе результаты дают основание к использованию метода функционала плотности в предсказательных расчетах структуры и колебательных полифенольных соединений. Достоверность таких расчетов следует обосновывать как согласием полученных

результатов модельных расчетов с имеющимися данными реального эксперимента в спектрах инфракрасного поглощения и комбинационного рассеяния, а также общими закономерностями в поведении полос бензольного и сопряженного фрагментов соединения.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тараховский Ю.С., Ким Ю.А., Абдраимов Б.С., Музафаров Е.Н. Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина. Пушкино: Synchrobook. 2013. 310 с.
2. Heneczowski M., Kopacz M., Nowak D., Kuzniar A. Infrared spectrum analysis of some flavonoids // Acta Poloniae Pharmaceutica. 2001. Vol. 57, № 6. P. 415–420.

3. Teslova T., Corredor C., Livingston R., Spataru T., Birke R.L., Lombardi J.R., Canamares M.V., Leona M. Raman and surface-enhanced Raman spectra of flavone and several hydroxyflavone // J. Raman Spectroscopy. 2007. Vol. 38. P. 802–818.
4. Vavra A., Linder R., Kleinermans K. Gas phase infrared spectra of flavone and its derivatives // Chem. Phys. Letters. 2008. Vol. 463. P. 349–352.
5. Canamares M.V., Lombardi J.R., Leon M. Raman and surface enhanced Raman spectra of 7-hydroxy flavone and 3',4'-dihydroxy flavone // Morana. 2009, Vol. 6. P. 81–88.
6. Erdogdu Y., Unsalan O., Gulluoglu M.T. Vibrational analysis of flavone // Turk J. Phys. 2009. V.33. P. 249–259.
7. Элькин М.Д., Гайсина А.Р., Степанович Е.Ю., Шагаутдинова И.Т. Структурно-динамические модели флавоноидов. Моногидроксифлавоны // Естественные науки. 2012. №4 (41). С. 133–140.
8. Элькин М.Д., Гайсина А.Р., Джалмухамбетова Е.А., Смирнов В.В., Степанович Е.Ю., Шагаутдинова И.Т. Моделирование структуры и спектров конформеров 3',4'-дигидроксифлавоны // Естественные науки. -2013. - № 1 (42). -С. 111–118.
9. Элькин М.Д., Гайсина А.Р., Джалмухамбетова Е.А., Смирнов В.В., Степанович Е.Ю., Шагаутдинова И.Т. Структурно-динамические модели кризина // Естественные науки. -2013. - № 1 (42). -С. 105–111
10. Machado N.F.L., Batista L.A.E., Otero J.C., Marques M.P.M. A conformational study of hydroxylated isoflavones by vibrational spectroscopy coupled with DFT calculations // Vibrational spectroscopy. 2013. Vol. 68, №9. P.257–265.
11. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. et al. 2003. Pittsburgh PA.: Gaussian Inc.
12. Элькин М.Д., Джалмухамбетова Е.А., Гордеев И.И. Компьютерное моделирование геометрической структуры и колебательных состояний спиназарина. //Прикасп. журнал: высокие технологии и управление. 2009, №3(7), с.48–54.
13. Пулин В.Ф., Элькин П.М., Эрман М.А. Моделирование адиабатических потенциалов гидроксизамещенных бензола // Вест. Саратов. гос. тех. ун-та. 2011, № 3 (37). С.91–95.
- Элькин М.Д., Джалмухамбетова Е.А., Гайсина А.Р. Моделирование колебательных состояний гидроксизамещенных фенола. //Прикасп. журнал: управление и высокие технологии. -2011. - №2 (14). -С.55 - 61
14. Raja G, Sivakamal S. Structure and vibrational spectroscopic studies of 1-naphthol. DFT theory calculation // International journal of applied Bioengineering. 2013. Vol.7, № 1. P.45–57.
15. Элькин П.М., Эрман Е.А., Гречухина О.Н., Карташов М.В. Математическое моделирование колебательных состояний молекулярных систем // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. Т.9. №11. - С.50 - 55
16. Эрман Е.А., Элькин П.М., Стефанова Г.П., Равчеева Н.А. Программно-алгоритмическая поддержка задач молекулярного моделирования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2012. Т.10. №14. - С. 63–67

УДК 539.193/.194;535/33.34

**П. М. Элькин<sup>1</sup>, А. М. Лихтер<sup>2</sup>, Т. А. Егоренкова<sup>3</sup>, О. Н. Гречухина<sup>4</sup>**

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПОЗИЦИОННЫХ ТАУТОМЕРОВ МОНОГИДРОКСИИЗОФЛАВОНОВ**

<sup>1</sup>Энгельсский технологический институт (филиал) СГТУ им. Гагарина Ю. А.

<sup>2,3</sup>Астраханский государственный университет

<sup>4</sup>Каспийский институт морского и речного транспорта (филиал) «ВГАВТ»

eti@techn.sstu.ru, asu@asu.edu.ru, kasp.institut@mail.ru

В рамках метода теории функционала плотности DFT (B3LYP) осуществлены квантовохимические расчеты геометрической структуры и колебательных спектров позиционных таутомеров и их конформеров моногидроксифлавоны. Выявлены признаки спектроскопической идентификации соединений.

**Ключевые слова:** изофлавоноиды, колебательные спектры, спектроскопическая идентификация.

**P. M. Elkin<sup>1</sup>, A. M. Lihter<sup>2</sup>, T. A. Egorenkova<sup>3</sup>, O. N. Grechuhina<sup>4</sup>**

### **MODELLING OF ADIABATIC POTENTIALS FOR MONOHYDROXYISOFLAVONES**

<sup>1</sup>Engels Technological Institute (branch) «SGTU Yuri Gagarin»

<sup>2,3</sup>Astrakhan State University

<sup>4</sup>Caspian Institute of Sea & River Transport branch of the state-financed educational institutional of higher professional education «Volga State Academy of Water Transport»

By means of the DFT (B3LYP) method, quantum chemical computations of spatial structure and vibrational spectra for the positional monohydroxyisoflavone tautomers and conformers have been carried out. The indications of the compounds spectroscopic identification have been revealed.

**Keywords:** isoflavones, vibrational spectra, spectroscopic identification.

Моногидроксифлавоны – содержащиеся в растениях природные соединения. Являются фитостероидными, обладают метаболическими и антиканцерогенными свойствами, благотворно влия-

ют на сердечно-сосудистую систему и кожу. Интерес к ним связан с изучением влияния соединений на сигнальные и регуляторные системы клеток, выяснения механизма их биохимического

и биофизического действия. За подробностями отсылаем к обзору литературы в монографии [1]. Отметим только, что в названной книге крайне важному для исследования структуры и свойств биомолекул явно недостаточно освещен вопрос использования спектроскопических методов применительно к флавоноидам.

Согласно современным научным воззрениям, основные физико-химические и медико-биологические свойства молекулярных объектов определяются формой их адиабатического потенциала (строением электронной подсистемы). Оценку параметров адиабатического потенциа-

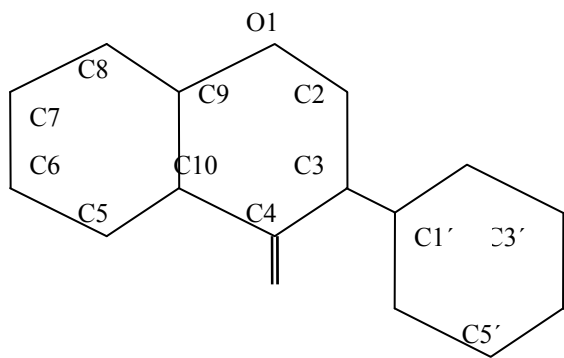
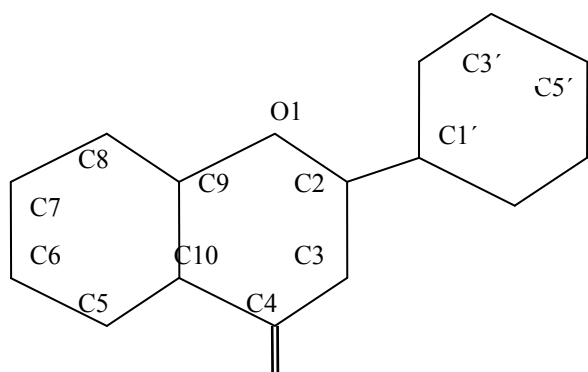
ла можно получить из лабораторного эксперимента по колебательным (ИК и КР) спектрам молекул в различных фазовых состояниях или из предсказательных квантовохимических расчетов структуры и спектров соединений. В последнем случае необходимо обосновывать достоверность результатов численного эксперимента.

Имеющиеся в периодической литературе данные по колебательным спектрам ряда флавоноидов – гидроксифлавонов весьма ограничены и касаются, как правило, диапазона  $1600\text{--}450\text{ см}^{-1}$ . Достаточно сослаться на публикации [2–5].

Таблица 1

Длина связей ( $R$ , Å) и валентных углов ( $A$ , °) в молекулах флавона (Ф) и изофлавона (ИФ)

|           | Ф    | ИФ   |            | Ф    | ИФ   |             | Ф   | ИФ  |             | Ф   | ИФ  |
|-----------|------|------|------------|------|------|-------------|-----|-----|-------------|-----|-----|
| $R(1,2)$  | 1.36 | 1.35 | $R(4,O)$   | 1.22 | 1.22 | $A(2,3,4)$  | 123 | 119 | $A(1,9,5)$  | 122 | 121 |
| $R(1,9)$  | 1.37 | 1.37 | $R(7,8)$   | 1.38 | 1.38 | $A(4,3,X)$  | 117 | 122 | $A(1,9,10)$ | 117 | 117 |
| $R(2,3)$  | 1.36 | 1.35 | $R(9,10)$  | 1.38 | 1.39 | $A(3,4,5)$  | 114 | 114 | $A(8,9,10)$ | 122 | 122 |
| $R(CC)$   | 1.48 | 1.48 | $A(1,2,3)$ | 122  | 126  | $A(3,4,27)$ | 123 | 124 | $A(10,5,H)$ | 117 | 117 |
| $R(3,4)$  | 1.46 | 1.48 | $A(1,2,X)$ | 112  | 111  | $A(5,4,27)$ | 123 | 122 | $A(6,5,H)$  | 122 | 122 |
| $R(4,10)$ | 1.48 | 1.48 | $A(3,2,X)$ | 126  | 123  | $A(4,5,7)$  | 122 | 121 | $A(7,8,H)$  | 122 | 122 |



Молекулярные диаграммы флавона и изофлавона

Попытки интерпретировать имеющиеся спектральные данные, предсказать спектр фунда-

ментальных колебаний, выявить признаки спектроскопической идентификации гидроксифлавонов были предприняты, к примеру, в серии публикаций [6–11]. Там же приведено обоснование используемых физических приближений в теории молекулярных колебаний и достоверности полученных результатов расчетов колебательных спектров молекул.

Для моногидроксиизофлавонов ситуация иная. Литературными источниками экспериментальными с данными по их колебательным спектрам не располагаем. Имеющая в нашем распоряжении работа [12] касается исследования конформационных свойств лишь нескольких полигидроксизамещенных изофлавонов. Поэтому предлагаемые ниже структурно-динамические модели позиционных таутомеров этих представителей флавоноидов есть результат системного анализа квантовохимических расчетов структуры и колебательных спектров моногидроксиизофлавонов в рамках метода теории функционала плотности DFT на уровне теории B3LYP/ (6-311G\*\*) с использованием программного пакета Gaussian 03W [13] и их сопоставления с подобными результатами для моногидроксифлавонов. В качестве объектов исследования нами рассмотрены незамещенные

флаван и изофлаван, а также их замещенные с единственной ОН-группой в различных положениях. Возможны два типа конформера для каждого из десяти позиционных таутомеров (а-конформер и b-конформер). Для атома водорода 5a конформера имеет место внутримолекулярное взаимодействие с атомом кислорода связи C=O).

#### Результаты квантовохимических расчетов и их обсуждение

Одним из критериев достоверности квантовохимических расчетов структуры и спектров подобных молекул является воспроизведение частоты относительного внутреннего вращения бензольного и бициклического фрагментов. Для изофлавона такой результат достигается для неплоской конформации молекулы (угол между плоскостями указанных фрагментов  $\sim \pm 40^\circ$  и  $\sim -40^\circ$ ). Для моногидроксиизофлавонов значение указанного угла попадает в интервал  $\sim \pm 37$ - $\pm 41^\circ$  и  $\sim -37$ - $41^\circ$ , (наличие двухминимумного потенциала) за исключением конформеров 2' (2'a) и 2 (2b). Здесь значения углов соответственно  $\sim \pm 46^\circ$  и  $\sim \pm 52^\circ$ . Причиной является отталкивание соседних атомов водорода связей О-Н и С-Н ( $R \sim 2.48 \text{ \AA}$  и  $2.58 \text{ \AA}$ ).

К конформерам типа b отнесены те, для которых вектор связи **ОН** гидроксильного фрагмента направлен в сторону увеличения номера атома циклических фрагментов.

Оценки геометрических параметров флавона и изофлавона сопоставлены в табл. 1. Приведены лишь данные для длины валентных связей и валентных углов, отличающихся от значений в бензоле на величины более  $0.01 \text{ \AA}$  и  $1^\circ$  соответственно. Расхождение значений  $\sim 5^\circ$  имеет место для валентных углов  $\beta$ , прилегающих к связи  $C_3-C_1'$ , и валентного угла  $A(1,2,3)$ . Этот факт дает основание предполагать сопоставимость параметров адиабатического потенциала флавона и изофлавона. Подтверждением являются результаты теоретической интерпретации спектра для фундаментальных колебаний соединений, представленные в табл. 2, 3. Внутримолекулярная водородная связь для моногидроксиизофлавонов имеет место в конформерах 2a ( $R(O\cdots H) \sim 2.14 \text{ \AA}$ ), 6'b ( $R(O\cdots H) \sim 1.69 \text{ \AA}$ ), 5a ( $R(O\cdots H) \sim 1.70 \text{ \AA}$ ). В двух последних системах она – прочная, что проявляется в ее длине и в смещении полос валентных колебаний связей О-Н ( $\nu_{OH}$ ) в длинноволновый диапазон колебательного спектра ( $\Delta \sim 500 \text{ см}^{-1}$ ). Крутильные колебания гидроксильной группы ( $\chi_{OH}$ ) смещаются в коротковолновый диапазон на величину  $\sim 400 \text{ см}^{-1}$ . Данный факт следует использовать в задаче спектроскопической идентификации конформеров моногидроксиизофлавонов.

Таблица 2

Интерпретация колебаний в молекулах флавона и изофлавона

| Флаван             |                   |      |                   |     |      | Изофлаван          |                   |      |                   |     |     |
|--------------------|-------------------|------|-------------------|-----|------|--------------------|-------------------|------|-------------------|-----|-----|
| Форма колеб.       | ν <sub>эксп</sub> |      | ν <sub>выч</sub>  | ИК  | КР   | Форма колеб.       | ν <sub>эксп</sub> |      | ν <sub>выч</sub>  | ИК  | КР  |
|                    | [18]              | [20] |                   |     |      |                    | [18]              | [20] |                   |     |     |
| Q <sub>C=O</sub>   | 1634              | 1646 | 1678              | 439 | 211  | Q <sub>C=O</sub>   | 1634              | 1646 | 1672              | 231 | 93  |
| Q,β                | 1611              | 1606 | 1604 <sup>3</sup> | 151 | 1188 | Q,β,γ              | 1611              | 1606 | 1606 <sup>t</sup> | 104 | 689 |
| Q,β,γ              | 1592              | 1586 | 1566              | 42  | 224  | Q,β,γ              | 1592              | 1586 | 1570 <sup>2</sup> | 33  | 59  |
| β'                 | 1504              | 1504 | 1488              | 17  | 29   | β                  | 1504              | 1504 | 1490              | 17  | 21  |
| β,Q,γ              | 1452              | 1460 | 1460 <sup>2</sup> | 108 | 20   | β,Q                | 1452              | 1460 | 1463 <sup>d</sup> | 130 | 9   |
| Q',β'              | –                 | 1439 | 1443              | 24  | 23   | β,Q                | –                 | 1439 | 1440              | 8   | 6   |
| Q,β                | 1361              | 1387 | 1352              | 354 | 122  | β,Q                | 1361              | 1387 | 1357              | 51  | 11  |
| Q,β                | 1326              | 1331 | 1325 <sup>2</sup> | 22  | 31   | β,Q                | 1326              | 1331 | 1341              | 92  | 2   |
| Q',β               | 1280              | 1278 | 1298              | 54  | 1    | β,Q                | –                 | –    | 1323 <sup>2</sup> | 95  | 114 |
| β,Q                | –                 | 1275 | 1267              | 5   | 59   | Q,β                | –                 | 1267 | 1284 <sup>d</sup> | 67  | 71  |
| β,Q                | 1239              | 1241 | 1226              | 20  | 159  | Q <sub>CC</sub> ,β | 1239              | 1226 | 1219              | 94  | 75  |
| Q <sub>CC</sub> ,β | –                 | 1223 | –                 | 3   | 95   | Q,β                | 1210              | 1210 | 1197              | 12  | 38  |
| Q,β                | 1210              | 1207 | 1210              | 36  | 86   | β                  | 1003              | –    | 1009              | 15  | 42  |
| β'                 | 1158              | 1180 | 1181              | 12  | 39   | γ                  | –                 | 993  | 993               | 0   | 73  |

Окончание табл. 2

| Флаван       |                   |      |                  |    |    | Изофлаван    |                   |      |                  |    |    |
|--------------|-------------------|------|------------------|----|----|--------------|-------------------|------|------------------|----|----|
| Форма колеб. | V <sub>эксп</sub> |      | V <sub>выч</sub> | ИК | КР | Форма колеб. | V <sub>эксп</sub> |      | V <sub>выч</sub> | ИК | КР |
|              | [18]              | [20] |                  |    |    |              | [18]              | [20] |                  |    |    |
| Q,β          | 1031              | 1038 | 1029             | 14 | 20 | γ            | –                 | –    | 874 <sup>d</sup> | 26 | 14 |
| Q,γ          | 1003              | 1008 | –                | 9  | 34 | ρ,χ          | –                 | 769  | 763              | 89 | 1  |
| γ'           | –                 | 991  | 993              | 2  | 75 | γ            | 731               | –    | 738              | 8  | 32 |
| χ',ρ'        | –                 | 770  | 769              | 59 | 2  | ρ,χ          | –                 | 687  | 695              | 36 | 1  |

Примечание. В табл. 2–4 частоты приведены в см<sup>-1</sup>. Интенсивности полос ИК спектров в км/моль, интенсивности линий спектров КР в Å<sup>4</sup>/а.е.м. Надстрочным индексом помечены дублеты (<sup>d</sup>) и триплеты (<sup>t</sup>) полос.

Таблица 3

**Интерпретация валентных (q<sub>он</sub>) и крутильных (χ<sub>он</sub>) колебаний гидроксильных фрагментов в конформерах моногидроксифлавонов и моногидроксизофлавона**

| Моногидроксифлавоны  |                              |                  |     |     |                  |     |     | Моногидроксизофлавоны |                  |     |     |                  |     |     |
|----------------------|------------------------------|------------------|-----|-----|------------------|-----|-----|-----------------------|------------------|-----|-----|------------------|-----|-----|
| *                    | V <sub>эксп</sub><br>[15-17] | Ka               |     |     | Kb               |     |     | *                     | Ka               |     |     | Kb               |     |     |
|                      |                              | v <sub>выч</sub> | ИК  | КР  | v <sub>выч</sub> | ИК  | КР  |                       | v <sub>выч</sub> | ИК  | КР  | v <sub>выч</sub> | ИК  | КР  |
| Валентные колебания  |                              |                  |     |     |                  |     |     |                       |                  |     |     |                  |     |     |
| 2'                   | 3615                         | 3626             | 295 | 146 | 3694             | 67  | 125 | 2'                    | 3655             | 90  | 89  | 3696             | 60  | 140 |
| 3'                   | 3656                         | 3698             | 76  | 177 | 3696             | 51  | 88  | 3'                    | 3697             | 47  | 98  | 3697             | 68  | 175 |
| 4'                   | 3656                         | 3690             | 99  | 252 | 3692             | 101 | 262 | 4'                    | 3695             | 76  | 201 | 3695             | 78  | 192 |
| 5'                   | 3656                         | 3698             | 80  | 179 | 3695             | 55  | 98  | 5'                    | 3697             | 67  | 170 | 3692             | 52  | 91  |
| 6'                   | 3656                         | 3693             | 77  | 153 | 3629             | 122 | 107 | 6'                    | 3696             | 60  | 140 | 3296             | 806 | 338 |
| 3                    | 3656                         | 3654             | 70  | 99  | 3427             | 152 | 183 | 2                     | 3664             | 132 | 137 | 3597             | 187 | 99  |
| 5                    | 3185                         | 3170             | 390 | 119 | 3679             | 67  | 202 | 5                     | 3188             | 413 | 79  | 3677             | 62  | 172 |
| 6                    | 3656                         | 3694             | 79  | 151 | 3698             | 82  | 210 | 6                     | 3694             | 69  | 117 | 3700             | 86  | 204 |
| 7                    | 3656                         | 3658             | 67  | 198 | 3656             | 48  | 129 | 7                     | 3694             | 99  | 198 | 3692             | 85  | 173 |
| 8                    | 3656                         | 3696             | 76  | 138 | 3668             | 81  | 48  | 8                     | 3696             | 85  | 179 | 3668             | 76  | 61  |
| Крутильные колебания |                              |                  |     |     |                  |     |     |                       |                  |     |     |                  |     |     |
| 2'                   | —                            | 514              | 71  | 3   | 340              | 75  | 2   | 2'                    | 429              | 41  | 3   | 335              | 85  | 3   |
| 3'                   | 310                          | 338              | 108 | 2   | 340              | 108 | 4   | 3'                    | 333              | 103 | 3   | 333              | 105 | 4   |
| 4'                   | 360                          | 362              | 111 | 4   | 359              | 111 | 4   | 4'                    | 340              | 120 | 4   | 348              | 106 | 3   |
| 5'                   | 310                          | 332              | 110 | 4   | 338              | 108 | 3   | 5'                    | 327              | 100 | 3   | 356              | 105 | 2   |
| 6'                   | 360                          | 390              | 100 | 3   | 462              | 68  | 3   | 6'                    | 335              | 84  | 3   | 750              | 47  | 12  |
| 3                    | -                            | 432              | 52  | 13  | 641              | 52  | 6   | 2                     | 346              | 83  | 3   | 496              | 86  | 2   |
| 5                    | 871                          | 851              | 93  | 1   | 413              | 91  | 3   | 5                     | 839              | 88  | 1   | 410              | 65  | 7   |
| 6                    | 360                          | 353              | 114 | 3   | 306              | 108 | 4   | 6                     | 360              | 115 | 3   | 306              | 107 | 3   |
| 7                    | 360                          | 374              | 125 | 4   | 387              | 126 | 7   | 7                     | 362              | 109 | 3   | 375              | 116 | 4   |
| 8                    | 310                          | 330              | 52  | 2   | 393              | 99  | 1   | 8                     | 332              | 90  | 3   | 392              | 111 | 5   |

Достоверность сказанного подтверждаются также подобным характером проявления внутримолекулярного взаимодействия между гидроксильным атомом водорода и связью С=О в колебательных спектрах этилспиназарина [14] и эхинохрома [15]. Использование для задач спектроскопической идентификации факта

смещения полос валентных колебаний связей С=О ( $\Delta \sim 40 \text{ см}^{-1}$ ), на наш взгляд, затруднительно. Укажем на низкую интенсивность в спектрах КР полос, интерпретированных как крутильные колебания гидроксильных групп, что имеет место также в феноле, полигидроксibenзолах, нафтолах, спиназаринах [16–19].

Таблица 4

**Интерпретация деформационных колебаний валентных углов  $\text{C-OH}(\beta_{\text{OH}})$  и  $\text{C-N}(\beta)$  в конформерах позиционных таутомеров моногидроксиизофлавона**

|                     | *  | $V_{\text{эксп}}$ |      | Ка                |                  |     | Кб                |     |     |
|---------------------|----|-------------------|------|-------------------|------------------|-----|-------------------|-----|-----|
|                     |    | [5–11]            | [20] | $V_{\text{выч}}$  | ИК               | КР  | $V_{\text{выч}}$  | ИК  | КР  |
| $\beta_{\text{OH}}$ | 2  | 1278              | –    | 1275              | 119              | 64  | 1308              | 99  | 139 |
|                     | 5  | –                 | 1474 | 1477              | 112              | 11  | –                 | –   | –   |
|                     |    | 1210              | 1215 | –                 | –                | –   | 1207              | 142 | 8   |
|                     | 6  | 1176              | –    | 1174              | 152              | 2   | 1185              | 46  | 23  |
|                     | 7  | 1176              | –    | 1167              | 240              | 1   | 1161              | 83  | 15  |
|                     | 8  | 1176              | –    | 1185              | 59               | 13  | –                 | –   | –   |
|                     |    | –                 | –    | –                 | –                | –   | 1225              | 81  | 109 |
|                     | 2' | 1181              | –    | 1173              | 82               | 4   | 1172              | 55  | 6   |
|                     | 3' | 1171              | 1210 | 1175              | 120              | 9   | 1171              | 96  | 5   |
|                     | 4' | –                 | –    | 1167              | 246              | 28  | 1169              | 202 | 27  |
|                     | 5' | 1171              | 1181 | 1193              | 56               | 4   | 1179              | 133 | 5   |
|                     | 6' | –                 | –    | –                 | –                | –   | 1383              | 67  | 43  |
|                     |    | 1159              | 1181 | 1172              | 55               | 6   | –                 | –   | –   |
| $\beta$             | 2  | –                 | –    | 1376              | 538              | 90  | 1409              | 341 | 12  |
|                     |    | –                 | –    | 1283              | 175 <sup>3</sup> | 117 | 1283 <sup>2</sup> | 77  | 24  |
|                     |    | –                 | –    | 1220              | 27               | 25  | 1215 <sup>2</sup> | 198 | 43  |
|                     | 5  | 1460              | –    | 1455              | 137              | 33  | 1446              | 139 | 4   |
|                     |    | 1387              | 1404 | 1392              | 117              | 37  | 1352 <sup>2</sup> | 173 | 11  |
|                     |    | 1280              | –    | 1280              | 117              | 149 | 1282              | 147 | 88  |
|                     |    | 1239              | –    | 1237              | 213              | 39  | 1268              | 35  | 156 |
|                     | 6  | 1504              | 1490 | 1478              | 155              | 2   | 1478              | 239 | 4   |
|                     |    | 1460              | –    | 1451              | 219              | 6   | 1451              | 29  | 2   |
|                     |    | 1256              | –    | –                 | –                | –   | 1277              | 133 | 5   |
|                     |    | 1185              | –    | 1219              | 139              | 52  | –                 | –   | –   |
|                     | 7  | 1290              | 1286 | 1284 <sup>2</sup> | 98               | 121 | 1322 <sup>2</sup> | 167 | 64  |
|                     |    | 1185              | 1193 | 1197              | 8                | 43  | 1191              | 256 | 25  |
|                     | 8  | 1280              | 1262 | 1282              | 144              | 55  | 1262              | 261 | 24  |
|                     |    | –                 | 1226 | 1218              | 182              | 94  | 1192              | 90  | 34  |
|                     | 2' | 1223              | 1226 | 1219              | 100              | 14  | 1219              | 63  | 60  |
|                     | 3' | 1323              | 1331 | 1309 <sup>2</sup> | 62               | 52  | 1295              | 191 | 6   |
|                     |    | 1267              | 1278 | 1285              | 173              | 64  | 1285              | 121 | 68  |
|                     | 4' | 1182              | 1210 | 1159              | 36               | 5   | 1158              | 118 | 13  |
|                     | 5' | 1458              | 1460 | 1454              | 20               | 3   | 1438              | 121 | 3   |
|                     |    | 1316              | 1331 | 1292 <sup>2</sup> | 314              | 54  | 1289 <sup>2</sup> | 155 | 57  |
|                     | 6' | 1500              | 1504 | 1460 <sup>2</sup> | 142              | 12  | 1458 <sup>2</sup> | 31  | 9   |
|                     |    | 1380              | 1387 | 1343              | 142              | 2   | 1345              | 64  | 5   |
|                     |    | 1223              | 1226 | 1199              | 9                | 40  | 1206              | 71  | 122 |

В табл. 4 сопоставлены результаты квантово-химических расчетов деформационных колебаний связей О-Н и С-Н в моногидроксиизофла-

вонах с экспериментальными данными по подобным колебаниям для моногидроксифлавонов и дизамещенных бензолах. При этом ограничи-



лись полосами высокой интенсивности, позволяющими использовать их в качестве признаков спектроскопической идентификации конформеров позиционных таутомеров соединения.

Следует отметить, что разделение указанных деформационных колебаний на две группы является условным. Факт делокализации по форме общеизвестен, как и спектральный диапазон, в котором располагаются соответствующие полосы. Приведенные в первой половине табл. 4 характеристики полос отнесены все же к деформационным колебаниям связей О-Н гидроксильных групп по наибольшей форме колебаний. Прослеживаемая закономерность в смещении полос в коротковолновый диапазон при наличии внутримолекулярного взаимодействия - водородной связи, также является подтверждением достоверности результатов в представленных квантовых расчетах спектра фундаментальных колебаний позиционных таутомеров моногидроксиизофлавонов. Аналогичная тенденция имеет место в случае флавоноидов [5–11] и спиназаринов [14, 15].

Характеристичность деформационных колебаний связей С-Н по частоте демонстрируется в нижней половине табл. 4. Это касается как смещения полос в конформерах, так и наличия малых энергетических щелей между ними, что помечено индексами как дублеты и триплеты.

Из рассмотрения исключены валентные и деформационные колебания шестичленных циклических фрагментов молекул (бензольного и бициклического). Шесть полос валентных колебаний углерод-углеродных связей и валентного колебания связи С=О проявляются в диапазоне 1660–1560  $\text{см}^{-1}$ . Энергетические щели между ними не превышают величины  $\sim 20 \text{ см}^{-1}$ . Полосы интенсивны как в ИК, так и КР спектрах. Их использование в задачах спектроскопической идентификации моногидроксиизофлавонов затруднительно.

Общей закономерностью для флавоноидов и изофлавоноидов является низкая интенсивность полос в ИК и КР спектрах, отнесенных к неплоским колебаниям связей С-Н (диапазон 1000–700  $\text{см}^{-1}$ ), крутильным колебаниям углерод-углеродных связей шестичленных циклических фрагментов (ниже 600  $\text{см}^{-1}$ ) и колебаниям валентных углов шестичленных циклов (интервал 700–500  $\text{см}^{-1}$ ). Для задач спектроскопической идентификации флавоноидов и изофлавоноидов указанные полосы интереса не представляют.

Вычислительный эксперимент был осуществлен в рамках информационной технологии, описанной в публикации [19].

### Заключение

Представленные результаты квантовохимических расчетов дают основание сделать вывод о возможности использовать метод теории функционала плотности в предсказательных расчетах структуры и колебательных спектров флавоноидов и изофлавоноидов, а также для выявления признаков спектроскопической идентификации конформеров позиционных таутомеров названных веществ. Подтверждение достоверности оценок является согласие полученных данных численных экспериментов с имеющимися данными лабораторных экспериментов - спектрами инфракрасного поглощения и комбинационного рассеяния. Отмечены общие закономерности в поведении спектральных полос бензольного и бициклического фрагмента молекул соединений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тараховский Ю.С., Ким Ю.А., Абдраимов Б.С., Музафаров Е.Н. Флавоноиды: биохимия, биофизика, медицина. Пушино: Synchrobook. – 2013. – 310 с.
2. Teslova T., Corredor Ch., Livingston R., Spataru T., Birke R.L., Lombardi J.R., Cañamares M.V., Leona M. Raman and surface-enhanced Raman spectra of flavone and several hydroxy derivatives // J. Raman Spectroscopy. 2007. Vol. 38, № 7. P. 802-818.
3. Vavra A., Linder R., Kleinermanns K. Gas phase infrared spectra of flavone and its derivatives // Chemical Physics Letters. 2008. Vol. 463, № 4-6. P. 349-352.
4. Cañamares M.V., Lombardi J.R., Leon M. Raman and surface enhanced Raman spectra of 7-hydroxy flavone and 3',4'-dihydroxy flavone // Morana. 2009. Vol. 6. P. 81-88.
5. Heneczowski M., Kopacz M., Nowak D., Kuźniar A. Infrared spectrum analysis of some flavonoids // Acta Polonica Pharmaceutica - Drug Research. 2001. Vol. 58, № 6. P. 415-420.
6. Элькин М.Д., Гайсина А.Р., Степанович Е.Ю., Шагаутдинова И.Т. Структурно-динамические модели флавоноидов. Моногидроксифлавоны // Естественные науки. – 2012. – № 4 (41). – С. 133–140.
7. Элькин М.Д., Гайсина А.Р., Джалмухамбетова Е.А., Смирнов В.В., Степанович Е.Ю., Шагаутдинова И.Т. Структурно-динамические модели кризина // Естественные науки. – 2013. – № 1 (42). – С. 105–111.
8. Элькин М.Д., Гайсина А.Р., Джалмухамбетова Е.А., Смирнов В.В., Степанович Е.Ю., Шагаутдинова И.Т. Моделирование структуры и спектров конформеров 3',4'-дигидроксифлавонов // Естественные науки. – 2013. – № 1 (42). – С. 111–118.
9. Элькин М.Д., Панкратов А.Н., Гайсина А.Р. Структурно-динамические модели и спектроскопическая идентификация флавоноидов // Изв. Саратовск. Ун-та. Новая серия. – 2014, Т. 14. – Серия: Химия, Биология, Экология. – Вып. 2. – С. 18–26.

10. Элькин М.Д., Шагаутдинова И.Т., Лихтер А.М., Гречухина О.Н. Моделирование структуры и колебательных спектров лютеалина (5,7,3',4'-тетрагидроксифлавонола) // Естественные науки. – 2014. – № 2 (47). – С. 86–93.
11. Шагаутдинова И.Т., Элькин М.Д., Лихтер А.М., Березин В.И. Интерпретация колебательных спектров морина // Материалы международной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике SFM-2013. – Саратов: Новый ветер, 2013. – С. 174–178.
12. Machado N.F.L., Batista de Carvalho L.A.E., Otero J.C., Marques M.P.M. A conformational study of hydroxylated isoflavones by vibrational spectroscopy coupled with DFT calculations // Vibrational Spectroscopy. – 2013. – Vol. 68. – P. 257–265.
13. Frisch M.J., Trucks G.W., Schlegel H.B. and Gaussian 03, Revision B.03. Gaussian, Inc., Pittsburgh, PA, 2003.
14. Эрман Е.А., Элькин П.М. Компьютерное моделирование внутримолекулярного взаимодействия в эхинохроме // Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. Сер. Актуальные проблемы управления, выч. техники и информатики в техн. системах. – 2010. – № 6(66), вып. 8. – С. 41–46.
15. Элькин М. Д., Джалмухамбетова Е.А., Гордеев И.И. Компьютерное моделирование геометрической структуры и колебательных состояний спиназарина // Прикаспийский журнал: высокие технологии и управление. – 2009. – № 3 (7). – С. 48–54.
16. Элькин М.Д., Джалмухамбетова Е.А., Гайсина А.Р. Моделирование колебательных состояний гидроксизамещенных фенола // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2011. – № 2 (14). – С. 55–61.
17. Raja G, Saravanan K., Sivakumar S. Structure and Vibrational Spectroscopic Studies of 1-Naphthol: Density Functional Theory Calculations // Int. J. Appl. Bioeng. – 2013. – Vol. 7, № 1. – P. 45–56.
18. Пулин В.Ф., Элькин П.М., Эрман М.А. Моделирование адиабатических потенциалов гидроксизамещенных бензола // Вест. Саратов. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 3 (37). – С. 91–95.
19. Эрман Е.А., Элькин П.М., Стефанова Г.П., Равчеева Н.А. Программно-алгоритмическая поддержка задач молекулярного моделирования // Известия Волгоградского гос. техн. ун-та. Сер. Актуальные проблемы управления, выч. техники и информатики в техн. системах. – 2012. – № 10 (97), вып. 14. – С. 63–67.
20. Erdoğan Y., Ünsalan O., Güllüoğlu M.T. Vibrational Analysis of Flavone // Turk J. Phys. 2009. – Vol. 33, № 5. – P. 249–260.

УДК 519.61

*А. Г. Яновский, Т. А. Яновский*

# О ПРОТИВОПОСТАВЛЕНИИ КВАЗИНЬЮТОНОВСКИХ МЕТОДОВ, ОПЕРИРУЮЩИХ АППРОКСИМАЦИЯМИ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ МАТРИЦЫ ГЕССЕ

Волгоградский государственный университет  
Волгоградский государственный технический университет  
janovsky@yandex.ru

В статье рассмотрены важные квазиньютоновские формулы переоценки аппроксимаций матрицы Гессе и обратной к ней, в том числе BFGS и DFP. Раскрыта относительная природа различий между ними. Сделан вывод об искусственности противопоставления аппроксимаций прямой и обратной матрицы Гессе в данном контексте.

*Ключевые слова:* численная оптимизация, квазиньютоновский метод, матрица Гессе, аппроксимация матрицы Гессе.

*T. A. Janovsky, A. G. Janovsky*

# ABOUT THE OPPOSITION OF QUASI-NEWTON METHODS, WHICH OPERATES WITH APPROXIMATION OF DIRECT AND INVERSE HESSIAN MATRIX

Volgograd Technical State University  
Volgograd State University

The important quasi-Newton formulas for revaluation of Hessian matrix and inverse Hessian matrix approximations, including BFGS and DFP, are considered in this paper. The relative nature of distinctions between them is discovered. The conclusion on artificiality of Hessian matrix and inverse Hessian matrix approximations opposition in this context is drawn.

*Keywords:* numerical optimization, quasi-Newton method, Hessian matrix, Hessian matrix approximation.

В последние годы наблюдается относительно небольшой, но стабильный интерес к квазиньютоновским методам, обусловленный усилиями решить три центральные проблемы современной оптимизации: задачи большой размерности, условная оптимизация и методы

«доверительных областей» (trust region methods). Здесь можно отметить работы Носедала, Берда, Хансена, Сингера, Райта [1, 2], Конна, Гоулда, Тойнта [3], Берда, Чина, Нивейта и Носедала [4], Гоулда, Лейффера [5], Яновских А. и Т. [6]

Как известно, эффективность ньютоновских методов обусловлена учетом информации о кривизне целевой функции  $F(X)$ , содержащейся в матрице Гессе  $H(X)$ . Квазиньютоновская теория использует аппроксимацию кривизны нелинейной функции без явного формирования ее матрицы Гессе.

Фундаментом квазиньютоновской оптимизации является вытекающая из разложения градиента в ряд Тейлора в окрестности точки  $X^k$

$$\nabla F(X^k + S^k) = \nabla F(X^k) + H_k S^k + \dots \quad (1)$$

линейная оценка кривизны целевой функции  $F(X)$

$$\langle H_k S^k, S^k \rangle \approx \langle \nabla F(X^k + S^k) - \nabla F(X^k), S^k \rangle. \quad (2)$$

При известной аппроксимации  $\hat{H}_k$  матрицы Гессе, накопившей на предыдущих итерациях информацию о кривизне  $F(X)$ , на  $k$ -й итерации поиска направление  $P^k$  определяется в виде

$$\hat{H}_k P^k = -\nabla F(X^k). \quad (3)$$

После оценивания точки  $X^{k+1} (= X^k + \alpha_k P^k)$   $\hat{H}_k$  пополняется информацией о кривизне  $F(X)$  посредством рекуррентной формулы

$$\hat{H}_{k+1} = \hat{H}_k + \Delta \hat{H}_k, \quad (4)$$

где  $\Delta \hat{H}_k$  – некоторая поправочная матрица. Положив

$$\begin{aligned} S^k &\equiv X^{k+1} - X^k \equiv \alpha_k P^k, \\ Y^k &\equiv \nabla F(X^{k+1}) - \nabla F(X^k). \end{aligned} \quad (5)$$

основное квазиньютоновское условие (2) можно представить в виде

$$\hat{H}_{k+1} S^k = Y^k. \quad (6)$$

Матрица Гессе симметрична по определению, поэтому должны быть симметричными и ее квазиньютоновские аппроксимации. Для поправок ранга 1 это требование приводит к симметричной формуле ранга 1 (SR1-формула) [7]

$$\hat{H}_{k+1} = \hat{H}_k + \frac{(Y^k - \hat{H}_k S^k) \langle (Y^k - \hat{H}_k S^k), S^k \rangle}{\langle Y^k - \hat{H}_k S^k, S^k \rangle}, \quad (7)$$

где вектор  $Y^k - \hat{H}_k S^k$  и скаляр  $\langle Y^k - \hat{H}_k S^k, S^k \rangle$  считаются ненулевыми. Другие «симметричные» формулы получаются при помощи поправок ранга 2, что приводит к общей формуле пересчета [8, с. 163; 9, с. 253]

$$\begin{aligned} \hat{H}_{k+1} = \hat{H}_k + & \frac{(Y^k - \hat{H}_k S^k) \langle V + V \rangle \langle (Y^k - \hat{H}_k S^k) - \\ & - \frac{\langle Y^k - \hat{H}_k S^k, S^k \rangle}{\langle V, S^k \rangle^2} V \rangle \langle V, \end{aligned} \quad (8)$$

В класс формул (8) при  $V = Y^k - \hat{H}_k S^k$  входит и SR1-формула. При  $V = S^k$ , получается формула Пауэлла-Бройдена (PSB-формула) [10]. Еще одна симметричная формула следует из (8) при  $V = Y^k$ . По мнению Гилла и др. [8, с. 163], «...она называется формулой Давидона-Флетчера-Пауэлла (DFP-формула) и выглядит следующим образом»:

$$\begin{aligned} \hat{H}_{k+1} = \hat{H}_k - & \frac{\hat{H}_k S^k \langle \hat{H}_k S^k}{\langle S^k, \hat{H}_k S^k \rangle} + \frac{Y^k \langle Y^k}{\langle Y^k, S^k \rangle} + \\ & + \langle S^k, \hat{H}_k S^k \rangle \langle W^k \rangle \langle W^k \rangle, \quad (9) \\ W^k = & \frac{Y^k}{\langle Y^k, S^k \rangle} - \frac{\hat{H}_k S^k}{\langle S^k, \hat{H}_k S^k \rangle}. \end{aligned}$$

Прямой подстановкой легко проверить, что  $W^k \perp S^k$ . Поэтому добавление к  $\hat{H}_{k+1}$  матрицы ранга 1, кратной  $W^k \langle W^k$ , не нарушает ни условие (6), ни симметрию и позволяет получить однопараметрическое семейство формул рекуррентного переоценивания вида

$$\begin{aligned} \hat{H}_{k+1}^\varphi = \hat{H}_k^\varphi - & \frac{\hat{H}_k^\varphi S^k \langle \hat{H}_k^\varphi S^k}{\langle S^k, \hat{H}_k^\varphi S^k \rangle} + \frac{Y^k \langle Y^k}{\langle Y^k, S^k \rangle} + \\ & + \varphi_k \langle S^k, \hat{H}_k^\varphi S^k \rangle \langle W^k \rangle \langle W^k \rangle, \quad (10) \end{aligned}$$

где скалярный параметр  $\varphi_k$  может зависеть от  $Y^k$  и  $\hat{H}_k^\varphi S^k$ .

Согласно результатам теоретических исследований [11, 12] наиболее эффективная в классе (10) формула получается при  $\varphi_k = 0$ . Это известная формула Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно (BFGS) [13, 14, 15, 16], созданная в 1970 г.:

$$\hat{H}_{k+1} = \hat{H}_k - \frac{\hat{H}_k S^k \langle \hat{H}_k S^k}{\langle S^k, \hat{H}_k S^k \rangle} + \frac{Y^k \langle Y^k}{\langle Y^k, S^k \rangle}. \quad (11)$$

Таковы общие теоретические рассуждения и выкладки, лежащие в основе важнейших квазиньютоновских формул, использующих «прямые» аппроксимации  $\hat{H}_k$  матрицы Гессе.

Рассматривая же вопрос в ретроспективе, следует отметить, что проблему оценивания направления  $P^k$  авторы первых квазиньютоновских методов [7, 17, 18, 19] решали, оперируя аппроксимациями обратной матрицы Гессе.

При этом, согласно (3)

$$P^k = -H_k^{-1} \nabla F(X^k), \quad (12)$$

а квазиньютоновское условие (6) приобретает вид

$$H_{k+1}^{-1} Y^k = S^k. \quad (13)$$

Самый первый квазиньютоновский метод, разработанный Давидоном, был им назван методом переменной метрики потому, что это по мнению Давидона, отражало переменный, зависящий от номера итерации  $k$ , характер матрицы-метрики  $\hat{H}_k^{-1}$ . Этот метод был “доведен” Флетчером, Пауэллом [18] и получил широкое признание и имя – DFP. В нем переоценка матрицы  $\hat{H}_k^{-1}$  выполняется согласно формуле

$$\begin{aligned} \hat{H}_{k+1}^{-1} &= \hat{H}_k^{-1} + A_k - B_k = \\ &= \hat{H}_k^{-1} + \frac{S^k \langle S^k \rangle}{\langle S^k, Y^k \rangle} - \frac{\hat{H}_k^{-1} Y^k \langle \hat{H}_k^{-1} Y^k \rangle}{\langle Y^k, \hat{H}_k^{-1} Y^k \rangle} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \Delta \hat{H}_k^{-1}(W) &= \frac{1}{\langle Y^k, W^{-1} Y^k \rangle} \left[ S^k \langle W^{-1} Y^k + W^{-1} Y^k \rangle \langle S^k - \langle \hat{H}_k^{-1} Y^k, W^{-1} Y^k \rangle - \right. \\ &\quad \left. - \langle W^{-1} Y^k, \hat{H}_k^{-1} Y^k \rangle - \frac{[\langle Y^k, S^k \rangle - \langle Y^k, \hat{H}_k^{-1} Y^k \rangle]}{\langle Y^k, W^{-1} Y^k \rangle} W^{-1} Y^k \langle W^{-1} Y^k \rangle \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

Это общее решение анализировалось как самим Гринстадом, так и рядом исследователей, например, Гольдфарбом [15]. Рассматривались варианты выбора  $W$ :  $W = I$ ,  $W = \hat{H}_k^{-1}$  и  $W = \hat{H}_{k+1}^{-1}$ , среди которых случаи  $W = I$  и

так, чтобы для квадратичной целевой функции после  $n$  шагов она равнялась  $H^{-1}$ . На старте обычно выбирается  $\hat{H}_0^{-1} = I$ , при этом  $P^0$  есть направление наискорейшего спуска; при поиске происходит пошаговый переход к ньютоновскому направлению.

Первые варианты методов переоценивания  $\hat{H}_k^{-1}$  появились в 1959–1963 гг. Несколько позднее – в конце 60-х годов, появились формулы переоценивания матриц  $\hat{H}_k$ . Однако обобщение было произведено практически в одно время – в 1970 г. Именно тогда Гринстадт [20] поставил и решил для симметричной поправочной матрицы  $\Delta \hat{H}_k^{-1}$  следующую весьма общую задачу:

$$\text{минимизировать } \|\Delta \hat{H}_k^{-1}(W)\|, \quad (15)$$

$$\text{при } \|\Delta \hat{H}_k^{-1}(W)\| = \text{tr}[W \Delta \hat{H}_k^{-1} W (\Delta \hat{H}_k^{-1})^T], \quad (16)$$

$$\hat{H}_{k+1}^{-1} Y^k = S^k, \quad (17)$$

полагая также, что  $W$  – положительно определенная симметричная матрица.

Соответствующее решение имело вид

$W = \hat{H}_k^{-1}$  анализировались Гринстадом, а  $W = \hat{H}_k^{-1}$  и  $W = \hat{H}_{k+1}^{-1}$  – Гольдфарбом.

Рассмотрим случай  $W = I$ . Прямой подстановкой  $W = I$  в (18) получим

$$\begin{aligned} \Delta \hat{H}_k^{-1}(I) &= \frac{1}{\langle Y^k, Y^k \rangle} \left[ S^k \langle Y^k + Y^k \rangle \langle S^k - \langle \hat{H}_k^{-1} Y^k, Y^k \rangle - \langle Y^k, \hat{H}_k^{-1} Y^k \rangle - \right. \\ &\quad \left. - \frac{1}{\langle Y^k, Y^k \rangle} [\langle Y^k, S^k \rangle - \langle Y^k, \hat{H}_k^{-1} Y^k \rangle] Y^k \langle Y^k \rangle \right] = \\ &= \frac{(S^k - \hat{H}_k^{-1} Y^k) \langle Y^k + Y^k \rangle \langle (S^k - \hat{H}_k^{-1} Y^k) \rangle}{\langle Y^k, Y^k \rangle} - \frac{\langle S^k - \hat{H}_k^{-1} Y^k, Y^k \rangle}{\langle Y^k, Y^k \rangle^2} Y^k \langle Y^k \rangle. \end{aligned} \quad (19)$$

Следовательно, поправочная матрица  $\Delta \hat{H}_k^{-1}$  равна

$$\frac{(S^k - \hat{H}_k^{-1} Y^k) \langle Y^k + Y^k \rangle \langle (S^k - \hat{H}_k^{-1} Y^k) \rangle}{\langle Y^k, Y^k \rangle} - \frac{\langle S^k - \hat{H}_k^{-1} Y^k, Y^k \rangle}{\langle Y^k, Y^k \rangle^2} Y^k \langle Y^k \rangle. \quad (20)$$

Вернемся к «прямым» матрицам  $\hat{H}_k$  и симметризованному обобщению (8) для случая  $V^k = S^k$ , что приводит к поправочной матрице PSB-формулы

$$\frac{(Y^k - \hat{H}_k S^k) \langle S^k + S^k \rangle \langle (Y^k - \hat{H}_k S^k) \rangle}{\langle S^k, S^k \rangle} - \frac{\langle Y^k - \hat{H}_k S^k, S^k \rangle}{\langle S^k, S^k \rangle^2} S^k \langle S^k \rangle. \quad (21)$$

Сопоставляя пары выражений  $\{(6); (21)\}$  и  $\{(17); (20)\}$ , отражающих рекуррентное переоценивание прямых  $\hat{H}_k$  и обратных  $\hat{H}_k^{-1}$  матриц, видим, что соответствующие элементы пар зеркально отражают друг друга при взаимозамене как векторов  $Y^k$  и  $S^k$ , так и матриц  $\hat{H}_k$  и  $\hat{H}_k^{-1}$ .

Действительно, рассмотрим выражение (21) для переоценивания прямых матриц  $\hat{H}_{k+1}$  и соответствующее квазиньютоновское условие (6). Формально заменив  $Y^k \Leftrightarrow S^k$  и не переобозначая  $\hat{H}_k$ , получим для  $\Delta \hat{H}_k^{-1}$

$$\frac{(S^k - \hat{H}_k Y^k) \langle Y^k + Y^k \rangle \langle (S^k - \hat{H}_k Y^k) \rangle}{\langle Y^k, Y^k \rangle} - \frac{\langle S^k - \hat{H}_k Y^k, Y^k \rangle}{\langle Y^k, Y^k \rangle^2} Y^k \langle Y^k \rangle. \quad (22)$$

Сопоставление формул (22) и (20), а также (6) и (17) показывает, что они идентичны, но только при условии, что наряду с переобозначением  $Y^k \Leftrightarrow S^k$ , следует также переобозначить и матрицу  $\hat{H}_k$  на  $\hat{H}_k^{-1}$ , т. е. окончательно из (22) имеем для  $\Delta \hat{H}_k^{-1}$

$$\frac{(S^k - \hat{H}_k^{-1} Y^k) \langle Y^k + Y^k \rangle \langle (S^k - \hat{H}_k^{-1} Y^k) \rangle}{\langle Y^k, Y^k \rangle} - \frac{\langle S^k - \hat{H}_k^{-1} Y^k, Y^k \rangle}{\langle Y^k, Y^k \rangle^2} Y^k \langle Y^k \rangle. \quad (23)$$

Таким образом, используя обозначения (5) и квазиньютоновское условие (6), получим формулы переоценивания для прямых матриц  $\hat{H}_{k+1}$ , а сделав в них переобозначения  $Y^k \Leftrightarrow S^k$  и  $\hat{H}_k \Rightarrow \hat{H}_k^{-1}$ , получим и взаимодополняющие формулы переоценивания для обратных матриц  $\hat{H}_{k+1}^{-1}$ .

Из этих результатов вытекают, как минимум, три следствия:

1. все результаты, полученные для матриц  $\hat{H}_k$  при соответствующих определенных выше заменах имеют полные аналоги для матриц  $\hat{H}_k^{-1}$ . В частности, самоочевидно, что, как считается, лучшие на сегодня BFGS (11) и DFP (14) методы являются зеркальным (относительно взаимозамены исходных обозначений  $Y^k$  и  $S^k$  и рекуррентных аппроксимаций матриц  $\hat{H}_{k+1}$  и  $\hat{H}_{k+1}^{-1}$ ) отражением друг друга;

2. предпочтение, которое оказано Гиллом [8, с.167] формулам переоценивания на основе прямых матриц  $\hat{H}_k$  в связи с подчеркиваемыми достоинствами применения для них разложения Холецкого, не представляется убедительным, поскольку как матрица  $\hat{H}_k$ , так и матрица  $\hat{H}_k^{-1}$  являются симметричными и положительно определенными, а значит, разложение Холецкого может быть с тем же успехом применено и к  $\hat{H}_k^{-1}$ ;

3. противопоставление матриц  $\hat{H}_k$  и  $\hat{H}_k^{-1}$  выглядит искусственным, поскольку вопрос о том, какую из них считать прямой, а какую обратной, решается выбором системы обозначений, здесь (5). Но такой выбор может быть сделан и с точностью до наоборот – и все зеркально поменяется.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Nocedal J. and Wright S. J. (1999), Numerical optimization, Springer Verlag.
2. Byrd R., Hansen S., Nocedal J. & Singer Y. (2014), A Stochastic Quasi-Newton Method for Large-Scale Optimization. Technical report, arXiv:1401.7020 [math.OC]..
3. Conn A. R., Gould N. I. M. and Toint Ph. L. (1991), Convergence of quasi-Newton matrices generated by the Symmetric Rank One update, Math. Programming, 50, 177–196 (see also Math. Comp. 50 (1988) 399:430).
4. Byrd R., Chin G., Neveitt W. & Nocedal J. (2011), On the Use of Stochastic Hessian Information in Optimization Methods for Machine Learning. *SIAM J. Optim.*, 21(3):977–995.

5. Gould N.I.M., Leifffer S. An introduction to algorithms for nonlinear optimization. RAL-TR-2002-031. Computational Science and Engineering Department, Atlas Center, Rutherford Appleton Laboratory Oxfordshire OX11' OQX, December 17, 2002.
6. Яновский Т., Яновский А. Прикладная квазиньютоновская оптимизация высокой точности, LAP LAMBERT Academic Publishing, Саарбрюккен, 2011. – 292 с.: ил.
7. Broyden C. G. Quasi-Newton methods and their application to function minimization, Mathematics of Computation 21, 1967. 577:593.
8. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация – М.: Мир, 1985. – 509с., ил.
9. Дэnnис Дж., Шнабель Р. Численные методы безусловной оптимизации и решения нелинейных уравнений. – М.: Мир, 1988. – 440с., ил.
10. Broyden C. G. (1969) A new double-rank minimization algorithm, AMS Notices 16, 670.
11. Fletcher R. Practical Optimization, John Wiley & Sons, New York, 1987.
12. Schnabel R.B. Convergence of quasi-Newton updates to correct derivative values, 1982.
13. Broyden G. G., The Convergence of a Class of Double-Rank Minimization Algorithms, J. Inst Math. Appl., 6, 76-90, 222-231 (1970).
14. Fletcher R. (1970), A new approach to variable metric algorithms, Computer Journal 13, pp. 317-322.
15. Goldfarb D. (1970), A family of variable metric methods derived by variational means, Mathematics of Computation 24, pp, 23-26.
16. Shanno D. F. (1970), Conditioning of quasi-Newton methods for function minimization, Mathematics of Computation 24, pp. 647-657.
17. Davidon W.C. Variable metric methods for minimization, Argonne National Labs Report ANL-5990, 1959.
18. Fletcher R., Powell M. J. D., A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization, Computer J., 6, 163-168 (1963).
19. Pearson, J.D., Computer J., 13, 171(1969)
20. Greenstadt J.L. (1970), Variations on variable-metric methods, Mathematics of Computation 24, pp. 1–22.

# СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.932.2

*А. В. Алексеев, В. Л. Розалиев, Ю. А. Орлова, С. А. Фоменков*

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ОКРАШИВАНИЕ ПОЛУТОНОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛИЗА СЦЕНЫ\*

Волгоградский государственный технический университет

alekseev.yeskela@gmail.com

Данная работа посвящена автоматизированному окрашиванию полутоновых изображений. В статье исследованы существующие решения, выявлены их достоинства и недостатки. Рассмотрены основные методы окрашивания полутоновых изображений, предложена двухэтапная методика автоматического окрашивания и описаны методы и алгоритмы.

*Ключевые слова:* окрашивание полутоновых изображений, распознавание образов, анализ сцены изображения, SURF.

*A. V. Alekseev, V. L. Rozaliev, Y. A. Orlova, S. A. Fomenkov*

## AUTOMATIZATION COLORIZE GRAYSCALE IMAGES BASED INTELLIGENT SCENE ANALYSIS

Volgograd State Technical University

This paper is devoted to automated colorize grayscale images. The article examines the existing solutions, identified their strengths and weaknesses. The basic methods of coloring grayscale images is proposed a two-stage technique of automatic coloring and describes methods and algorithms.

*Keywords:* colorize grayscale images; pattern recognition, intelligent scene analysis.

### 1. Введение

На данный момент существует большое количество самых разных полутоновых изображений: старые черно-белые фильмы, старые черно-белые фотографии, современная стилизация под них, большинство кадров, сделанных ночью, также лишены цвета, полутоновые изображения создаются для экономии занимаемого ими дискового пространства (актуально для передачи изображений через сеть интернет [3], особенно видеоряда). Часто возникает необходимость восстановить цвет изображений, который по описанным выше причинам отсутствует.

Проблема окрашивания полутоновых изображений на данный момент полностью не решена, это связано со многими сложностями: во-первых, при удалении цвета теряется информация, точно восстановить которую невозможно; во-вторых, необходимо понимать, что изобра-

жено на изображении, то есть необходимо решить задачу распознавания всех объектов, которая сейчас тоже не решена. Кроме того, полутоновое изображение занимает меньше дискового пространства, чем цветное, что позволяет при сохранении качества хранить больше информации [1].

На данный момент существуют различные подходы к окрашиванию полутоновых изображений, самый широко распространенный и качественный подход – ручное (с помощью графических редакторов) окрашивание, но у этого метода есть два больших недостатка: большие денежные и трудозатраты. Например, фильм (последовательность кадров, которые являются изображениями) «17 мгновений весны» был окрашен за три года, стоимость колоризации одной минуты составила 3000\$.

Особенностью данной работы является двухэтапная методика окрашивания с применением интеллектуального анализа сцены для решения задачи окрашивания полутоновых изображений.

\* Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 12-07-00270, 14-07-97016\_p\_поволжье\_a).

## 2. Анализ существующих решений окраски полутоновых изображений

Кроме ручного подхода окраски применяется так же промежуточный между ручным и полностью автоматизированным окрасиванием. Суть его состоит в том, что пользователь выделяет области на изображении и указывает их цвет, оттенки цвета определяются на основе яркости окрасиваемого изображения. Наиболее перспективным является автоматизированное окрасивание изображений. Суть этого подхода заключается в том, чтобы либо уменьшить, либо

вообще исключить вмешательство человека в процесс окрасивания. Существуют различные методы реализации, такие как окрасивание на основе регрессии гистограммы яркости, выбор типа изображения, окрасивание на основе выбранного цветного изображения и др.

На рис. 1 представлен процесс окрасивания полутоновых изображений существующими системами в нотации IDEF0 [10] (as is). На рис. 2 представлен процесс окрасивания полутоновых изображений разработанной системой в нотации IDEF0 (to be).

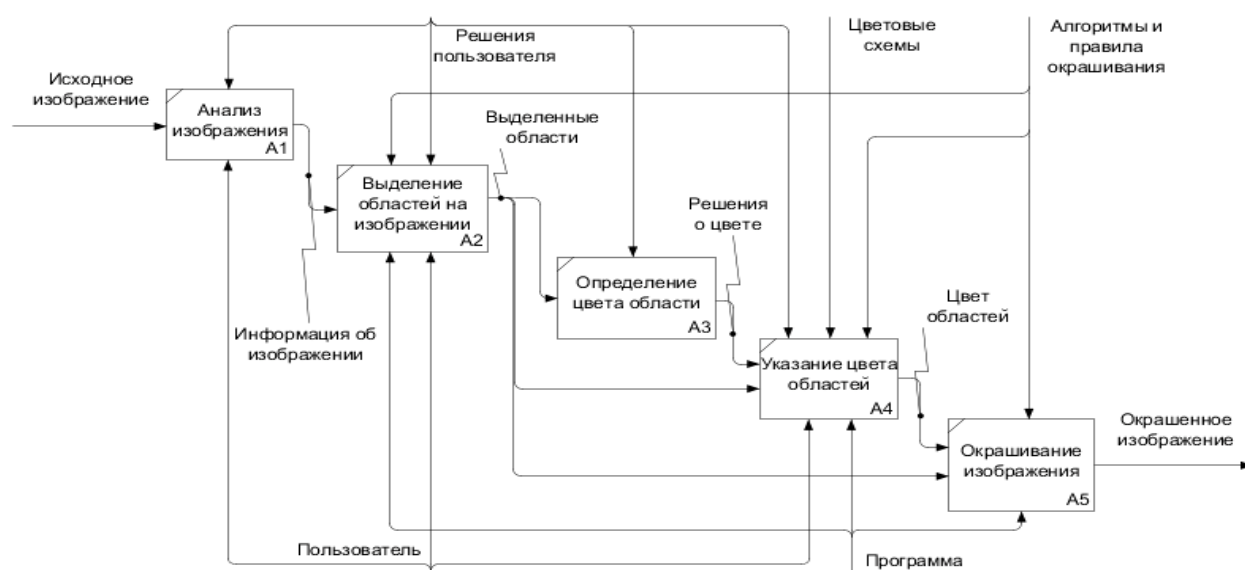


Рис. 1. Процесс окрасивания в нотации IDEF0 (as is)



Рис. 2. Процесс окрасивания в нотации IDEF0 (to be)



### 3. Методика окрашивания полутоновых изображений

На рис. 3 представлена методика окрашивания черно-белых изображений, она состоит из двух основных этапов:

а) Общее окрашивание. Изображение окраши-

вается на основе цветного изображения: из базы изображений или предложенного пользователем.

б) Окрашивания найденных объектов на изображении. Если на изображении есть объекты из базы объектов, они окрашиваются индивидуально.

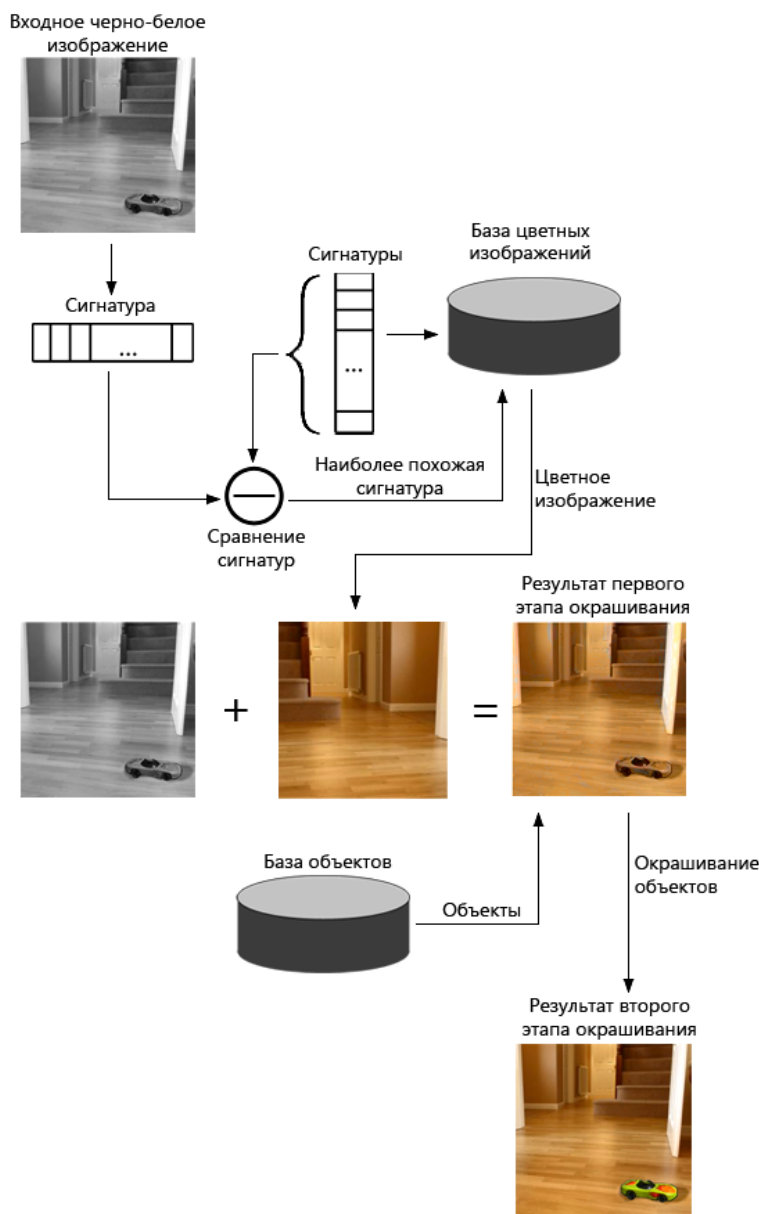


Рис. 3. Методика окрашивания

#### Первый этап окрашивания.

Окрашивание на основе цветного изображения источника реализовано с помощью модифицированного метода Уолша. Для повышения качества переноса цвета в исходном методе был изменен размер сетки. В итоге модифицированный метод выглядит следующим образом (рис. 4):

1. Канал 1 (модель lab) изображения-источника разбивается на 400 участков (сетка 20x20).

2. В каждом участке выбирается случайно один пиксель.

3. В его окрестности 5x5 вычисляется математическое ожидание и дисперсия.

4. Сравниваются мат. ожидание и дисперсия изображений

5. В случае близости значений цвет переносится на соответствующую окрестность с изображения-источника (каналы a и b).



Рис. 4. Модифицированный метод переноса цвета Велша

### Второй этап окрашивания

Второй этап окрашивания представляет собой интеллектуальную [2, 11] окраску извест-

ных системе объектов. Объекты на изображении будут локализоваться методом SURF, уточняться их границы будут с помощью поиска контуров и сравнения инвариантных Ну-моментов.

## 4. Разработанное программное обеспечение

### Архитектура программы для окрашивания полутонных изображений

Архитектура программы представлена на рис. 5, модули работы с базой данных изображений обеспечивают добавление, удаления и просмотр изображений базы данных. Модуль окрашивания фона изображения на основе определенного цветного изображения-источника цвета из БД изображений переносит цвет на целевое изображение модифицированным методом переноса цвета Уолша. Модуль окрашивания объектов выполняет поиск объектов на изображении и окрашивает их в случае наличия, используя полученное изображение с предварительно окрашенным фоном. На выходе модуля окрашивания изображений результат окрашивания [4].

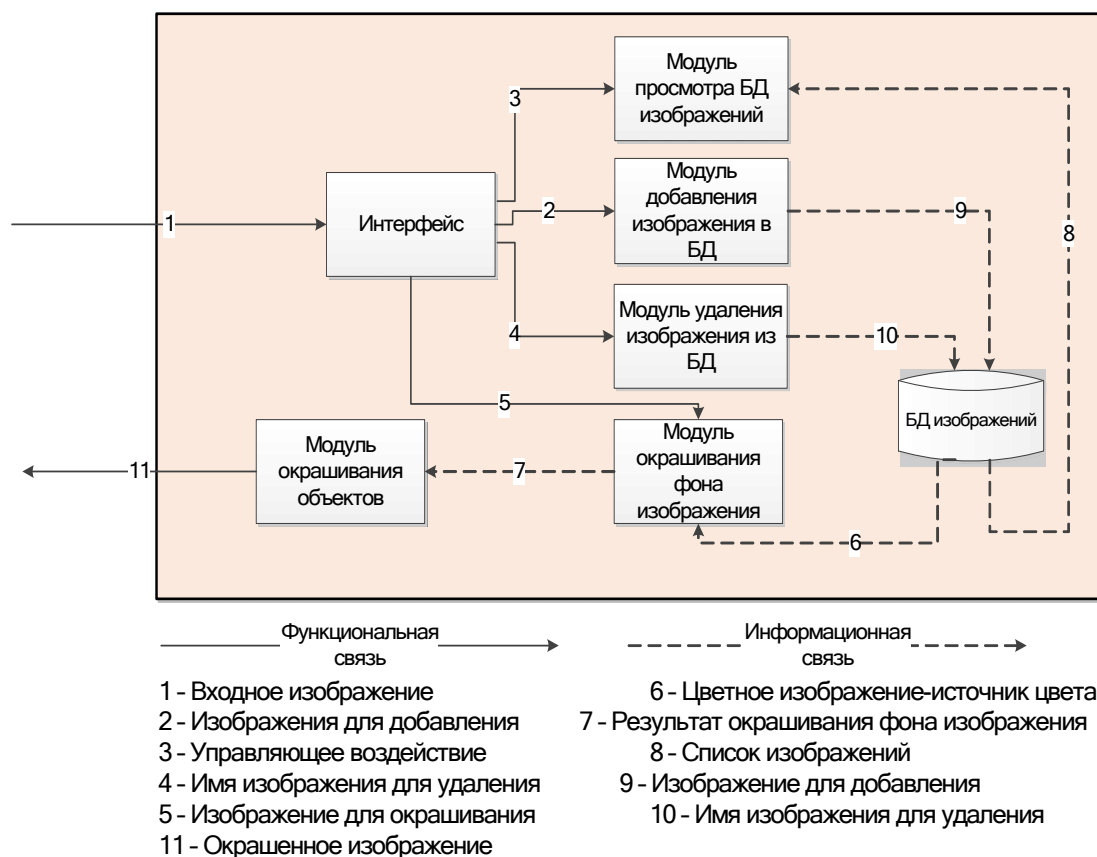


Рис. 5. Архитектура приложения

*Распараллеливание вычислений для увеличения производительности*

Первый этап окрашивания – окрашивание фона изображения очень хорошо укладывается в идеологию параллельных вычислений, по-пиксельный обход изображения представляет собой два цикла, один вложен в другой, резуль-

таты эксперимента представлены в таблице, в ней показано время выполнения последовательного кода и кода с использованием библиотеки многопоточных вычислений OpenMP [12].

Как видно из таблицы, распараллелив первый этап окрашивания, можно добиться ускорения в 2,5 раз.

**Распараллеливание вычислений**

| Размер изображения | Последовательный код, с |       | Код с использованием директив OpenMP, с |      | Ускорение, раз |
|--------------------|-------------------------|-------|-----------------------------------------|------|----------------|
| 360x270            | 2,61                    | 2,45  | 1,03                                    | 1,03 | 2,36           |
|                    | 2,41                    |       | 1,04                                    |      |                |
|                    | 2,40                    |       | 1,02                                    |      |                |
|                    | 2,39                    |       | 1,02                                    |      |                |
| 480x360            | 4,22                    | 4,12  | 1,68                                    | 1,65 | 2,50           |
|                    | 4,10                    |       | 1,64                                    |      |                |
|                    | 4,09                    |       | 1,66                                    |      |                |
|                    | 4,08                    |       | 1,63                                    |      |                |
| 720x540            | 9,06                    | 9,01  | 3,45                                    | 3,53 | 2,55           |
|                    | 8,99                    |       | 3,51                                    |      |                |
|                    | 8,99                    |       | 3,67                                    |      |                |
|                    | 9,00                    |       | 3,49                                    |      |                |
| 960x720            | 15,16                   | 15,18 | 5,66                                    | 5,70 | 2,66           |
|                    | 15,15                   |       | 5,75                                    |      |                |
|                    | 15,15                   |       | 5,69                                    |      |                |
|                    | 15,26                   |       | 5,70                                    |      |                |
| 1024x768           | 17,66                   | 17,61 | 6,57                                    | 6,55 | 2,69           |
|                    | 17,53                   |       | 6,53                                    |      |                |
|                    | 17,78                   |       | 6,52                                    |      |                |
|                    | 17,46                   |       | 6,58                                    |      |                |

*Ограничения, накладываемые на входные изображения*

Представленное ПО позволяет обрабатывать полутоновые изображения без ограничения размера (размер ограничивается возможностями ЭВМ) в форматах BMP, PNG и JPEG.

## 5. Результаты

В результате была разработана программа, позволяющая автоматизировано окрашивать полутоновые изображения на основе интеллектуального анализа сцены. Отличительной особенностью данной программы является окрашивание известных объектов на изображении, на

рис. 6 представлен результат окрашивания без учета этой особенности, такой же результат показывают ближайшие аналоги. На рис. 7 показан результат окрашивания с учетом окрашивания объектов. Для изображения 6 индекс SSIM равен 77,58 %, для изображения 7 индекс SSIM равен 79,6 %. Как видно, окрашивание одного небольшого объекта на изображении позволило повысить качество результата на 2,04%, соответственно это минимальный результат, при большем значении объектов на изображении качество будет увеличиваться. На рис. 8 представлены примеры окрашенных изображений и изображения-источники цвета.

Исходное изображение:



Полученное изображение:



Рис. 6. Окрашивание изображения без окрашивания объектов

Исходное изображение:



Полученное изображение:



Рис. 7. Окрашивания изображения с окрашиванием объектов

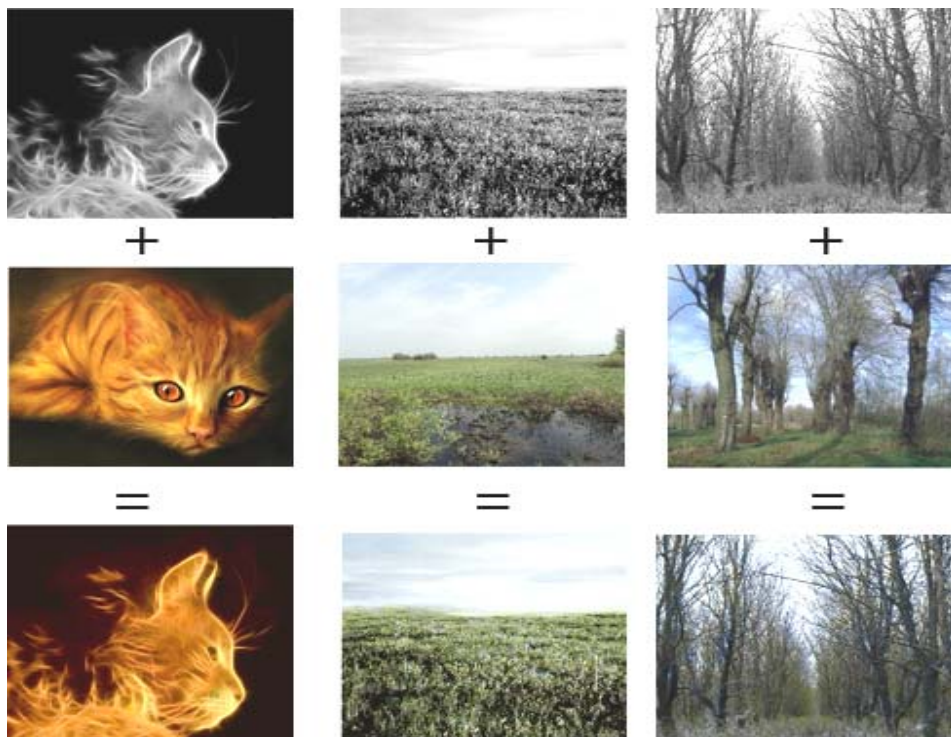


Рис. 8. Результаты окрашивания

## 6. Заключение

В данной работе рассмотрено такое направление компьютерной обработки изображений как окрашивания полутоновых изображений. Было показано, что окрашивание полутоновых изображений является актуальной нерешенной задачей.

Разработанная программа позволяет окрашивать изображение на основе автоматического выбора цветного изображения-источника цвета из базы данных, также пользователь может сам выбрать изображение, имеет возможность редактировать базу по средствам добавления и удаления изображений.

Отличительной важной особенностью является распознавание известных программе объектов на изображении, что повышает качество окрашивания.

Так как задача окрашивания полутоновых изображений не имеет единственного верного решения, и задача окрашивания полностью не решена, можно выделить следующие основные перспективы развития работы:

- а) улучшение алгоритма сравнения изображений или разработка принципиально другого механизм выбора цвета для изображения, не основанного на другом цветном изображении;
- б) разработка нового метода переноса цвета, корректно работающего на многоцветных изображениях;
- в) улучшенный интеллектуальный анализ сцены.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Алексеев, А. В.* Автоматизация определения шрифтов по изображению / Алексеев А. В., Розалиев В. Л. // Труды конгресса по интеллектуальным системам и информационным технологиям "IS&IT'12" (Дивноморское, Краснодарский край, 2-9 сент. 2012 г.). В 4 т. Т. 1 : тр. конф. "Интеллектуальные системы '12" и "Интеллектуальные САПР – 2012" / ЮФУ [и др.]. – М., 2012. – С. 292–293.
2. *Алексеев, А. В.* Интеллектуальный анализ сцены для окрашивания черно-белых изображений / Алексеев А. В., Шпирко А. А. // Открытые семантические технологии

проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2013) : матер. III междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 21-23 февр. 2013 г.) / УО "Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники", ГУ "Администрация Парка высоких технологий". – Минск, 2013. – С. 417-420.

3. *Алексеев, А. В.* Применение окрашивания полутоновых изображений для ускорения передачи видеопотока через сеть Интернет / Алексеев А.В., Орлова Ю.А., Розалиев В.Л. // Наука и образование в XXI веке : сб. науч. тр. по матер. междунар. заоч. науч.-практ. конф., Тамбов, 30 сент. 2013 г. В 34 ч. Ч. 12 / Консалтинговая компания Юком. – Тамбов, 2013. – С. 16–18.

4. *Заболеева-Зотова, А. В.* Автоматизация начальных этапов проектирования программного обеспечения / Заболеева-Зотова А.В., Орлова Ю.А. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 8 : междуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 6. – С. 121–124.

5. *Петров, М. Н.* Компьютерная графика: учебник для вузов / М. Н. Петров. – 3-е изд. (+CD). – СПб. : Питер, 2011. – 544 с. – ISBN 978-5-459-00809-8 : илл.

6. Раскраска черно-белых фотографий и замена цвета и цветных с помощью AKVIS Coloriage [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа: <http://akvis.com/ru/coloriage/index.php>.

7. Раскрашивание полутоновых изображений и черно-белых видеопленок «Кулибин» [Электронный ресурс]. – 2011. – Режим доступа: <http://kulibin.org/projects/show/1812>.

8. Colorize Black and White Photos using Recolored [Электронный ресурс]. – [2010]. – Режим доступа: <http://www.recolored.com>.

9. *Duda, R. и Hart, P.*, «Pattern Classification and Scene Analysis», изд. John Wiley and Sons, 1973, P. 271—272

10. Formalization of initial stage of designing multi-component software / Заболеева-Зотова А.В., Орлова Ю.А., Розалиев В.Л., Фоменков С.А., Петровский А.Б. // Multi Conference on Computer Science and Information Systems 2013 (Prague, Czech Republic, July 23-26, 2013) : Proceedings of the IADIS International Conference Intelligent Systems and Agents 2013 / IADIS (International Association for Development of the Information Society). – [Prague], 2013. – P. 107-111.

11. *Алексеев, А. В.* Automatization colorize grayscale images based intelligent scene analysis / Алексеев А.В., Розалиев В.Л., Орлова Ю.А. // 11th International Conference of Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies (PRIA-11-2013), Samara, September 23-28, 2013 : Conference Proceedings / Dorodnicyn Computing Centre of the RAS, Image Processing Systems Institute of the RAS [et al.]. – Samara, 2013. – Vol. I. – С. 151–154.

УДК 004.052+004.75

*И. В. Артамонов***ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ИНТЕРНЕТ-МАГАЗИНА  
С ПОМОЩЬЮ ОКРАШЕННЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ****Байкальский государственный университет экономики и права**

ivan.v.artamonov@gmail.com

Статья рассматривает схему организации заказа товара интернет-магазина как типовой пример распределенного B2B-взаимодействия. При проектировании и разработке таких веб-сайтов анализ надежности функционирования всей системы, как правило, не производится в виду сложности и трудоемкости операции. На базе описанного примера статья раскрывает процедуру анализа показателей надежности с помощью специального программного комплекса имитационного моделирования, в основе которого лежит идея представления системы в виде окрашенной сети Петри.

*Ключевые слова:* бизнес-транзакция, интернет-магазин, имитационное моделирование, надежность, окрашенная сеть Петри.

*I. V. Artamonov***USE OF COLOURED PETRI NETS FOR RELIABILITY  
ANALYSIS OF ONLINE STORE****Baikal National University of Economy and Law**

The paper examines a scheme of order service in web store as a typical example of distributed B2B-interaction. Designers and developers usually don't analyze such systems' reliability because of high complexity in this operation. The article uses the example and describes a procedure of reliability analysis with assistance of special simulation software. The software is based on idea of coloured Petri nets and CPN Tools as drawing tools.

*Keywords:* business transaction, online store, simulation, reliability, coloured Petri net.

В современном мире сеть интернет играет значительную роль в общественной жизни и экономике. Ежедневно создается и запускается множество веб-сайтов, большая часть которых направлена на предпринимательскую деятельность. В частности, особое распространение получили т.н. интернет-магазины – веб-сайты, которые принимают оплату безналичным способом и оказывают клиенту определенные услуги или высылают купленные товары. Интернет-магазины крайне редко существуют изолированно, часто они вынуждены пользоваться услугами посредников при приеме платежей, уведомлениях клиентов, логистике товаров или в иных целях. Каждый из участников этого взаимодействия представляет собой сложный комплекс аппаратно-программных средств и организационных ресурсов, действующих достаточно согласовано и представляющих независимую автоматизированную информационную систему. Вопросы надежности программных средств являются достаточно изученными, однако данная статья показывает возможности анализа надежности проектируемых взаимодействий нескольких распределенных участников, совместно выполняющих общую работу.

Рассмотрим схему бизнес-транзакции, протекающей в интернет-магазине при покупке то-

вара. Несмотря на то, что специфика технической реализации интернет-магазинов может отличаться, рассмотрим типовую схему, где выделим 6 участников: клиент или пользователь веб-сайта магазина, веб-сервер магазина, принимающий запросы от браузера, сервер баз данных интернет-магазина, СМС-шлюз, шлюз для приема платежей, внутренний сервер баз данных компании обеспечивает хранение и обработку данных, связанных с «оффлайновой» деятельностью компании, которой принадлежит интернет-магазин.

Описанная схема (см. рис. 1), является типовой и широкоиспользуемой при работе интернет-магазинов любого профиля. При проектировании и разработке подобных информационных систем много внимания уделяется вопросам маркетинга, логистики, эргономике интерфейса и скорости работы.

Между тем, схема включает минимально необходимое количество участников и описывает сложное, многоэтапное B2C-и B2B-взаимодействие нескольких независимых систем, каждая из которых принадлежит отдельной области управления. Как организационная и как техническая система клиент, платежная и смс-система, а также внутренний сервер баз данных компании выходят за пределы контроля и от-



ветственности интернет-магазина, хотя успешное выполнение бизнес-транзакции напрямую

зависит от работоспособности и выполнения своих обязательств каждого из них.

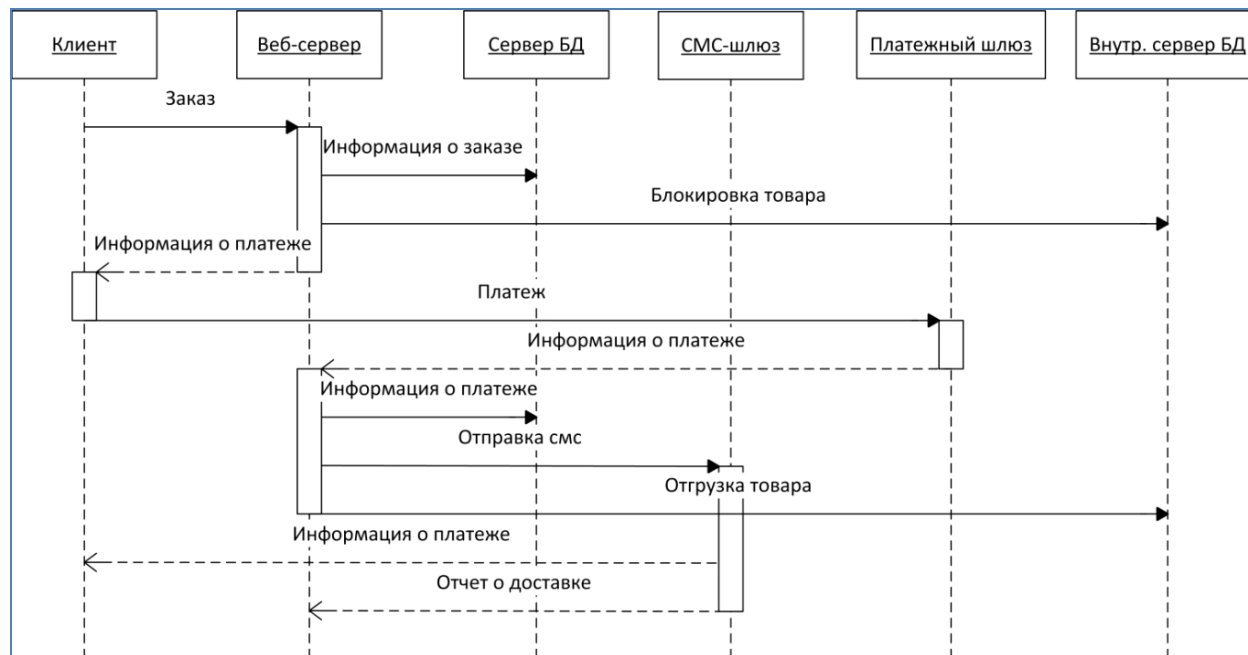


Рис. 1. Последовательность выполнения бизнес-транзакции

Несмотря на то, что параметры надежности функционирования каждого из участников априори известны разработчикам интернет-магазинов, расчеты надежности распределенной системы взаимодействия осуществляются только в процессе ее тестирования на финальных этапах разработки. Выявленные недостатки исправляются на этапах сопровождения и опытной эксплуатации системы, что негативно сказывается на успешности ее дальнейшего сопровождения и развития. Считается, что основные работы по обеспечению надежности любого разрабатываемого изделия должны проводиться на этапе его проектирования (обоснование этой позиции дано в [1], [2], [3], [4]).

Мы предлагаем новый способ анализа надежности бизнес-транзакций, не требующих специальных навыков, легкий в освоении и интерпретации результатов. Способ реализуется специальным программным комплексом (далее – ПК). В качестве языка моделирования бизнес-транзакции используется аппарат сетей Петри. В ([5], [6], [7]) приводятся аргументы, позволяющие считать сети Петри подходящим средством моделирования распределенных приложений. Математическое обоснование возможности использования аппарата окрашенных сетей Петри было нами дано в ([8], [9]), где также были определены следующие понятия: под

компенсирующей сетью будем понимать вспомогательную последовательность переходов сети Петри, позволяющую приводить сеть к одному из множества начальных состояний. То есть компенсирующая сеть позволяет проводить «откат» бизнес-транзакции. Под восстанавливающей сетью понимается такая последовательность переходов, которая заменяет один или несколько восстанавливаемых переходов и приводит сеть к такому же состоянию, которое она могла бы достигнуть, если бы восстанавливаемые переходы были запущены. Иными словами, восстанавливающая сеть реализует концепцию резервирования потенциально сбойной функции или элемента, однако предполагается, что эта функция (или элемент) может быть заменена цепочкой вызовов других функций, где вход и выход этой цепочки совпадает с входом и выходом зарезервированной функции.

Определим также понятия аварии и отказа. Под отказом понимается событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта. Под аварией понимается отказ, повлекший за собой невозможность дальнейшей работы системы при любых других условиях.

Методической основой оценки надежности является интерпретация бизнес-транзакции как сложной системы с тройственной природой: как бизнес-процесса, атомарной операции

и композиции взаимодействующих систем с выявлением таких статистических показателей надежности, которые учитывают природу и специфику бизнес-транзакции.

Приведем пример оценки надежности бизнес-транзакции интернет-магазина, функционирующего по описанной ранее схеме. Зададим требования к надежности проектируемой системы. Пусть необходимо достигнуть обеспечить успешное завершение 95 % бизнес-транзакций (без учета организационных факторов), а 99% бизнес-транзакций должны быть атомарными. При этом принимается, что каждая из функций, участвующая в деятельности транзакции, индивидуально надежна настолько, насколько это возможно в пределах существующего бюджета, поэтому ее резервирование или замена экономически и технически целесообразнее, чем дальнейшее внутреннее улучшение ее надежности.

В таблице приведена статистика успешных обращений к той или иной функции.

**Статистика надежности процессов интернет-магазина**

| Процесс                        | Вероятность успешного выполнения |
|--------------------------------|----------------------------------|
| Инициирование процедуры заказа | 99,7%                            |
| Решимость клиента к оплате     | 85,8%                            |
| Оплата через платежную систему | 99,9%                            |
| Отправка смс                   | 99,7%                            |
| Передача информации о платеже  | 99,2%                            |
| Отгрузка товара                | 94,1%                            |
| Передача отчета о доставке     | 99,1%                            |

Например, важным «моментом», влияющим на успешное выполнение бизнес-транзакции является готовность клиента к оплате товара после получения платежной информации. По статистике, около 14.2 % пользователей сайта отказываются производить платеж или прекращают взаимодействие с информационной системой из-за различных факторов, в основном эмоционально-психологических и неспособности провести оплату приемлемым способом.

Схема бизнес-транзакции на языке окрашенных сетей Петри (см. рис. 2) включает 8 переходов, которые олицетворяют выполняемые распределенной системой функции: «MakeOrder»

«Инициирование процедуры заказа», «Readyto pay» – «Решимость клиента к оплате», «Pay» – «Оплата через платежную систему», «Sendsms» – «Отправка смс», «Paymentismade» – «Передача информации о платеже», «Shipobject» – «Отгрузка товара», «Sendreport» – «Передача отчета о доставке». Схема предполагает обработку 50 случайных заказов, которые подаются на вход системы поочередно и далее конкурируют за ее ресурсы, выполняясь параллельно.

Для достижения статистически значимых результатов в оценке надежности понадобилось 1446 имитационных прогонов (по отчету ПК). Ввиду того, что схема взаимодействия участников не предполагает резервирования или иных подходов к обработке исключительных ситуаций, то любой отказ перехода приводит к аварии всей транзакции. В целом, результаты анализа надежности операций совпадают с заданными вероятностями отказа. Уровень общей атомарности достиг только значения 0,7305, что означает только 73 % успеха транзакции или безопасного ее отката. В среднем через каждые 3,8 успешных выполнений следует отказ. Проведем анализ возможностей повышения надежности выполняемой схемы.

Обратим внимание на процесс «Readyto pay». Его выполнение зависит от готовности клиента продолжить покупку. Этот процесс может быть улучшен методами маркетинга, построением эффективных взаимоотношений с клиентами, дизайном платежных приложений и т. д. Все это относится к мерам организационного характера и не может быть улучшено внесением изменений в архитектуру системы. Поэтому положим готовность клиента к покупке равной 100 %. Повторный эксперимент показал атомарность и вероятность безаварийной работы на уровне 0,8559.

Выявим процессы, оказывающие наибольшее влияние на надежность системы. Для этого проведем эксперимент в режиме анализа чувствительности системы к отказам отдельных функций. ПК оценивает влияние самостоятельно и предлагает экспертам самостоятельно оценивать корреляционные поля, показывающие соотношения между отказами отдельного процесса и отказами транзакции в целом. Например, было выявлено, что процесс отправки отчета о доставке смс «Sendreport» не оказывает влияние на успешность выполнения транзакции, но влияет на ее атомарность.



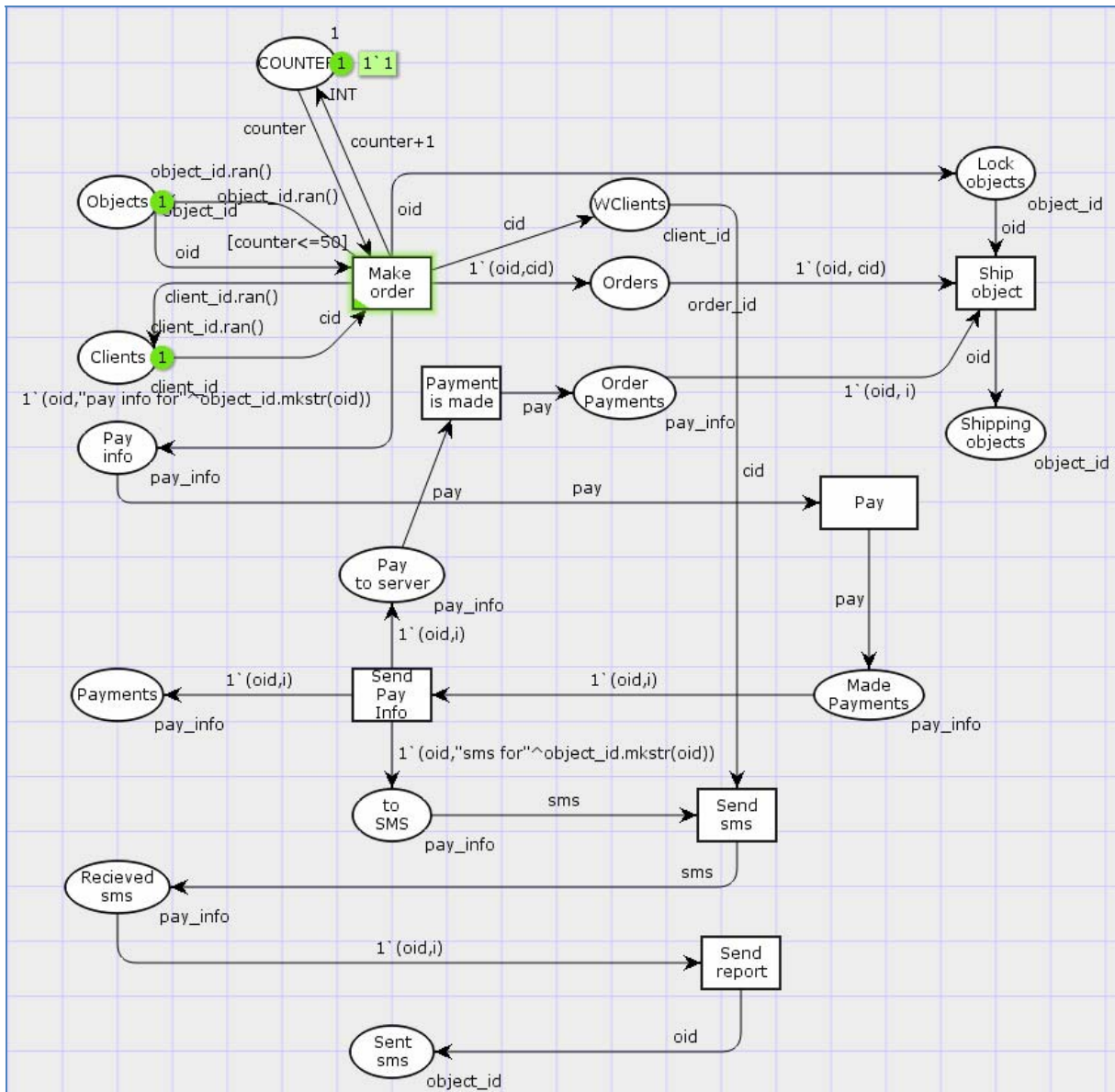


Рис. 2. Сеть Петри

Или следующий график (см. рис. 3) наглядно демонстрирует, что вероятность безотказной работы системы линейно снижается с повышением вероятности отказа процесса «Отгрузка товара». Угол наклона линии тренда позволяет оценивать степень влияния. В рассматриваемом примере выполнение транзакции состоит в последовательном однократном вызове всех описываемых функций, поэтому их влияние на успешность бизнес-транзакции одинаково. В связи с этим, логичной стратегией является повышение надежности наиболее «слабых» процессов до тех пор, пока целевые показатели не будут достигнуты.

Введем резерв для процесса «Отгрузка товара». На схеме сети Петри такое дублирование отобразим с помощью восстанавливающей под-

сети, которая будет запускаться в случае отказа восстанавливаемого перехода. Возможности сервис-ориентированных систем [10] и разработанного нами языка их моделирования на базе окрашенных сетей Петри позволяют представить восстанавливающую сеть в виде неограниченного количества взаимодействующих в сколь угодно сложном порядке функций, то есть резервирование может выполняться не дубликатом процесса, а иными средствами.

По результатам новой имитации было получено, что общая атомарность и вероятность безаварийной работы достигли значения 0,98, а уровень разрешимости отказов – 0,4944, означающий, что примерно половина всех отказов бизнес-транзакции исправляется. Тем не менее,

целевой показатель надежности – 99 % атомарность на этой итерации достигнут не был, что

требует проведения дальнейших мер по повышению надежности очередного процесса.

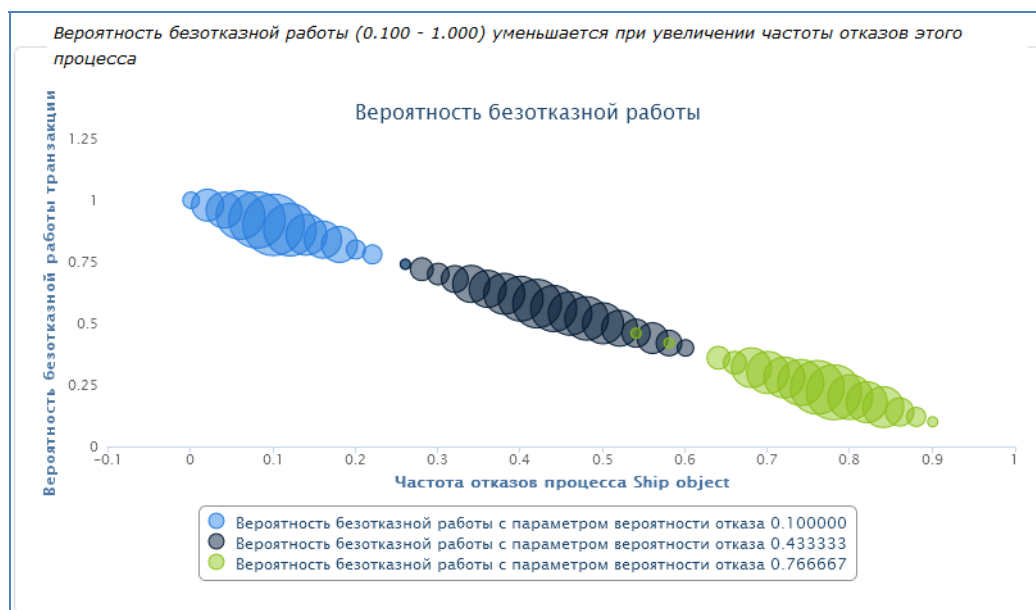


Рис. 3. График соотношения отказов процесса и транзакции

Предположим, что при передаче данных о проведенном платеже от платежной системы возникла ошибка, и интернет-магазин не смог принять эти данные. Тогда платежная система должна запустить каскад действий по отмене транзакции и восстановлению прежнего состояния всех участников: в первую очередь, клиенту должны быть возвращена денежная сумма, а интернет-магазин должен списать заказ в отмененный. После реализации этой схемы в качестве компенсирующей подсети по результатам имитации атомарность достигла уровня 0,9987, а вероятность безаварийной работы – 0,9967, таким образом, цель эксперимента была достигнута. В итоге можно вынести следующие рекомендации, которые необходимо учитывать при разработке рассмотренной распределенной системы:

1. Процессы, связанные с отчетом о доставке смс клиенту не влияют на выполнение бизнес-транзакции.
2. Операцию отгрузки товара, которая имеет наиболее низкие показатели безотказной работы, следует зарезервировать.
3. Должна быть предусмотрена возможность аварийной реакции платежной системы на невозможность доступа к интернет-магазину. Реакция заключается в отмене платежа и запуске каскада операций, отменяющих бизнес-транзакцию.

Все эти меры позволяют достичь требуемого уровня надежности выполнения бизнес-транзакции. Следует учитывать, что приведенная в примере схема взаимодействия заметно упрощена, а сам эксперимент не включает, например, анализ надежности восстанавливающих и компенсирующих сетей. Однако проведенная работа в полной мере демонстрирует базовые возможности ПК по анализу надежности проектов бизнес-транзакций, что может заметно упростить процедуры проектирования распределенных информационных систем с заданными характеристиками отказоустойчивости, стабильности и атомарности.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дружинин, Г. В. Надежность автоматизированных систем / Г. В. Дружинин. – М. : Энергия, 1977. – 536 с.
2. Ллойд, Д. Надежность: организация исследования, методы, математический аппарат / Ллойд Д., Липов М. – М. : Советское радио, 1964. – 687 с.
3. Капур, К. Надежность и проектирование систем / Капур К., Ламберсон Л. – М. : Мир, 1980. – 610 с.
4. Шураков, В. В. Надежность программного обеспечения систем обработки данных / Шураков В. В. – М. : Финансы и статистика, 1987. – 272 с.
5. Graham, I. Requirements Modelling and Specification for Service Oriented Architecture/ Graham Ian. – John Wiley & Sons Ltd, 2008. – 301 с.
6. Massuthe, P. Operating Guidelines for Services: Dissertation / Massuthe Peter. – University Press Facilities, 2009. – 266 с.

7. Zafar, B. Conceptual Modelling of Adaptive Web Services based on High-level Petri Nets: PhD Thesis / ZafarBassam. – De Montfort University, 2008. – 188 с.

8. Артамонов, И. В. Использование окрашенных сетей Петри для моделирования бизнес-транзакций в сервис-ориентированной среде / И. В. Артамонов // Известия ИГЭА (БГУЭП). – Иркутск, 2013. – Вып. 5.

9. Артамонов, И. В. Моделирование сервисной композиции с помощью окрашенных сетей Петри / И. В. Ар-

тамонов // Вестник НГУЭУ. – Новосибирск, 2013. – Вып. 2. – С. 180-187.

10. Ишкина, Е. Г. Архитектура адаптивного сервисно-ориентированного промежуточного программного обеспечения / Е. Г. Ишкина, О. В. Щербинина // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 9 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – №11 (71). – С. 142-145.

УДК 004.8.681.3.06

*А. Н. Афанасьев, В. С. Хородов*

### **АГЕНТНЫЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ СИСТЕМЫ РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ VHDL-ОБЪЕКТОВ И ЕЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НА БАЗЕ ЦВЕТНЫХ СЕТЕЙ ПЕТРИ**

**Ульяновский государственный технический университет**

a.afanasev@ulstu.ru, v.khorodov73@gmail.com

Предложена многоагентная система распределенного проектирования сложных VHDL-программ. Разработана модель системы на основе цветных сетей Петри. Описаны результаты моделирования.

*Ключевые слова:* распределенное проектирование, многоагентная система, VHDL, цветные сети Петри.

*A. N. Afanasev, V. S. Khorodov*

### **AGENT APPROACH TO BUILDING A SYSTEM DISTRIBUTED DESIGN VHDL-OBJECTS AND ITS SIMULATION BASED ON COLORED PETRI NETS**

**Ulyanovsk State Technical University**

Multiagent system of distributed designing complex VHDL-program is proposed. Model of system based on colored Petri nets is developed. The results of modeling are presented.

*Keywords:* distributed design, multiagent system, VHDL, colored Petri nets.

#### **Введение**

В настоящее время проектирование сложных устройств на кристалле ведется преимущественно с использованием высокоуровневых языков, таких как VHDL, Verilog и др. Вследствие сложности подобных проектов [1] разработчики сталкиваются с проблемами, аналогичными при разработке программно-информационного обеспечения сложных автоматизированных систем. Одной из основных проблем является успешность проекта, под которой понимают реализацию в заданные сроки, финансовые средства и функциональные возможности. Парадигмой современного промышленного проектирования сложных программных продуктов, позволяющей повысить успешность проекта, является коллективная работа с ролевым распределением функций и организацией единого проектного пространства с активным взаимодействием в нем проектировщиков. Практическое применение данного подхода связано с использованием инструментария мастер-технологий (например, RUP, ARIS) или разработкой и применением веб-ориентированных

систем распределенного проектирования. Последний вариант выступает в качестве основы предлагаемой системы проектирования.

Создание описываемого приложения направлено на сокращение затрат и повышение качества проектирования за счет реализации методов и средств наполнения библиотеки VHDL-программ и коллективного распределенного проектирования [2], позволяющих организовать взаимодействие между проектировщиками и повторно использовать разработанный код.

В основе предложенной системы лежит агентный подход, обеспечивающий повышение гибкости, масштабируемости и эффективное распределение проектной нагрузки между агентами.

Система распределенного проектирования работает со структурно-функциональными лингвистическими моделями (СФЛМ), которые хранятся в базе знаний и с которыми взаимодействуют агенты и проектировщики. Под СФЛМ понимаются объекты, представленные на языке типа VHDL, состоящие из структурной и функциональной частей [3].

Для представления работы системы опишем назначение агентов.

### Агенты

Описания агентов позволяют определить их роль и место в системе. *Интерфейсный агент* (interface agent [INA]) - выполняет связующую роль агентов в многоагентной системе.

*Агент управления проектными задачами* (management agent project tasks [MAPT]) – выполняет формирование параллельной сетевой схемы задач (ПССЗ) [4] и распределение проектных задач между проектировщиками.

*Агент разработки проектного решения* (agent designer project solution [ADPS]) – выполняет операции связанные с созданием проектного решения на языке VHDL, т. е. формированием структурно-функциональной лингвистической модели (СФЛМ), шаблона СФЛМ и проведением лексического и семантического анализа кода.

*Агент синтеза проектных решений* (agent synthesis project solution [ASPS]) – выполняет поиск готовых к объединению проектных решений, созданных проектировщиками, а также их синтез в единое проектное решение.

*Агент маршрутизации* (router agent [ROA]) – выполняет связующую роль между локальными или распределенными агентами, расположенными на разных серверах, которые исполняют роль хранения или разработки проектных решений.

*Поисковый агент* (search agent [SEA]) – выполняет формирование запроса на поиск проектного решения и кластеризацию данных с целью сокращения времени поиска данных.

*Агент базы знаний* (agent knowledge base [AKB]) – выполняет операции по работе с базой знаний.

*Агент рабочей памяти* (agent working memory [AWM]) – управляет состоянием системы и распределением нагрузки, как на агентов, так и на всю систему.

Для наглядного представления и последующего анализа функционирования как агентов, так и подсистем, проведем моделирование с использованием математического аппарата сети Петри.

### Описание функционирования системы в виде сети Петри

Для моделирования используется цветная сеть Петри второго рода, представленная в виде иерархической композиции объектов. Путем перехода от одного уровня детализации описания системы к другому осуществляется анализ и детальное рассмотрение процесса функционирования отдельных блоков системы. На рис. 1. представлен пример иерархической композиции подсистемы в виде сети Петри.

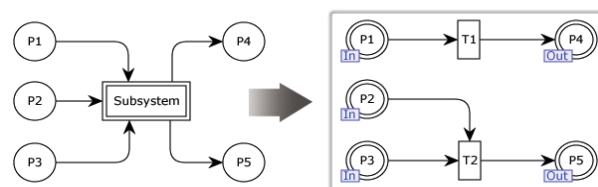


Рис. 1. Пример иерархической композиции в сети Петри

Для визуализации сети Петри, описанной с помощью языка Colored Petri Net Markup Language (CPN ML), используется программный продукт CPN Tools. Общий вид сети Петри представлен на рис. 2. Описание ее позиций приведено в табл. 1.

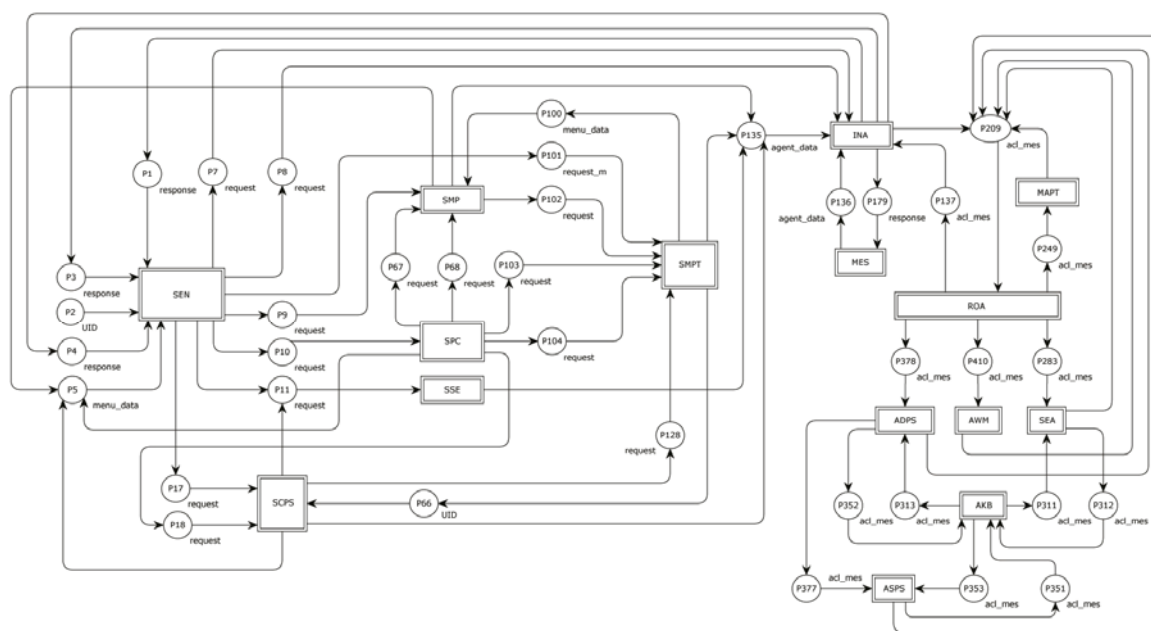


Рис. 2. Модель сценария функционирования системы

Таблица 1

## Описание сети Петри для системы распределенного проектирования

| Обозначение элемента | Описание                                                                                             |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| P1                   | Были выявлены ошибки при авторизации пользователя в системе                                          |
| P2                   | Осуществлен переход на стартовую страницу системы                                                    |
| P3                   | Были выявлены ошибки при регистрации пользователя в системе                                          |
| P4                   | Авторизация в системе пройдена. Осуществлен вход в систему                                           |
| P5                   | Выбран элемент основного меню                                                                        |
| P7                   | Передан запрос на регистрацию пользователя в системе                                                 |
| P8                   | Передан запрос на авторизацию пользователя в системе                                                 |
| P9                   | Осуществлен переход на страницу управления проектами                                                 |
| P10                  | Осуществлен переход в личный кабинет                                                                 |
| P11                  | Осуществлен переход на страницу поиска                                                               |
| P17                  | Осуществлен переход к конструктору проектного решения                                                |
| P101                 | Осуществлен переход к управлению проектными задачами                                                 |
| P135                 | Передан запрос интерфейсному агенту                                                                  |
| P67                  | Осуществлен переход на страницу создания проекта                                                     |
| P68                  | Выбран проект. Осуществлен переход к странице проекта                                                |
| P104                 | Осуществлен переход к проектной задаче                                                               |
| P103                 | Осуществлен переход к странице управления результатами поиска ПССЗ                                   |
| P18                  | Осуществлен переход к странице управления результатами поиска СФЛМ                                   |
| P100                 | Осуществлен переход к меню.                                                                          |
| P102                 | Осуществлен переход к просмотру списка проектных задач с фильтрацией по проекту и/или проектировщику |
| P66                  | Осуществлен переход к странице создания / редактирования проектного решения                          |
| P128                 | Осуществлен переход на страницу создания проектной задачи                                            |
| P179                 | Пользователю переданы уведомления                                                                    |
| P136                 | Передан запрос на получение уведомлений для пользователя                                             |
| P137                 | Передано сообщение от агента ROA агенту INA                                                          |
| P209                 | Сформировано и передано сообщение агенту ROA                                                         |
| P249                 | Передано сообщение от агента ROA агенту MAPT                                                         |
| P283                 | Передано сообщение от агента ROA агенту SEA                                                          |
| P311                 | Передано сообщение от агента AKB агенту SEA                                                          |
| P312                 | Сформировано и передано сообщение агенту AKB агентом SEA                                             |
| P351                 | Передано сообщение от агента ASPS агенту AKB                                                         |
| P352                 | Передано сообщение от агента ADPS агенту AKB                                                         |
| P378                 | Сформировано и передано сообщение агенту ADPS агентом ROA                                            |
| P353                 | Сформировано и передано сообщение агенту ASPS агентом AKB                                            |
| P377                 | Передано сообщение от агента ADPS агенту ASPS                                                        |
| P378                 | Передано сообщение от агента ROA агенту ADPS                                                         |
| P410                 | Передано сообщение от агента ROA агенту AWM                                                          |

В сетевой модели сценария кроме агентов присутствуют функциональные блоки системы распределенного проектирования: system entry

(SEN) – подсистема входа; system search (SSE) – подсистема поиска; constructor project solution (SCPS) – подсистема конструктора проектного

решения; system personal cabinet (SPC) – подсистема личного кабинета; system managing projects (SMP) – подсистема управления проектами; system managing project tasks (SMPT) – подсистема управления проектными зада-

чами; messenger (MES) – подсистема уведомлений.

В качестве примера на рис. 3 и в табл. 2 представлена модель подсистемы SEN в виде цветной сети Петри.

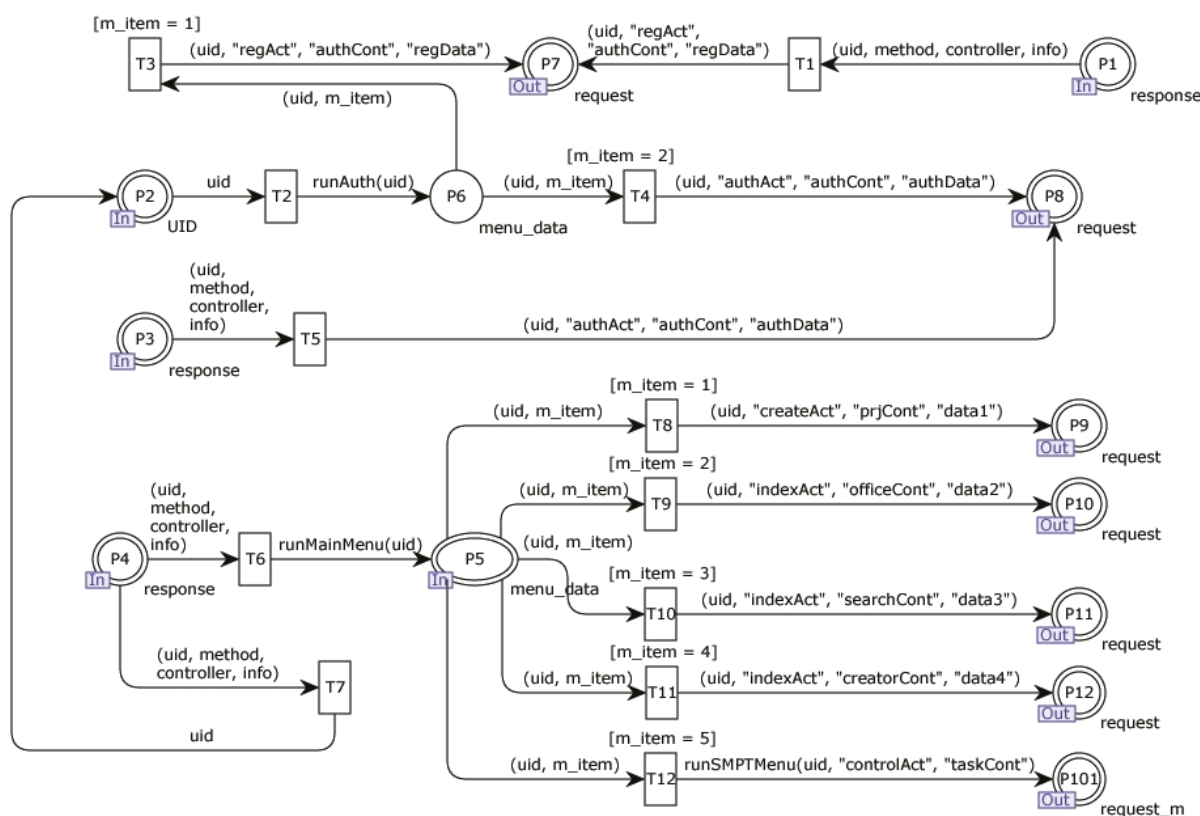


Рис. 3. Модель подсистемы SEN

Таблица 2

Описание сети Петри подсистемы SEN

| Обозначение элемента | Описание                                                    |
|----------------------|-------------------------------------------------------------|
| P1                   | Ошибки в данных регистрации                                 |
| P2                   | Осуществлен вход на начальную страницу системы              |
| P4                   | Авторизация успешна. Осуществлен вход в систему             |
| P5                   | Выбран элемент основного меню                               |
| P3                   | Ошибки в данных авторизации                                 |
| P7                   | Отправлен запрос на регистрацию                             |
| P8                   | Отправлен запрос на авторизацию                             |
| P9                   | Выполнен переход на страницу создания проекта               |
| P10                  | Выполнен переход в личный кабинет                           |
| P11                  | Выполнен переход на страницу поиска                         |
| P12                  | Выполнен переход к конструктору проектных решений           |
| P6                   | Ожидание авторизации / регистрации                          |
| P101                 | Выполнен переход на страницу управления проектными задачами |
| T1                   | Исправление ошибок в данных регистрации                     |

Окончание табл. 2

| Обозначение элемента | Описание                                           |
|----------------------|----------------------------------------------------|
| T2                   | Вход в систему                                     |
| T3                   | Регистрация и вход в систему                       |
| T4                   | Авторизация и вход в систему                       |
| T5                   | Исправление ошибок в данных авторизации            |
| T6                   | Выбор элемента основного меню                      |
| T7                   | Выход из системы                                   |
| T8                   | Переход на страницу создания проекта               |
| T9                   | Переход в личный кабинет                           |
| T10                  | Переход на страницу поиска                         |
| T11                  | Переход к конструктору проектных решений           |
| T12                  | Переход на страницу управления проектными задачами |

### Моделирование и анализ сети Петри

Моделирование активности проектировщиков в системе выполняется путем создания токенов в стартовой позиции сети Петри через случайные интервалы времени. Действия проектировщиков моделируется путем запуска переходов в сети. Остальные события в сети представляют собой реакцию интерфейсных агентов на запрос проектировщиков и взаимодействие агентов между собой. Основными типами токенов являются сообщения взаимодействия агентов на языке Agent Communication Language (ACL) и запросы проектировщиков к системе в ходе работы.

К позициям сети Петри добавляется информация о типах токенов, а к дугам – информация, которая может быть представлена в виде типа токена или совокупности атрибутов этого типа токена. За счет добавления такой информации в качестве предиката возбуждения перехода можно осуществить проверку на наличие внутреннего правила работы агента или системы, а также его корректного выполнения. Внутренние правила работы агента основаны на обработке ACL от других агентов.

Тип токена, описывающего сообщения агентов (*acl\_mes*), характеризуется следующими атрибутами: *uid* – идентификатор пользователя в системе; *sender* – идентификатор агента-отправителя сообщения; *receiver* – кортеж идентификаторов агентов-получателей; *content* – содержимое сообщения или объект действия; *reply-with* – выражение, которое будет использоваться агентом, чтобы определить исходное сообщение при ответе на полученное сообщение; *in-reply-to* – выражение, ссылающееся на

раннее действие, к которому текущее сообщение является ответом; *envelope* – конверт, содержащий полезную информацию о сообщении, представляет собой список пар значений ключевых слов; *language* – обозначает кодировку содержимого; *ontology* – онтология, которая используется, чтобы дать смысл содержимому; *reply-by* – крайний срок отправки ответа на сообщение в виде времени и/или даты; *protocol* – идентификатор протокола, который использует агент-отправитель (протокол предназначен для формирования дополнительного контекста, служащего для интерпретации сообщения); *conversation-id* – выражение для идентификации последовательности коммуникативных актов, которые вместе образуют «разговор» [5].

Тип токена, описывающего запрос проектировщика в системе (*request*), характеризуется следующими атрибутами: *uid* – идентификатор пользователя в системе; *action* – метод, отвечающий на действие проектировщика; *controller* – контроллер, в котором находится вызываемый метод; *content* – параметры запроса проектировщика.

Среди позиций P137-P410 преобладает тип токена [*acl\_mes*], а среди позиций P1-P135 – тип токена [*request*].

Формирование токена для выходной позиции происходит с учетом выражения на дугах. Таким образом, переход может порождать токены нового типа путем объединения данных [6]. В описываемой системе такое преобразование происходит в том случае, когда данные типа токена *request* участвуют в формировании *acl\_mes* с сохранением определенных данных, например, идентификатора пользователя, сделавшего запрос.



В цветных сетях Петри анализ проводится с учетом цвета токена. Данная особенность позволяет моделировать коллективную работу проектировщиков путем применения токенов-идентификаторов.

При моделировании работы системы распределенного проектирования задача достижимости интерпретируется как возможность перехода к некоторой типовой ситуации. Под типовой ситуацией понимается совокупность последовательных маркировок, которые нужно пройти для перехода в интересующее состояние системы. Строится дерево типовых ситуаций, переходы по которому переводят систему в выбранное состояние, минуя определенное количество промежуточных этапов с полуавтоматическим выполнением промежуточных действий. Анализируя достижимость, строится карта внутрисистемных переходов. На ней отображаются все переходы, но активны будут только те, в которые можно перейти из текущего состояния.

Анализ живости позволяет определить работоспособность всех подсистем. Наличие тупиковых разметок и выявление зацикливаний локализует места неисправностей.

В случае превышения предельно допустимого количества задач, установленного в системе, запускается механизм создания копии агента и переназначение на него части задач. Освобождение ресурсов путем удаления копии агента из системы происходит при отсутствии задач в позиции-очереди агента.

Результаты моделирования в пакете CPN Tools [7] приведены в табл. 3.

В ходе моделирования путем оценки количества меток в ключевых позициях (например, позиции-очереди агентов, такие как P135, P209 и др.) были выявлены узкие места в системе, из-за которых производительность или пропускная способность ограничена одним или несколькими компонентами или ресурсами. В сети отсутствуют мертвые маркировки и переходы, это свидетельствует о том, что при работе проектировщиков не будут возникать тупиковые состояния, выход из которых требует перезапуска системы. Результаты моделирования показали работоспособность системы в целом и эффективное распределение проектной нагрузки между проектировщиками.

### Заключение

Применение многоагентной технологии при построении системы распределенного проектирования позволяет сократить время, затрачиваемое проектировщиками на поиск проектных решений, упростить процесс взаимодействия пользователей с системой, модифицировать работу системы при высоких нагрузках путем создания копий исполняющих агентов. Использование цветных сетей Петри с различными типами токенов позволило адекватно построить модель и провести ее анализ.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Афанасьев А. Н., Хородов В. С. Распределенное проектирование структурно-функциональных моделей представленных на языке VHDL // Вестник ульяновского государственного технического университета. – 2014. – №2 (66). – С. 41–45.
2. Глушань, В. М. Обобщение некоторых результатов исследования когнитивной модели распределенной САПР / В. М. Глушань, Р. В. Иванько, П. В. Лаврик, Н. Н. Орлов // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 5 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – №8. – С. 130–134.
3. Афанасьев А. Н., Игонин А. Г. Применение нейросемантического подхода для анализа и синтеза функциональных моделей в системах проектирования // Вестник ижевского государственного технического университета. – 2007. – №1. – С. 66–69.

Таблица 3

Результаты моделирования в пакете CPN Tools

| Статистика                                                                                                                  | Комментарии                                                     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| State Space<br>Nodes: 42096<br>Arcs: 101652<br>Secs: 73<br>Status: Full<br>Scc Graph<br>Nodes: 344<br>Arcs: 1086<br>Secs: 6 | Пространство состояний модели содержит 42096 узлов и 101652 дуг |
| Home Markings<br>None                                                                                                       | Модель не имеет домашних маркировок                             |
| Dead Transition Instances<br>None<br>Live Transition Instances<br>None                                                      | В модели отсутствуют мертвые переходы                           |
| Impartial Transition Instances<br>None                                                                                      | Бесконечная последовательность срабатывания отсутствует         |

Обязательное наличие позиции-очереди у агента позволяет организовать контроль путем проверки позиции на свойство ограничен-



4. Афанасьев А.Н. Методология графо-аналитического подхода к анализу и контролю потоков работ в автоматизированном проектировании сложных компьютеризованных систем // Вестник Ульяновского государственного технического университета. – 2011. – №3(55). – С. 48–52.

5. FIPA. ACL Message Structure Specification [Электронный ресурс] // <http://www.fipa.org> : The Foundation for Intelligent Physical Agents: – Режим доступа : <http://www.fipa.org/specs/fipa00061/SC00061G.pdf> (дата обращения: 12.06.2014).

6. Коваль А.А. Применение цветных сетей Петри для моделирования сценария работы приложений // Научная сессия МИФИ-2005. Т.2 Технологии разработки программных систем. Информационные технологии. – 2005. – С. 99–100.

7. Романников Д.О., Марков А.В. Об использовании программного пакета CPN Tools для анализа сетей Петри // Сборник научных трудов НГТУ. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2012. №2(68). – С. 105–116.

УДК 621.372

**В. Б. Байбурун, А. А. Терентьев, А. С. Ершов, С. А. Лазарев**

# **АНАЛИЗ МАГНИТНОЙ И ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ ПРИБОРОВ МАГНЕТРОННОГО ТИПА С УВЕЛИЧЕННЫМ УРОВНЕМ МОЩНОСТИ**

**Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А.**

[baiburinvb@rambler.ru](mailto:baiburinvb@rambler.ru), [a\\_a\\_terentyev@mail.ru](mailto:a_a_terentyev@mail.ru), [ace2886@mail.ru](mailto:ace2886@mail.ru)

В статье изложены результаты расчета магнитных и электростатических полей для оригинальной конструкции магнетронного прибора, позволяющей увеличить площадь эмиссионного катода и, следовательно, заряд в пространстве взаимодействия и выходную мощность прибора, что особенно важно для магнетронов, работающих в коротковолновой части сантиметрового диапазона и в миллиметровом диапазоне.

**Ключевые слова:** магнетрон, эмиссионный катод, магнитные поля, электростатические поля, компьютерное моделирование.

**V. B. Bayburin, A. A. Terentyev, A. S. Ershov, S. A. Lazarev**

# **MAGNETIC AND ELECTROSTATIC SYSTEM ANALYZE FOR M-TYPE DEVICES WITH INCREASED POWER**

**Saratov State Technical University**

The article presents the results of a calculation of the magnetic and electrostatic fields for original design of the M-type device that allows to increase the area of cathode emission, and hence increase as charge in the interaction space as the output power of the device, which is particularly important for short-wavelength part of the centimeter range and in the millimeter range magnetrons.

**Keywords:** magnetron, emissive cathode, magnetic fields, electrostatic fields, computer modeling.

В патенте [1] предложена новая конструкция магнетрона коротковолнового диапазона повышенной мощности. В работах [2, 3] развита аналитическая модель расчета выходных параметров таких магнетронов.

В отличие от традиционной конструкции [4] в данном случае катод и анод имеют форму концентрических и разнесенных по аксиальной высоте цилиндров так, что эмиссионный слой катода обращен в сторону анода, а резонаторы анодного блока обращены в сторону катода (рис. 1). Таким образом, статическое электрическое поле имеет аксиальное направление.

На рисунке  $D$  – расстояние анод-катод,  $h$  – поперечный размер резонаторной системы и катода.

Особенность конструкции заключается в том, что в ней площадь катода равна площади анода. Таким образом, в ней частично снимается ограничение по выходной мощности магнетрона,

вызванное относительной малой площадью эмиссионного слоя катода.

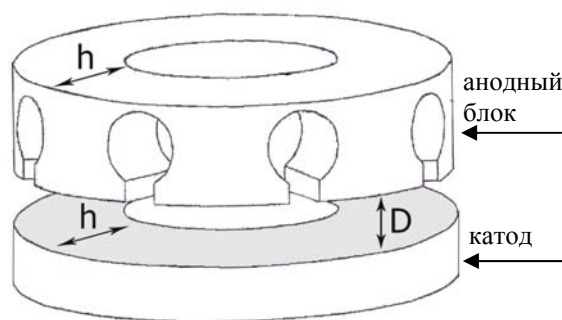


Рис. 1. Конструкция прибора

Магнитное поле создается кольцевыми магнитными наконечниками. На рис. 2 схематически представлено сечение анодной и магнитной системы. Расчет силовых линий магнитного поля проводился с помощью программы [5].

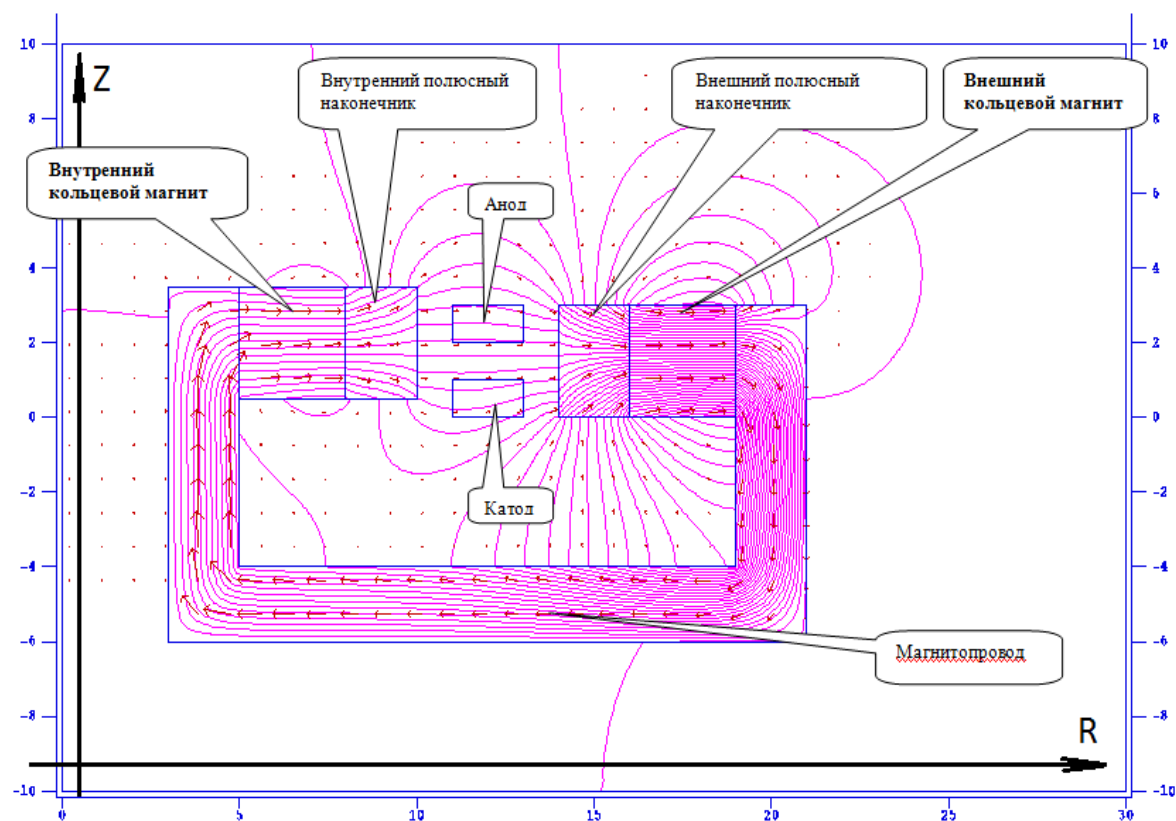


Рис. 2. Магнитная система и силовые магнитного поля

Как видно из рисунка, магнитные поля в пространстве взаимодействия имеют сравнительно однородный характер. Как представля-

ется, изменяя форму наконечников можно свести аксиальную составляющую в зазоре анод-катод к приемлемому минимуму.

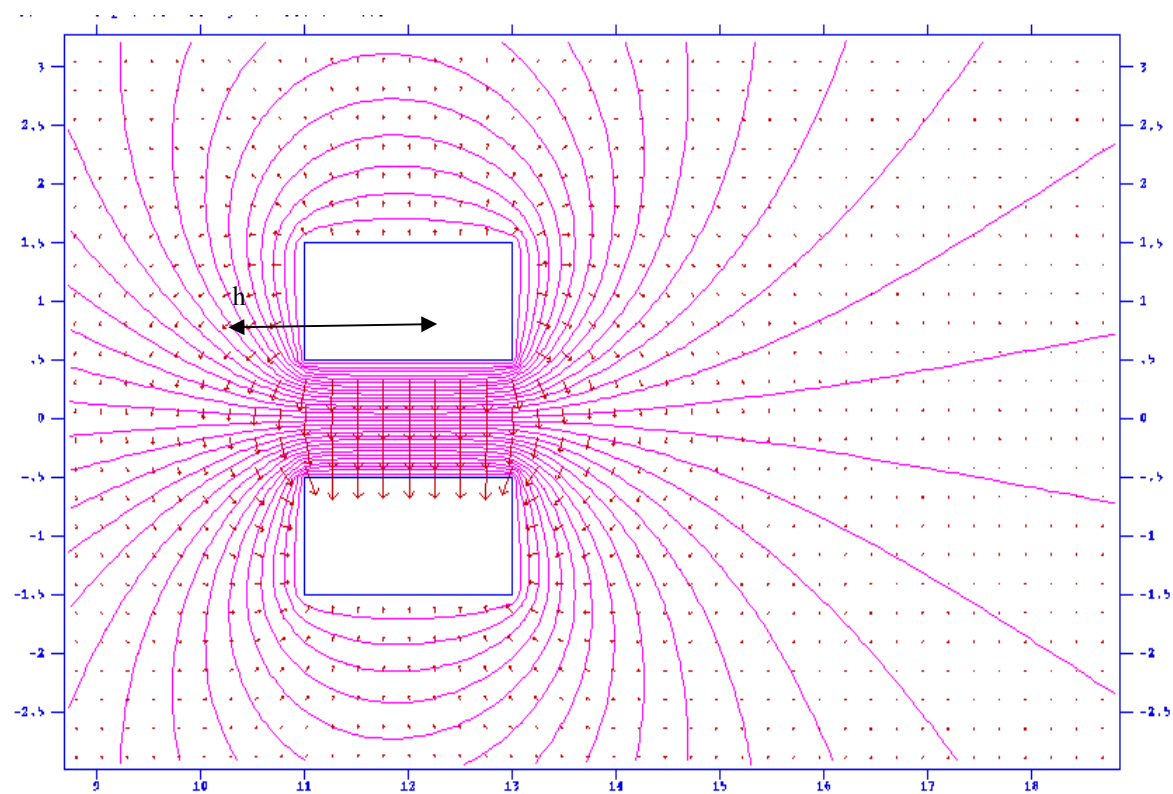


Рис. 3. Распределение электростатических полей в пространстве взаимодействия (сверху – анод, снизу – катод)

На рис. 3 показано распределение электростатических полей. В расчетах принималось:  $U_k = 0.0$ ,  $U_a = 10000$  В.

Как видно из рис. 3, в пространстве между катодом и анодом удается обеспечить сравнительно однородные электрические поля. С увеличением поперечного размера резонаторной системы и катода  $h$  электрическое поле будет еще более однородным.

Изложенные результаты обосновывают практическую возможность создания статических магнитных и электрических полей, обеспечивающих функционирование магнетронных приборов, предложенных в патенте [1].

Для более детального анализа требуется разработка соответствующего математического и программного обеспечения анализа и расчета электронно-волнового взаимодействия в предложенной конструкции и проведение оптимизационных расчетов.

# БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шириин С.И., Байбури В.Б.* Патент на полезную модель № 85751. Заявка № 2009115322, приоритет полезной модели 22 апреля 2009 г.
2. *Байбури В.Б., Терентьев А.А., Еришов А.С., Лазарев С.А.* Аналитические соотношения расчета основных рабочих параметров коротковолнового магнетрона с повышенным уровнем мощности. // Материалы Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП – 2014). – Саратов, СГТУ имени Гагарина Ю.А. – 2014. – Том 1. – С. 59–62.
3. *Байбури В.Б., Терентьев А.А., Еришов А.С., Лазарев С.А.* Аналитическая модель коротковолнового амплитрона повышенной мощности // Материалы Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» (АПЭП – 2014). – Саратов, СГТУ имени Гагарина Ю.А. – 2014. – Том 1. – С. 25–28.
4. *Чиков И.С., Шейн А.Г.* Математическая модель амплитрона // Известия Волгоградского государственного технического университета – 2008. Т. 4.–№2. – С. 40–44.
5. Программа Superfish – [http://laacg.lanl.gov/laacg/services/serv\\_codes.shtml#ps](http://laacg.lanl.gov/laacg/services/serv_codes.shtml#ps)

УДК 621.039.714

*А. Б. Голованчиков<sup>1</sup>, Л. В. Курылева<sup>2</sup>, В. Ф. Каблов<sup>2</sup>, Б. А. Дулькин<sup>3</sup>*

## АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ ОЧИСТКИ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ ВОДЫ РЕАКТОРОВ АЭС ОТ РАДИОАКТИВНЫХ ИЗОТОПОВ СТРОНЦИЯ И ЦЕЗИЯ

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет

<sup>2</sup>Волжский политехнический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета

<sup>3</sup>Научно-исследовательский университет Московский энергетический институт

[pahp@vstu.ru](mailto:pahp@vstu.ru), [kurylevalv@mail.ru](mailto:kurylevalv@mail.ru)

Предложено очищать охлаждающую воду АЭС, загрязненную радиоактивными изотопами цезия и стронция не до ПДК, которые в сотни и более раз превышают естественный радиационный фон, а до концентраций, соответствующих этому природному фону. Приводится пример расчета ионообменной колонны, обеспечивающей такую очистку охлаждающей воды.

*Ключевые слова:* цезий, стронций, ПДК, естественный и радиационный фон, ионообмен.

*B. Golovanchikov<sup>1</sup>, L. V. Kuryleva<sup>2</sup>, V. F. Kablov<sup>2</sup>, B. A. Dulkan*

## ANALYSIS OF COOLING WATER PURIFICATION IN NUCLEAR REACTORS FROM RADIOACTIVE STRONTIUM AND CESIUM ISOTOPES

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University

<sup>2</sup>VPI (branch) of VSTU

<sup>3</sup>National Research University Moscow Power Engineering Institute

It is suggested that nuclear power plant cooling water contaminated with radioactive cesium and strontium isotopes should be purified not up to maximum permissible concentrations, which are a hundred or more times higher than natural background radiation levels, but until concentrations that are in line with such natural background levels are reached. An example of an ionic exchange column that provides for such cooling water treatment is given.

*Keywords:* cesium, strontium, maximum permissible concentration (MPC), natural background radiation, ionic exchange.

Нуклеофобия, поразившая ряд цивилизованных и развивающихся стран после аварии на японской атомной электростанции «Фукусима» в марте 2011 года, привела к снижению интереса к атомной энергетике и даже запрету строи-

тельства новых и постепенного вывода из эксплуатации действующих АЭС.

Одним из аргументов против АЭС является то, что предельно-допустимые концентрации (ПДК) по радиоактивным «долгоживущим»

изотопам цезия  $^{137}\text{Cs}$  и стронция  $^{90}\text{Sr}$  на два порядка и более превосходят природный радиоактивный фон. В табл. 1 приведены начальные

концентрации в охлаждающей воде этих изотопов после аварии, ПДК и концентрации, соответствующие природному фону.

Таблица 1

Концентрации ионов цезия и стронция в воде

| № | Радиоактивный фон в воде | Концентрация                |                      |                      |                       |                                             |                       |
|---|--------------------------|-----------------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|---------------------------------------------|-----------------------|
|   |                          | До очистки после аварии [5] |                      | ПДК [1,4]            |                       | Естественный радиоактивный фон в воде [2,3] |                       |
|   |                          | Ки/л                        | кг/м <sup>3</sup>    | Ки/л                 | кг/м <sup>3</sup>     | Ки/л                                        | кг/м <sup>3</sup>     |
| 1 | Цезий                    | $5,13 \cdot 10^{-6}$        | $5,95 \cdot 10^{-8}$ | $2,7 \cdot 10^{-10}$ | $3,13 \cdot 10^{-12}$ | $0,2 \cdot 10^{-12}$                        | $2,32 \cdot 10^{-15}$ |
| 2 | Стронций                 | $4,05 \cdot 10^{-6}$        | $2,92 \cdot 10^{-8}$ | $1 \cdot 10^{-10}$   | $7,2 \cdot 10^{-13}$  | $0,2 \cdot 10^{-12}$                        | $1,44 \cdot 10^{-15}$ |

В работе [5] введено понятие идеальности экологического процесса, в котором концентрации и температуры выбрасываемых компонентов не превышают этих параметров в окружающей среде (атмосфере, гидросфере и литосфере). В случае с АЭС это понятие приобретает особую актуальность. ПДК опасных веществ утверждены как нормативы, несоблюдение которых может привести к деградации естественных экологических систем. В случае с радиоактивными веществами последствия могут проявиться и в рамках нормативов ПДК, но не сразу, и даже не через год, а через 1–2 поколения, поскольку радиоактивное облучение вызывает мутагенные изменения. Поэтому считаем, что в данном исследовании, охлаждающую воду, загрязненную радиоактивными изотопами цезия и стронция необходимо очищать не до ПДК, которые в сотни и более раз превышают естественный радиационный фон, а до концентраций, соответствующих этому природному фону, тем самым стремясь к идеальному экологическому процессу.

Так как все концентрации по радиоактивным изотопам приводятся в Ки/л или Бк/л, а расчеты сорбционных процессов ведут в г/л

или кг/м<sup>3</sup>, то пересчет заданных радиоактивных концентраций ( $C^*$ ) в объемно-массовые ( $C$ ) необходимо вести по формуле [4–7]:

$$C = 2,8 \cdot 10^{-6} \cdot M \cdot T \cdot C^* \quad (1)$$

где  $M$  – молекулярная масса, г/моль;  $T$  – периода полураспада, год.

Период полураспада для цезия  $^{137}\text{Cs}$  составляет 30,17 лет, для стронция  $^{90}\text{Sr}$  – 28,8 года [8].

Согласно величинам концентраций, приведенных в табл. 1, ПДК по радиоактивным ионам цезия в воде превышает фоновую в 1350 раз, а по таким же ионам стронция в 500 раз. Рассмотрим возможность доочистки воды от радиоактивных ионов цезия и стронция от концентраций, соответствующих ПДК до естественной фоновой концентрации в ионообменной колонне периодического действия с неподвижным слоем ионита. Для этого после основной ионообменной колонны диаметром  $D_a = 1,6$  м и высотой слоя ионита  $H = 0,5$  м ставим такую же дополнительную колонну. В табл. 2 приведены исходные и справочные данные для расчета этой колонны и сами результаты расчетов. Алгоритм расчетов был тот же, что и в наших работах [5–7, 9].

Таблица 2

Исходные и справочные данные и расчетные параметры дополнительной ионообменной колонны с неподвижным слоем ионита [10]

| №                            | Наименование параметра                          | Размерность         | Обозначение | Величина |
|------------------------------|-------------------------------------------------|---------------------|-------------|----------|
| Исходные и справочные данные |                                                 |                     |             |          |
| 1                            | Производительность по воде                      | м <sup>3</sup> /час | $q_v$       | 10       |
| 2                            | Полная обменная емкость ионита (катионита КУ-2) | (ммоль-экв)/2       | $x_0$       | 4,75     |
| 3                            | Константа равновесия ионита                     | -                   | $k_p$       | 1,2      |
| 4                            | Насыпная плотность влажного набухшего ионита    | кг/м <sup>3</sup>   | $\rho_n$    | 800      |
| 5                            | Удельный объем сухого ионита (насыпной)         | м <sup>3</sup> /кг  | $V_0$       | 0,003    |

Окончание табл. 2

| №                   | Наименование параметра                                                                      | Размерность                                      | Обозначение                  | Величина                                       |
|---------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------------------------|
| 6                   | Поброзность неподвижного слоя                                                               | $\text{м}^3/\text{м}^3$                          | $\varepsilon_0$              | 0,4                                            |
| 7                   | Средний размер гранул ионита                                                                | м                                                | d                            | $0,9 \cdot 10^{-3}$                            |
| 8                   | Плотность очищаемой воды                                                                    | $\text{кг}/\text{м}^3$                           | $\rho_w$                     | 1000                                           |
| 9                   | Вязкость динамическая воды                                                                  | Па·с                                             | $\mu$                        | $10^{-3}$                                      |
| 10                  | Молекулярная масса:<br>- цезия<br>- стронция                                                | $\text{кг}/\text{кмоль}$                         | $M_1$<br>$M_2$               | 137<br>90                                      |
| 11                  | Валентность ионов:<br>- цезия<br>- стронция                                                 | -<br>-                                           | $n_1$<br>$n_2$               | 1<br>2                                         |
| 12                  | Коэффициенты диффузии в воде ионов:<br>- цезия<br>- стронция                                | $\text{м}^2/\text{с}$                            | $D_{y1}$<br>$D_{y1}$         | $0,57 \cdot 10^{-9}$<br>$0,73 \cdot 10^{-9}$   |
| 13                  | Коэффициенты диффузии в ионите ионов:<br>- цезия<br>- стронция                              | $\text{м}^2/\text{с}$                            | $D_{x1}$<br>$D_{x2}$         | $1,2 \cdot 10^{-10}$<br>$1,6 \cdot 10^{-10}$   |
| 14                  | Начальная концентрация ионов в воде, равная ПДК:<br>- цезия<br>- стронция                   | $\text{кг}/\text{м}^3$                           | $C_{o1}$<br>$C_{o2}$         | $3,13 \cdot 10^{-12}$<br>$0,72 \cdot 10^{-12}$ |
| 15                  | Конечная концентрация ионов в воде, равная природному фону:<br>- цезия<br>- стронция        | $\text{кг}/\text{м}^3$                           | $C_{к1}$<br>$C_{к2}$         | $2,32 \cdot 10^{-15}$<br>$1,44 \cdot 10^{-15}$ |
| 16                  | Высота слоя ионита                                                                          | м                                                | H                            | 0,50                                           |
| Расчетные параметры |                                                                                             |                                                  |                              |                                                |
| 17                  | Стандартный диаметр колонны                                                                 | м                                                | $D_a$                        | 1,6                                            |
| 18                  | Скорость фиктивная очищаемой воды                                                           | м/с                                              | $V_p$                        | $1,38 \cdot 10^{-3}$                           |
| 19                  | Число Шмидта для цезия                                                                      | -                                                | $S_{c1}$                     | 1754,4                                         |
| 20                  | Число Шмидта для стронция                                                                   | -                                                | $S_{c2}$                     | 1369,9                                         |
| 21                  | Число Шервуда для цезия                                                                     | -                                                | $S_{h1}$                     | 15,6                                           |
| 22                  | Число Шервуда для стронция                                                                  | -                                                | $S_{h2}$                     | 15,4                                           |
| 23                  | Поверхностный коэффициент внешней массоотдачи:<br>- для цезия<br>- для стронция             | м/с                                              | $\beta_{y1}$<br>$\beta_{y2}$ | $1,05 \cdot 10^{-5}$<br>$1,25 \cdot 10^{-5}$   |
| 24                  | Объемный коэффициент для массопередачи:<br>- для цезия<br>- для стронция                    | л/с                                              | $k_{v1}$<br>$k_{v2}$         | $4,2 \cdot 10^{-2}$<br>$5 \cdot 10^{-2}$       |
| 25                  | Число Био:<br>- для цезия<br>- для стронция                                                 |                                                  | $B_{i1}$<br>$B_{i2}$         | $5,41 \cdot 10^{-2}$<br>$4,75 \cdot 10^{-2}$   |
| 26                  | Коэффициенты равновесной зависимости в уравнении Лекгмюра:<br>- для цезия<br>- для стронция | $\text{м}^2/\text{кг}$<br>$\text{м}^3/\text{кг}$ | a<br>в                       | 1,31<br>1,99                                   |
| 27                  | Время рабочего цикла                                                                        | час                                              | $\tau$                       | 7,41                                           |
| 28                  | Концентрация в очищенной воде цезия в конце времени рабочего цикла                          | $\text{кг}/\text{м}^3$                           | $C_1$                        | $2,32 \cdot 10^{-15}$                          |
| 29                  | Концентрация в очищенной воде стронция в конце времени рабочего цикла                       | $\text{кг}/\text{м}^3$                           | $C_2$                        | $6,07 \cdot 10^{-16}$                          |

Как видно из расчетных данных табл. 2, время рабочего цикла дополнительной адсорбционной колонны лимитируется ионами цезия в очищенной воде, по которым концентрация, соответствующая их естественному природному фону, достигается ко времени  $\tau = 7,41$  часа.

По радиоактивным ионам стронция концентрация в воде  $C_2 < C_{e2}$ , то есть даже меньше естественной природной на 42 %. Профили концентраций цезия и стронция в очищаемой воде по высоте слоя ионита приведены на рис. 1.

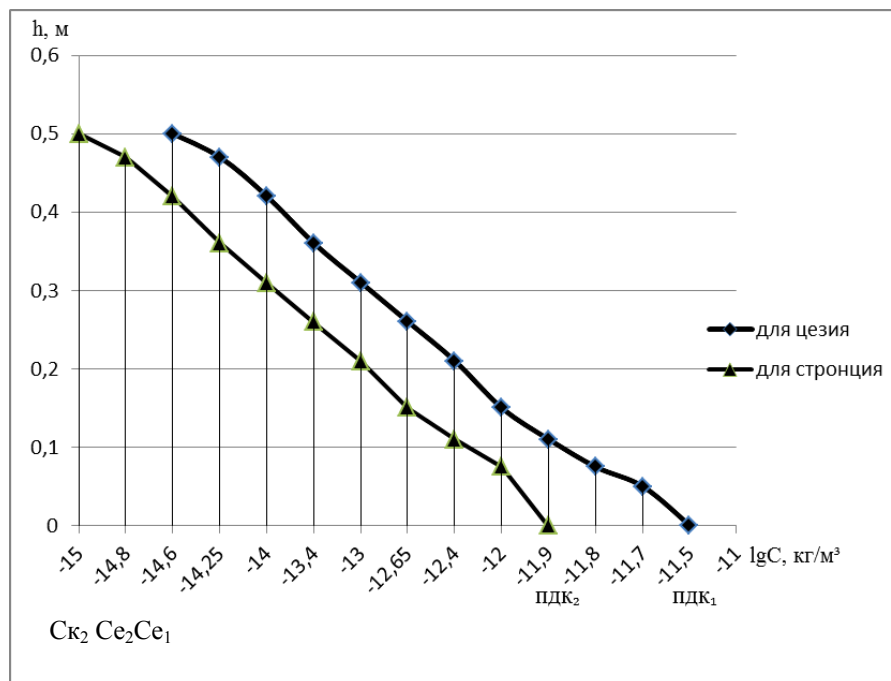


Рис. 1. Профили концентраций в очищаемой воде по высоте неподвижного слоя ионита во второй колонне в конце рабочего цикла ( $\tau = 7,41$  часа) для цезия и стронция

Рассчитаем для рассматриваемой дополнительной ионообменной колонны защитную оболочку с целью возможности работы вблизи нее обслуживающего персонала.

Разница концентраций по цезию

$$\Delta C_1 = C_{01} - C_{к1} \approx 3,13 \cdot 10^{-12} \text{ кг/м}^3$$

При переходе к радиоактивным параметрам концентрации согласно формуле (1):

$$\Delta C_1^* = \frac{\Delta C_1}{2,8 \cdot 10^6 \text{ МТ}_1} = 2,7 \cdot 10^{-10} \text{ Ки/л}$$

Аналогично для стронция (см. табл. 1):

$$\Delta C_2^* = 10^{-10} \text{ Ки/л}$$

Тогда за время рабочего цикла  $\tau = 7,41$  часа в ионите накапливается радиоактивных изотопов цезия с активностью

$$A_1 = q_v \Delta C_1^* \cdot 10^3 \cdot \tau = 20 \cdot 10^{-6} \text{ Ки} = 20 \text{ мКи.}$$

То же для стронция

$$A_2 = q_v \Delta C_2^* \cdot 10^3 \cdot \tau = 7,41 \cdot 10^{-6} \text{ Ки} = 7,41 \text{ мКи.}$$

Допускаемая доза облучения для работающего персонала  $J = 0,006 \text{ Р/час}$  [11, 12]. Без при-

менения защиты в продолжении восьмичасовой рабочей смены работающий персонал будет получать мощность дозы облучения от ионов цезия, если он находится на расстоянии от ионообменной колонны  $l = 60 \text{ см}$  [11]:

$$J_{01} = 6,5 \cdot \frac{A_1 n_1}{l^2} = 6,5 \cdot \frac{20 \cdot 1}{60^2} = 0,0361 \text{ Р/час}$$

Аналогично от ионов стронция

$$J_{02} = 6,5 \cdot \frac{A_2 n_2}{l^2} = 6,5 \cdot \frac{7,41 \cdot 2}{60^2} = 0,0267 \text{ Р/час}$$

Общая мощность облучения от обоих радиоактивных изотопов, накапливаемых в колонне:

$$J_o = J_{01} + J_{02} = 6,28 \cdot 10^{-2} \text{ Р/час,}$$

то есть в 10,5 раз превышает допускаемую, если не будет защиты.

При применении свинцовой защитной оболочки используем номограмму для расчета толщины защиты. Для двадцатикратного ослабления мощности облучения от цезия с энергией изотопов 0,662 МэВ толщина свинцовой оболочки должна составлять 4 см. Тогда на внеш-

ней ее поверхности активность упадет в 20 раз и составит

$$a_1 = A_1 / 20 = 1 \text{ мКи},$$

а мощность дозы облучения

$$i_{o1} = \frac{J_{o1}}{20} = 1,81 \cdot 10^{-3} \text{ Р/час}$$

Аналогично для ионов стронция с энергией изотопов 2,28 МэВ при принятой толщине свинцовой оболочки 7 см активность упадет в 7 раз и составит

$$a_2 = A_2 / 6 = 1,24 \text{ мКи},$$

а мощность дозы облучения

$$i_{o2} = \frac{J_{o2}}{7} = 3,81 \cdot 10^{-3} \text{ Р/час}$$

Общая мощность облучения составит

$$i_0 = i_1 + i_2 = 5,62 \cdot 10^{-3} \text{ Р/час},$$

что на 6,3 % меньше допускаемой мощности облучения, равной  $6 \cdot 10^{-3} \text{ Р/час}$ .

Можно сразу в первой колонне вести процесс ионообмена так, чтобы вода очищалась от радиоактивных изотопов цезия и стронция не до ПДК, а до природных естественных фоновых концентраций. В этом случае концентрации радиоактивных изотопов в воде будут меняться (см. табл. 1):

– для цезия: от начальной  $C_{o1} = 5,95 \cdot 10^{-8} \text{ кг/м}^3$  до конечной  $C_{к1} = 2,32 \cdot 10^{-15} \text{ кг/м}^3$ ;

– для стронция: от начальной  $C_{o2} = 2,92 \cdot 10^{-8} \text{ кг/м}^3$  до конечной  $C_{к2} = 1,44 \cdot 10^{-15} \text{ кг/м}^3$ .

При той же высоте слоя ионита в первой колонне ( $H = 0,5 \text{ м}$ ) уже через время  $\tau \cong 6 \text{ мин.}$  проскоковые концентрации в воде на выходе из ионообменного слоя будут превышать фоновые по цезию.

Поэтому необходимо высоту слоя ионита увеличить с 0,5 м до 0,7 м. В этом случае время рабочего цикла увеличивается с 6 мин. до 2,51 часа.

Рассчитаем защитную оболочку этой колонны по выше представленному алгоритму.

1. Разница концентраций:

– по цезию  $\Delta C_1 = 5,95 \cdot 10^{-8} \text{ кг/м}^3$ ;

– по стронцию  $\Delta C_2 = 2,92 \cdot 10^{-8} \text{ кг/м}^3$ .

2. Переход к радиоактивным параметрам концентраций:

– для цезия  $\Delta C_1 = 5,13 \cdot 10^{-6} \text{ Ки/л}$ ;

– для стронция  $\Delta C_2 = 4,05 \cdot 10^{-6} \text{ Ки/л}$ .

3. Активность изотопов за время рабочего цикла  $\tau = 2,51 \text{ часа}$ :

– для цезия  $A_1 = 12,8 \cdot 10^4 \text{ мКи}$ ;

– для стронция  $A_2 = 10,2 \cdot 10^4 \text{ мКи}$ .

4. Без применения защиты мощность дозы облучения для обслуживающего персонала при расстоянии от колонны 1 м составляет от ионов:

– цезия  $J_{o1} = 83,2 \text{ Р/час}$ ;

– стронция  $J_{o2} = 66,3 \text{ Р/час}$ ,

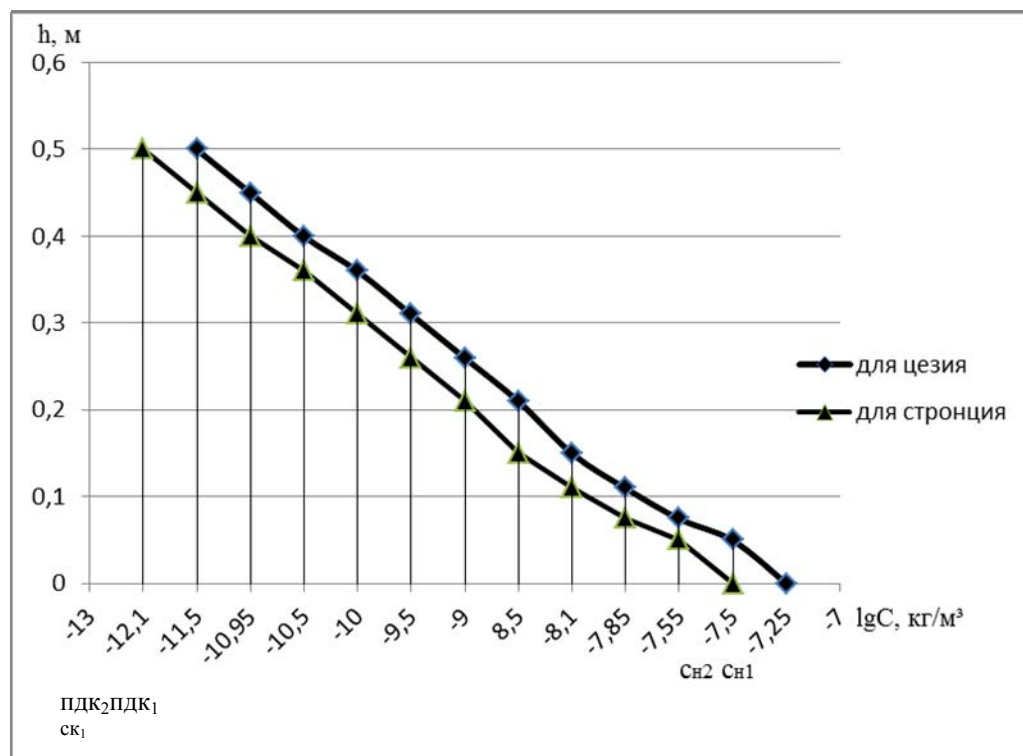


Рис. 2. Профили концентраций в очищаемой воде по высоте неподвижного слоя ионита в первой колонне в конце рабочего цикла ( $\tau = 3,56 \text{ час.}$ ) для цезия и стронция

Общая мощность дозы облучения составит  $J_0=149,5$  Р/час, то есть в 24917 раз превышает допускаемую  $J_d=0,006$  Р/час.

Принимаем толщину свинцовой оболочки для колонны  $\delta = 25$  см.

Тогда активность ионов цезия уменьшится более, чем в 1 млн. раз [11] и составит  $a_1 < 0,013$  мКи, а мощность дозы облучения составит:

$$i_{01}=8,32 \cdot 10^{-5} \text{ Р/час.}$$

Для ионов стронция активность уменьшится в 12500 раз и составит  $a_2=8,16$  мКи, а мощность дозы облучения:

$$i_{02}=5,3 \cdot 10^{-3} \text{ Р/час.}$$

Общая мощность дозы облучения составит:

$$i_0 \sim 5,31 \cdot 10^{-3} \text{ Р/час,}$$

что меньше допускаемой  $J_d=0,006$  Р/час [11].

Однако масса свинцовой оболочки такой ионообменной колонны диаметром  $D = 1,6$  м с высотой ионообменного слоя  $H=0,7$  м и толщиной свинца 25 см будет в 5 раз больше, чем дополнительной колонны, рассчитанной ранее, с высотой ионообменного слоя  $H=0,5$  м и толщиной свинца 7 см при том же диаметре колонны  $D = 1,6$  м.

При этом расстояние, на котором может работать персонал от свинцовой оболочки при работе на дополнительной колонне может быть уменьшено с 1 м до 60 см.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Постановление Госатомнадзора РФ от 14.11.1997 N 9 "Об утверждении и введении в действие нормативного до-

кумента ПНАЭ Г-01-011-97 "Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. ОПБ-88/97".

2. Белоусова, И.М. Естественная радиоактивность / И.М. Белоусова, Ю.М. Штуккенберг. – М., 1967.

3. Вопросы ядерной метеорологии. Сб.статей. – М., 1962, с.259-271.

4. Нормы радиационной безопасности. (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере прав защиты потребителей и благополучия человека, 2008.

5. Об идеальных и реальных экологических процессах и их количественной оценке / А.Б. Голованчиков, Л.В. Курылева, Т.А. Голованчикова, В.Л. Гончаренко // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. - 2004. - Вып.8. – С. 6-10.

6. Добряков, А.В. Очистка сточных вод от радиоактивных изотопов цезия и стронция в неподвижном слое ионита и постоянном электрическом поле / А.В. Добряков, А.Б. Голованчиков // АНРИ, №2 (61) – 2010, с.39-43.

7. Добряков, А.В. Очистка сточных вод от радиоактивных изотопов / А.В. Добряков, А.Б. Голованчиков // Безопасность жизнедеятельности, №9 (117). – 2010, с.22-26.

8. Голованчиков, А.Б. Электроионообменная очистка воды от радиоактивного йода / А.Б. Голованчиков, Н.Ю. Ефремов, Н.А. Дулькина // АНРИ, №3 (70). – 2012, с.52-54.

9. Карякин, Н.И. Краткий справочник по физике / Н.И. Карякин, К.Н. Быстров, П.С. Киреев. – Изд. 2-е. – М.: Высшая школа, 1964, 574с.

10. Голованчиков, А.Б. Влияние электрического поля на одновременную очистку сточных вод от радиоактивных ионов цезия и стронция / А.Б. Голованчиков, А.В. Добряков, М.Ю. Ефремов, Н.А. Дулькина // Энергоснабжение и водоподготовка. - 2010.-№5 (октябрь), с.17-22.

11. Голованчиков, А.Б. Интенсификация очистки воды от ионов жесткости и железа / А.Б. Голованчиков, М.Ю. Ефремов, Н.А. Дулькина // Водоснабжение и санитарная техника. -2012, №9, с.58-63.

12. Бабинчук, В.С. Ядерная физика. Часть III. Взаимодействие ядерных излучений с веществом / В.С. Бабинчук, Ю.А. Ницук. - Одесса. Национальный университет им. И.И. Мечникова, 2007, 48 с.

УДК 616:519.2

*А. В. Дедов, Г. А. Попов*

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАГНОЗА ПО СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТЫМ ЗАБОЛЕВАНИЯМ НА ОСНОВЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НАБОРА ФОРМАЛИЗОВАННЫХ МОДЕЛЕЙ

Астраханская государственная медицинская академия  
Астраханский государственный технический университет  
dedov1965@rambler.ru, popov@astu.org

Работа посвящена построению формализованной процедуры определения диагноза по сердечнососудистым заболеваниям, опирающимся на набор формализованных моделей, которые описывают зависимость диагноза от отдельных наборов первичных диагностических признаков. На основе представительного набора данных, полученных в результате многолетнего наблюдения за больными, сформирован набор из 14 моделей, удовлетворяющих введенному авторами критерию эффективности модели. Описана процедура постановки диагноза на основе данных, полученных в результате построенных моделей.

*Ключевые слова.* Регрессионная модель, определение диагноза, критерий эффективности модели, сердечнососудистые заболевания, набор моделей.

*A. V. Dedov, G. A. Popov*

### A DEFINITE DIAGNOSIS OF CARDIOVASCULAR DISEASES ON THE BASIS USING A SET FORMALIZED MODELS

Astrakhan State Medical Academy  
Astrakhan State Technical University

Work is devoted to the construction of a formalized procedure for determining a diagnosis on cardiovascular disease, relying on a set of formal models that describe the dependence of the diagnosis of separate sets of primary diagnostic features. On the basis of representative set of data obtained as a result of long-term monitoring of patients, formed a set of 14 models that satisfying introduced by the authors on the efficiency of the model. Described procedure diagnosis based on data obtained from in model construction.

*Keywords.* Regression model, the definition of the diagnosis, the criterion of model performance, cardiovascular disease, a set of models.



### Введение

В работе [1] была сформулирована проблема построения формализованных моделей по заболеваниям печени, опираясь на данные обследования 137 пациентов, причем в данных много пробелов и возможны неточности. Исходя из описанной ситуации, была предложена процедура построения набора регрессионных моделей, а также способ их использования для определения диагноза. В данной работе также строится пакет регрессионных моделей для определения острого коронарного синдрома (ОКС), нередко имеющего исход в инфаркт миокарда. Кроме [1], других работ, близких к данной по методам исследования, нет. Определенный интерес с точки зрения рассматриваемой проблемы представляют работы [2–5].

### Исходные данные обследования пациентов

Пациенты, включенные в исследование, находились на обследовании и лечении в отделении кардиологии (БИТ) ГКБ №3 г.Астрахани с 2004 по 2010 г.г. Они составили группу из 136 лиц с ОКС, в возрасте от 35 до 84 лет, в среднем  $58,47 \pm 0,93$  лет. Критериями включения в исследование было наличие направительного диагноза ОКС, подтвержденного с помощью комплекса лабораторно-инструментальных методов исследования, отсутствие предшествующих нарушений ритма и клинически значимой сердечной недостаточности (ХСН), не связанных с ИБС, пороков сердца, кардиомиопатий, тяжелых конкурирующих и/или сопутствующих заболеваний со стороны других органов и систем в фазе обострения или декомпенсации, а также отсутствие летальных исходов при нахождении в стационаре. Больные отбирались в случайном порядке. Все пациенты были обследованы согласно Российским национальным стандартам в кардиологии. Кроме того определялись сывороточные маркеры вирусных и бактериальных инфекций (*Chlamidophyla pneumoniae*, *Mycoplasma pneumoniae*, *Helicobacter pylori*, вирус простого герпеса (HSV-1), вирус Эпштейна-Барр (ВЭБ), цитомегаловирус (ЦМВ), вирус гепатита А (HAV) и антитела к патогенной и условно-патогенной микрофлоре (*E.coli*, *Proteus mirabilis*, *Candida albicans*, *Streptococcus* spp., *Bacteroides*, *Klebsiella pneumoniae*) классов IgG, IgM, IgA или суммарные антитела методом ИФА (качественным, полуколичественным или количественным). Была составлена база данных с наличием 106 используемых парамет-

ров, включая результаты исследований, формализованные по «бинарному» принципу «0 или 1», то есть «нет признака»-«есть признак» (жалобы пациентов, результаты физикального исследования, некоторые инструментальные и лабораторные показатели), а также количественные показатели – результаты определения биохимических параметров, данные инструментальных методов исследования (ультразвуковое, ЭКГ-исследования), а также иные факторы, (год рождения, возраст). В ряде случаев использовалась шкала признаков. Целью исследования была разработка оценки «вклада» в болезнь сывороточных маркеров вирусных и бактериальных инфекций, антител к патогенной и условно-патогенной микрофлоре.

### Построение регрессионных моделей

Основой построения являются результаты расчета характеристик моделей, построенных для разных сочетаний входных факторов. Расчеты выполнены на основе программной системы EViews. В результате выполнения расчетов было построено 269 моделей (в случае заболеваний печени [1] было 160 моделей), что обусловлено более полным и качественным составом исходных данных. В частности, пустых, незаполненных ячеек в исходной таблице данных существенно меньше. Поэтому выбор наиболее важных и эффективных моделей из числа полученных в случае сердечных заболеваний можно провести более качественно и полно. Именно, схема выбора моделей, выбранная при анализе моделей заболеваний печени, модернизируется следующим образом.

1. При сравнительном анализе моделей печени был введен специальный коэффициент  $r$  – средняя величина ошибки в пересчете на один фактор в модели. В силу общепринятых подходов к сравнительному анализу набора моделей, следовало бы сравнить их, прежде всего, по коэффициенту значимости – вероятности того, что полученное ненулевое значение коэффициента детерминации можно объяснить случайными отклонениями в исходных данных. В случае медицинской сферы чем больше факторов участвуют в описании заболевания, тем более качественна модель с точки зрения учета взаимосвязей между органами. Поэтому, в отличие от коэффициента значимости, при сравнении различных моделей заболеваний целесообразно учитывать также количество факторов, участвующих в модели, что и породило необходимость введения коэффициента  $r$  в качестве

одного из основных критериев сравнения построенных моделей.

Тем не менее, вначале из всего множества построенных моделей вначале были выделены модели, у которых коэффициент детерминации  $R^2$  оказался приемлемо большим. С учетом количества полученных моделей в качестве такого порога было выбрано значение 0,2, то есть были выделены модели, у которых выполнено условие  $R^2 \geq 0,2$ . Таким моделей оказалось 51; они были упорядочены по значению коэффициента  $R^2$ . Эти модели приведены в табл. 1.

При этом мы использовали следующие сокращения:  $x_1$  - Креатинфосфокиназа при поступлении-КФК (ед/л),  $x_2$  - Фибриноген А при поступлении (г/л),  $x_3$  - Сегментоядерные лейкоциты (%),  $x_4$  - Лейкоциты при поступлении ( $\cdot 10^{12}/л$ ),  $x_5$  - Антигликолипиновые антитела (мкг/мл),  $x_6$  - Изменения ЭКГ «передней» локализации (0-нет, 1- есть),  $x_7$  - Поражение ле-

вой коронарной артерии по данным ЭКГ(0-нет, 1- есть),  $x_8$  - Поражение правой коронарной артерии по данным ЭКГ(0-нет, 1- есть),  $x_9$  - ОКС с подъемом сегмента ST(0-нет, 1- есть),  $x_{10}$  - Конечный систолический размер левого желудочка по данным эхокардиоскопии – КСР (мм),  $x_{11}$  - Гипокинезия миокарда (0-нет, 1- есть),  $x_{12}$  - Концентрация холестерина (моль/л).

Как видно из приведенного перечня, имеются три модели с очень высоким коэффициентом детерминации, близким к 1 (больше 0,9, а двух первых моделей – больше 0,95). К сожалению, объем выборки, использованный при построении этих моделей очень мал (6 – 7 значений, тогда в статистике обычно рекомендуется иметь не менее 20 наблюдений), что вызывает определенные сомнения в истинной достоверности полученных моделей. Тем не менее, у первой из этих моделей коэффициент значимости (равный 0,054) очень низкий и почти укладывается в общепринятый интервал значений: от 0 до 0,05.

Таблица 1

Упорядоченный по коэффициенту детерминации перечень моделей

| №  | Наименование переменных    | Коэффициент детерминации | Объем выборки | Уровень достоверности | Коэффициент $r$ |
|----|----------------------------|--------------------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| 1  | $x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_6$    | 0,9719                   | 7             | 0,0554                | 3,362773        |
| 2  | $x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_8$    | 0,971328                 | 6             | 0,25156               | 3,96239         |
| 3  | $x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_6$    | 0,943                    | 6             | 0,351278              | 5,546545        |
| 4  | $x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5$    | 0,8008                   | 8             | 0,625                 | 7,486648        |
| 5  | $x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_9$    | 0,74504                  | 7             | 0,4449                | 9,528854        |
| 6  | $x_2 \ x_3 \ x_5$          | 0,691929                 | 7             | 0,261769              | 10,31379        |
| 7  | $x_3 \ x_4 \ x_{10}$       | 0,549787                 | 7             | 0,436713              | 11,93293        |
| 8  | $x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_7$    | 0,54576                  | 7             | 0,70214               | 11,97059        |
| 9  | $x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_{12}$ | 0,538657                 | 7             | 0,70984               | 12,03607        |
| 10 | $x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4$    | 0,51496                  | 6             | 0,87576               | 14,2869         |
| 11 | $x_1 \ x_2 \ x_3$          | 0,51489                  | 7             | 0,48103               | 12,24652        |
| 12 | $x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_7$    | 0,51085                  | 6             | 0,878                 | 14,32783        |
| 13 | $x_3 \ x_{10}$             | 0,43212                  | 8             | 0,2430                | 11,2727         |
| 14 | $x_3 \ x_4 \ x_5 \ x_9$    | 0,3421                   | 7             | 0,8829                | 13,42377        |
| 15 | $x_4 \ x_5 \ x_{11}$       | 0,328871                 | 17            | 0,14656               | 5,555146        |
| 16 | $x_4 \ x_5 \ x_{11}$       | 0,32887                  | 17            | 0,14656               | 5,555148        |
| 17 | $x_1 \ x_2 \ x_{10}$       | 0,31833                  | 10            | 0,48025               | 9,4798          |
| 18 | $x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_7$    | 0,31332                  | 12            | 0,5625                | 7,91373         |

Окончание табл. 1

| №  | Наименование переменных                            | Коэффициент детерминации | Объем выборки | Уровень достоверности | Коэффициент $r$ |
|----|----------------------------------------------------|--------------------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| 19 | $x_7 \ x_9$                                        | 0,31019                  | 57            | 0,000044              | 1,66785         |
| 20 | $x_1 \ x_2 \ x_5$                                  | 0,308148                 | 13            | 0,32258               | 7,317988        |
| 21 | $x_4 \ x_5 \ x_7$                                  | 0,2893                   | 18            | 0,176                 | 5,317992        |
| 22 | $x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9$                            | 0,2833                   | 45            | 0,0085                | 2,131181        |
| 23 | $x_4 \ x_7$                                        | 0,27804                  | 52            | 0,00034               | 1,847249        |
| 24 | $x_4 \ x_5 \ x_{10}$                               | 0,2722358                | 11            | 0,49917               | 8,747551        |
| 25 | $x_4 \ x_5 \ x_{10}$                               | 0,272235                 | 11            | 0,499175              | 8,747553        |
| 26 | $x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{12}$                   | 0,2684                   | 44            | 0,030588              | 2,189335        |
| 27 | $x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{12}$                         | 0,26685                  | 44            | 0,01458               | 2,190314        |
| 28 | $x_5 \ x_{10}$                                     | 0,26103                  | 12            | 0,25634               | 8,044422        |
| 29 | $x_1 \ x_7$                                        | 0,25135                  | 45            | 0,002289              | 2,150881        |
| 30 | $x_3 \ x_4 \ x_{11}$                               | 0,248396                 | 25            | 0,10531               | 3,874634        |
| 31 | $x_2 \ x_{10}$                                     | 0,24271                  | 10            | 0,37792               | 9,700989        |
| 32 | $x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_{11}$                         | 0,2345                   | 22            | 0,30868               | 4,41871         |
| 33 | $x_6 \ x_7$                                        | 0,23146                  | 57            | 0,000818              | 1,706745        |
| 34 | $x_5 \ x_{11}$                                     | 0,23128                  | 18            | 0,13906               | 5,404929        |
| 35 | $x_7$                                              | 0,22958                  | 57            | 0,00016               | 1,707526        |
| 36 | $x_4 \ x_9$                                        | 0,221569                 | 131           | 1,09163e-7            | 0,744385        |
| 37 | $x_9 \ x_{11}$                                     | 0,22149                  | 94            | 1,12826e-05           | 1,037407        |
| 38 | $x_7 \ x_{12}$                                     | 0,22078                  | 56            | 0,00134               | 1,741649        |
| 39 | $x_2 \ x_9$                                        | 0,22077                  | 105           | 2,9839e-06            | 0,928882        |
| 40 | $x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12}$ | 0,2166                   | 33            | 0,4624                | 2,958365        |
| 41 | $x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11}$          | 0,2165                   | 33            | 0,3386                | 2,958432        |
| 42 | $x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{12}$          | 0,21579                  | 34            | 0,3182                | 2,871882        |
| 43 | $x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10}$                   | 0,21578                  | 34            | 0,2093                | 2,871888        |
| 44 | $x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11}$                | 0,2133                   | 33            | 0,2341                | 2,960566        |
| 45 | $x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{11} \ x_{12}$       | 0,2133                   | 33            | 0,34979               | 2,960566        |
| 46 | $x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{11}$                   | 0,2118                   | 33            | 0,2383                | 2,961555        |
| 47 | $x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10}$                         | 0,2117                   | 34            | 0,1292                | 2,874514        |
| 48 | $x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{10} \ x_{12}$                | 0,2117                   | 34            | 0,22029               | 2,874514        |
| 49 | $x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{11}$                         | 0,2064                   | 33            | 0,15276               | 2,965054        |
| 50 | $x_9$                                              | 0,20568                  | 136           | 2,9434e-8             | 0,719573        |
| 51 | $x_9 \ x_{12}$                                     | 0,202799                 | 134           | 3,57017e-07           | 0,730761        |

Итак, в табл. 1 перечислены все полученные модели, из которых и необходимо выбрать базовые модели для постановки диагноза – последние и могут представлять практический интерес.

2. Приведенные в табл. 1 модели были «про-

сеяны» по показателю значимости  $r$  каждой из них (последний столбец табл. 1). Оставлены только те модели, у которых коэффициент значимости меньше 0,05. Результаты просеивания приведены в табл. 2 (14 моделей).

Таблица 2

Просеянный перечень моделей (по показателю значимости  $<0,05$ )

| №  | Наименование переменных          | Коэффициент детерминации | Объем выборки | Уровень достоверности | Коэффициент $r$ |
|----|----------------------------------|--------------------------|---------------|-----------------------|-----------------|
| 1  | $x_7 \ x_9$                      | 0,31019                  | 57            | 0,000044              | 1,66785         |
| 2  | $x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9$          | 0,2833                   | 45            | 0,0085                | 2,131181        |
| 3  | $x_4 \ x_7$                      | 0,27804                  | 52            | 0,00034               | 1,847249        |
| 4  | $x_6 \ x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{12}$ | 0,2684                   | 44            | 0,030588              | 2,189335        |
| 5  | $x_7 \ x_8 \ x_9 \ x_{12}$       | 0,26685                  | 44            | 0,01458               | 2,190314        |
| 6  | $x_1 \ x_7$                      | 0,25135                  | 45            | 0,002289              | 2,150881        |
| 7  | $x_6 \ x_7$                      | 0,23146                  | 57            | 0,000818              | 1,706745        |
| 8  | $x_7$                            | 0,22958                  | 57            | 0,00016               | 1,707526        |
| 9  | $x_4 \ x_9$                      | 0,221569                 | 131           | 1,09163e-7            | 0,744385        |
| 10 | $x_9 \ x_{11}$                   | 0,22149                  | 94            | 1,12826e-05           | 1,037407        |
| 11 | $x_7 \ x_{12}$                   | 0,22078                  | 56            | 0,00134               | 1,741649        |
| 12 | $x_2 \ x_9$                      | 0,22077                  | 105           | 2,9839e-06            | 0,928882        |
| 13 | $x_9$                            | 0,20568                  | 136           | 2,9434e-8             | 0,719573        |
| 14 | $x_9 \ x_{12}$                   | 0,202799                 | 134           | 3,57017e-07           | 0,730761        |

Все модели в табл. 2 опираются на достаточно большой объем выборки (от 44 наблюдений до 136), что позволяет говорить о высоком уровне их надежности и стабильности: добавление новых наблюдений, по-видимому, не приведет к существенному изменению коэффициентов моделей. При этом ни в одной модели табл. 2 не присутствует ни один фактор из списка тех маркеров, которые предлагалось включить в состав диагностических параметров. Таким образом, введение новых факторов не позволило повысить качество диагностических моделей, что говорит об отсутствии значимости м важности данных показателей для прогнозирования исхода ОКС в инфаркт миокарда.

3. Сравним все приведенные в табл. 2 модели по показателю  $r$ . Значения показателя  $r$ , рассчитанные по формуле  $r = r(n) = \Delta/n$ , приведены в последних столбцах табл. 1 и 2. Анализ пока-

зывает, упорядочивание по коэффициенту  $r$  значительно отличается от первоначального упорядочивания по коэффициенту значимости; первая модель по коэффициенту значимости оказалась 25-ой, а на первое место по коэффициенту  $r$  переместилась 50-ая модель. Таким образом, результаты анализа конкретных заболеваний, опирающиеся на показатель  $r$ , могут существенно отличаться от результатов анализа на основе показателя статистической значимости.

#### Анализ моделей по составу входящих в них факторов

Сравним различные факторы по частоте использования их в различных моделях. Прежде всего, рассмотрим общий набор построенных моделей, затем модели по табл. 2. Результаты приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Частота использования факторов в моделях

| №  | Наименование факторов                                                                          | Частота появления фактора (абс./%) по: |         |
|----|------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------|
|    |                                                                                                | табл. 1                                | табл. 2 |
| 1  | $x_1$ - Креатинфосфокиназа при поступлении-КФК (ед/л) _                                        | 10/19                                  | 2/9     |
| 2  | $x_2$ - Фибриноген А при поступлении (г/л)                                                     | 15/29                                  | 2/9     |
| 3  | $x_3$ - Сегментоядерные лейкоциты (%)                                                          | 17/33                                  | 2/9     |
| 4  | $x_4$ - Лейкоциты при поступлении ( $\cdot 10^{12}/л$ )                                        | 16/31                                  | 6/27    |
| 5  | $x_5$ - Антигликолипиновые антитела (мкг/мл)                                                   | 13/25                                  | 4/18    |
| 6  | $x_6$ - Изменения ЭКГ «передней» локализации (0 -нет, 1- есть)                                 | 10/19                                  | 4/18    |
| 7  | $x_7$ - Поражение левой коронарной артерии по данным ЭКГ(0-нет, 1- есть)                       | 23/44                                  | 13/59   |
| 8  | $x_8$ - Поражение правой коронарной артерии по данным ЭКГ(0-нет, 1- есть)                      | 14/27                                  | 5/23    |
| 9  | $x_9$ - ОКС с подъемом сегмента ST(0-нет, 1- есть)                                             | 21/40                                  | 10/45   |
| 10 | $x_{10}$ - Конечный систолический размер левого желудочка по данным эхо-кардиоскопии –КСР (мм) | 15/29                                  | 1/5     |
| 11 | $x_{11}$ - Гипокинезия миокарда (0-нет, 1- есть)                                               | 12/23                                  | 6/27    |
| 12 | $x_{12}$ - Концентрация холестерина (моль/л)                                                   | 9/17                                   | 4/18    |

Анализ данных, полученных в табл. 3, позволяет сделать ряд полезных выводов:

а) в полученном перечне моделей три наиболее часто встречающихся фактора следующие (по столбцу «табл.1»):  $x_7$  - Поражение левой коронарной артерии по данным ЭКГ(0-нет, 1- есть) – встречается в 44% моделей,  $x_9$  - ОКС с подъемом сегмента ST(0-нет, 1- есть) – в 40 % моделей,  $x_3$  -Сегментоядерные лейкоциты (%) – в 33% моделей;

б) Пять наиболее важных факторов по критериям значимости и  $r$  являются (столбец «табл.3»)  $x_7$  - Поражение левой коронарной артерии по данным ЭКГ(0-нет, 1- есть) – 64%,  $x_9$  - ОКС с подъемом сегмента ST(0-нет, 1- есть) – 64%,  $x_{12}$  - Концентрация холестерина (моль/л) – 29%;  $x_6$  - Изменения ЭКГ «передней» локализации (0-нет, 1-

есть) – 21%,  $x_8$  - Поражение правой коронарной артерии по данным ЭКГ(0-нет, 1- есть) – 21%. Отметим, что модель, построенная по этим пяти факторам, по критерию значимости занимает 4-ю позицию, а по критерию  $r$  - 13-ю позицию.

## Регрессионные модели определения диагноза

Выпишем соотношения для 14 наиболее эффективных моделей; нумерация моделей – по табл. 2, нумерация факторов – по табл. 3.

Введем переменные:  $y_j$  - значение диагноза по  $j$ -ой модели ( $j = \overline{1;14}$ );  $x_i$  - значение  $i$ -го фактора ( $i = \overline{1;12}$ ) - список см. перед табл. 1. Тогда на основе результатов расчетов (файл «Результаты расчета в EViews по ОКС-моделям») получаем соотношения:

$$y_1 = 0.45761 + 0.38262 \cdot x_7 + 0.24813 \cdot x_9;$$

$$y_2 = 0.41417 + 0.10568 \cdot x_6 + 0.32611 \cdot x_7 + 0.08576 \cdot x_8 + 0.30807 \cdot x_9;$$

$$y_3 = 0.366597 + 0.01739 \cdot x_4 + 0.44996 \cdot x_7;$$

$$y_4 = 0.54801 + 0.09076 \cdot x_6 + 0.3043 \cdot x_7 + 0.07379 \cdot x_8 + 0.29078 \cdot x_9 + 0.01964 \cdot x_{12};$$

$$y_5 = 0.55606 + 0.31471 \cdot x_7 + 0.07064 \cdot x_8 + 0.29006 \cdot x_9 + 0.02089 \cdot x_{12};$$

$$y_6 = 0.41946 + 0.000489 \cdot x_1 + 0.36813 \cdot x_7;$$

$$y_7 = 0.55172 + 0.055556 \cdot x_6 + 0.39272 \cdot x_7;$$

$$\begin{aligned}
y_8 &= 0.55172 + 0.41256 \cdot x_7; \\
y_9 &= 0.32208 + 0.02391 \cdot x_4 + 0.40695 \cdot x_9 \\
y_{10} &= 0.48492 + 0.393658 \cdot x_9 + 0.1133 \cdot x_{11} \\
y_{11} &= 0.68817 + 0.38853 \cdot x_7 + 0.02098 \cdot x_{12} \\
y_{12} &= 0.32911 + 0.05184 \cdot x_2 + 0.40635 \cdot x_9 \\
y_{13} &= 0.51724 + 0.44194 \cdot x_9 \\
y_{14} &= 0.66148 + 0.42311 \cdot x_9 + 0.02402 \cdot x_{12}
\end{aligned}$$

В [1] была описана процедура определения диагноза на основе построенных моделей. Указанная процедура может быть усовершенствована следующим образом. Основное решение по процедуре, приведенной в [1], принималось на основе «принципа большинства» по всем решениям, которые получались на основе всей совокупности отобранных моделей. При этом не учитывались другие полученные характеристики моделей. Предлагается модифицировать процедуру принятия решений, учитывая как коэффициенты значимости моделей, так и коэффициенты  $r$ , на основе которых и были выбраны (и упорядочены модели; именно.

1. На основе результатов обследования пациента формируются значения переменных  $\{x_i; i = \overline{1;12}\}$ .

2. Подставив полученные значения  $x_i$  ( $i = \overline{1;12}$ ) в уравнения моделей, выписанные выше, получаем набор значений переменных  $\{y_j; j = \overline{1;14}\}$ .

3. Вычисляем значение  $Y = \sum_{j=1}^{14} w_j y_j$ , где весовые коэффициенты  $w_j$  находятся на основе соотношений  $w_j = r_j \cdot (1 - \gamma_j) \left( \sum_{k=1}^{14} r_k \cdot (1 - \gamma_k) \right)^{-1}$ ,  $\gamma_j$  - коэффициент значимости в  $j$ -ой модели, его значения приведены в таблице 3 (предпоследний столбец);  $r_k$  - значения коэффициента  $r$  (взяты из той же таблицы). Тогда для значений  $w_j$  получаем следующую таблицу значений

Таблица 4

Значения коэффициент  $w_j$ 

| $j$        | 1          | 2           | 3         | 4        | 5           | 6           | 7           |
|------------|------------|-------------|-----------|----------|-------------|-------------|-------------|
| $\gamma_j$ | 0,000044   | 0,0085      | 0,00034   | 0,030588 | 0,01458     | 0,002289    | 0,000818    |
| $r_j$      | 0,31019    | 0,2833      | 0,27804   | 0,2684   | 0,26685     | 0,25135     | 0,23146     |
| $w_j$      | 0,09132125 | 0,082699    | 0,081832  | 0,076604 | 0,07742     | 0,073832    | 0,06809     |
| $j$        | 8          | 9           | 10        | 11       | 12          | 13          | 14          |
| $\gamma_j$ | 0,00016    | 0,00000011  | 0,0000113 | 0,00134  | 0,000002984 | 0,000000029 | 0,000000357 |
| $r_j$      | 0,22958    | 0,221569    | 0,22149   | 0,22078  | 0,22077     | 0,20568     | 0,202799    |
| $w_j$      | 0,0675815  | 0,065233716 | 0,06521   | 0,064914 | 0,064998    | 0,060556    | 0,059707    |

Таким образом,

$$\begin{aligned}
Y &= 0,0913 \cdot y_1 + 0,0827 \cdot y_2 + 0,0818 \cdot y_3 + 0,0766 \cdot y_4 + 0,0774 \cdot y_5 + 0,0738 \cdot y_6 + 0,0681 \cdot y_7 + \\
&+ 0,0676 \cdot y_8 + 0,0652 \cdot y_9 + 0,0652 \cdot y_{10} + 0,0649 \cdot y_{11} + 0,065 \cdot y_{12} + 0,0606 \cdot y_{13} + 0,0597 \cdot y_{14}
\end{aligned}$$

4. Если  $Y \geq 0,5$ , то принимается диагноз, соответствующий значению 1; если же  $Y < 0,5$ , то принимается диагноз, соответствующий значению 0.

#### Заключение

В работе получены следующие результаты:

1. На основе имеющихся данных об обследовании 136 пациентов с помощью программ

ной системы EViews построен набор из 269 регрессионных моделей, описывающих зависимость развития инфаркта миокарда при ОКС от значений обследуемых параметров (количество параметров 106). Из полученной совокупности моделей выбраны те, у которых коэффициент детерминации, характеризующий качество модели, не меньше 0,2 и коэффициент значимости не превосходит повсеместно используемый на практике уровень 0,05. В результате получили набор из 14 моделей.

2. Проведен анализ 12 обследуемых показателей (факторов), которые вошли в состав последних 14 моделей. Среди них выявлены пять наиболее важных факторов, частота использования которых в моделях изменяется от 64 % до 21 %. Ни один из вирусно-бактериальных маркеров не вошел в окончательный набор диагностически значимых факторов.

3. Выписаны уравнения регрессионной зависимости диагноза от значений факторов для указанных 14 моделей.

4. Предложена процедура определения диагноза на основе набора значений выходных переменных, получаемых для указанных 14 моделей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дедов А.В., Попов Г.А. Формирование моделей предварительного диагноза заболеваний печени на основе методов регрессионного анализа // Вестник АстраГосТехУн-та, 2014, №4, с.124-136.
2. Медик В.А., Фишман Б.Б., Токмачев М.С. Руководство по статистике в медицине и биологии. В 2-х томах/Под ред. Ю.М.Комарова.Т.2. Прикладная статистика здоровья./Медик В.А., Фишман Б.Б., Токмачев М.С.-М.:Медицина, 2001.-352с.
3. Леонов В.П. Статистика в кардиологии. 15 лет спустя.// Медицинские технологии. Оценка и выбор, 2014, №1, с. 17-28.
4. de Bruijne M.H.J., le Cessie S., Kluine-Nelemas H.C., van Houwelingen H.C. On the use of Cox regression in the presence of an irregularly observed time-dependent covariate // Statistic in medicine.-2001.-v.20.-№ 24.-p.3817-3829.
5. Marshall G., Warner B., MaWhinney S., Hammermeister K. Prospective prediction in the presence of missing data.// Statistics in Medicine.-2002.-v.21.-№4.-p.561-570.
6. Реброва О. Ю. Статистический анализ медицинских данных. Применение пакета прикладных программ STATISTIKA. – М., МедиаСфера, 2002. – 312с.

УДК 004.822:514

*А. С. Климов, В. Л. Розалиев, Ю. А. Орлова*

#### АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ ОБЪЕМНОЙ МОДЕЛИ ГОЛОВЫ ЧЕЛОВЕКА\*

Волгоградский государственный технический университет

vladimir.rozaliyev@gmail.com

В работе рассматривается задача определения ключевых параметров для построения объемной модели человеческой головы по изображению с произвольной ротацией и наклоном моделируемого объекта. Для восстановления фронтального изображения используется относительное положение характерных точек лица. Изменение положений характерных точек и их описание представляется нечеткими темпоральными высказываниями. 3D-модель строится на основе полученной стереопары изображений – восстановленного фронтального изображения и входного изображения с углом поворота не превышающем 40 градусов.

*Ключевые слова:* биометрическая идентификация, нечеткое темпоральное высказывание, распознавание лиц, 3D-модель, анализ изображений.

*S. Klimov, V. L. Rozaliyev, Y. A. Orlova*

#### AUTOMATION BUILDING THREE-DIMENSIONAL MODEL OF A HUMAN HEAD

Volgograd State Technical University

This article considers the problem of face key parameters determination to construct 3D-model of human head, from image with arbitrary and tilts rotation. The frontal restoration uses relative position of face's key point. Modern biometric identification systems are based on comparing methods of input images and already existing in database. It is necessary that the angles of these face images was identical. 3D-model is based on stereo pair of images, obtained frontal and input image with rotation angle not exceeding 40 degrees.

*Keywords:* biometric identification, fuzzy temporal cognition statement, face recognition and 3D-model, image analysis.

#### 1. Введение

Для решения задачи построения объемной модели головы человека, необходимо решить

ряд задач. В частности необходимо распознать лицо, определить характерные точки, описать их семантическую связность, определить ключевые параметры лица, определить углы наклона и поворота головы, восстановить фронтальное положение точек, построить объемную мо-

\* Работа частично поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проекты 12-07-00266, 12-07-00270, 13-07-00459, 13-07-97042).

дель. [3] В статье мы опишем подходы к распознаванию лиц и разрабатываемый метод нахождения характерных точек.

Разрабатываемые подходы, методы и модели будут применяться в создаваемой системе определения эмоциональных реакций человека и социально значимом проекте по автоматизации понимания и обучения жестам языка глухих [2, 7]. Создание объемной модели головы необходимо для построения анимированных аватаров пользователей в этих системах.

## 2. Подходы к распознаванию лиц

В настоящее время существует несколько подходов к распознаванию лиц. Однако все подходы имеют свои особенности и ограничения. Критериями эффективности этих методов являются процент распознавания, максимальное измерение ракурса в градусах, условия, препятствующие работе метода, чувствительность к изменению яркости и освещения, характерные точки лица, с которыми работают подходы и иные особенности. [9, 10, 11].

**Подход 1. Сравнение эластичных графов.** В данном методе лицо представляется в виде графа. Вершины графа находятся в характерных точках лица (контур губ, центр глаза, носа и т.д.). Каждой точке соответствует коэффициент разложения по функциям Габора. Набор точек называется джетом. Джеты необходимы для нахождения определенных точек на двух разных изображениях (нахождение соответствия) и для сравнения соответствующих областей на двух изображениях. Метод способен распознавать лица при угле наклона не более 20 градусов.

**Подход 2. Метод главных компонент.** Применяется для сжатия информации. Суть метода состоит в линейном ортогональном преобразовании входного вектора в вектор меньшей размерности. Выходные вектора называются собственными лицами. Они могут быть представлены как изображения и выглядят как лица. При распознавании лиц первое собственное лицо является фильтром, который позволяет определить корреляцию изображения лица с самим собой.

**Подход 3. Линейный дискриминантный анализ.** В отличие от метода главных компонент, линейный дискриминантный анализ не ставит своей целью найти пространство меньшей размерности. Основная задача метода состоит в нахождении подпространства, где раз-

ница между объектами, принадлежащими разным классам, будет максимальной. Классы представляются как компактные кластеры, удаленные друг от друга на максимальные расстояния. Таким образом, кластеры лиц и «не лиц» имеют минимальные пересечения.

**Подход 4. Факторный анализ.** Данный метод является обобщением метода главных компонент. Основная идея метода состоит в выявлении скрытых зависимостей между наблюдаемыми переменными с помощью определенной совокупности моделей и методов. В основе факторного анализа лежит гипотеза, что переменные являются проявлением небольшого числа факторов. В задаче распознавания наблюдаемые переменные являются признаками объектов.

**Подход 5. Метод Виолы-Джонса.** Основными принципами, которые используются в методе, являются: интегральное представление; признаки Хаара; бустинг; использование классификатора; построение каскадов классификаторов. Метод использует следующий алгоритм «сканирующего окна». Выбирается окно сканирования и используемые признаки. Окно перемещается параллельно на одну ячейку окна. В каждом окне вычисляется около 200000 способов расположения признаков за счет масштабирования. Сканирование происходит последовательно для различных масштабов окна. Все признаки попадают на вход к классификатору, который определяет, лицо это или нет.

**Подход 6. Метод сравнения с эталоном.** На вход подается изображение с фронтальным расположением лица и определенным для данной базы данных набором масок. Каждая маска представляет собой регион лица (нос, рот, глаза и т.д.). Положения масок для каждого изображения в базе данных нормализованы одинаково. При распознавании региона лица части входного изображения сравниваются с хранящимися в базе данных масками и на основе совпадений изображение классифицируется.

**Подход 7. Нейронные сети.** При идентификации лиц с помощью нейронных сетей используют несколько архитектур нейронных сетей (когнитрон, неокогнитрон, сверточные нейронные сети, радиально-базисные нейронные сети и т.д.). Принципы функционирования нейронных сетей построены на автоассоциативной памяти: на входную совокупность данных – ключ (при идентификации лиц ключом является лицо) – выдается наиболее близкая совокупность той же размерности.



**Подход 8. Распознавание по цвету кожи.** Существует два подхода к распознаванию лиц по цвету кожи. Первый подход базируется на обработке пикселей для всех частей, имеющих цвет человеческой кожи. Каждый пиксель обрабатывается отдельно, а затем определяется принадлежность пикселя к цвету кожи. Затем, опираясь на структуру лица или другие признаки, принимается решение, является ли данный набор пикселей лицом или нет. Второй подход базируется на статусе региона изображения. При этом подходе необходимо определить регион, где может находиться лицо. И, учитывая данную информацию, решается вопрос, является ли этот регион лицом или нет.

Были проведены эксперименты для определения лучшего подхода. Выборка делалась на группе из 15 человек. Каждый человек тестировал программы, реализующие приведенных выше алгоритмы (программы использовали веб-камеру для получения изображений), следующим образом: поочередно закрывались области лица, и проверялось, будет ли программа распознавать лицо при закрытии данной области. Такими областями лица являлись нос, рот, глаза, лоб, щеки. В результате были выявлены достоинства и недостатки подходов, условия работы. Все подходы обеспечивают высокий процент распознавания. Однако угол поворота головы при распознавании у большинства подходов ограничен. Существенно влияют на работу – закрытие определенных участков лица. Также некоторые подходы не допускают изменения яркости изображения. Таким образом, было предложено использовать комбинацию из подходов 5, 7, 8, дополняющих друг друга. [7].

### 3. Характерные точки лица

При описании личности в криминалистике используется более 30 антропометрических точек головы человека (рис. 1). [8] Взаимное расположение этих точек характеризует конкретного человека и является основным средством для расчета ключевых параметров лица [5, 6]. Под характерными, или антропометрическими точками лица человека понимают такие точки, которые в наибольшей степени характеризуют пропорции лица человека [13].

Ключевыми параметрами лица человека считают: ширина бровей; ширина глаз; высота бровей; ширина лица; высота скул; ширина рта; ширина носа; длина носа; высота подбородка.

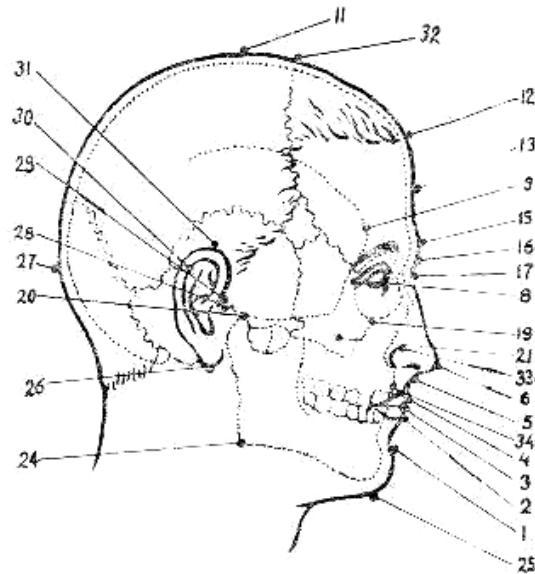


Рис. 1. Антропометрические точки головы человека, относящиеся к профильному изображению

Из данного множества точек были выделены те, которые видны на изображении и могут быть локализованы достаточно точно (рис. 2) как на профильном, так и фронтальном изображении. Для проверки работы методов построения объемной модели головы, первоначально точки растовлялись в ручную. В дальнейшем этот процесс будет полностью автоматизирован.

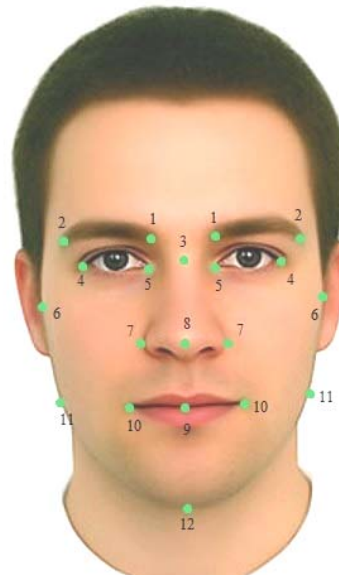


Рис. 2. Характерные точки лица человека

В таблице приведены их роли в процессе определения ключевых параметров. Обычно, при анализе характерных точек человеческого лица на изображении, его масштаб не известен.

Поэтому при расчете ключевых параметров находят их относительные величины. Для определения абсолютных величин необходимо решить задачу нахождения расстояния между камерой и объектом съемки.

**Роль характерных точек в процессе определения ключевых параметров лица**

| Название точки          | Номер | Определяемая величина                         |
|-------------------------|-------|-----------------------------------------------|
| Внутренний край брови   | 1     | Ширина бровей                                 |
| Внешний край брови      | 2     | Ширина бровей, наклон головы                  |
| Переносица              | 3     | Наклон головы, высота лица, длина носа        |
| Внешний уголок глаза    | 4     | Ширина глаз, наклон головы                    |
| Внутренний уголок глаза | 5     | Ширина глаз                                   |
| Надкозелковая           | 6     | Наклон головы, ширина лица                    |
| Боковая точка           | 7     | Ширина носа                                   |
| Кончик носа             | 8     | Длина носа                                    |
| Центр рта               | 9     | Наклон головы, высота подбородка              |
| Уголок рта              | 10    | Ширина рта                                    |
| Скулы                   | 11    | Наклон головы, ширина лица                    |
| Кончик подбородка       | 12    | Наклон головы, высота лица, высота подбородка |

Для определения шаблонов характерных точек применяется корреляционный поиск, при этом набор шаблонов сравниваемых лиц должен включать изображения с разным углом поворота головы. Для учета наклона шаблоны поворачиваются по часовой стрелке и против нее на углы в 15 и 30 градусов. Точки локальных максимумов корреляции сохраняются как возможные кандидаты.

#### **4. Подготовка к построению объемной модели головы**

После нахождения кандидатов характерных точек необходимо построить из них «правильное» лицо. Для изображения «правильного» лица правый глаз находится слева, а левый – справа, верхненосовая точка располагается между ними. Эти три точки должны образовывать линию, близкую к прямой. То же самое относится и к краевым точкам и середине рта. Верхненосовая и поднососовая точка, кончик но-

са и подбородочная точка образуют вертикальную линию также близкую к прямой. Надкозелковые точки должны находиться сбоку от краев глаз. Расстояния между точками должны определенным образом соответствовать масштабу шаблонов, а наклоны линий глаз и рта – их наклону. Кроме того, следует учесть, что переносица смещается от среднего положения на линии, соединяющей края глаз, а центр рта смещается по линии, соединяющей края рта. Причем величина этого смещения зависит от поворота головы.

Перебирая все возможные комбинации найденных характерных точек, и учитывая суммарную величину их корреляций, а также оценивая выполнение указанных выше критериев «правильности» лица, можно выбрать такую комбинацию характерных точек, которая наилучшим образом соответствует лицу человека.

Взаимное расположение найденных характерных точек позволяет определить углы наклонов и поворота головы на изображении. Угол поворота головы  $\alpha$  определяется исходя из положения точек переносицы и внешних краев глаз, при этом угол поворота не должен превышать 40 градусов. Алгоритм определения углов подробно рассмотрен в [1]. Найденные углы поворота позволяют построить точечный скелет фронтального изображения лица.

Для получения из плоского изображения 3D формы необходимо перенести координаты на регулярную сетку и пересчитать координаты. Такое решение основывается на процедуре триангуляции. В этом случае каждые три координаты связывают в треугольник, вершины которого соединяют с ближайшими соседями, образуя новые треугольники. Необходимо отметить, что через три точки проходит единственная плоскость, а треугольник является простейшим полигоном, вершины которого однозначно задают все его стороны. Координаты, определяющие вершины треугольников создают опорные точки сетки, узлы которой определяют высоту рельефа лица.

Таким образом, имеется стереопара из фронтального и входного изображения с известным углом поворота и наклона головы. Этих данных достаточно для определения длины, ширины и высоты носа, выступания подбородка, глубины посадки глаз, ширины рта и носа и других параметров необходимых для построения объемной модели головы человека.

## 5. Заключение

Использование комбинации подходов позволяет добиться большей точности определения лиц, а описанный метод нахождения характерных точек позволяет находить точки и восстанавливать фронтальное изображение в автоматическом режиме при углах поворота не превышающих 40 градусов. Получение характерных точек необходимо для построения семантически связанной сети и построения нечетких темпоральных высказываний, описывающих активность каждой такой точки. Полученная стереопара изображений позволит также в автоматическом режиме рассчитать ключевые параметры человеческого лица и построить его объемную модель.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Агарков, А.В.* Восстановление фронтального вида лица человека по одному изображению / А.В. Агарков, К.М. Нюнькин // Искусственный интеллект. – 2005. – № 1. – С. 4-12.
2. *Бобков, А. С.* Развитие системы автоматизированного определения эмоций и возможные сферы применения / А.С. Бобков, А.В. Заболеева-Зотова, Ю.А. Орлова, В.Л. Розалиев // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 59-62.
3. *Заболеева-Зотова, А. В.* Автоматизация семантического анализа текста технического задания: монография. / А.В. Заболеева-Зотова, Ю.А. Орлова. – Волгоград, ИУНЛ. 2010. – 155 с.
4. *Заболеева-Зотова, А. В.* Применение нечетких темпоральных высказываний для описания движений при эмоциональных реакциях / А.В. Заболеева-Зотова, Ю.А. Орлова, В.Л. Розалиев, А.С. Бобков // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 10 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 3. – С. 60-64.

5. *Кадомский, К. К.* Определение характеристик профильного изображения лица человека / К.К. Кадомский, К.М. Нюнькин // Искусственный интеллект. – 2006. – №1. – С. 138-146.

6. *Нюнькин, К. М.* Определение углов наклонов головы человека на изображениях // Искусственный интеллект. – 2004. – № 1. – С. 243-250.

7. *Розалиев, В. Л.* Применение нейронных сетей и granulization при построении автоматизированной системы определения эмоциональных реакций человека / В.Л. Розалиев, А.С. Бобков, О.С. Федоров // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»: межвуз. сб. науч. ст. – ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – Вып. 9, № 11. – С. 63-68.

8. *Криминалистическое описание внешности человека: учебное пособие* / В.А. Снетков, И.Ф. Виниченко, В.С. Житников, А.М. Зинин, М.Н. Овсянникова. Под общей редакцией профессора В. А. Снеткова. – М.: ВНИИ МВД СССР, 1984. – 128 с.

9. *Gokberk, B.* Selection of Location, Frequency and Orientation Parameters of 2D Gabor Wavelets for Face Recognition / Berk Gokberk, M.O. Irfanoglu, Lale Akarun, Ethem Alpaydin // Advanced Studies in Biometrics, Vol. 3161, pp. 138-146., 2005.

10. *Viola, P.* Rapid object detection using a boosted cascade of simple features / P. Viola, M.J. Jones // IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. – Kauai, Hawaii, USA, 2001. – V. 1. – P. 511-518, 2001.

11. *Alizadeh, F.* Face Detection in Color Images using Color Features of Skin / Fattah Alizadeh, Saeed Naloussi, Chiman Savari // World Academy of Science, Engineering and Technology, 52, 2011.

12. Formalization of initial stage of designing multi-component software / Заболеева-Зотова А.В., Орлова Ю.А., Розалиев В.Л., Фоменков С.А., Петровский А.Б. // Multi Conference on Computer Science and Information Systems 2013 (Prague, Czech Republic, July 23-26, 2013) : Proceedings of the IADIS International Conference Intelligent Systems and Agents 2013 / IADIS (International Association for Development of the Information Society). – [Prague], 2013. – P. 107-111.

УДК 004.75, 519.876.5

*А. Г. Кравец, Ле Суан Куен***ПРОТОКОЛ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ КОНФИДЕНЦИАЛЬНОСТИ ПРОФИЛЯ  
В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ****Волгоградский государственный технический университет**

agk@gde.ru, lexuanquyen@gmail.com

Одной из центральных проблем в разработке распределенных систем является проектирование криптографических протоколов, которые отвечают заданным функциональным требованиям и сохраняют конфиденциальность пользователя. Традиционные методы обычно используют алгоритмы шифрования с инфраструктурой открытых ключей. В статье предложен другой подход. Авторами разработан криптографический Фреймворк для контроля доступа, обеспечивающий конфиденциальность общественных отношений, ресурсов и анонимность пользователей в социальных сетях. При реализации протоколов в Фреймворке используются доказательства с нулевым разглашением и схема подписи Camenisch-Lysyanskaya.

**Ключевые слова:** социальная сеть, учетные данные, доказательство с нулевым разглашением, конфиденциальность, анонимность, аутентификация.

*G. Kravets, Le Suan Kuen***MINIMIZING DISCLOSURE PROFILE IN SOCIAL NETWORKS****Volgograd State Technical University**

One of the central problems in the development of distributed systems is the design of cryptographic protocols that meet specified functional requirements and preserve user privacy. Methods of conventional encryption algorithms typically use PKI. In this paper we presented a method based on other approach. The authors have developed a cryptographic framework for access control, ensured the confidentiality of social relations, secrecy of resources and anonymity of users in social networks. The implementation of the protocols in the framework is combination of zero-knowledge proof and signature schemes Camenisch-Lysyanskaya.

**Keywords:** social network credentials, zero-knowledge proof, privacy, anonymity, authentication.

**Введение**

С распространением онлайн-социальных сетей все большее значение получает забота о неприкосновенности частной жизни участников. Раскрытие личной информации в сети Интернет является добровольным. Однако пользователи зачастую не знают о том, кто может получить доступ к их данным и как защитить эти данные. Социальные сети, такие как Google+, Facebook, Vkontakte, LinkedIn, обеспечивают разнообразные формы взаимодействия: сообщества, группы по интересам, дискуссионные форумы [1,2]. Социальные сети включают онлайн-услуги, которые позволяют пользователям создавать профили и делиться своими предпочтениями и мнениями, например, размещая и комментируя фото, видео, книги или музыку. Профили могут иметь личные атрибуты, такие как имя, возраст, пол, адрес, дату рождения и географическое положение, номер телефона и т.д. Для описания таких данных использовались онтологический, мультиагентный и фрактальный подходы [3,4,5,6]. Поставщик услуги по-прежнему имеет доступ к личным данным всех пользователей и может делиться своими данными с внешними сторо-

нами, такими как целевые рекламные компании. Таким образом, пользователь не имеет полного контроля над своими данными.

В статье авторы представили фреймворк, который позволит сохранить анонимность атрибутов в профиле с помощью системы доказательств с нулевым разглашением и схемы подписи Camenisch-Lysyanskaya.

**Протоколы**

Учитывая данные Alla G. Kravets [7] и M. Maffe [8,9], обозначим через  $s$  подпись автора  $A$  в утверждении  $F$  с ключами  $k$ :  $sign_k(s, A, F)$ . Эквивалентом выражения  $sign_k(s, A, F)$  является метод «says»:  $A \text{ says } F$  на рис. 1.

$$\text{SIGNED} \frac{\Gamma \mapsto \text{digital\_signature}(s, A, F)}{\Gamma \mapsto A \text{ says } F}$$

$$\text{NAME - IMP - E} \frac{A \text{ says } F \quad A \text{ says } F \rightarrow G}{A \text{ says } G}$$

Рис. 1. Метод «says»

Описание профиля пользователя выглядит так:  $Profile(att_i, \dots)$ , где  $att_i$  – атрибут  $i$ -го профиля (имя, возраст, пол, адрес, дата рождения,

географическое положение и т. д.). Обозначаем  $op := R/W/RW$ , где  $R$  - чтение данных,  $W$  - запись данные,  $RW$  - чтение и запись данных.

**Протокол регистрации.** Этот протокол описывает дружбу пользователя (А) с пользователем (Б) (рис. 2).

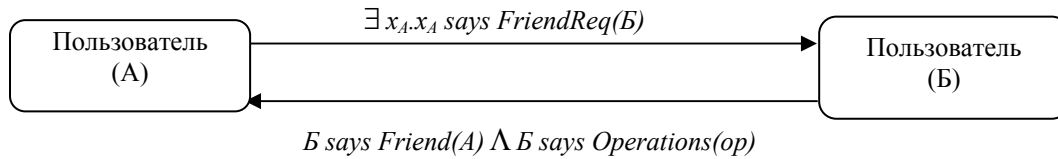


Рис. 2. Протокол регистрации

При инициализации А подпишет утверждение *FriendReq* (Б) своим секретным ключом, вычислив доказательства[10] из своей подписи с помощью доказательства с нулевым разглашением, отправит доказательства к Б. Б, получив доказательства, выполнит аутентификацию доказательства. Если результат аутентификации был правильный, Б подпишет утверждение *Friend(A)*, *Operations(op)* своим секретным ключом. Далее Б отправит подписи обратно А.

**Протокол не прямой регистрации.** Этот протокол описывает дружбу пользователя (Б) с пользователем (С), но в этой ситуации Б и С имеют вместе друга А. При инициализации Б подпишет утверждение *RequestFoF(C,B)* своим секретным ключом, вычислив доказательства из своей подписи с помощью доказательства с нулевым разглашением, отправит доказательства к С. Далее Б подпишет утверждение *Re-*

*lay(RequestFoF,C,B)*, на основе подписи, полученной от А, Б вычислит доказательства из своей подписи с помощью доказательства с нулевым разглашением, чтобы доказать, что Б был другом А и Б хочет дружбы с А. Доказательство выражено утверждением:  $\exists x_B. A \text{ says } Friend(x_B) \wedge x_B \text{ says } Relay(RequestFoF,C,B)$ . А выполнит аутентификацию утверждения. Если результат аутентификации правильный, А докажет пользователю(С), что А был другом С, Б. Доказательство выражено утверждением:  $\exists x_B, x_A. C \text{ says } Friend(x_A) \wedge x_A \text{ says } Friend(x_B) \wedge x_B \text{ says } Relay(RequestFoF,C,B)$ . С выполнит аутентификацию утверждения, если результат аутентификации был правильный, С подпишет утверждение *Friend\_of\_a\_Friend(B)* своим секретным ключом. Далее С отправит подписи обратно Б на рис. 3.

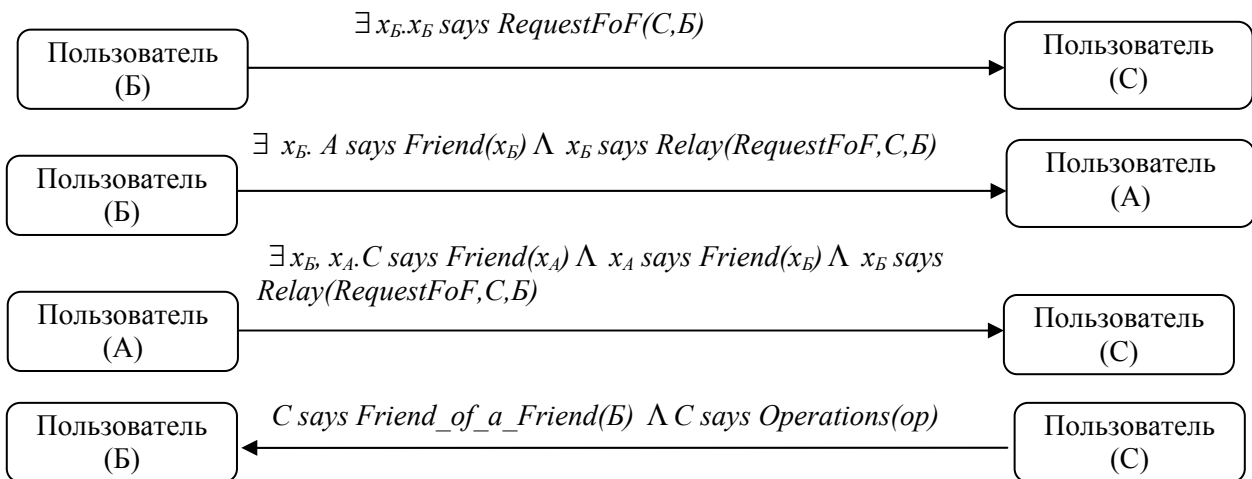


Рис. 3. Протокол не прямой регистрации

**Протокол отправки сообщения.** С помощью этого протокола пользователь (Б) публикует сообщение в стене А. Б подписывает утверждение *Wallpost(m)*. На основе подписи, полученной от пользователя А, Б построит доказательство, выраженное в утверждении:  $\exists x. A$

$\text{ says } Friend(x) \wedge x \text{ says } Operations(op) \wedge x \text{ says } Wallpost(m)$ . А выполнит аутентификацию утверждения. Если результат аутентификации был правильный, А позволит Б опубликовать сообщение на своей стене (рис. 4).

**Протокол загрузки данных.** С помощью

этого протокола пользователь(Б) загружает данные из А. При инициализации Б подпишет утверждение  $getResource(B, data)$ . На основе подписи, полученной от пользователя А, Б построит доказательство, выраженное в утверждении:

нни:  $\exists x. A \text{ says Friend}(x) \wedge x \text{ says Operations}(op) \wedge x \text{ says getResource}(B, data)$ . А выполнит аутентификацию утверждения. Если результат аутентификации был правильным, А позволит Б загрузит данные из А (рис. 5).

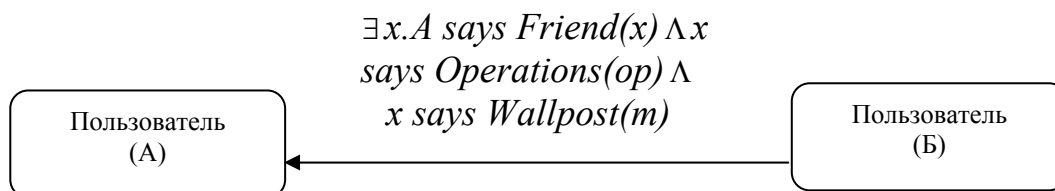


Рис. 4. Б публикует сообщение в стене А

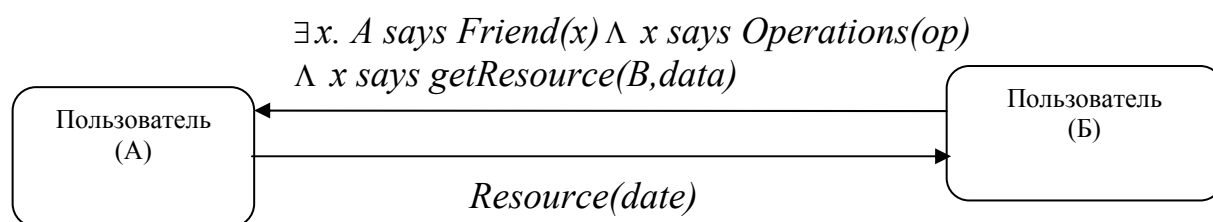


Рис. 5. Б загрузит данные из А

#### Реализация протоколов и схема подписи

Протоколы реализованы с помощью схемы подписи Jan Camenisch и Anna Lysyanskaya[9].

Генерирование ключей. Параметр  $k$  – длинное число;  $p$ ,  $p'$  и  $q$ ,  $q'$  – это простые числа:  $p = 2p' + 1$ ,  $q = 2q' + 1$ . Модуль вычислен RSA:  $n = pq$ ,  $l_n = 2k$ . Обозначаем через  $\in_R$  – случайный выбор числа;  $a$ ,  $b$ ,  $c \in_R QR_n$ . Секретный ключ  $SK = p$ , публичный ключ  $PK = (n, a, b, c)$ .

Пространство сообщения. Пусть задан параметр  $l_m$ . Пространство сообщения – это все строки, которые имеют длину  $l_m$ .

Алгоритм подписи. Пусть задано сообщение  $m$ . Выбираются случайные числа:  $s$ ,  $e > 2^{l_m+1}$ ,  $l_e = l_m + 2$ ,  $l_s = l_n + l_m + 1$ ,  $l$  – это параметр безопасности. Параметр  $v$  вычисляется:  $v^e \equiv a^m b^s c \mod n$ . Подпись сообщения  $(e, s, v)$ .

Аутентификация подписи. Входные данные  $(e, s, v)$  и  $m$ . Выражение  $v^e = a^m b^s c \mod n$  нужно проверить.

**Доказательство с нулевым разглашением.** Это доказательство системы между доказывающим и верификатором[10,11,12,13,14,15]. Пусть  $g \in_R QR_n$ ,  $h \in \langle g \rangle$ ,  $g$  – генератор группы. Пусть  $x \in \mathbb{N}$ . Чтобы создавать доказательства числа  $x$ , используем формулу:  $C \equiv g^x h^r$ , где  $r \in_R \mathbb{Z}_n$ . Далее доказывающий отправит  $C$  для верификатора, проверяющего правильность формы:  $C \equiv g^x h^r$ .

Identity Mixer являются анонимными учетными данными системы, разработанной в IBM [16,17]. В библиотеке Identity Mixer имеются функции API, разработанные алгоритмы схемы подписи Jan Camenisch и Anna Lysyanskaya.

Протоколы реализованы на языке Java с помощью библиотеки Identity Mixer.

#### Вывод

Контроль доступа остается очень важной проблемой для социальных сетей. Он обеспечивает конфиденциальность пользователя. В статье проблема конфиденциальности решена с помощью фреймворка, который включил протоколы: «Протокол регистрации», «Протокол не прямой регистрации», «Протокол отправки сообщения», «Протокол загрузки данных».

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Chumak, A.A. Analysis of User Profiles in Social Networks / Chumak A.A., Ukustov S.S., Kravets A.G. // Knowledge-Based Software Engineering : Proceedings of 11th Joint Conference, JCKBSE 2014 (Volgograd, Russia, September 17-20, 2014) / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Tadashi Iijima ; Volgograd State Technical University [etc.]. – [Б/м] : Springer International Publishing, 2014. – pp. 70-76. – (Series: Communications in Computer and Information Science ; Vol. 466).
2. Chumak, A.A. Social Networks Message Posting Support Module / Chumak A.A., Ukustov S.S., Kravets A.G., Voronin Yu.F. // World Applied Sciences Journal (WASJ). – 2013. – Vol. 24, Spec. Issue 24 : Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. – pp. 191-195.

3. Кравец, А.Г. Моделирование процесса решения задач по физике / Кравец А.Г., Титова О.В. // Открытое образование. - 2011. - № 2. - С. 76-79.

4. Кравец, А.Г. Онтология физической задачи / Кравец А.Г., Титова О.В. // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2011. - № 4. - С. 12-16.

5. Гарин, М.С. Автоматизация бизнес-администрирования в туристической фирме / Гарин М.С., Кравец А.Г., Романенко Е.В. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 10 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 3. - С. 100-102.

6. Гуртяков, А.С. Организация дистанционного обучения / Гуртяков А.С., Кравец А.Г. // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 13 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2012. - № 4 (91). - С. 103-107.

7. Le, Xuan Quyen Development of a Protocol to Ensure the Safety of User Data in Social Networks, Based on the Backes Method / Le Xuan Quyen, Alla G. Kravets // Knowledge-Based Software Engineering : Proceedings of 11th Joint Conference, JCKBSE 2014 (Volograd, Russia, September 17-20, 2014) / ed. by A. Kravets, M. Shcherbakov, M. Kultsova, Tadashi Iijima ; Volograd State Technical University [etc.]. - [Б/м] : Springer International Publishing, 2014. - P. 393-399. - (Series: Communications in Computer and Information Science ; Vol. 466).

8. Maffei, M. Privacy-Aware Proof-Carrying Authorization / M. Maffei and K. Pecina // ACM SIGPLAN Workshop on Programming Languages and Analysis for Security (PLAS'11). - 2011. - № 7. - С. 87-95.

9. Maffei, M. Security and Privacy by Declarative Design / Maffei.M., Saarland Univ., Saarbrücken, Germany // IEEE -

Computer Security Foundations Symposium (CSF). - 2013. - № 26. - С.81-96.

10. A signature scheme with efficient protocols / J. Camenisch, A. Lysyanskaya // Springer-Verlag, Proc. 3rd International Conference on Security in Communication Networks (SCN), volume 2576 of Lecture Notes in Computer Science. - 2002. - С. 268 - 289.

11. An integer commitment scheme based on groups with hidden order / Damgard and E. Fujisaki // Springer-Verlag, 8th International Conference on the Theory and Application of Cryptology and Information Security: ASIACRYPT2002, volume 2501 of Lecture Notes in Computer Science. - 2001. - С. 125 - 142.

12. Pseudo trust: Zero-knowledge authentication in anonymous p2ps / L. Lu, J. Han, Y. Liu, L. Hu, J.-P. Huai // IEEE Transactions on Parallel Distributed Systems. - 2008. - С. 1325 - 1337.

13. Efficient proofs that a committed number lies in an interval / F. Boudot // Advances in Cryptology - EUROCRYPT 2000, volume 1807 of Lecture Notes in Computer Science. - 2000. - С.431-444.

14. How to construct a hash function / J.-S. Coron, Y. Dodis // SpringerVerlag, Advances in Cryptology - CRYPTO 2005, volume 3621 of Lecture Notes in Computer Science. - 2005. - С. 430 - 448.

15. Zero-knowledge in the applied pi-calculus and automated verification of the direct anonymous attestation protocol / M. Backes, M. Maffei // In Proc. 29th IEEE Symposium on Security & Privacy. IEEE Computer Society Press. - 2007. - С. 202 - 215.

16. Specification of the Identity Mixer Cryptographic Library / Camenisch J, Gross T, Heydt-Benjamin TS, Sommer D // IBM Research Report. - 2013. - С. 48.

17. Credentica. U-Prove SDK [Электронный ресурс]. - 2011. - Режим доступа: <http://www.credentica.com/>

УДК 004.032.26 : 658.58 : 65.011.4

**В. В. Пантелеев, А. В. Кизим**

## **ПРИМЕНЕНИЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ОБОРУДОВАНИЯ\***

**Волгоградский государственный технический университет**

[pantelev.vlad@gmail.com](mailto:pantelev.vlad@gmail.com), [kizim@mail.ru](mailto:kizim@mail.ru)

Рассматриваются вопросы повышения эффективности организации процесса технического обслуживания и ремонта оборудования. Исследован и проанализирован процесс ТОиР ремонтно-сервисного предприятия. Используется агентный подход к имитационному моделированию процесса ТОиР. Выделены основные объекты модели и наборы функций, которые они выполняют. Разработаны концептуальные и логические модели МАС процесса ТОиР.

**Ключевые слова:** оборудование, техническое обслуживание, ремонт, техническое обслуживание и ремонт, ТОиР, организация, методическое и программное обеспечение, информационная поддержка, информационная поддержка технического обслуживания и ремонта, агентное моделирование, многоагентные системы, интеллектуальные методы, автоматизации.

**V. V. Pantelev, A. V. Kizim**

## **USING AGENT-BASED APPROACH IN MODELING OF THE PROCESS OF EQUIPMENT MAINTENANCE AND REPAIR**

**Volograd State Technical University**

This paper examines the organizational effectiveness of the technical inspection and repair equipment. We have analysed the MRO process of repair-service facility. The basic objects of the model and the functions they perform are defined in this paper. We use agent-based approach to simulate the MRO process. The conceptual and logical models of MAS of the MRO process have been developed.

**Keywords:** equipment, maintenance, repair, maintenance and repair, maintenance and repair organization, methodical and software and information support of maintenance and repair, maintenance and repair methodologies, agent-based modeling, multi-agent systems, intelligent methods, automation.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 13-01- 00798\_a).

### Введение

Согласно [1], основная задача повышения качества эксплуатации оборудования состоит в обеспечении длительной и безотказной его работы с заданными характеристиками при минимальных затратах времени, труда и средств на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР). Работоспособность оборудования обеспечивается за счет качественного, своевременного и безопасного проведения технического обслуживания и ремонта оборудования при рациональном использовании ресурсов [2]. Для решения данной задачи на предприятиях организуют системы технического обслуживания и ремонта (СТОиР) технологического оборудования. Цель деятельности СТОиР – обеспечение работоспособности оборудования путем качественного, своевременного и безопасного проведения технического обслуживания и ремонта оборудования при рациональном использовании ресурсов [3]. СТОиР реализуют ремонтные службы, которые выполняют задачи обеспечения постоянной работоспособности и модернизации оборудования, изготовления необходимых запасных частей, повышения культуры эксплуатации действующего оборудования и качества ремонта и снижения затрат на его выполнение.

Управление СТОиР ТО осуществляется воздействием на режим ТОиР, характеризуемый периодичностью технического обслуживания и ремонта и максимально допустимым (критическим) отклонением определяющего параметра (критерия предельного состояния) оборудования от нормативного значения [1]. Критерием эффективности ТОиР является минимизация затрат на ремонт и техническое обслуживание в совокупности с минимизацией производственных потерь из-за неудовлетворительного технического состояния оборудования, а также обеспечение своевременной поставки необходимых ресурсов [4,5].

Следствием эффективного осуществления данного воздействия является улучшение содержания действующего оборудования и четкое осуществление всех видов его периодических технических обслуживаний и плановых ремонтов. Это способствует повышению технологичности эксплуатационного периода жизненного цикла [6].

Комплексному решению задач поддержки ТОиР посвящены такие работы, как [4, 7 и 8].

### Агентный подход

Задача предотвращения отказов динамического оборудования в значительной степени связана с задачей прогнозирования технического состояния. Динамика технического состояния определяется факторами, обуславливающими протекание деградационных процессов в элементах динамического оборудования. Под деградационным [9] понимается механо-физико-химический процесс, протекающий в материале детали, обуславливающий изменение технического состояния следующих элементов иерархии «деталь – сборочная единица – механическая система» и приводящий к прекращению функционирования и/или нарушению безопасности эксплуатации.

Применение современных технологий имитационного моделирования является одним из эффективных способов решения задачи прогнозирования и исследования технического состояния динамического оборудования. Так как динамическое оборудование – это объект со сложной структурой, и его состояние складывается из состояний его элементов, для моделирования динамики технического состояния целесообразно использовать подход «Агентное моделирование» [10, 11].

Данный подход позволяет моделировать поведение сложно-структурированных объектов и предназначен для моделирования систем, содержащих большое количество подсистем, обладающих индивидуальным поведением. [12]. Использование интеллектуальных агентов (ИА) упрощает процесс управления [13].

Очень важным для рассматриваемой проблемы преимуществом агентного моделирования является то, что, в отличие от моделей системной динамики или дискретно событийных моделей, здесь нет необходимости подробно определять поведение системы в целом, разработка модели возможна при отсутствии глубоких знаний о глобальных зависимостях [14]. Агентную модель можно построить, опираясь на знания об индивидуальной логике поведения объектов. А информацию об особенностях динамики системы в целом можно вывести из результатов исследования поведения модели. Агентную модель проще поддерживать: уточнения обычно делаются на локальном уровне и не требуют глобальных изменений [15]. Очевидно, что применение этого подхода к моделированию наиболее удобно в случаях, когда нас интересуют характеристики поведения всей



системы, которые определяются как интегральные характеристики всей совокупности агентов [16]. Одну и ту же систему в зависимости от поставленной цели моделирования можно построить в рамках различных парадигм.

### Цели и задачи

Целью данной работы является повышение эффективности использования имеющихся средств для технического обслуживания и ремонта оборудования, уменьшение нагрузки на специалистов, а также разработка программного продукта, который позволит провести имитацию процесса ТОиР предприятия.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследование предметной области ТОиР оборудования для определения состава этапов процесса и критически значимых из них;
2. Исследование процесса ТОиР ремонтного сервисного предприятия;

3. Разработка модели мультиагентной системы процесса ТОиР сервисного предприятия для определения рационального объема затрат технических специалистов сервисного предприятия.

### Описание модели

Объектом исследования является процесс технического осмотра и ремонта оборудования. Для исследования и моделирования выбрано ремонтно-сервисное предприятие, выполняющее ТОиР различного оборудования для разных заказчиков в различных географически разнесенных местах.

Предметом исследования является процесс ТОиР ремонтно-сервисного предприятия, а именно: исполнение процесса ТОиР ремонтной бригадой, которая специализируется на одном типе оборудования.

В ходе работы, был исследован и проанализирован процесс ТОиР ремонтно-сервисного предприятия (схема представлена на рис. 1).

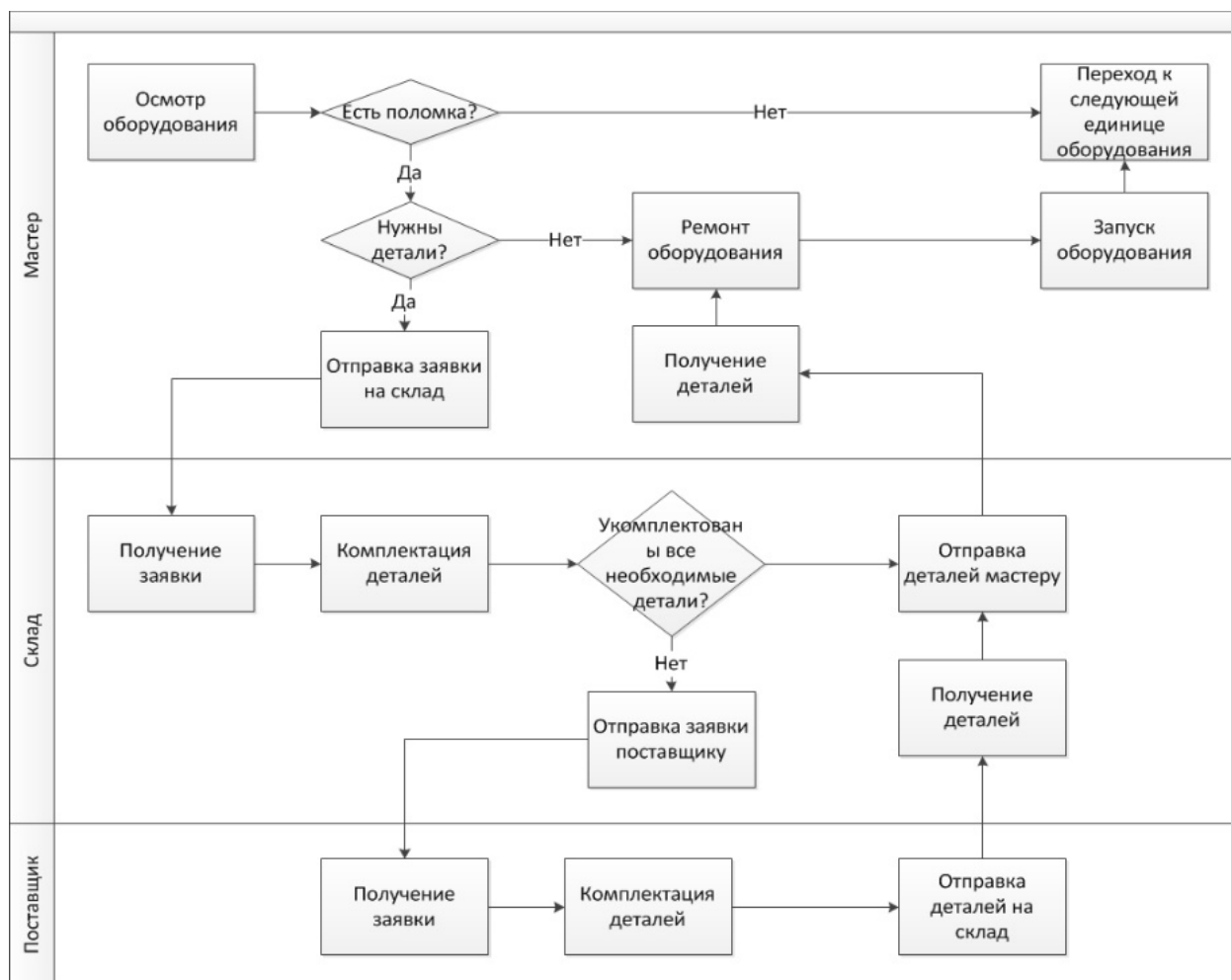


Рис. 1. Процесс ТОиР ремонтно-сервисного предприятия

В ходе детального анализа процесса ТОиР предприятия ремонтно-сервисного предприятия были выделены основные объекты модели и наборы функций, которые они выполняют.

На основе дальнейшего анализа в разрабаты-

ваемую модель добавлен еще один объект «Главный инженер», который руководит работой всех объектов «Инженер». Принимает от них заявки на ремонт и распределяет их занятость в зависимости от загрузки остальных.

Основные объекты модели и выполняемые функции

| Наименование объекта | Выполняемые функции                                                                                 |
|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Оборудование         | Изменение состояния работоспособности.                                                              |
| Инженер              | Осмотр оборудования; Остановка оборудования; Заказ деталей; Получение деталей; Запуск оборудования. |
| Склад                | Получение заказа; Выполнение заказа; Комплектования деталей; Заказ деталей; Получение деталей.      |
| Поставщик            | Получение заказа; Выполнение заказа; Комплектования деталей.                                        |

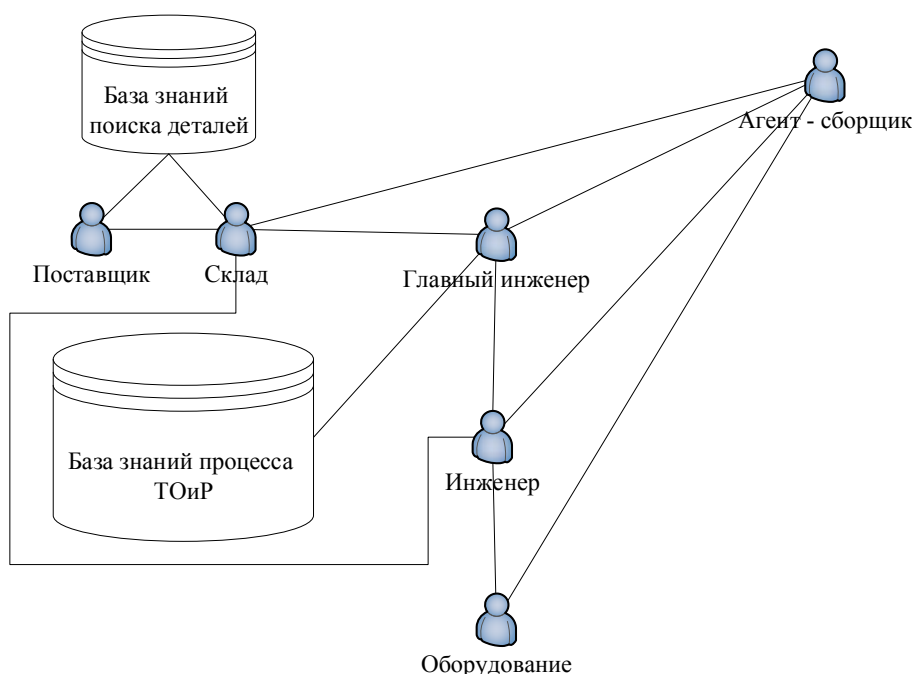


Рис. 2. Модель мультиагентной системы

Многоагентная система состоит из следующих агентов. Агент «Оборудование» имеет следующие состояния:

- работа;
- простой;
- отказ.

Так же он включает в себя список деталей и связей, из которых состоит оборудование. Ряд ключевых параметров для каждого элемента по значениям которых определяется состояние оборудования.

Агент «Инженер» имеет следующие состояния:

- диагностика оборудования;

- запуск оборудования;
- ремонт оборудования;
- остановка оборудования;
- отправка данных о состоянии оборудования агенту «Главный инженер»;
- получение указания от агента «Главный инженер»;
- получение материалов для ремонта от агента «Главный инженер».

Агент «Главный инженер» имеет следующие состояния:

- получение отчета о состоянии оборудования от агента «Инженер»;
- анализ полученного отчета;

- принятие решения о необходимости ремонта;
- заказ необходимых деталей для ремонта;
- получение необходимых деталей для ремонта;
- передача рекомендаций и деталей по ремонту агенту «Инженер»;
- распределение нагрузки между агентами «Инженер».

Для принятия решения о необходимости ремонта агент «Главный инженер» использует базу знаний. В настоящий момент пока не существует общепринятой и универсальной методологии ТОиР. Поэтому для моделирования различных методологий процесса ТОиР необходимо использовать базу знаний, разработанную конкретно под выбранную методологию. Что немного усложняет процесс моделирования.

Агент «Снабжение» имеет следующие состояния:

- получение списка деталей от агента «Главный инженер»;
- заказ деталей у поставщика;
- получение деталей от поставщика;
- передача деталей агенту «Главный инженер»;
- поиск и заказ подобных деталей.

При отсутствии необходимых деталей, агент «Снабжение» может произвести поиск подобных деталей с использованием базы знаний по совпадению конструкционных параметров и выполняемой функции.

Для поиска подобных деталей разработана база знаний на основе И/ИЛИ графа. Который состоит из следующих элементов:

- Объект ремонта – оборудование. Содержит функции.
- Функции – действия, которые может выполнять объект ремонта или узлы. Содержит связи и детали.
- Узел – элементы оборудования, которые могут выполнять определенный набор функций отдельно от оборудования. Содержит функции.
- Деталь – элемент, не несущий в себе никаких функциональных особенностей.

Разработанная модель служит для определения рационального объема трудозатрат технических специалистов сервисного предприятия, путем построения моделей процесса ТОиР с различными вариациями загруженности специалистов. Данные моделирования этих процессов анализируются и сравниваются между собой для определения наиболее оптималь-

ного процесса ТОиР с примерно равной нагрузкой на специалистов. Так же предлагаемые улучшения на этапе снабжения могут значительно ускорить процесс поиска и получения деталей предприятием.

### Заключение

Проведено исследование предметной области «техническое обслуживание и ремонт оборудования» для определения состава этапов процесса и критически значимых из них. Исследован процесс ТОиР ООО сервисного предприятия для определения ключевых объектов и их функций. Разработана модель мультиагентной системы процесса ТОиР ООО сервисного предприятия для определения рационального объема трудозатрат технических специалистов сервисного предприятия.

В дальнейшем планируется реализовать инструментальное программное обеспечение для реализации прототипа МАС, моделирующей процесс ТОиР и апробации разработанной модели.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Анцеева, Н. В.* Управление качеством технического обслуживания и ремонта металлообрабатывающего оборудования с периодическим контролем состояния / Н. В. Анцеева, Н. И. Пасько // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. №1. С.440-449.
2. *Кизим, А.В.* Исследование и разработка методики автоматизации ремонтных работ предприятия / А.В. Кизим, Н.А. Линева // Изв. ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – № 2, вып. 4. – С. 43–45.
3. *Кизим, А.В.* Обоснование необходимости автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования / А.В. Кизим // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в техн. системах". Вып. 6: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2009. - № 6. - С. 118-121.
4. *Ченцов, Н.А.* Организация, управление и автоматизация ремонтной службы: учебник / под ред. В.Я. Седуша. – Донецк: Норд-Пресс-УНИТЕХ, 2007. – 258с.
5. *Кизим, А.В.* Постановка и решение задач автоматизации работ по ремонту и техническому обслуживанию оборудования / А.В. Кизим // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Доклады ТУСУРа). - 2009. - № 2 (декабрь). - С. 131-135.
6. *Кизим, А.В.* Задачи и методы поддержки ТОиР оборудования на протяжении его жизненного цикла / А.В. Кизим // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 13 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2012. - № 4 (91). - С. 55-59.
7. *Кизим, А.В.* Комплексный методологический подход к решению задач поддержки технического обслуживания и ремонта оборудования/ Кизим А.В. // Известия

Волгоградского государственного технического университета. - 2013. Т. 18. № 22 (125). С. 60-66.

8. Кизим, А.В. Организация программно-информационной поддержки методологий технического обслуживания и ремонта / Кизим А.В. // Сборник научных трудов SWorld : матер. междунар. науч.-практ. конф. «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2012». - 2012. - Вып. 4, т. 12. - С. 86-88.

9. Берман, А. Ф. Агентная система моделирования динамики состояний сложных технических систем/ А.Ф. Берман, О.А. Николайчук, А.И. Павлов // XII всероссийское совещание по проблемам управления, ВСПУ-2014 Москва, 16-19 июня 2014. - 2014. - Т. 16. - С. 19.

10. Пантелеев, В.В. Моделирование процесса технического обслуживания и ремонта оборудования с использованием мультиагентных технологий / Пантелеев В.В., Кизим А.В., Камаев В.А. // Сборник научных трудов SWorld: матер. междунар. науч.-практ. конф. «Современные направления теоретических и прикладных исследований '2013» (19-30 марта 2013 г.). - 2013. - Вып. 1, т. 10. - С. 35-38.

11. Решетников И. «Агентская» модель управления ТООИР интегрированной производственной структуры / И. Решетников // РИСК: Ресурсы, информация, снабжение, конкуренция. 2010. № 4. С. 169-171.

12. Нгуен, Д.Х. Моделирование обслуживания движения документов с использованием мультиагентных технологий / Д.Х. Нгуен, В.А. Камаев, А.В. Кизим // Известия ЮФУ. Технические науки. - 2012. - № 5. - С. 245-248.

13. Кизим, А.В. Генерация интеллектуальных агентов для задач поддержки технического обслуживания и ремонта / А.В. Кизим, А.Д. Кравец, А.Г. Кравец // Известия Томского политехнического университета. [Тема выпуска "Управление, вычислительная техника и информатика"]. - 2012. - Т. 321, № 5. - С. 131-134.

14. Кизим, А.В. Организация системы документооборота на основе мультиагента / Д.Х. Нгуен, В.А. Камаев, А.В. Кизим, Д.В. Быков // Безопасность информационных технологий. - 2012. - № 1. - С. 130-132.

15. Кизим, А.В. Поддержка принятия решений для проведения дорожных работ и мониторинга техники / А.В. Кизим, М.В. Денисов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т.16. № 8 (111). С. 64-67.

16. Кизим А.В., Камаев В.А., Денисов М.В. Информационная система поддержки принятия решений (ИСППР) для планирования ТООИР дорожной техники / А.В. Кизим, В.А. Камаев, М.В. Денисов // Инновации на основе информационных и коммуникационных технологий. 2013. Т. 1. С. 402-404.

УДК 004.932.2

*А. Н. Солошенко, Ю. А. Орлова, В. Л. Розалиев*

## **АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ АНАЛИЗ НОВОСТНОГО ПОТОКА ИЗ СЕТИ ИНТЕРНЕТ С УЧЕТОМ СЕМАНТИКИ ТЕКСТОВ**

**Волгоградский государственный технический университет**

nastyasolan@gmail.com

Семантический анализ текста в последние годы получил значительную актуальность в связи с развитием Internet и каталогов информационных ресурсов. Данная статья посвящена проблеме представления неструктурированного новостного потока в сжатом виде, но с сохранением смысла. Особое внимание уделено интеграции системы с новостными сайтами. Скомбинированы статистические алгоритмы извлечения ключевых слов и алгоритмы формирования семантической связности блоков текста.

*Ключевые слова:* семантический анализ текста, новостной поток.

*A. N. Soloshenko, Y. A. Orlova, V. L. Rozaliev*

## **AUTOMATED ANALYSIS OF NEWS FLOW FROM THE INTERNET TAKING INTO ACCOUNT THE SEMANTICS OF THE TEXTS**

**Volgograd State Technical University**

Semantic text analysis in recent years has gained considerable importance in connection with the development of Internet and directories of information resources. This article focuses on the problem of representation of unstructured news stream in a compressed form, but with preservation of meaning. Special attention is paid to the integration of the system with news sites. Combined statistical algorithms to extract keywords and algorithms of generating the semantic coherence blocks of text.

*Keywords:* semantic analysis of text, news flow.

### **1. Введение**

Развитие информационных ресурсов сети Internet многократно усилило проблему информационной перегрузки. Еще в начале XXI века американская исследовательская служба Surveillance сообщила о том, что количество страниц в сети Internet превысило 4 млрд, и с каждым днем увеличивается на 7 млн. «Сырые»

неструктурированные новостные данные составляют большую часть информации, с которой имеют дело пользователи, поэтому многие организации (службы рассылки новостей и каналы вещания, информационно-библиотечные системы, корпоративные системы документооборота, поисковые машины и каталоги ресурсов сети Internet и др.) и частные лица заинтере-

ресованы в эффективных технологиях автоматизированного семантического анализа информации, представленной на естественном языке.

## 2. Обзор существующих систем семантического анализа новостных текстов

На международном рынке представлено множество программных продуктов, которые позволяют проанализировать текст с точки зрения семантики. Среди отечественных стоит выделить АОТ и Semantic Analyzer Group, позволяющие строить синтактико-семантическую сеть текста. Из зарубежных – мощный инструмент анализа текстов IBM Text Miner, содержащий утилиты классификации, кластеризации, поиска ключевых слов и составления аннотации текстов. Однако на обработку новостных статей программы не направлены.

Российская система Яндекс Новости позволяет автоматически группировать данные в новостные сюжеты и составлять аннотации статей на основе кластера документов. Сервис InfoStream, обеспечивает доступ к оперативной информации с учетом семантической близости документов. Прямым аналогом системы является мобильный агрегатор новостей Summly, купленный в марте 2013 компанией года Yahoo!. Но приложение абсолютно неприменимо для обработки текстов на русском языке [3].

Таким образом, существующие программные системы полностью не решают поставленную проблему. Объяснением этого является сложность и неоднозначность решения задачи семантического анализа для различного вида текстов. Разрабатываемая система призвана устранить недостатки существующих систем, модифицировать существующие решения семантического анализа применительно к новостным текстам на русском языке. Основная идея заключается в разработке нового подхода к обработке текстов, основанного на комбинировании традиционного статистического и более сложного лингвистического подходов.

## 3. Особенности построения новостных текстов и интеграция с новостными сервисами

Проанализировав ряд статей, представленных на известных новостных сайтах, таких как сайты газет Lenta.ru, NewsRu.com, Коммерсант.ru, Эксперт (и других, относящихся к топ-30 новостных порталов Рунета), можно построить обобщенную структуру текста новости (рис. 1).

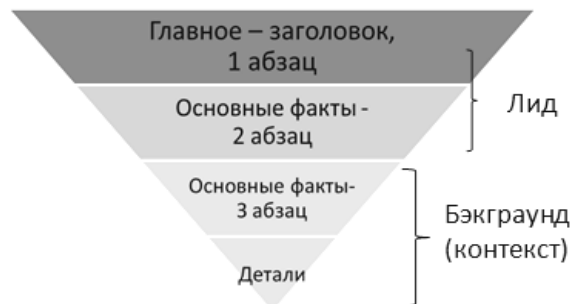


Рис. 1. Структура новостного текста

В ее основу заложен принцип «перевернутой пирамиды», который требует размещение основной информации в самом начале материала и последующее ее раскрытие далее по тексту в деталях [2].

– Заголовок новости отражает ее тему и содержит не более 10 слов (около 80 символов). Так, для примера, в Яндексе отображается не более 15-ти слов в тайтле, Google показывает до 70 слов.

– Основные факты, касающиеся события, отражены в 1-2 абзацах, и составляют так называемый лид текста (освещает главную тему).

– 3-й и последующие абзацы составляют бэкграунд новости (контекст). Как правило, здесь раскрываются детали происходящего, дается информация, напрямую касающаяся новости.

Знание структуры новостного текста значительно упрощает обработку сообщений и задачу получения текста новости с сайта. Рассмотрим далее решение задачи семантического анализа новостного текста по этапам.

## 4. Методика семантического анализа новостного текста

Семантический анализ является основной составляющей анализа текстов, его можно разбить на несколько этапов (отражены на рис. 2).

*Предварительная обработка текста новости и синтаксический анализ*

Графематический анализ представляет собой начальный этап обработки текста, в ходе которого вырабатывается информация, необходимая для дальнейшей обработки морфологическим и синтаксическим анализаторами. Его задача – внутреннее представление структуры новости в виде:  $T = \langle P, S, W \rangle$ , где  $P$  – абзацы,  $S$  – предложения,  $W$  – слова. При этом необходимо корректно выделить заголовок и первое предложение абзаца, содержащее основные факты статьи.

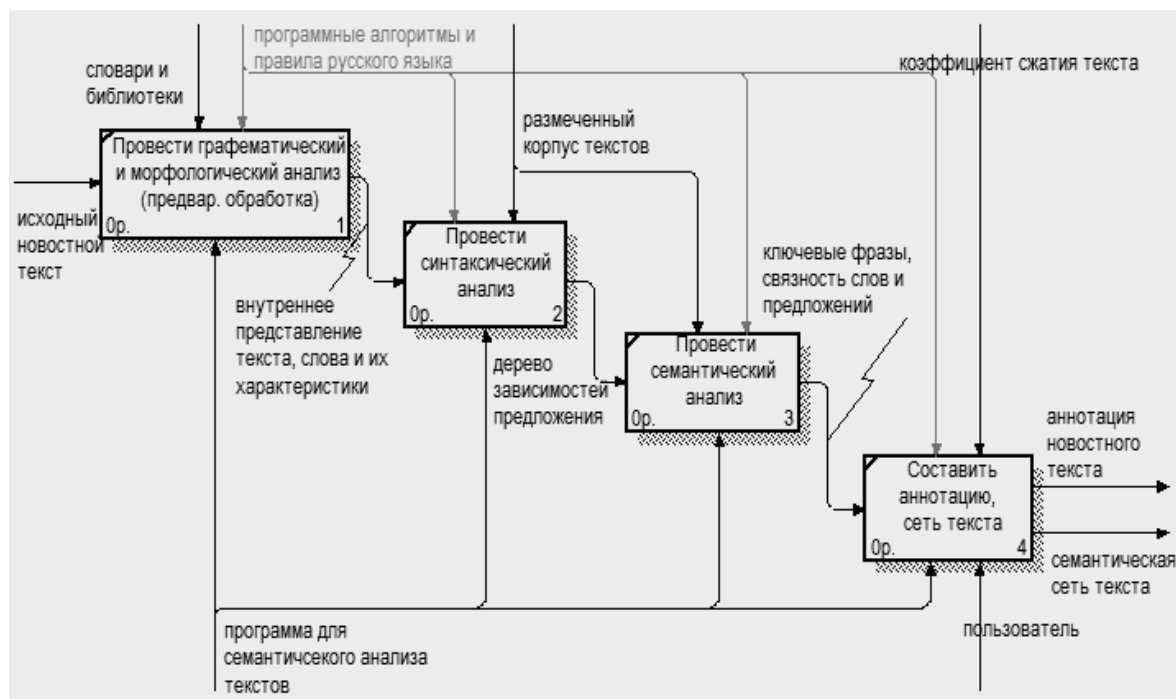


Рис. 2. Процесс семантического анализа текста новости

Следующим этапом является морфологический анализ, цель которого – построение морфологической интерпретации слов входного текста. Все методы можно разделить на словарные и вероятностно-статистические (без использования словаря). Недостатками вторых являются большой объем лексиконов, плохая работа на малой выборке, отсутствие точных лингвистических методов. Словарный метод основан на подключении словаря-тезауруса и дает максимально полный анализ словоформы.

Для каждого слова входного текста морфологическая библиотека выдает множество морфологических интерпретаций следующего вида: морфологическая часть речи; лемма (например, существительное в и.п. ед.ч. или

глагол–инфинитив); множество наборов (род, одушевленность, число, падеж). Для работы с незнакомыми словами можно использовать стеммер Портера для русского языка [8].

Синтаксический анализ рассматривается как задача построения дерева зависимостей предложения. В ходе его происходит выделение синтаксических конструкций, определение связности и подчинения фрагментов. Для поиска фрагментов потребуется шаблон поиска – кортеж  $\langle N, S, P \rangle$ , где  $N$  – нормальная форма искомого слова,  $S$  – часть речи и  $P = \{p\}$  – множество искомых параметров искомого слова. После нахождения фрагмента необходимо его преобразование [1, 7].

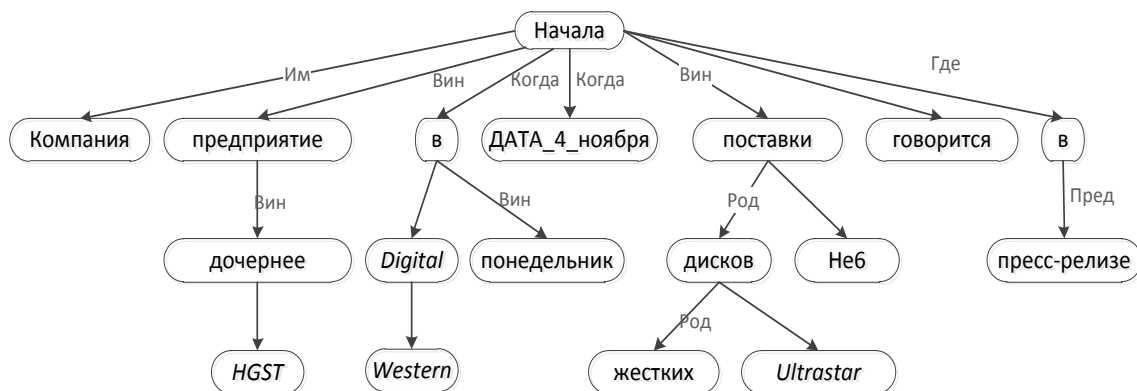


Рис. 3. Дерево зависимостей предложения

Таким образом, правило синтаксической сегментации будет состоять из шаблона поиска фрагмента, шаблона формирования фрагмента и списка исключений. В результате синтаксического анализа получается граф, подобный представленному на рис. 3.

*Поиск ключевых слов, построение сети текста и аннотации*

Для новостных текстов уже существуют программные модули для извлечения ключевых сущностей. К таковым относится PullEnti SDK, полностью написанный на C#.NET. Поэтому для программы разработан алгоритм поиска ключевых слов, сочетающий выделение имено-

ванных сущностей из текста новости (на основе результатов морфологического анализа и подключаемого модуля SDK), подсчет веса слова с учетом частоты его встречаемости (рис. 4).

Пороговое значение для признания слова ключевым – это такое значение, которое рассчитано с учетом относительной частоты встречаемости слова, рассматриваемого как кандидат в ключевые слова, с индексом равным  $(0,2 \times \text{количество сущностей})$ . Значение вычисляется экспериментально на выборке из 1000 текстов [6]. Для составления выдержек далее необходимо выделить характерные фрагменты.



Рис. 4. Алгоритм поиска ключевых фраз

В простейшем случае структуру совокупности знаний  $S$  текста новости можно определить следующим образом:  $S = \{M, F\}$ , где  $M$  – множество всех понятий данной совокупности знаний,  $F$  – отношение «смысловая связь». В качестве формальной модели структуры знаний можно использовать семантическую сеть, определяемую в виде ориентированного графа  $G = (E, V)$ , где  $E$  – множество вершин, поставленное во взаимно однозначное соответствие с множеством понятий;  $V$  –

множество ориентированных дуг; дуга выходит из вершины, соответствующей основному понятию  $A$ , и входит в вершину, соответствующую понятию, которое сочетается по смыслу в тексте с понятием  $A$  [4, 5]. Таким образом, содержание новости можно представить наглядно в виде ключевых понятий и связей между ними, либо в виде mind map или интеллектуальной карты (рис. 5).

Перед непосредственно составлением аннотации новости необходимо выполнить сле-

дующую обработку предложений текста: определить тип предложения (заголовок, 1-е в абзаце, обычное), подсчитать вес предложения и

удалить незначимые слова. Подсчет веса предложений осуществляется в зависимости от его нахождения в тексте.



Рис. 5. Интеллектуальная карта текста новости

Рассчитывается по формуле:

$$W_s = N(kw) \cdot Rf(kw) \cdot \text{Вес параграфа} \cdot k$$

$W_s$  здесь – вес предложения;  $N(kw)$  – количество вхождений ключевого слова в предложение;  $Rf(kw)$  – относительная частота ключевого слова; вес параграфа – относительный вес параграфа в тексте, равен 0.35 для первого параграфа (лид), 0.2 для второго, 0.1 для остальных (контекст);  $k$  – коэффициент значимости предложения внутри параграфа. Для первого предложения в абзаце равен 1, для остальных – 0.8.

В аннотацию включаются предложения с наибольшим весом, в зависимости от заданного коэффициента сжатия.

#### 5. Пример работы системы, эксперимент и результаты

В заключение рассмотрим работу системы на примере новостного сообщения, взятого из Интернет, заглавием которого является строка «Пользователи из США предпочли карты Apple картам Google» (рис. 6).

#### Пользователи из США предпочли карты Apple картам Google



Приложение «Карты» для iPhone, выпущенное компанией Apple в сентябре 2012 года, за год обошло Google Maps по популярности в США. Об этом пишет The New York Times, ссылаясь на отчет исследовательской компании comScore.

В течение года после выхода карт Apple аудитория Google Maps на iPhone сократилась на 23 миллиона пользователей. Сейчас она составляет 6 миллионов пользователей, причем у двух миллионов из них на смартфоне установлена версия iOS 5 и ниже.

Для сравнения, аудитория карт Apple в сентябре 2013 года составила в США 35 миллионов пользователей.

Google Maps является платным сервисом в операционной системе iOS до 2012 года, когда Apple выпустила iOS 6. В этой системе, как карты Apple.

Сразу после выхода карт Apple подвелась критика за ошибки и неточности. Так, например, парк в Вашингтоне Apple назвала аэродромом, вокзал в Вашингтоне – парком, а московскую Тверскую улицу – улицей Горького.

Глава Apple Тим Кук ответил пользователям извинениями и посоветовал немедленно обновить приложение до последней версии. Google выпустила свои карты для iOS в декабре 2012 года. За первые 48 часов приложение загрузили десять миллионов раз.

Анализ текста

Сохраненные обзоры

Наука и техника +1

Спорт

Экономика

Политика

Результаты анализа:

1) Предложение, отражающее тему:  
Приложение «Карты» для iPhone за год обошло Google Maps по популярности в США.

2) Ключевые сущности, их вес:  
Apple, пользователи, iOS, Google, приложение, США, карты, аудитория

3) Синтаксические и морфологические характеристики (на примере заголовка)  
Простое предложение, объект: пользователи (сущ. Мн. ч., И.п., подлежащее), субъект: карты, действие: предпочли (глагол. Пр. вр).

Рис. 6. Пример работы системы

Предполагается возможность настройки агрегации новостей по темам или ключевым словам на основе предпочтений пользователя (получение новостей из разных источников, их классификация и кластеризация). Для подобранных текстов, кроме аннотирования и построения деревьев зависимости (описанных

выше), доступна функция комплексного анализа текста (определение темы, ключевых сущностей, синтаксических и морфологических характеристик), цитирования новостей, сокращенных до определенного формата, в социальных сетях (например, Твиттере). Возможно сохранить понравившиеся обзоры.



Был проведен эксперимент на текстах различной тематики и размера. Было измерено время обработки текстов вручную (как это происходит на многих новостных порталах) и время анализа новостного текста с помощью разработанной программы. При этом время обработки с помощью программы учитывает не только непосредственно время анализа и аннотирования текста, но и время, необходимое для окончательной корректировки краткого обзора новости.

### 5. Заключение

Итак, процесс семантического анализа включает все этапы обработки текста: предварительный анализ, синтаксическую сегментацию, выделение ключевых слов и построение аннотации или семантической сети текста. Осуществив ряд экспериментов, был сделан вывод о том, что в результате автоматизации семантического анализа качество обработанных новостей не ухудшается (если сравнивать с процессом обработки текстов человеком), а время обработки значительно уменьшаются, сокращая тем самым трудозатраты.

Совмещение статистических и лингвистических алгоритмов семантического анализа позволяет улучшить качество обработки новостных статей для последующей публикации в новостных лентах. А в условиях нынешнего информационного века, с огромным количеством новостных сообщений в сети интернет, применение таких технологий является необходимостью, так как значительно ускоряет обработку повседневной информации.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Добров Б.В. Исследование качества базовых методов кластеризации новостного потока в суточном временном окне // Труды 12й Всероссийской научной конференции «Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции» RCDL'2010, Казань, Россия, 2010. – С. 287–295.
2. Ландэ Д.В. Поиск знаний в INTERNET. : Пер. с англ. – М.: Диалектика, 2005. – 272 с. : ил.
3. Машечкин И. В. Латентно-семантический анализ в задаче автоматического аннотирования / И. В. Машечкин, М. И. Петровский // Программирование. – 2011. – Т. 37, № 6. – 67–77.
4. Орлова Ю.А. Расширенная нечеткая атрибутивная грамматика над фреймовой структурой текста технического задания // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 9 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 11. – С. 60–63.

5. Орлова Ю.А. Анализ и оценка эмоциональных реакций пользователя при речевом взаимодействии с автоматизированной системой / Орлова Ю.А., Розалиев В.Л. // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 83–85.
6. Орлова Ю.А. Методика анализа текста технического задания / Орлова Ю.А. // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2011. – Вып. 3. – С. 213–220.
7. Орлова Ю.А. Определение эмоционального состояния человека по его движениям с использованием нейросетей / Заболеева-Зотова А.В., Орлова Ю.А., Розалиев В.Л., Федоров О.С. // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2011. – № 3. – С. 80–86.
8. Орлова Ю.А. Представление характерных эмоциональных жестов и движений человека в виде нечетких последовательных темпоральных высказываний / Заболеева-Зотова А.В., Орлова Ю.А., Розалиев В.Л., Федоров О.С. // Обзорение прикладной и промышленной математики. – 2011. – Т. 18, вып. 4. – С. 537–544.
9. Орлова, Ю.А. Развитие системы автоматизированного определения эмоций и возможные сферы применения / Заболеева-Зотова А.В., Орлова Ю.А., Розалиев В.Л., Бобков А.С. // Открытое образование. – 2011. – № 2. – С. 59–62.
10. Орлова, Ю.А. Автоматизация начальных этапов проектирования программного обеспечения / Заболеева-Зотова А.В., Орлова Ю.А. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 8 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 6. – С. 121–124.
11. Орлова Ю.А. Алгоритмическое обеспечение анализа текста технического задания и построения моделей программного обеспечения / Орлова Ю.А. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 8 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – № 6. – С. 68–72.
12. Орлова Ю.А. Обзор современных автоматизированных систем распознавания эмоциональных реакций человека / Орлова Ю.А., Розалиев В.Л. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 10 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 3. – С. 68–72.
13. Орлова Ю.А. Применение нечетких темпоральных высказываний для описания движений при эмоциональных реакциях / Заболеева-Зотова А.В., Орлова Ю.А., Розалиев В.Л., Бобков А.С. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 10 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 3. – С. 60–64.
14. Солошенко А.Н. Автоматизация семантического анализа новостных интернет-текстов / А.Н. Солошенко, В.Л. Розалиев, А.В. Заболеева-Зотова // Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем = Open Semantic Technologies for Intelligent Systems (OSTIS-2014) : матер. IV междунар. науч.-техн. конф. (Минск, 20–22 февр. 2014 г.) / УО "Белорусский гос. ун-т информатики и радиоэлектроники", ГУ "Администрация Парка высоких технологий". – Минск, 2014.
15. Grune D. Tokens to Syntax Tree – Syntax Analysis. New York, NY: Springer New York. – 2012.

УДК 004.4'236

*О. А. Сычев, Д. А. Пахомов***ГЕНЕРАЦИЯ ОПИСАНИЯ РЕГУЛЯРНОГО ВЫРАЖЕНИЯ НА ЕСТЕСТВЕННОМ ЯЗЫКЕ  
КАК ИНСТРУМЕНТ ПОМОЩИ СОСТАВИТЕЛЮ РЕГУЛЯРНОГО ВЫРАЖЕНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

oasychev@gmail.com, topt.iiviii@gmail.com

Статья посвящена проблеме помощи преподавателям, составляющим регулярные выражения для типа использования в тестовых вопросах при проверке знаний студентов. Авторами был разработан инструмент, генерирующий описание регулярного выражения на английском и русском языках. Инструмент интегрирован с типом вопроса Preg СДО Moodle и может использоваться для лучшего понимания возможных совпадений с созданными им регулярными выражениями. По отзывам пользователей, инструмент помогает в изучении регулярных выражений и сокращает время, затрачиваемое начинающими на создание регулярного выражения.

*Ключевые слова:* регулярные выражения, генерация текста, естественные языки.

*О. А. Sychev, D. A. Pahomov***GENERATION OF THE TEXT DESCRIPTION OF A REGULAR EXPRESSION IN A NATURAL  
LANGUAGE AS AN ASSISTING TOOL FOR THE REGULAR EXPRESSION AUTHOR****Volgograd State Technical University**

The paper addresses a problem of supporting the teachers writing regular expressions for their formative and summative quizzes. The tool generating text description of regular expression in English and Russian languages was developed. Developed tool was integrated with the question type Preg in Moodle LMS and can be used by teachers for better understanding of regular expressions they have written. According to the user reviews, this tool helps in the learning of the regular expressions and reduces time spent by novices on regular expression creation.

*Keywords:* regular expression, text generation, natural languages.

**1. Введение**

В настоящее время в учебном процессе многих образовательных учреждений используется автоматизированное тестирование студентов. Оно позволяет значительно снизить нагрузку на преподавателя при обучении больших групп студентов – как при проверке обучающихся, так и контрольных примеров. Однако, как правило, автоматизированные тесты ограничены в своих педагогических возможностях по проверке сложных ответов, отражающих понимание обучаемым материала. Преподаватель вынужден выбирать между предоставлением перечня возможных вариантов ответа (что нередко приводит к попыткам решить вопрос угадыванием) или вопросам с открытым ответом, которые должны быть сформулированы очень просто, чтобы преподаватель мог сформулировать все варианты правильных ответов для проверки. Ввод всех вариантов вручную преподавателем нежелателен, так как если в правильном ответе существует несколько фраз, имеющих альтернативные формы записи, количество вариантов правильного ответа растет мультипликативно и быстро превышает пределы трудоемкости вопроса. Методы же сравнивающие близость строк посимвольно также плохо зарекомендовали себя в проверке смысла предложения, так как небольшое слово «нет», представляющееся не-

большим изменением при посимвольном сравнении двух предложений, может полностью изменить смысл ответа.

Желаемой целью для многих преподавателей является автоматизированная проверка ответов в виде предложений на естественном языке или законченного фрагмента (соответствующего нетерминальному символу грамматики) на формальном языке, где количество возможных вариантов ответа велико, что привело к возникновению различных способов задать шаблон правильного ответа для проверки.

Методы описания шаблона правильного ответа брались из двух основных источников. Одним была теория формальных языков, чьи конструкции давно используются для задания шаблонов поиска – наиболее часто используемым из них являются регулярные выражения. Другим были специализированные методы обработки естественных языков (naturallanguageprocessing). Исследование, проведенное в Открытом университете (TheOpenUniversity) установило, что автоматическая проверка свободных ответов студентов размером в одно предложение с применением методов шаблонизации, сравнима по качеству с оцениванием преподавателем вручную. При этом эффективность разных методов шаблонизации примерно одинакова, однако регулярные выражения проще

для освоения, чем специализированные методы обработки естественных языков [2].

Кафедра «Программное обеспечение автоматизированных систем» (ПОАС) Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ) много лет применяет регулярные выражения для оценки ответов студентов при обучении программированию. Ввиду слабости существующих решений на кафедре был разработан программный модуль проверки ответов на вопросы (тип вопроса) для системы дистанционного обучения (СДО) Moodle под названием Preg [3]. Этот модуль позволяет задавать шаблоны ответов с помощью перл-совместимых регулярных выражений, которые являются наиболее развитой формой записи регулярных выражений.

Однако при использовании данного подхода в различных отраслях образования появляется новая проблема – составлением тестовых вопросов занимаются преподаватели, среди которых далеко не все являются специалистами в области информационных технологий (IT-специалистами), и создание шаблона ответа с использованием регулярных выражений может вызывать у них значительные трудности [1]. Для решения данной проблемы был разработан комплекс инструментов составителя регулярных выражений, одним из составляющих которого была генерация описания регулярного выражения в виде предложения на естественном языке, понятном пользователю. В процессе составления выражения, пользователь может ориентироваться на описание для понимания ожидаемого результата работы регулярного выражения, а также для изучения механизма работы непонятных ему конструкций.

## 2. Существующие программы объяснения регулярного выражения

Регулярные выражения имеют достаточно сложно читаемый синтаксис. Даже профессионалы в области информационных технологий могут испытывать трудности при составлении сложных выражений, поэтому для упрощения процесса составления регулярных выражений разработано достаточно много различных программ. Часть из них показывают пользователю описание регулярного выражения.

Одним из таких инструментов является

«regex101» [4]. Это сайт, предоставляющий возможность получить описание регулярного выражения.



Рис. 1. Объяснение выражения `^\d{2}\/\d{2}\/\d{4}$` с помощью приложения regex101

На рис. 1 вы можете увидеть пример работы этой программы для регулярного выражения, совпадающего с датой в формате дд/мм/гггг. Данное описание отражает описание в виде дерева, благодаря этому можно проследить приоритет операций. Каждый элемент дерева содержит фрагмент регулярного выражения в том виде, в котором его ввел пользователь, и описание этого фрагмента. Описание предоставляется в тестовой форме и указанием всех параметров данного фрагмента. Программа также может тестировать регулярное выражение на строках и помогать составлять новое выражение.

Однако, для больших выражений показанное выше описание оказывается очень громоздким, что затрудняет его использование при составлении регулярных выражений для тестовых вопросов.

Как можно заметить на рис. 2, при описании больших выражений дерево становится громоздким и ухудшается связь описания с самим выражением – если в выражении присутствуют одинаковые элементы, тяжело определить какому фрагменту выражения соответствует данный фрагмент описания.

Еще одним инструментом, разработанным для помощи в составлении регулярных выражений, является приложение RegExBuddy [5].

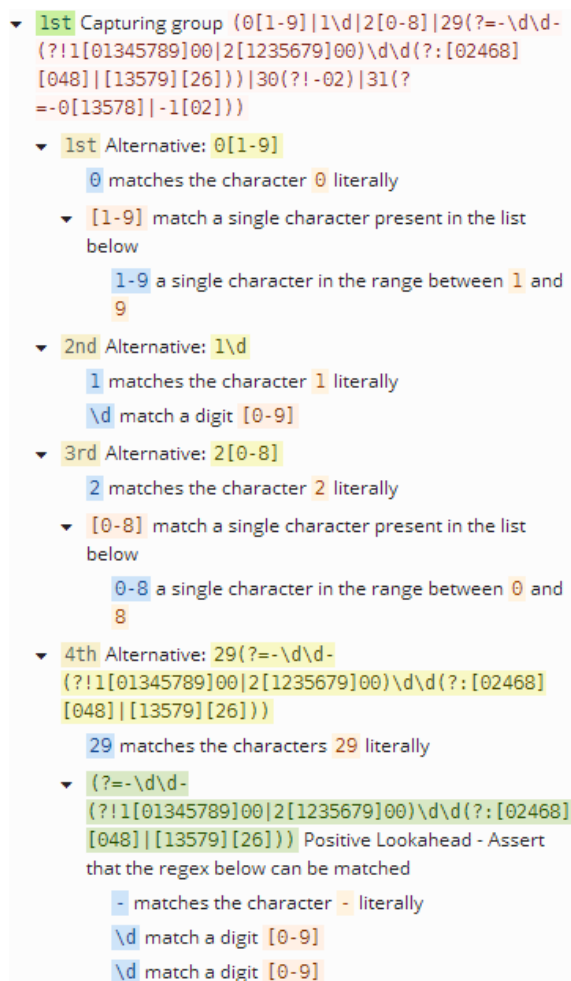


Рис. 2. Фрагмент объяснения выражения совпадающего с датой в формате "дд-мм-ггггчч:мм:сс" с учетом корректности написания чисел в соответствующих позициях с помощью приложение regex101

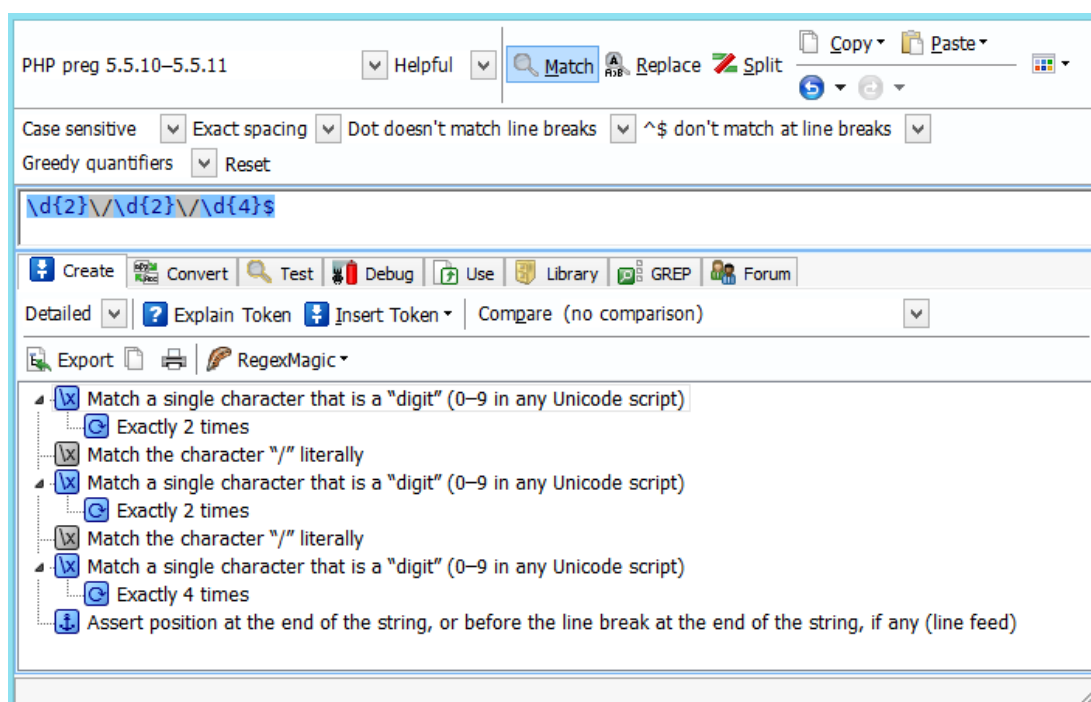


Рис. 3. Объяснение выражения `^\d{2}\/\d{2}\/\d{4}$` с помощью приложение RegExBuddy

Как видно на рис. 3 RegexBuddy описывает регулярное выражение тоже в виде дерева, отражающего порядок выполнения операций в выражении. В отличие от предыдущего приложения, в описании, сгенерированном Regex Buddy, отсутствует текст отдельных элементов выражения. Однако присутствует функция, помогающая сопоставлять описание с частями выражения – при щелчке мышью по элементу дерева выделяется часть регулярного выражения, для которой было сгенерировано описание. RegexBuddy является платной программой, имеющей демонстрационный период использо-

вания 30 дней.

Другим известным клиентским приложением для работы с регулярными выражениями является Expresso[7].

Как видно из рисунка 4, Expresso описывает регулярное выражение таким же способом как и описанные выше инструменты - в виде текстового дерева, отражающего порядок действий и вложенность операций и с описанием каждого узла дерева в текстовой форме. Аналогичной предыдущей программе при выделении элемента дерева выделяется соответствующая часть регулярного выражения.

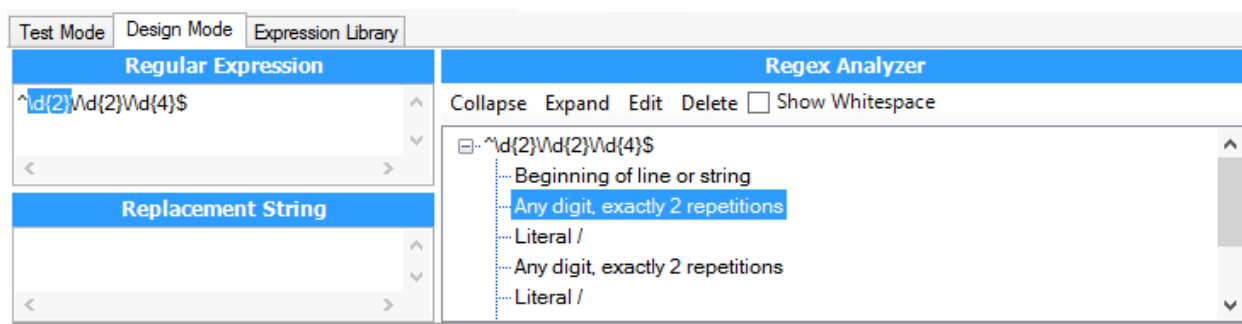


Рис. 4. Объяснение выражения `^d{2}d{2}d{4}$` с помощью приложение Expresso

Описанные выше приложения показывают описание регулярного выражения в виде дерева. Хотя такая форма обладает немалыми достоинствами, ей присущи и недостатки. При анализе больших выражений обилие текста мешает воспринимать структуру дерева. В тоже время структура синтаксического дерева регулярного выражения понятная в первую очередь программистам, в то время как наибольшие проблемы с составлением регулярных выражений для тестовых вопросов испытывают преподаватели специальностей не связанных с информационными технологиями. Большинство существующих инструментов создавались в расчете на программистов как на целевую аудиторию.

Для решения данных проблем при разработке модуля помощи составителям регулярных выражений в системе дистанционного обучения Moodle было принято решение разделить синтаксическое дерево с текстовым описанием на 2 инструмента: графическое синтаксическое дерево, в котором узлы содержат символическое отображение операций (с расшифровкой в виде всплывающего текста) и текстовое описание в виде предложения на естественном языке (на настоящий момент поддерживаются русский и английский языки). Общий вид модуля представлен на рис. 5.

## Конструктор регулярных выражений

Регулярное выражение ?

Введите регулярное выражение:

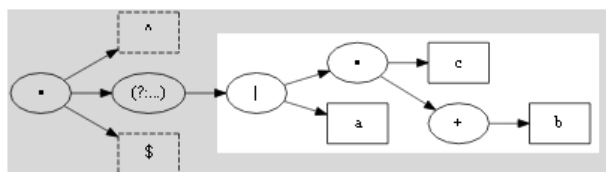
a|b+c

Показать

Отмена

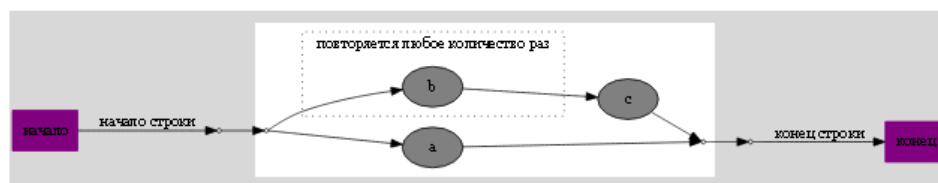
Синтаксическое дерево ?

☒ По вертикали ☒ По горизонтали ☐ Режим свёртки



Объясняющий граф ?

☐ Режим выделения прямоугольником



Описание ?

начало строки затем группировка: [ a или b повторяется любое количество раз затем c ] затем конец строки

Тестирование регулярного выражения ?

Введите строки для проверки (каждую строку с новой строки)

a  
ab  
bc  
c

✓ a  
✗ ab  
✓ bc  
✗ c

Рис. 5. Общий вид модуля помощи авторам регулярных выражений

Также модуль изображает граф работы регулярного выражения [8] и дает возможность протестировать регулярные выражения на наборе строк.

В данной статье рассматривается инструмент генерации текстового описания выражения на естественном языке.

### 3. Генерация словесного описания регулярных выражений

В качестве входных данных инструмент Генерации описаний принимает регулярное выражение в виде абстрактного синтаксического дерева [9]. Синтаксический разбор выражения

производится общим кодом, расположенном в ядре типа вопроса Preg, разработанном в ВолгГТУ[1]. Простейший пример такого дерева вы можете увидеть на рис. 6.

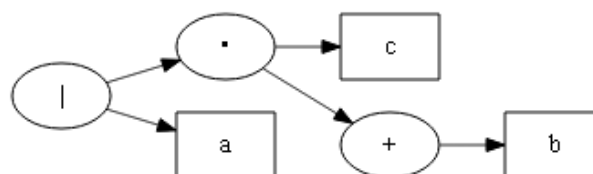


Рис. 6. Абстрактное синтаксическое дерево для выражения a|b+c



Для каждого узла синтаксического дерева регулярного выражения сопоставляется ряд шаблонов, которые хранят его описание в различных ситуациях. В шаблонах используются специальные управляющие последовательности для указания мест вставки описания дочерних

узлов дерева и, возможно, требований к их грамматической форме.

Рассмотрим набор шаблонов для узла квантификатора (повторения), один из вариантов которого на рис. 6 обозначен в виде узла с плюсом внутри.

Таблица 1

Шаблоны для узла синтаксического дерева типа конкатенация

| Имя шаблона<br>в хранилище шаблонов | Текст шаблона                                                  |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| finite_quant                        | %1 повторяется от %leftborder до %rightborder раз(a)%greedy    |
| finite_quant_strict                 | %1 повторяется %leftborder раз(a) %greedy                      |
| finite_quant_0                      | %1 повторяется не более %leftborder раз или отсутствует%greedy |
| finite_quant_1                      | %1 повторяется не более %leftborder раз%greedy                 |
| finite_quant_01                     | %1 (может отсутствовать)%greedy                                |

Квантификатор – унарный оператор, задающий количество повторений определенного подвыражения. Он содержит одного потомка (повторяемое подвыражение) и ряд параметров: минимальное количество повторений, максимальное количество повторений, жадность. Если минимальное количество повторений равно нулю, то повторяемое выражение может отсутствовать. Максимальное количество повторений может быть не ограничено. На естественном языке различные диапазоны повторений описываются разными фразами. После анализа различных параметров квантификации и способов их написания на естественном языке было создано 5 шаблонов (см. таблица 1). Например, выражение  $a\{0,1\}$  можно описать как "символ а повторяется 0 или 1 раз" так и "символ а (может отсутствовать)" - второй вариант является более естественным для восприятия человеком.

Шаблоны описаний квантификаторов содержат управляющую последовательность %1 - вместо нее будет поставлено описание, сгенерированное для повторяемого подвыражения. Управляющие последовательности %leftborder, %rightborder и %greedy будут заменены на соответствующие параметры квантификатора.

Таким образом, текст описания генерируется при обходе синтаксического дерева снизу вверх (от листьев к корню).

Для выражения  $a|b|c$  сгенерированный текст будет выглядеть следующим образом: «символ а или символ b повторяемый любое количество

раз, затем с», в то время как для отличающегося порядком выполнения операций выражения  $(?:a|b|c)$  будет сгенерировано следующее описание: «группировка: [ символ а или символ b повторяемый любое количество раз] затем с». Скобки во втором случае позволяют различить, что символ «с» должен следовать после альтернативы, тогда как в первом случае символ «с» относится только к одной из частей альтернативы. В описании выражения  $a|b|c$  приоритет операций может быть не достаточно очевиден пользователю, но разобраться в границах любой операции (фразы) можно используя функцию выделения (см. ниже).

Однако, возможна ситуация, когда родительский шаблон требует генерацию текста в потомках в определенной грамматической форме, например для согласования падежей в русском языке. Для решения данной проблемы алгоритм бы модифицирован добавлением модификаторов форм для маркеров вставки.

Если в качестве маркера вставки указать "%1genitive" то при генерации текста узлов-потомков в хранилище шаблонов будут подбираться в первую очередь шаблоны с суффиксом "\_genitive".

Например, описание выражения "word(=?\{1,3\})" должно выглядеть следующим образом: «word и текст далее должен соответствовать символу точка, повторяемому от 1 до 3 раз». Шаблон для описания условия "(=?...)" выглядит следующим образом: «текст далее

должен соответствовать %lgenitive». Соответственно, вместо текст, подставляемый вместо "%lgenitive" должен быть сгенерирован в форме "genitive".

Также были созданы специальные шаблоны для описания всех непечатаемых символов кодировки utf-8. Примеры таких шаблонов показаны в табл. 2, всего был создан 41 такой шаблон.

Таблица 2

Шаблоны для описания непечатных символов

| Имя шаблона<br>в хранилище шаблонов | Текст шаблона                 |
|-------------------------------------|-------------------------------|
| char7                               | Символ звукового сигнала(BEL) |
| char8                               | символ удаления(BS)           |
| char9                               | табуляция(HT)                 |
| charA                               | перевод строки(LF)            |
| charB                               | вертикальная табуляция(VT)    |
| char2003                            | em пробел                     |
| char2009                            | тонкий пробел                 |

Возможна ситуация, когда символ введенный пользователем, совпадает с автоматически сгенерированным текстом. Например, для выражения "(Подмаска №1)" будет сгенерировано следующее описание: "Подмаска №1 [Подмаска №1]". Чтобы избежать путаницы, было принято решение выделять текст, введенный пользователем, цветом шрифта. Таким образом, пользователь может легко различить автоматически сгенерированный текст и символы, которые он ввел как часть регулярного выражения.

Все шаблонные строки хранятся в системе интерфейсных строк СДО Moodle - AMOS, которая предоставляет возможность перевода языковых строк сторонними переводчиками без необходимости редактирования исходного кода программы. Название (ключ) шаблона строки

формируется следующим образом: приставка "description\_", затем логическое имя шаблона, затем название формы через подчеркивание.

Был разработан набор шаблонов для английского и русского языков. Всего было разработано 448 шаблонов для каждого из языков. Рассмотрим пример описания одного и того же выражения на разных языках. В качестве такого выражения используем выражение " [-+]?[0-9]+(\.[0-9]+)? ", захватывающего число с плавающей точкой.

На английском языке:

one of the following characters: -, +(may be missing) then any character from 0 to 9 repeated any number of times then subpattern #1: [ . then any character from 0 to 9 repeated any number of times ] may be missing

На русском языке:

один из следующих символов: -, + (может отсутствовать), затем любой символ от 0 до 9 повторяется любое количество раз затем подмаска #1: [ . затем любой символ от 0 до 9 повторяется любое количество раз ] может отсутствовать

При генерации описания для больших регулярных выражений понятность длинных предложений снижается. Для решения данной проблемы был разработан механизм взаимодействия для всех инструментов помощи составителям регулярных выражений через выделение. При выделении части регулярного выражения (в его тексте, на синтаксическом дереве или в объясняющем графе) выделяется часть описания, соответствующая выделенному подвыражению (см. рис. 7). Данный способ позволяет пользователю легко увидеть, какую смысловую нагрузку несет любая часть выражения. В дальнейшем планируется реализовать возможность выделения части текстового описания с подсветкой соответствующей части регулярного выражения.



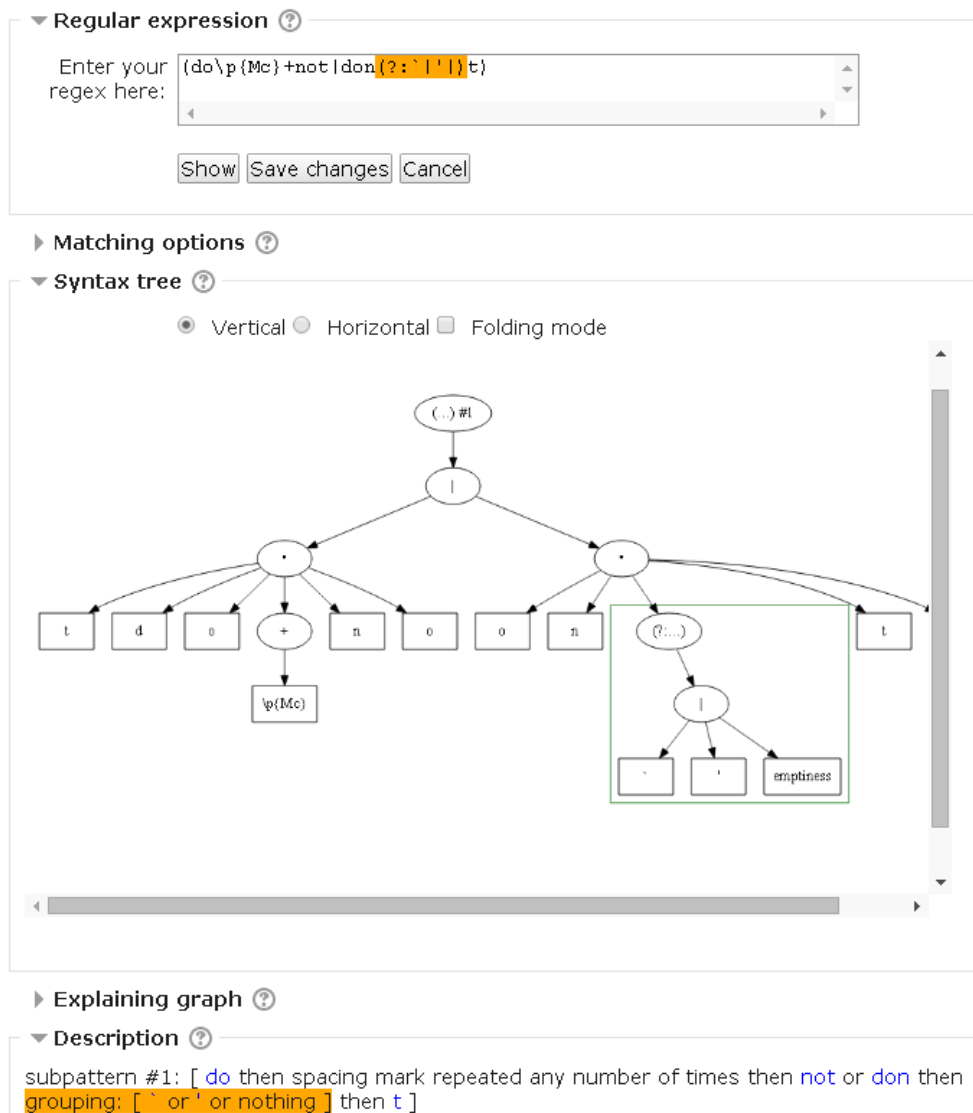


Рис. 7. Взаимодействие с другими частями модуля для отображения описания подвыражения

#### 4. Обсуждение

Описанный выше инструмент был реализован как элемент комплекса инструментов помощи составителям регулярных выражений, входящего в состав типа вопроса Preg для СДО Moodle, состоящего из синтаксического дерева, объясняющего графа, текстового описания и инструмента тестирования регулярных выражений. Оценка полезности разработанного инструмента проводилась для 4-х групп студентов, изучающих регулярные выражения: студенты 2 и 3-го курсов направления «Программная инженерия» ВолгГТУ, а также украинские и иностранные (обучаемые на английском языке) студенты Восточноукраинского национального университета имени Владимира Даля (Луганск). Хотя в целом студенты выделили как наиболее полезный инструмент объясня-

ющий граф, текстовое описание тоже получило высокие оценки. Интересно, что в одной из принявших участие в исследовании групп – группе англоязычных студентов ВНУ им Даля текстовое описание получило самую высокую оценку полезности, обогнав остальные инструменты. В тоже время для русских и украинских студентов текстовое описание, при общих положительных оценках, имеет более низкую среднюю оценку полезности, однако интересно, что такой результат получается при максимальном разбросе оценок – что означает, что для отдельных студентов (очевидно, визуально ориентированных) этот инструмент почти ничего не добавил, в то время как другие студенты оценивали его высоко. Это подтверждает первоначальные предположения авторов разработки о том, что система из нескольких инстру-

ментов, показывающих регулярное выражение с различных точек зрения полезнее чем отдельно взятый инструмент, т. к. различные категории пользователей получают информацию разным образом.

Инструмент получил также положительные отзывы преподавателей. Данченко Алла Леонидовна, доцент кафедры системной инженерии ВНУ имени Владимира Даля отмечает, что текстовое описание дополняет поясняющий и обеспечивает возможность смена вида педагогической деятельности, что дает заметны педагогический эффект при переходе к более сложным конструкциям регулярного выражения.

В дальнейшем планируется реализация возможности выделения в тексте описания с показом соответствующей части регулярного выражения, а также поиск типовых подвыражений с указанием им специальных описаний (например «число», «слово» и т. д.). Также рассматривается возможность решения обратной задачи: генерации регулярного выражения по его описанию на естественном языке.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сычев, О. А. Архитектура программного обеспечения тестовых вопросов preg с оценкой ответа по регулярным выражениям, поддерживающего возможность подсказок продолжения совпадения/О. А. Сычев, В. О. Стрельцов, Д. В. Колесов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 15/ВолгГТУ. - Волгоград, 2012. - (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). - С. 99-104.
2. Butcher, P.G., Jordan, S. E. A comparison of human and computer marking of short free-text student responses // Computers & Education, Volume 55, Issue 2, September 2010, Pages 489-499.
3. Литовкин Д.В. Программное обеспечение для тренировки навыков по составлению логических выражений на языке Си. Сценарий работы программы-тренажера / Литовкин Д.В., Сычев О.А., Гладкова М.П. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 12 :межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 11. - С. 99-102.
4. Onlineregextesteranddebugger: JavaScript, Python, PHP, and PCRE [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://regex101.com/> (дата обращ. 29.04.2014)
5. Goyvaerts J. RegexpBuddy: Learn, Create, Understand, Test, Use and Save Regular Expression [Электронныйресурс]. Режим доступа : <http://www.regexbuddy.com/screen.html>;
6. Erwig M, Gopinath R. Explanations for regular expressions. Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics) 2012 - pp. 394-408.
7. Espresso Regular Expression Tool [Электронный ресурс]. Режим доступа :<http://www.ultrapico.com/espresso.htm>
8. Сычев О.А. Визуализация регулярного выражения в виде графа как инструмента помощи составителю регулярного выражения / Сычев О.А., Иванов В.А. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т.18. № 22 (125). С. 118-123.
9. Ахо А. Компиляторы. Принципы, технологии, инструменты/ Ахо А., Сети Р., Ульман Д. – Москва: Издательство Вильямс, 2003.– 1184 стр.

## УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 519.876.5:658.5

*В. И. Аверченков<sup>1</sup>, А. И. Якимов<sup>2</sup>, Е. М. Борчик<sup>3</sup>*

### МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПА ОПТИМАЛЬНОСТИ БЕЛЛМАНА\*

<sup>1</sup>ФГБОУ ВПО Брянский государственный технический университет

<sup>2</sup>ГУ ВПО Белорусско-Российский университет, Могилев, Беларусь

<sup>3</sup>ОАО «Моготекс», Могилев, Беларусь

kts@tu-bryansk.ru, ykm@tut.by, katrinb15@gmail.com

Решена задача многокритериального управления технологическим процессом (ТП) производства готовой ткани путем выбора оптимальных технологических режимов в соответствии с принципом оптимальности Беллмана. Обоснованность оптимального решения показана для одно- и двумерных характеристик потока на дугах ориентированного ациклического графа ТП. Проведено экспериментальное исследование на примере данных реального ТП.

*Ключевые слова:* технологический процесс, имитационная модель, многокритериальное управление, принцип оптимальности Беллмана.

*V. I. Averchenkov<sup>1</sup>, A. I. Yakimov<sup>2</sup>, E. M. Borchik<sup>3</sup>*

### MULTICRITERIA PROCESS CONTROL USING THE PRINCIPLE OF OPTIMALITY BELLMAN

<sup>1</sup>Bryansk State Technical University

<sup>2</sup>Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus

<sup>3</sup>«Mogotex», Mogilev, Belarus

The problem of multicriteria control of technological process by selecting the optimum technological conditions in accordance with the principle of optimality Bellman is solved. The validity of the optimal solution for single- and two-dimensional characteristics of the flow on the arcs of a directed acyclic graph of the technological process is proved. An experimental study on the real data of the technological process is showed.

*Keywords:* technological process, simulation model, multicriteria control, Bellman's optimality principle

#### Введение

В работе рассматривается предприятие легкой промышленности, производящее ткани и трикотажные полотна. Ткань, изготовленная на ткацком производстве (из пряжи) с помощью специального приготавительного и ткацкого оборудования и прошедшая стадию браковки, называется суровой тканью. До поступления к потребителю ткани подвергаются предварительной обработке, крашению или печатанию, различным видам заключительной отделки. Суровая ткань, прошедшая все стадии отделки в отделочном производстве (отварка, отбелка, покраска, нанесение рисунка, виды заключительных отделок) и браковки, называется готовой тканью.

Технологические режимы (ТР) – документы, регламентирующие отдельные операции процесса производства готовой продукции. Каждый ТР описывает процесс обработки определенного вида ткани на соответствующем технологическом оборудовании. Технологическая документация каждого ТР включает: допустимые (для определенного вида ткани) диапазоны скорости работы оборудования; параметры температурных и других настроек каждой из частей оборудования; применяемые химикаты и красители, их концентрации; длительности периодов работы оборудования до сливов и полной замены химического раствора в соответствующих частях оборудования и др. [1].

При этом имеет место неоднозначный выбор технологических режимов в процессе производства готовой продукции, в связи с чем ставится задача определения оптимальных ТР

\* Работа выполнена при финансовой поддержке ГПНИ по заданию «Информатика 1.3.02».

в соответствии с заданными критериями оптимизации (в разрезе стоимости ресурсов и/или временных затрат, необходимых для выпуска заданного количества продукции).

### Постановка задачи

Пусть технологический процесс (ТП) производства готовой продукции (тканей)  $TexPr$  состоит из  $n$  фиксированных технологических операций, или этапов:

$$TexPr \stackrel{def}{=} \{Op_i \mid i = 1, \dots, n\}. \quad (1)$$

Операции  $Op_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , выполняются последовательно.

Пусть каждая из технологических операций  $Op_i$  допускает выбор одного из  $M_i \in N$  допустимых технологических режимов (ТР)  $TR_{R(i,k)}$

на одном из допустимых видов соответствующего технологического оборудования (рис. 1):

$$Op_i \stackrel{def}{=} \{TR_{R(i,k)} \mid k = 1, \dots, M_i\}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

$$R(i,k) \stackrel{def}{=} (i, \xi_{ik}, k),$$

где  $R(i,k)$  в (2) – вектор-идентификатор номера технологического режима, включающий порядковый номер технологической операции  $Op_i$ :  $i$ ,  $i \in \{1, \dots, n\}$ ; код соответствующего оборудования из справочника оборудования:  $\xi_{ik}$ ,  $\xi_{ik} \in \{1, \dots, |\xi|\}$ ; порядковый номер технологического режима в пределах нумерации режимов операции  $Op_i$ :  $k$ ,  $k \in \{1, \dots, M_i\}$ .

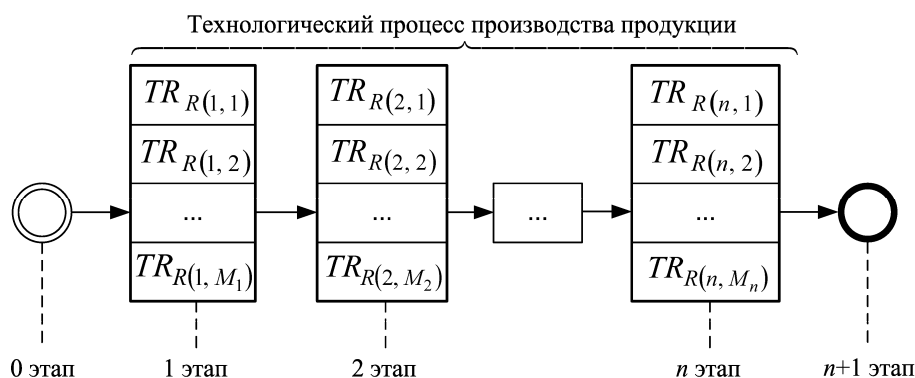


Рис. 1. Последовательность технологических операций

Себестоимости отдельных ТР складываются из стоимостей используемых ресурсов. Время, затрачиваемое на обработку продукции в рамках отдельных ТР зависит в частности от особенностей оборудования, тканей, параметров ТР и др.

Пусть  $Res$ ,  $Cen$  – множества ресурсов и цен на соответствующие ресурсы:

$$Res \stackrel{def}{=} \{Res_r \mid r = 1, \dots, |Res|\}, \quad (3)$$

$$Cen \stackrel{def}{=} \{Cen_r \mid Cen_r \in R, \quad r = 1, \dots, |Res|\}. \quad (4)$$

Технологический процесс производства готовой продукции (1) может быть представлен в виде нагруженного ориентированного ациклического графа [2], вершинами которого являются ТР (2). Для интерпретации в виде графа

ТП (1) разделяется на  $n$  однотипных этапов, или операций. Исток графа представляет собой нулевой этап ТП (1). Нумерация вершин производится последовательно от истока (0°этап) до стока ( $n+1$ °этап). Вершины соединяются дугами в соответствии с последовательностью операций (см. рис. 1).

Обозначим через  $\tau_{uv}$  нагрузку на дугу графа (рис. 2), исходящую из вершины с номером  $u \in M_B(i-1)$  и входящую в вершину с номером  $v \in M_B(i)$ , где  $M_B(i)$  – множество номеров вершин для  $i$ -го этапа графа ТП (1):

$$M_B(i) \stackrel{def}{=} \left\{ \sum_{j=0}^{i-1} M_j + 1, \dots, \sum_{j=0}^i M_j \right\}, \quad i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

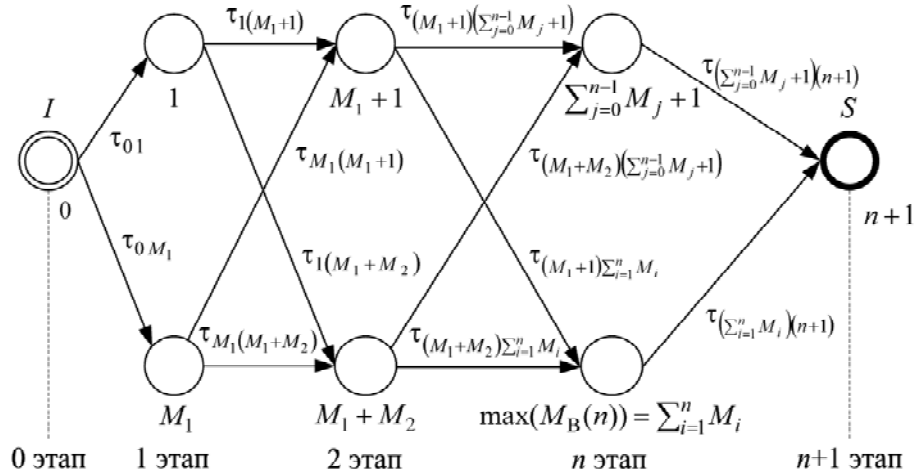


Рис. 2. Нагрузки на дуги ориентированного графа

Пусть нагрузки  $\tau_{uv}$  (в общем случае стохастического характера, уточняемые методом Монте-Карло с использованием специально разработанных моделей их имитации и статистического анализа данных ТП) интерпретируются как временные затраты и/или стоимости затрат ресурсов на выпуск заданного количества ткани – 1000 метров погонных (м.п.) на соответствующем оборудовании в соответствии с  $TR_{R(u,v)}$  (2) ТП (1).

#### Решение задачи многокритериального управления технологическим процессом

В общем случае одним из методов решения задачи определения оптимальных ТР (2) для ТП (1) является метод динамического программирования: метод нахождения последовательных оптимальных решений в задачах с многошаговой (многоэтапной) структурой [3].

Рассматриваемый технологический процесс (ТП) производства готовой продукции (ткани) является управляемой системой, находящейся в одном из нескольких состояний, изменяемых на каждом этапе ТП в результате управляющего воздействия (управления). При этом эффективность процесса управления характеризуется многомерной целевой функцией (ЦФ), зависящей от состояния системы и применяемого управления.

Принцип оптимальности Беллмана утверждает, что на последовательности оптимальных управлений  $y_1^*, y_2^*, \dots, y_i^*$ ,  $i = 1, \dots, n$ , должна достигать  $\max(\min)$  и каждая из функций:

$$f_i(\tau_{i-1}, y_i, y_{i+1}, \dots, y_n) = h_i(\tau_{i-1}, y_i) + h_{i+1}(\tau_i, y_{i+1}) + \dots + h_n(\tau_{n-1}, y_n), \quad i = 1, \dots, n. \quad (6)$$

Введем следующее обозначение:

$$\varphi_i(\tau_{i-1}) \stackrel{\text{def}}{=} \max_{y_i, y_{i+1}, \dots, y_n} (\min) (f_i(\tau_{i-1}, y_i, y_{i+1}, \dots, y_n)), \quad i = 1, \dots, n \quad (7)$$

Тогда из (6) и (7) следуют функциональные уравнения, называемые функциональными уравнениями Беллмана:

$$\varphi_i(\tau_{i-1}) = \max_{y_i} (\min) (\varphi_{i+1}(g_i(\tau_{i-1}, y_i)) + h_i(\tau_{i-1}, y_i)), \quad i = 1, \dots, n. \quad (8)$$

Решение уравнений Беллмана позволяет найти последовательность оптимальных управлений и оптимальных значений ЦФ.

С учетом обозначений нагрузок на дуги графа  $\tau_{uv}$ , функциональное уравнение (8) принимает вид:

$$\tau_v = \min_u (\max) \{ \tau_u + \tau_{uv} \}, \quad \tau_0 = 0, \quad (9)$$

где  $u \in M_B(i-1)$  – номера вершин из которых исходят дуги графа  $(i-1)$ -го этапа ТП;  $v \in M_B(i)$  – номера вершин в которые входят дуги графа  $i$ -го этапа ТП;  $M_B(i)$  – множество номеров вершин вида (5) для  $i$ -го этапа ТП.

Нагруженные дуги, исходящие из одних и тех же вершин, эквивалентны в силу интерпретации их характеристик: временных и/или стоимостных затрат на выпуск заданного количества продукции для одного и того же ТП (1), поэтому имеют место следующие соотношения.

**Соотношение 1.** Пусть  $\tau_{uv} \in R$ , тогда для ТП (1) верны равенства вида:

$$\forall u \in M_B(i-1) \forall v_1, v_2 \in M_B(i) [\tau_{uv_1} = \tau_{uv_2}], \quad i = 1, \dots, n \quad (10)$$

**Соотношение 2.** Пусть  $\tau_{uv} = (\tau_{uv}^{(1)}, \tau_{uv}^{(2)}) \in R^2$ ,  $\tau_{uv_1} = (\tau_{uv_1}^{(1)}, \tau_{uv_1}^{(2)})$ ,  $\tau_{uv_2} = (\tau_{uv_2}^{(1)}, \tau_{uv_2}^{(2)})$ , тогда для ТП (1) верны равенства вида:

$$\begin{aligned} \forall u \in M_B(i-1) \forall v_1 v_2 \in M_B(i) [(\tau_{uv_1}^{(1)} = \tau_{uv_2}^{(1)}) \wedge (\tau_{uv_1}^{(2)} = \tau_{uv_2}^{(2)}) \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow (\tau_{uv_1} = \tau_{uv_2})], i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (11)$$

**Утверждение 1.** Пусть для  $\tau_{uv} \in R$ , имеют место соотношения вида (10), тогда для рассматриваемой задачи функциональное уравнение Беллмана (9) принимает вид:

$$\tau_v = L_i = L_{i-1} + \min_{u \in M_B(i-1)} (\max) \{\tau_{uv}\}, \quad (12)$$

где  $L_i$  – оптимальное состояние на  $i$ -м этапе,  $L_i \in R$ ,  $L_0 = \tau_0 = 0$ ,  $u \in M_B(i-1)$ ,  $v \in M_B(i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ .

Доказательство проводится методом математической индукции.

**Утверждение 2.** Пусть для  $\tau_{uv} = (\tau_{uv}^{(1)}, \tau_{uv}^{(2)}) \in R^2$  имеют место соотношения вида (11), тогда для рассматриваемой задачи из уравнения Беллмана (9) следует [4]:

$$L_i = \begin{cases} \left( \begin{aligned} &L_{(i-1)1} + Fm_1 \left( \{\tau_{uv}^{(1)}\} \right) \\ &L_{(i-1)2} + Fm_2 \left\{ \tau_{uv}^{(2)} \middle| \tau_{uv}^{(1)} = Fm_1 \left( \{\tau_{uv}^{(1)}\} \right) \right\} \end{aligned} \right) \Bigg|_{pOpt=1}, \\ \left( \begin{aligned} &L_{(i-1)1} + Fm_1 \left\{ \tau_{uv}^{(1)} \middle| \tau_{uv}^{(2)} = Fm_2 \left( \{\tau_{uv}^{(2)}\} \right) \right\} \\ &L_{(i-1)2} + Fm_2 \left( \{\tau_{uv}^{(2)}\} \right) \end{aligned} \right) \Bigg|_{pOpt=2}; \end{cases} \quad (13)$$

где  $L_i = (L_{i1} \ L_{i2})^T$ ,  $L_0 = (0 \ 0)^T$ ,  $u \in M_B(i-1)$ ,

$v \in M_B(i)$ ,  $i = 1, \dots, n$ ;  $pOpt \in \{1, 2\}$  – параметр наивысшего приоритета критериев оптимизации ТП (1) по 1-му (времени), либо 2-му (стоимости ресурсов) измерениям векторов  $\tau_{uv} \in R^2$ ;  $Fm_1, Fm_2 \in \{\min, \max\}$  – лексикографически упорядоченные параметром  $pOpt$  критерии оптимизации ТП по 1-му, 2-му измерениям векторов состояний системы на этапах ТП, соответственно.

**Замечание.** Доказательство Утверждения 2 проводится с использованием метода математической индукции с учетом значений измерений векторов  $\tau_{uv}^{(pOpt)} \in R$ . При этом оптимизация ТП (1) методом динамического программирования (в указанной многокритериальной задаче выбора предпочитаемых ТР рассматриваемого ТП) в первую очередь проводится по наиболее важному критерию (измерению  $pOpt \in \{1, 2\}$  векторов  $\tau_{uv}^{(pOpt)} \in R$ ). В случае совпадения оптимальных по наиболее важному критерию значений для нескольких ТР рассматриваемого оптими-

зируемого этапа ТП, проводится оптимизация по другому – менее значимому из измерений векторов  $\tau_{uv}^{(pOpt)} \in R$ , по которому и выбираются предпочитаемые ТР (2) ТП (1).

Утверждения 1–2 с учетом значений управляющих параметров составляют основу процедуры пошаговой оптимизации ТП (1).

#### Процедура пошаговой оптимизации технологического процесса

Для выбора оптимальных ТР в системе имитации PowerSim [5] построена имитационная модель (ИМ) расчета норм расхода времени и ресурсов (химикаты, пар, газ, электроэнергия) на выпуск 1000 м.п. тканей в разрезе отдельных технологических режимов. Каждая стадия процесса производства готовых тканей представлена на отдельном листе построенной ИМ. Определение оптимального сочетания ТР для исследуемой проводки производится на специально созданном листе итогов модели [5].

Построенная в PowerSim модель удобна для применения тем, что в ней можно быстро пересчитывать разные варианты для режимов обслуживания с использованием разных ресурсов (химикаты, пар, газ, электроэнергия). При этом

можно выбирать критерий оптимизации (min, max) и отслеживать промежуточные значения временных и стоимостных затрат ресурсов на каждой стадии производства готовой продукции.

При использовании ИМ пошаговая оптимизация технологического процесса следующая.

**Шаг 1.** Инициализация значений входных параметров ИМ.

**Шаг 2.** Определение для каждой технологической операции  $Op_i$  ТП (1) норм расхода времени  $T_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , затрачиваемого на обработку заданного количества продукции.

**Шаг 3.** Определение для каждой операции  $Op_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , ТП (1) норм расхода отдельных ресурсов  $Res_r$ ,  $r = 1, \dots, |Res|$ , израсходованных на обработку заданного количества продукции в (1).

**Шаг 4.** Определение для каждой операции  $Op_i$  ТП (1) общих стоимостей расхода ресурсов, необходимых для обработки заданного количества продукции.

**Шаг 5.** Подведение итогов моделирования; оптимизация ТП:

**Шаг 5.1.** Построение последовательности оптимальных состояний ТП на этапах производства готовой продукции:

$$L_i \stackrel{def}{=} \varphi_i(L_{i-1}, S_i, T_i, Params_i), L_i, L_{i-1} \in \{R, R^2\},$$

$$L_0 \in \{0, (0 \ 0)^T\}, i = 1, \dots, n, \quad (14)$$

где  $L_i, L_{i-1} \in R$  – суммарный итог по отношению к оптимизируемому ресурсу (времени, стоимости ресурсов) для  $i$ ,  $i \in 1, \dots, N$ , этапов ТП (1); если  $L_i, L_{i-1} \in R^2$ ,  $L_i = (L_{i1} \ L_{i2})^T$ , то  $L_{i1}$  – оптимальное состояние по времени,  $L_{i2}$  – оптимальное состояние по стоимости ресурсов на  $i$ -м этапе ТП (1);  $\varphi_i$  – многомерные (одно-, двумерные) оптимизируемые многокритериальные целевые функции (относительно времени и/или стоимости ресурсов),  $Params_i$  – параметры управления ТП (1) производства готовой продукции, в частности параметр  $pOpt \stackrel{def}{\in} \{1, 2\}$  и  $Fm_1, Fm_2 \in \{\min, \max\}$ .

**Шаг 5.2.** Для построения последовательности оптимальных управлений (выбора оптимальных ТР для ТП, либо оптимального маршрута по графу) технологическим процессом производства готовой продукции предприятия

определяются последовательности предикатов вида:

$$Fl \stackrel{def}{=} \{fl_{ij} \mid fl_{ij} \in \{True, False\}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, M_i\}, \quad (15)$$

практическое применение которых представлено в экспериментальной части.

**Шаг 5.3.** Определение с учетом шагов 3, 5.2 общего расхода отдельных ресурсов  $Res_r$ ,  $r = 1, \dots, |Res|$  для оптимального сочетания ТР ТП (1).

**Шаг 6.** Выгрузка результатов работы ИМ в комплексную информационную систему (КИС) предприятия (рис. 3).

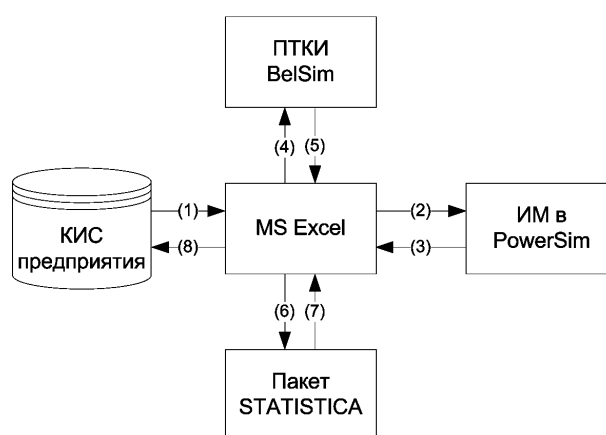


Рис. 3. Интеграция имитационной модели в КИС предприятия

Разработанная имитационная модель интегрируется в КИС предприятия посредством применения комплекса программных средств (см. рис. 3), включающих MS Excel, систему имитации PowerSim, программно-технологический комплекс имитации (ПТКИ) сложных систем BelSim [6], имеющий средства статистической обработки данных, пакет STATISTICA.

Предлагается следующий алгоритм работы построенного комплекса:

**Шаг 1.** Выгрузка необходимых данных из КИС предприятия в MS Excel.

**Шаг 2.** Инициализация переменных ИМ в PowerSim; запуск эксперимента.

**Шаг 3.** Выгрузка результатов моделирования из PowerSim в MS Excel.

**Шаги 4, 6.** Передача данных для анализа из MS Excel в BelSim, либо в пакет STATISTICA.

**Шаги 5, 7.** Выгрузка результатов анализа данных в MS Excel.

**Шаг 8.** Сохранение полученных результатов в КИС предприятия.





С помощью переменных-предикатов определяются оптимальные, в соответствии с заданными критериями оптимизации, ТР для ТП (1) – оптимальный маршрут по графу от истока к стоку.

$$\begin{pmatrix} fl_{11} \\ fl_{12} \\ fl_{13} \end{pmatrix} \rightarrow (fl_{21}) \rightarrow \begin{pmatrix} fl_{31} \\ fl_{32} \\ fl_{33} \end{pmatrix} \rightarrow (fl_{41}) \rightarrow \begin{pmatrix} fl_{51} \\ fl_{52} \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} fl_{61} \\ fl_{62} \\ fl_{63} \end{pmatrix} \rightarrow (fl_{71}) \rightarrow (fl_{81})$$

При этом функция-предикат  $Fl\_1$  применяется для ТР этапов 1, 3, 5, 6. при расчете значений предикатов  $fl_{11}, \dots, fl_{13}$  и т. д. Исключение составляют ТР этапа 2 ( $fl_{21} = True$ ), этапа 4 ( $fl_{41} = True$ ), этапа 7 ( $fl_{71} = True$ ), этапа 8 ( $fl_{81} = True$ ).

#### Заключение

В результате проведенного исследования получены следующие оптимальные ТР выбранного ТП (в ценах 2012-го года):

1) с минимальной суммарной стоимостью затрат ресурсов и времени ( $pOpt = 2$  – оптимизация в первую очередь по стоимости ресурсов (2-я координата), во вторую – по времени;  $Fm_1, Fm_2 = \min$ ):  $L_{\min}^* = L\_8 = (6,87; 4334260)$ , где время составило 6,87 час., стоимость ресурсов 4334260 руб.; маршрут по графу  $<0-3-4-7-8-10-13-14-15>$ ;

2) с минимальными временными затратами и минимальными затратами ресурсов ( $pOpt = 1$  – оптимизация в первую очередь по времени (1-я координата), во вторую – по стоимости ресурсов;  $Fm_1, Fm_2 = \min$ ):  $L_{\min}^* = L\_8 = (6,62; 4379060)$ , где время составило 6,62 час., стоимость ресурсов 4379060 руб.; маршрут по графу  $<0-3-4-5-8-10-13-14-15>$ .

При этом известно, что для реально применяемых технологических режимов исследуемого ТП, маршрут по графу  $<0-1-4-6-8-9-11-14-15>$  и имеют место следующие пока-

затели:  $L_{real} = (7,51; 5017930)$ , где время составляет 7,51 час., стоимость ресурсов – 5017930 руб.

Таким образом, для реального ТП исследование показало: при производстве заданного количества ткани (1000 м.п.) итоговая лучшая разница по стоимости расхода ресурсов составляет 684 тыс. руб.; разница по времени – порядка 50 мин (0,89 часа).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Отделка хлопчатобумажных тканей : справочник / Н. В Егоров [и др.] : В 2 ч. – М.: Легпромбытиздат, 1991. – Ч. 1. – 432 с.
2. Новиков, Ф. А. Дискретная математика для программистов : учебник. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 368 с.
3. Черноруцкий, И. Г. Методы принятия решений: учебник. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 416 с.
4. Борчик, Е. М. Метод управления процессом производства продукции на основании принципа оптимальности Беллмана / Е. М. Борчик, А. И. Якимов // Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии: материалы междунар. науч.-техн. конф. : В 2 ч.; редкол. : И. С. Сазонов (гл. ред.) [и др.]; Могилев, 18–19 апреля 2013 г. – Могилев : Белорус.-Рос. ун-т, 2013. – Ч. 1. – С. 193–194.
5. Доронькин, А. В. Автоматизация расчета затрат энергоресурсов в производстве тканей ОАО «Моготекс» / А. В. Доронькин, Е. М. Борчик, А. И. Якимов // Студенческий вестник, октябрь, 2012. – № 8. [Электрон. ресурс] – Режим доступа: <http://www.bru.mogilev.by/science/vesnik/Papers2012/04.pdf> - Дата доступа 21.10.2012.
6. Якимов, А. И. Технология имитационного моделирования систем управления промышленных предприятий : монография / А. И. Якимов. – Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2010. – 304 с.: ил.

УДК 519.816

*Ю. И. Хиноцкая***КАЧЕСТВЕННЫЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ЖИЗНИ НАСЕЛЕНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

poas@vstu.ru

В статье представлена качественная модель оценки качества жизни населения, в которой причинно-следственные зависимости между показателями качества жизни и мерами социально-экономической политики были определены на основе стратегического плана устойчивого развития Волгограда до 2025 года. На разработанной качественной модели были построены различные сценарии, отражающие возможные варианты изменения показателей качества жизни.

*Ключевые слова:* качество жизни населения, показатели качества жизни, качественная модель, сценарное моделирование.

*J. I. Khinotskaya***QUALITATIVE APPROACH TO ASSESSMENT OF LIFE QUALITY****Volgograd State Technical University**

In this paper a qualitative model of life quality assessment is presented, it contains the causal dependences between life quality indexes and measures of socio-economic policy which were defined from the strategic plan for sustainable development of Volgograd till 2025. A number of scenarios was simulated using developed qualitative model, which reflect the possible trends of changing the life quality indexes.

*Keywords:* life quality, life quality indexes, qualitative model, scenario modelling.

**Введение**

На сегодняшний день актуальной является проблема изучения качества жизни населения, однако в мировой науке нет единого подхода к оценке этой категории [1]. Качество жизни отражает научно-технический и человеческий потенциал, социально-экономическое развитие территории, поэтому решение проблемы оценки и повышения качества жизни является важным как для региона, так и для страны в целом.

Изучением категории «качество жизни» занимается ряд современных российских и зарубежных ученых, среди которых З. А. Васильева, Е. С. Грузина, Т. В. Гаврилова, А. С. Айвазян, В. А. Бывшев, А. А. Горчаков, И. В. Гришина, А. Г. Колбасина, А. О. Недосекин, О. И. Ларичев, Г. Дженкинс, А. Кофман, К. Д. Льюис, Р. Беллман, Л. Заде, Р. Л. Кини, Ф. Морз, М. Кендэл, Х. А. Таха и другие [2].

В настоящее время предложено множество различных методов оценки качества жизни населения, при этом в основном используется три подхода: объективный (количественный), субъективный (качественный) и комплексный (интегральный) [3]. При этом отсутствует единый подход к выбору критериев оценки эффективности мер социально-экономической политики, направленных на улучшение различных сфер жизнедеятельности, таких как экологическая обстановка, уровень здоровья населения, бытовой и трудовой комфорт, удовлетворенность культурными и духовными потребностями, со-

циальная защита и другие. Необходимо установить, каким образом изменения в одной из сфер влекут за собой изменения в других сферах, как это отражается на качестве жизни населения, какие государственные мероприятия действительно улучшат качество жизни. Для решения этих вопросов могут использоваться различные методы системного анализа, в том числе качественное и имитационное моделирование [4, 5]. В данной работе предлагается использовать качественное моделирование как инструмент для предварительной оценки эффективности программ развития городских территорий по критерию качества жизни населения.

**1. Постановка задачи**

Качественное моделирование широко используется при изучении экономических, экологических, образовательных, производственных и других систем [6, 7]. Качественная модель для оценки категории «качество жизни» должна обеспечивать следующие возможности: наглядное отображение информации об уровне каждого показателя качества жизни; установление причинно-следственных связей между показателями; отслеживание влияния одних показателей на другие; создание сценариев, отображающих изменение уровня качества жизни и составляющих его показателей.

Одним из наиболее распространенных методов качественного моделирования является метод сценариев. Достоинство этого метода

в возможности более детального и углубленного анализа взаимодействия аспектов развития ситуации. Разработанные сценарии можно использовать в качестве эффективных инструментов выработки решений в области социально-экономической политики развития территорий. Сценарий – это логически обоснованная модель, которую можно рассматривать как комплексный прогноз изменения качества жизни при определенных условиях.

В результате анализа существующих методов оценки качества жизни населения [3, 8] были выделены следующие показатели, определяющие категорию «качество жизни»: уровень здоровья населения, уровень образования, жилищные условия, экологические условия, состояние рынка труда, уровень благосостояния, личная безопасность, условия отдыха, качество питания. На основе анализа взаимовлияния выделенных показателей была построена модель оценки качества жизни населения в системе качественного моделирования Garp 3 (версия 1.5.2) [9], которая позволяет исследовать закономерности влияния показателей и мер социально-экономической политики на изменение качества жизни.

## 2. Описание качественной модели

Согласно идеологии используемого программного средства, качественная модель состоит из статической части, описывающей структуру моделируемой системы и пропорциональные зависимости между сущностями, а также динамической (процессной) части, описывающей процессы внутри системы. Процесс в данном случае может быть определен как механизм, вызывающий изменения свойств некоторого объекта системы [9]. Формально качественная модель **QM** представляется в следующем виде:

$$QM = \{BVC, AC\},$$

где **BVC** – множество простых компонентов модели; **AC** – множество составных компонентов модели, использующих элементы BVC как строительные блоки.

$$BVC = \{SB, BB, AB\},$$

где **SB** – простые структурные компоненты модели; **BB** – простые компоненты модели, задающие поведение системы; **AB** – множество посылок, управляющих допустимостью использования составных компонентов качественной модели.

$$SB = \{SE, SC\},$$

где **SE** – иерархия сущностей, задающая иерархию понятий предметной области; **SC** – множество отношений между сущностями предметной области.

$$BB = \{Q, QS, D\},$$

где **Q** – множество качественных переменных, используемых для описания состояния сущностей, **QS** – пространства допустимых значений (домены) качественных переменных **Q**; **D** – множество отношений причинно-следственной зависимости между значениями качественных переменных.

$$D = \{I+, I-, P+, P-\},$$

где **I+** – прямая пропорциональная зависимость между значением одной переменной и производной другой переменной, **I-** – обратная пропорциональная зависимость между значением одной переменной и производной другой переменной, **P+** – прямая пропорциональная зависимость между значениями двух переменных, **P-** – обратная пропорциональная зависимость между значениями двух переменных.

$$AC = \{SF, PF, Sc\},$$

где **SF** – множество статических фрагментов качественной модели, сформированных из элементов BVC, **PF** – множество динамических фрагментов качественной модели, сформированных из элементов BVC, **Sc** – множество сценариев симуляции качественной модели, сформированных из элементов BVC.

Разработанная модель оценки качества жизни населения включает в себя качественные переменные двух видов: одни отражают показатели качества жизни, а другие обозначают меры социально-экономической политики, применяемые в той или иной области. Каждая из переменных может принимать одно из следующих значений шкалы: {низкий уровень, средний уровень, высокий уровень}. Между значениями качественных переменных существуют отношения причинно-следственной зависимости.

В таблице представлен фрагмент описания отношений причинно-следственной зависимости качественной модели для переменных  $Q_1$  "Уровень образования (Education)",  $Q_2$  "Уровень благосостояния (Wealth)",  $Q_3$  "Состояние рынка труда (Labor market)",  $Q_4$  "Личная безопасность (Personal security)",  $Q_5$  "Уровень здоровья населения (Health)" и  $Q_6$  "Экологические условия (Ecology)".

Описание отношений причинно-следственной зависимости переменных качественной модели (фрагмент)

|                | Q <sub>1</sub> | Q <sub>2</sub> | Q <sub>3</sub> | Q <sub>4</sub> | Q <sub>5</sub> | Q <sub>6</sub> |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Q <sub>1</sub> | -              | D={I-,P-}      | D={I+,P+}      | D={I-,P-}      | D={I+,P+}      | D={I+,P+}      |
| Q <sub>2</sub> | -              | -              | D={I+,P+}      | D={I-,P-}      | D={I-,P-}      | D={I+,P+}      |
| Q <sub>3</sub> | -              | -              | -              | D={I-,P-}      | D={I+,P+}      | D={I+,P+}      |
| Q <sub>4</sub> | -              | -              | -              | -              | D={I-,P-}      | D={I-,P-}      |
| Q <sub>5</sub> | -              | -              | -              | -              | -              | D={I+,P+}      |
| Q <sub>6</sub> | -              | -              | -              | -              | -              | -              |

В частности, наличие отношения  $D=\{I-,P-\}$  между переменными  $Q_3$  и  $Q_4$  свидетельствует о том, что изменение состояния рынка труда влечет изменение уровня общей безопасности населения. При положительном изменении значения переменной «Состояние рынка труда» уменьшается значение переменной «Личная безопасность». Отметим, что показатель «Состояние рынка труда» отражает уровень безработицы населения по субъектам РФ в среднем за год в %, а показатель «Личная безопасность» характеризует число зарегистрированных преступлений в год. Меры, влияющие на эти показатели, имеют прямую пропорциональную зависимость по отношению к значениям показателей.

Отношения причинно-следственной зависимости между переменными качественной мо-

дели были определены на основе стратегического плана устойчивого развития города Волгограда [10].

На рис. 1 и 2 представлены фрагменты статической и динамической составляющих разработанной качественной модели оценки качества жизни населения.

На представленной качественной модели был смоделирован ряд тестовых сценариев. Рассмотрим сценарий 1 (рис. 3), который позволяет выявить влияние восходящей тенденции развития рынка труда на другие сферы жизни человека, начальные значения качественных переменных были установлены на среднем уровне. Полученный граф состояний и результаты моделирования представлены на рис. 4 и 5 соответственно.

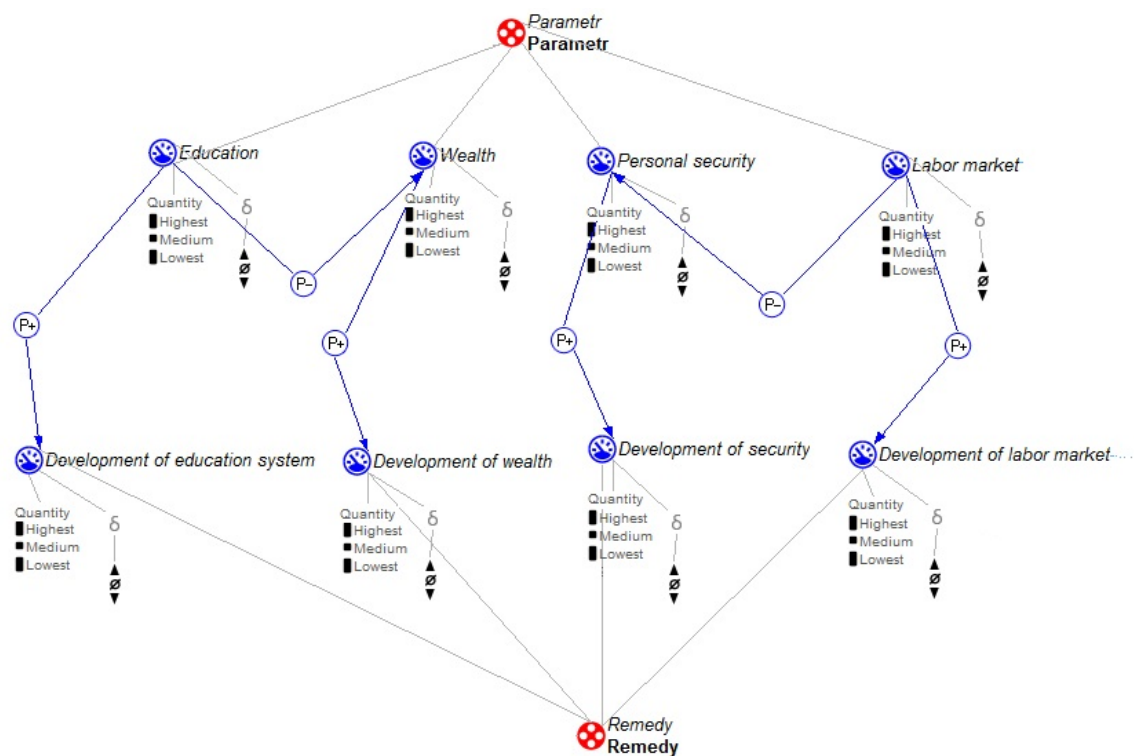


Рис. 1. Статическая составляющая качественной модели (фрагмент)

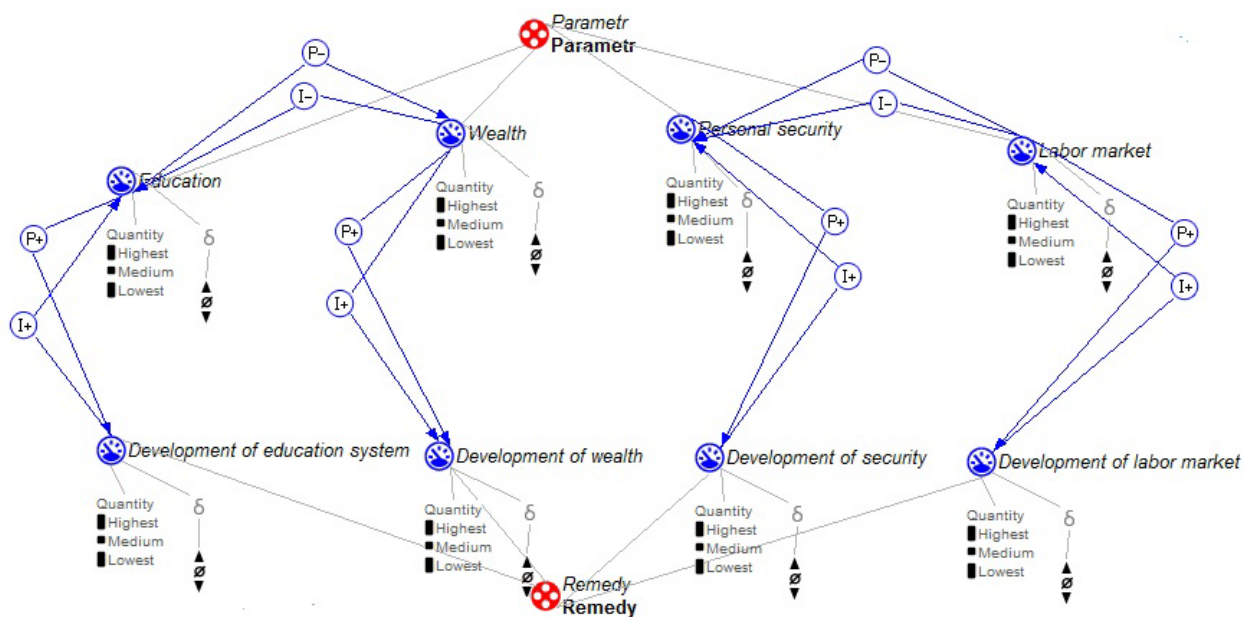


Рис. 2. Динамическая составляющая качественной модели (фрагмент)

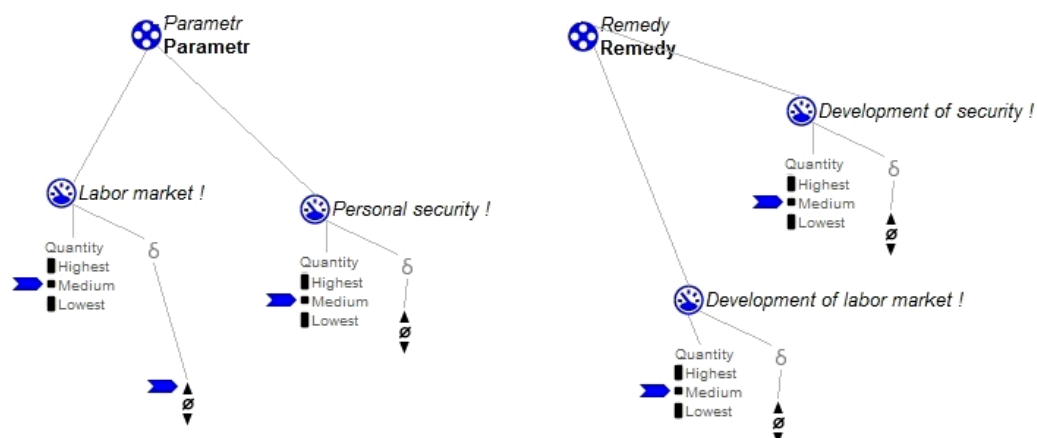


Рис. 3. Тестовый сценарий 1

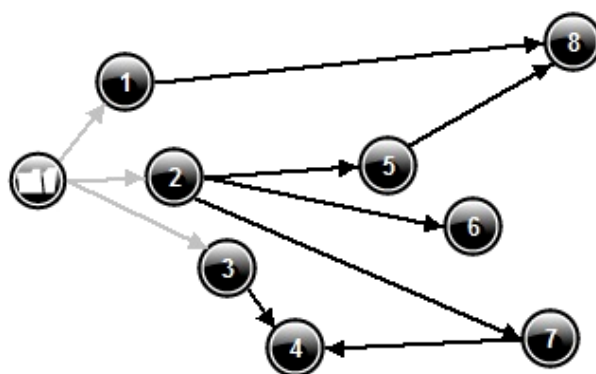


Рис. 4. Граф состояний качественной модели для сценария 1

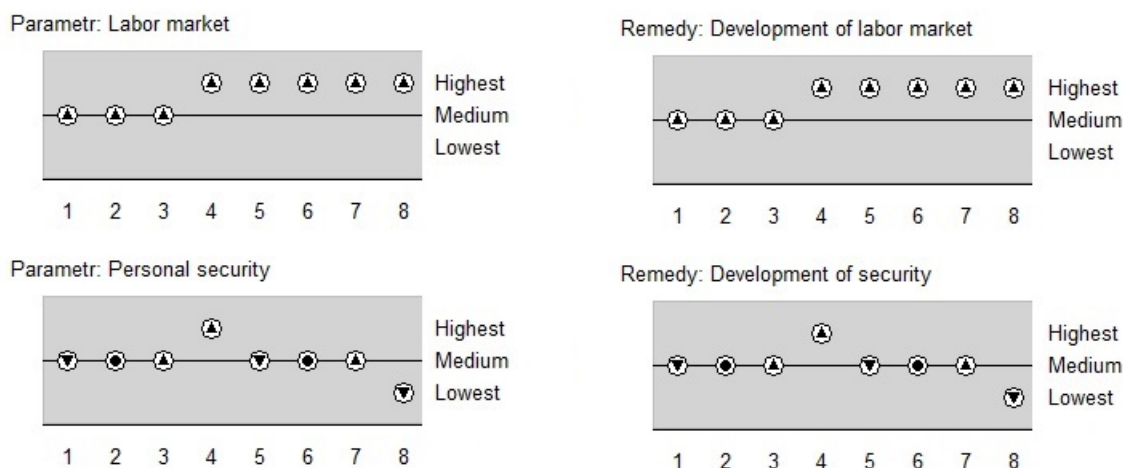


Рис. 5. Динамика изменения качественных переменных для сценария 1

По результатам качественного моделирования можно утверждать, что при развитом рынке труда уменьшается уровень правонарушений. Для поддержания данной ситуации необходимо разработать и применить меры в обеих сферах жизнедеятельности.

Второй сценарии (рис. 6) отражает влияние уровня образования на уровень благосостояния

населения. Граф состояний и результаты моделирования представлены на рис. 7 и 8 соответственно. По результатам этого сценария становится очевидным, что увеличение уровня образования имеет негативное влияние на уровень благосостояния, возникает эффект избыточного образования [11]. Рассмотрим данный эффект на микро- и макроуровнях.

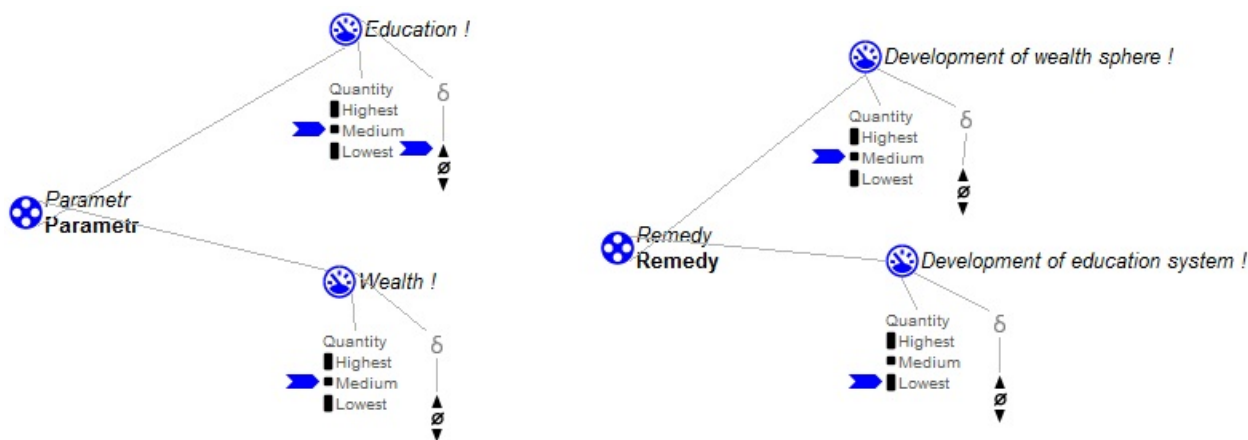


Рис. 6. Тестовый сценарий 2

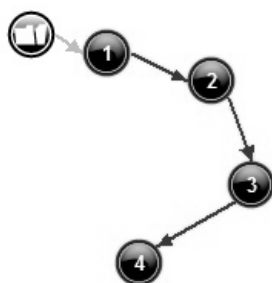


Рис. 7. Граф состояний для сценария 2

На микроуровне знание индивида (работника фирмы) о том, что его образование несколько превышает запас человеческого капитала,

который необходим для выполнения обязанностей, снижает его мотивацию к качественному выполнению работы. Причинами могут быть ненужность всего имеющегося образовательного потенциала, неудовлетворенность занимаемой должностью и выполняемыми функциями, размер заработной платы и другие. Таким образом, происходит деморализующий эффект и на работника с избыточным образованием, и на коллектив в целом. А это приводит к снижению производительности труда всех работников фирмы, вследствие чего учащаются штрафы, снижается уровень доходов. Таким образом, снижается уровень благосостояния работников.



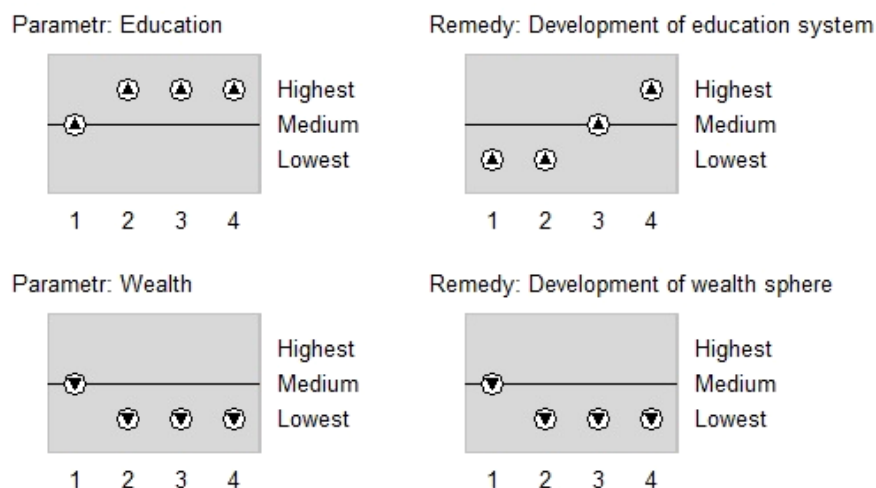


Рис. 8. Динамика изменения качественных переменных для сценария 2

На макроуровне из-за разницы количества квалифицированных работников в регионах происходит снижение благосостояния населения. Например, в регионах с относительно более низким уровнем образования отток квалифицированных кадров уменьшает запас человеческого капитала, а, следовательно, и средний уровень доходов. Все это отрицательно скажется на общем благосостоянии населения региона [11].

Мерами улучшения сферы благосостояния могут быть контроль работодателей за выполнением условий трудового кодекса, повышение уровня финансовой грамотности населения, поддержка развития малого и среднего бизнеса и другие [10].

### Выводы

В данной работе предложен подход к оценке эффективности программ социально-экономического развития городских территорий на основе качественной модели оценки качества жизни населения.

В результате анализа предметной области были выделены основные показатели качества жизни населения, определены причинно-следственные связи между ними. Построена качественная модель оценки качества жизни населения и проведено сценарное моделирование, для каждого сценария предложен комплекс мер по изменению или сохранению сложившейся ситуации.

Разработанная качественная модель может использоваться как вспомогательное средство поддержки принятия решений по выбору стратегий развития города, реализация которых в наибольшей степени способствует повышению качества жизни населения.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Нагимова, А. М. Социологический анализ качества жизни населения: региональный аспект. – Казань: Казан. гос. ун-т, 2010. – С. 4-6.
2. Чистобаев, А. И. Эволюция научных представлений о качестве жизни населения / А. И. Чистобаев, З.А. Семенова // Общество. Среда. Развитие. – 2013. – №3. – С. 248-251.
3. Гришина, И. В. Качество жизни населения регионов России: методология исследования и результаты комплексной оценки / И. В. Гришина, А. О. Полянев, С. А. Тимонин // Современные производительные силы. – 2012. – №1. – С.70-72.
4. Scenario forecasting of sustainable urban development based on cognitive model / Н. П. Садовникова (и др.) // Proceedings of the IADIS International Conference ICT, Society and Human Beings 2013, Proceedings of the IADIS International Conference e-Commerce. – 2013. – P. 115-119.
5. The Use of System-Dynamic Approach to Analyze the Vehicles and Landscaping Impact on Air Quality / Н. П. Садовникова (и др.) // World Applied Sciences Journal. – 2013. – № 24. – P. 159-164.
6. Комплексный анализ безопасности транспортной системы Волгограда / М. Б. Кульцова [и др.] // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 18. № 22 (125). С. 72-77.
7. Подход к прогнозированию энергопотребления в жилищном секторе на основе качественного и имитационного моделирования / М. Б. Кульцова [и др.] // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2014. – № 5(119). – С. 38-44.
8. Васильева, З. А. Разработка методики оценки качества жизни населения территорий (на примере г. Красноярск). [Электронный ресурс] / А. Г. Колбасина, И. В. Филимонов // Сайт Российской Ассоциации Маркетинга. – Красноярск, 2003. – Режим доступа : <http://ram.ru/activity/comp/bp2003/files/std09.pdf>.
9. Garp3: Workbench for qualitative modelling and simulation/ В. Bredeweg (and e.t.c.) // Ecological Informatics. – 2009. – № 4. – P. 263 – 281.
10. О принятии Стратегического плана устойчивого развития Волгограда до 2025 года [Электронный ресурс] : решение Волгоградской городской Думы от 24 дек. 2007 г. № 55/1399. – Режим доступа : [http://volgograd.news-city.info/docs/sistemst/dok\\_iergzz/index.htm](http://volgograd.news-city.info/docs/sistemst/dok_iergzz/index.htm).
11. Зак, Т. В. Избыточное образование и его роль в экономическом развитии / Т. В. Зак // Вестник Астраханского государственного технического университета. Серия: Экономика. – 2010. – №1. – С. 116-122.

УДК: 004.896

*В. Ф. Чан, А. А. Алимов, О. А. Шабалина***АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ И МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ ГРУППОЙ  
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СРЕДЕ\*****Волгоградский государственный технический университет**

vanphu01011989@gmail.com, velorth.avelies@gmail.com

В статье рассмотрена задача управления группой интеллектуальных агентов в динамической среде. Рассмотрены современные алгоритмы и методы для разработки системы, решающей три основных задачи управления агентами: планирование перемещений с избеганием препятствий, планирование действий и принятие решений. Показаны области применения, возможности и ограничения рассмотренных алгоритмов для решения задач управления группами агентов в компьютерных играх.

*Ключевые слова:* интеллектуальный агент, управление группой агентов, алгоритмы планирования.

*V. P. Tran, A. A. Alimov, O. A. Shabalina***ANALYSIS OF ALGORITHMS AND METHODS TO MANAGE A GROUP  
OF INTELLIGENT AGENTS IN A DYNAMIC ENVIRONMENT****Volgograd State Technical University**

The article considers the problem of management of a group of intelligent agents in a dynamic environment. Modern algorithms and methods for the development of a system for planning agent's movements to avoid obstacles, action planning and decision making are described. Areas of application, possibilities and limitations of the described algorithms for solving the problem of agents' group management in computer games are shown.

*Keywords:* intelligent agent, agents' group management, scheduling algorithms.

**Введение**

Применение интеллектуальных агентов (ИА) в различных областях имеет большое значение. Системы, построенные на основе мультиагентного подхода, являются более гибкими, мобильными и «интеллектуальными» в сравнении с системами, реализованными с использованием других технологий моделирования.

В таких системах агенты могут действовать в одиночку или группами. Под задачей управления группой ИА понимается распределение действий каждого агента в группе, так чтобы действия группы были направлены на достижение общей групповой цели и индивидуальных целей каждого агента. Решение проблемы управления группами ИА приводит к повышению ее производительности и эффективности работы.

В этой работе рассматриваются модели и методы, применяемые для организации групповой (коллективной) работы ИА в условиях противодействия в компьютерной игре.

**Актуальность работы**

Как правило, мультиагентные системы обладают высокой адаптивностью. Этим обусловлено применение мультиагентных систем для

разработки адаптивных компьютерных игр, в том числе обучающих игр [1].

Большинство компьютерных игр могут быть рассмотрены как мультиагентная система, в которой агентами являются игроки, управляемые человеком или компьютером (боты). Задача интеллектуального бота – максимально близко соответствовать рациональному поведению игрока-человека.

При управлении группой ИА возникает ряд весьма сложных задач. Первая задача связана с распределением действий между агентами, вторая – с организацией взаимодействия агентов группы между собой для наиболее эффективного достижения цели, поставленной перед группой. От выбора этих задач зависит эффективность работы всей группы ИА в целом [2].

Большое количество агентов в группе неизбежно приводит к снижению производительности системы при использовании равной вычислительной мощности. Возникает конфликт между качеством принимаемых решений, количеством агентов и производительностью системы. Чем более точное решение нужно получить и чем сложнее задача, тем больше вычислительных ресурсов требуется при использовании одного и того же алгоритма. Таким образом, от выбора алгоритмов и методов, применяемых в мультиагентной системе, зависят качество решения задачи и производительность системы.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке со стороны Минобрнауки России в рамках базовой части (проект 2586 задания № 2014/16).



## 1. Подходы построения системы управления группой ИА

Существуют три основных подхода к организации управления в динамической среде, применяемых в разработке мультиагентных систем:

- 1) централизованный подход;
- 2) децентрализованный подход;
- 3) комбинированный подход (комбинация между централизованным и децентрализованным).

В рамках каждого из этих подходов существуют специфичные методы и алгоритмы управления агентами.

При централизованном подходе система управления включает центрального ведущего ИА и его связи со всеми ИА группы. Каждый ИА группы должен постоянно передавать ведущему ИА информацию о своем текущем состоянии и текущем состоянии окружающего его участка среды. На основе этого подхода ведущий ИА решает задачу формирования действий для всех ИА группы, направленных на оптимальное достижение групповой цели в текущей ситуации. Такой подход требует значительных затрат времени для передачи информации между ИА группы и ведущему.

При децентрализованном подходе каждый ИА обладает своей системой управления. Эти системы объединены с помощью информационного канала связи, но каждая отвечает за выбор действий ИА составе группы. Информация о выбранном действии сообщается всем остальным группам, на основании чего последние могут скорректировать действия «своих» ИА с учетом действия этих ИА для оптимизации достижения групповой цели.

Система, построенная на основе комбинированного подхода, состоит из кластеров. Каждый кластер имеет своего ведущего агента, который получает информацию от всех ИА через каналы связи и отвечает за их выбор действий в текущей ситуации.

Децентрализованный и комбинированный подходы позволяют реализовать более гибкие и эффективные системы, однако при использовании этих подходов повышается сложность проектирования системы управления группой ИА.

## 2. Методы, применяемые при разработке системы управления группой ИА

### 2.1. Решаемые задачи управления группой ИА

Основные проблемы, которые должны быть решены для достижения оптимального управ-

ления группой ИА в условиях противодействия, связывают со следующими задачами:

- 1) перемещение агента с избеганием динамических препятствий;
- 2) планирование перемещений агента;
- 3) оптимизация процесса принятия решений для достижения общих групповых и индивидуальных целей.

Для решения этих задач используются методы и алгоритмы, рассмотренные ниже.

### 2.2. Методы для решения задачи перемещения ИА с избеганием препятствий

В динамической среде существуют объекты, которые препятствуют свободному перемещению агентов. Примерами таких объектов являются другие агенты, а также объекты, моделирующие статические игровые примитивы («кустарники», «камни», «контейнеры» и т. д.). Это могут быть как небольшие статичные объекты, которые слишком малы, чтобы учитываться навигационным графом, либо динамические объекты, перемещающиеся со скоростью, сравнимой со скоростью агента.

Для решения этой проблемы принято использовать децентрализованные алгоритмы. В [3] описана модель поведения точечных объектов, передвигающихся в больших группах. Поведение каждого агента в системе декомпозируется на три уровня: уровень выбора действия, уровень планирования и уровень локомоции. В статье представлены простые и составные алгоритмы перемещения (уровень локомоции). К простым алгоритмам относятся: «поиск», «преследование», «преследование с опережением», «прибытие», «избегание», «избегание препятствий». Составные алгоритмы получаются взвешенной комбинацией простых алгоритмов. Примерами «составного поведения» являются «следование по маршруту с избеганием препятствий», «перемещение в формации». Описанные в статье алгоритмы нашли применение во многих коммерческих играх и системах моделирования. Алгоритмы Steering Behavior являются децентрализованными.

Существуют различные подходы к управлению ИА в играх. Так, например, в [15] рассмотрена концепция системы управления ИА, основанная на многоуровневом планировании и поведенческих реакциях. Предложенная концепция системы управления ИА применяется в среде разработки обучающих игровых приложений. В [15, 16] предложены модель поведения ИА на основе анализа систем игрового иску-

ственного интеллекта и концепция систем управления ИА. На основе модели поведения построен прототип системы игрового ИИ, позволяющий решить проблемы, связанные с механизмом выполнения коллективных действий ИА и конфликтом при использовании общих ресурсов. Но задача распределения действий для достижения общей групповой цели и индивидуальных целей между ИА решена не полностью.

Среди централизованных алгоритмов избегания препятствий можно выделить алгоритмы Reciprocal Velocity Obstacle, RVO.

В алгоритме RVO [4, 5] каждый агент, который может перемещаться в виртуальной среде, планирует свои перемещения самостоятельно без явной связи с другими агентами в группе, однако результирующий вектор скорости выбирается на основании координат и скоростей столкновения с соседними агентами. Скоростью столкновения является разность скоростей между объектами. Реализованная с использованием этих алгоритмов система поддерживает моделирование перемещений до 100000

агентов в режиме реального времени. Алгоритм RVO является расширением алгоритма Velocity Obstacles, VO, который используется для навигации среди неподвижных (пассивных) препятствий.

В [5, 6, 7] предложен алгоритм Hybrid Reciprocal Velocity Obstacles, HRVO, который является комбинацией алгоритмов VO и RVO. Алгоритм решает проблему взаимного пересечения агентов, возникающую в алгоритмах RVO и VO. Каждый агент в общем случае чувствует изменение своего окружения и действует автономно без централизованной координации и общения с другими агентами. Для вычисления будущей траектории ИА, чтобы избежать столкновения с соседними ИА, используется информация о текущих положений и скорости соседних агентов.

В сравнении с алгоритмами VO и RVO алгоритм HRVO имеет большее вычислительное время [7], но преимущество этого алгоритма заключается в том, что количество столкновений агентов при перемещении намного меньше в одной же ситуации (см. рисунок).

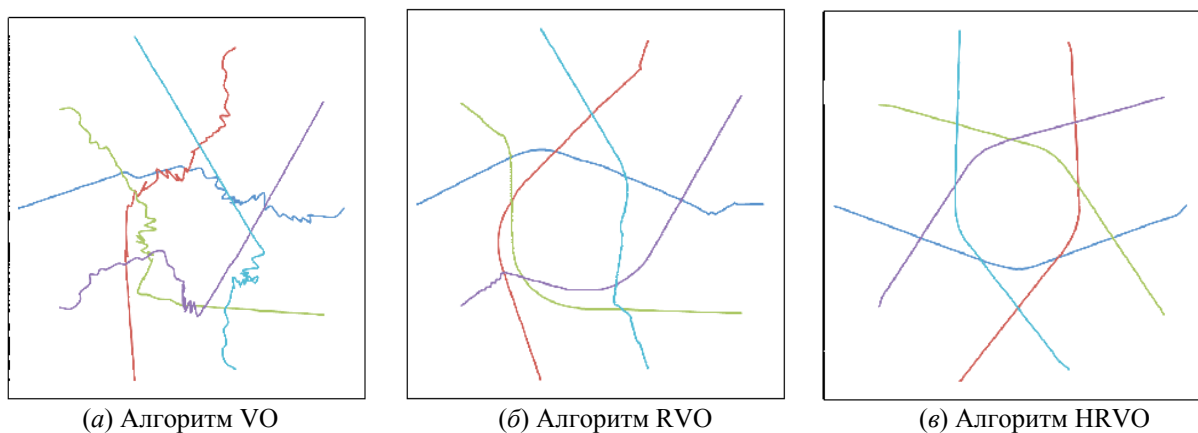


Рис. 1. Траектории пяти агентов (обозначены разными цветами), перемещающихся одновременно в одном окружении при использовании разных алгоритмов [7]

Таким образом, в зависимости от выбора подхода построения системы управления мы можем выбирать соответствующие алгоритмы. Если выбирается централизованный подход, то лучше всего подходят алгоритмы Steering Behavior. Если выбирается децентрализованный подход, то оптимальным является алгоритм HRVO, несмотря на то, что для его использования требуются большие ресурсы (память и время). Из-за трудностей реализации комбинационный подход используется только в тех случаях, когда количество ИА в группы достаточно большое.

### 2.3. Методы для решения задачи планирования перемещений и действий агента

Агент должен уметь самостоятельно планировать последовательность своих действий в будущем. В играх для планирования применяются алгоритмы поиска в графах, алгоритмы STRIPS и GOAP.

В компьютерных играх получил большое распространение алгоритм поиска оптимального маршрута A\*. Этот алгоритм позволяет агенту достигать цели за счет построения пути из начального в конечное положение. Однако у этого алгоритма имеется определенный недо-

статок. Например, в некоем лабиринте может потребоваться сначала идти по направлению от выхода, и только потом повернуть назад. В этом случае обследование вначале тех вершин, которые расположены ближе к выходу (по прямой дистанции), будет потерей времени. Для повышения эффективности (скорости) работы алгоритма  $A^*$  имеются два варианта: либо модификация алгоритма [8], либо многопоточная реализация алгоритма [9].

В [11] представлен автоматический планировщик STRIPS (Stanford Research Institute Problem Solver) и описана его структура с основными операторами. Описание поставленной задачи планирования на языке STRIPS включает в себя три компонента: начальное состояние, описание целевых состояний и набор возможных действий. Каждое действие включает:

предусловия – предварительные условия, которые должны быть удовлетворены, чтобы действие могло быть выполнено;

постусловия – изменения состояния, которые произойдут после выполнения действия.

Алгоритм планирования STRIPS в [11] представлен в виде псевдокода. STRIPS подходит для разработки логических игр на логических языках, например Prolog. Однако разработка системы планирования STRIPS на современных языках (таких как C/C++, Java, Python и др.) связана с рядом проблем: большой объем кода из-за построения баз правил и высокое требование к объему памяти из-за хранения планов.

На основе STRIPS разработана система GOAP [12], предназначенная для планирования действий ИА от текущего состояния до конечного. Входными данными системы являются состояние виртуального мира, цель и набор действий ИА. На основе входных данных план формулируется с помощью поиска в пространстве состояний графа для минимального упорядоченного набора действий, которые переводят текущее состояние ИА в целевое состояние.

Если алгоритм поиска оптимального пути  $A^*$  используется для планирования перемещения, то системы планирования GOAP, STRIPS содержат планировщик для планирования действий в будущем. В некоторых видео-играх используется GOAP или STRIPS для решения задач принятия решения, например как [12].

#### 2.4. Методы для решения задачи оптимизации процесса принятия решений

Самая важная задача при управлении группой ИА в динамической среде – это задача при-

нятия решений, при этом решение должно приниматься агентом с целью достижения индивидуальных и общих целей. На сегодняшний день широко используются алгоритмы на основе деревьев принятия решений. Узлы дерева группируют правила по назначению и условиям применимости. Часть узлов дерева описывает общие цели, часть – индивидуальные. Использование дерева принятия решений позволяет оптимизировать запись большого количества правил «если-то».

В некоторых случаях информация о виртуальной среде, полученная агентами, может быть неопределенной, неполной или недостоверной. Использование классических методов принятия решений в таких условиях не представляется возможным. Для решения этой проблемы в технологии управления появилось понятие «принятие решений на основе нечеткой логики» [13]. Применение методов принятия решений на основе нечеткой логики повышает гибкость и эффективность системы ИИ. В [17] предложены алгоритмы и методы для реализации игры Pac-Man на основе нечеткой логики. Результаты применения, предложенных в работе алгоритмов и методов показали большую эффективность в сравнении с оригинальной игрой Pac-Man. Однако использование нечеткой логики может привести к увеличению количества правил и, соответственно к увеличению времени выполнения алгоритмов. В этом случае для повышения скорости принятия решений возможно использовать RETE-сети [14].

Для принятия решений могут быть использованы конечные автоматы, в которых каждое состояние системы соответствует определенной тактике поведения или набору действий ИА. Конечные автоматы широко применяются в системах искусственного интеллекта (ИИ) по следующим причинам: простота описания программного кода, простота устранения ошибок кода, малая вероятность вычислительных издержек и гибкость. Примерами игр, в которых применяются конечные автоматы, являются игра Pac-Man [10], в которой тактики поведения ИА реализованы с использованием конечного автомата, боты в игре Quake и игроки в спортивных симуляторах, таких как FIFA 2002 и т. д. Однако в некоторых случаях применение конечных автоматов приводит к конфликту описаний состояний системы. Например, в системе ИИ, в которой агенты могут выполнять набор действий одновременно, конечные автоматы

плохо описывают поведения ИА. Сложность построения конечного автомата может достигать  $O(N!)$ , где  $N$  – количество действий, при полном переборе всех возможных вариантов. Если количество действий  $N$  агента довольно высоко, то разработка такой системы будет неоправданно дорогой.

Таким образом, количество алгоритмов для задачи принятия решений довольно велико. В зависимости от свойства виртуальной среды и знаний ИА об окружающей среде нужно выбирать соответствующий набор алгоритмов для реализации системы управления.

### Вывод

В данной работе рассмотрены подходы к построению систем управления группой интеллектуальных агентов, а также алгоритмы и методы, применимые в этих системах. Анализ методов и алгоритмов для решения задачи перемещения ИА в виртуальном мире показывает эффективность алгоритма HRVO при централизованном подходе и набора алгоритмов управления поведением Steering Behavior при децентрализованном. Результат анализа задачи планирования и принятия решений в системе ИИ показывает, что можно применять GOAP и методы нечеткой логики с возможным использованием RETE-сетей для повышения скорости поиска решений на основе нечеткого вывода.

Таким образом, задача управления группой интеллектуальных агентов имеет множество частных решений, которые реализованы в существующих системах. Данное исследование явилось первым шагом в разработке новой эффективной системы управления, позволяющей решать комплексную задачу управления группой агентов, включающую эффективное управление навигацией, планирование и принятие решения, которые являются наиболее важными при разработке систем ИИ в компьютерных играх.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шабалина, О. А. Модели и методы для управления процессом обучения с помощью адаптивных обучающих систем: дис. канд. техн. наук: 05.13.10 / О. А. Шабалина. – Астрахань, 2005. – 158 с.
2. Каляев, И. А. Самоорганизующиеся распределенные системы управления группами интеллектуальных роботов, построенные на основе сетевой модели / И. А. Каляев, С. Г. Капустян, А. П. Гайдук // Управление большими системами. Спец. выпуск 30.1 «Сетевые модели в управлении». – М.: ИПУ РАН. – 2010. – С. 605 – 639.
3. Craig W. Reynolds. Steering Behaviors For Autonomous Characters. – Sony Computer Entertainment America 919 East Hillsdale Boulevard Foster City. – California 94404, 1999. – URL: <http://www.cs.uu.nl/docs/vakken/mcrs/papers/8.pdf>
4. Jur van den Berg. Reciprocal Velocity Obstacles for Real-Time Multi-Agent Navigation / Jur van den Berg, Ming Lin, Dinesh Manocha // Proceedings - IEEE International Conference on Robotics and Automation. – 2008. – Article number 4543489. – P. 1928-1935.
5. Gayle R. Reactive deforming roadmaps: Motion planning of multiple robots in dynamic environments / R. Gayle, A. Sud, M. Lin, and D. Manocha // Proceedings IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems. – 2007. – P. 3777-3783.
6. Reciprocal Collision Avoidance and Navigation for Video Games / Jamie Snape, Stephen J. Guy, Deepak Vembar, Adam Lake, Ming C. Lin // AAAI Workshop - Technical Report. – Volume WS-12-10. – 2012. – P. 49-52.
7. The Hybrid Reciprocal Velocity Obstacle / Jamie Snape, Jur van den Berg, Stephen J. Guy, and Dinesh Manocha // IEEE Transactions on Robotics. – Volume 27. – Issue 4. – 2011. – P. 696-706.
8. Robin. A star algorithm // Электронный ресурс. – 2012. – URL: <http://intelligence.worldofcomputing.net/ai-search/a-star-algorithm.html>
9. Rafia, I. A\* Algorithm for Multicore Graphics Processors / Inam Rafia // Department of Computer Science and Engineering Göteborg. – Sweden. – 2010. – P. 63.
10. Pac-Man Game // Электронный ресурс. – 2014. – URL: <https://www.archlinux.org/pacman/>
11. Bylande. A probabilistic analysis of prepositional STRIPS planning / Bylander // Artificial Intelligence. – Volume 81. – Issue 1-2. – 1996. – P. 241-271.
12. Goal-Oriented Action Planning (GOAP) // Электронный ресурс. – 2014. – URL: <http://alumni.media.mit.edu/~jorkin/goap.html>
13. Поспелов, Д. А. Нечеткие множества в моделях управления искусственного интеллекта. Д. А. Поспелов // Проблемы искусственного интеллекта. – Москва «Наука». – Главная редакция физико-математической литературы. – 1980. – 312 с.
14. Jeff Martini. Playing Risk Using the Rete Algorithm. Электронный ресурс. – 2014. – URL: <http://martiniland.net/files/playing-risk-with-rete.pdf>
15. Алимов, А. А. Искусственный интеллект в компьютерных играх. Многоуровневое планирование и реактивное поведение агентов. А. А. Алимов, О. А. Шабалина // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2011. – Т. 3. – № 10. – С. 90-94.
16. Алимов, А. А. Система игрового искусственного интеллекта. А. А. Алимов, О. А. Шабалина // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2012. – Т. 4. – № 13. – С. 166-169.
17. Adnan S. Real-time game design of Pac-man using fuzzy logic. Adnan S., Brady K., Luke R. The international Arab journal of information technology, Vol. 3, No 4. – 2006. – P. 315 – 325.

## АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ

УДК 378.147:514.18

*Е. Н. Асеева, О. А. Авдеюк*

### АЛГОРИТМИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ПОСТРОЕНИЮ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ТЕЛ С ВЫРЕЗАМИ

**Волгоградский государственный технический университет**

elenaas34@yandex.ru, oxal2@mail.ru

Разработан алгоритм построения 3D модели с вырезом. В алгоритме предусмотрены различные варианты тел и ориентации вырезов. Представлена блок-схема последовательности действий при выполнении чертежа модели. Описанный алгоритм используется в учебном процессе и позволяет значительно сократить время приобретения навыков построения твердотельных моделей геометрических тел студентами.

*Ключевые слова:* компьютерная графика, твердотельное моделирование, алгоритм построения, геометрическое тело.

*E. N. Aseyeva, O. A. Avdeyuk*

### ALGORITHMIC APPROACH TO BUILDING SOLID MODELS GEOMETRICAL BODIES WITH CUTOUTS

**Volgograd State Technical University**

The developed algorithm build a 3D model with a cut. In the algorithm offers a range of bodies and orientation notches. Shows the block diagram of the sequence of operations when drawing model. The described algorithm is used in educational process and can significantly reduce the time of acquiring skills of building solid models geometrical bodies students.

*Keywords:* computer graphics, solid modeling, design algorithm, geometric body.

При обучении студентов твердотельному моделированию перед преподавателем стоит задача не только дать навыки работы с графическими редакторами, но и выработать у них пространственное воображение, умение видеть в сложных формах составляющие их простые. Научить студентов выбирать и комбинировать различные способы построения 3D моделей – с использованием твердотельных примитивов, операций вращения, выдавливания, булевых операций и т. д.

Исходя из определения компьютерной графики как раздела информатики, который занимается проблемами получения различных изображений на компьютере [1], кажется целесообразным использовать в обучение такое базовое понятие информатики как алгоритм решения задачи.

Существует много способов построения 3D моделей. Квалифицированные специалисты, обладающие большим опытом конструкторской

работы, имеют собственные подходы к разработке твердотельных моделей, выработанные многолетней практикой. Часто этот опыт приобретается через совершение определенного количества проб и ошибок и не всегда, в итоге, приводит к наиболее рациональному решению.

Анализ литературных источников показал, что учебных пособий и методических указаний по построению моделей недостаточно, а имеющиеся не содержат оптимальных алгоритмов для создания 3D моделей деталей различной сложности. В качестве критерия оптимальности алгоритма выбирается трудоемкость алгоритма, понимаемая как количество элементарных операций, которые необходимо выполнить для решения задачи с помощью данного алгоритма.

Для реализации этой задачи нужно проанализировать основные технические формы, сгруппировать их по алгоритму построения и создать базовые решения, которые могут быть положены в основу моделирования.

Одна из первых работ по 3D моделированию выполняемых студентом в курсе «Компьютерная графика» – построение твердотельной модели геометрического тела с вырезом. В качестве геометрического тела может выступать цилиндр (рис. 1, а), призма (рис. 1, б), конус (рис. 1, в), пирамида (рис. 1, г), сфера (рис. 1, е).

В основании гранной поверхности может лежать правильный (рис. 1, б, г) или неправильный многоугольник (рис. 1, д). Тело может быть пронизано одним (рис. 1, а, б, д) или несколькими вырезами (рис. 1, в, г, е). Вырезы могут быть параллельны одной из осей или не быть сонаправленными (рис. 1, в, г, е).

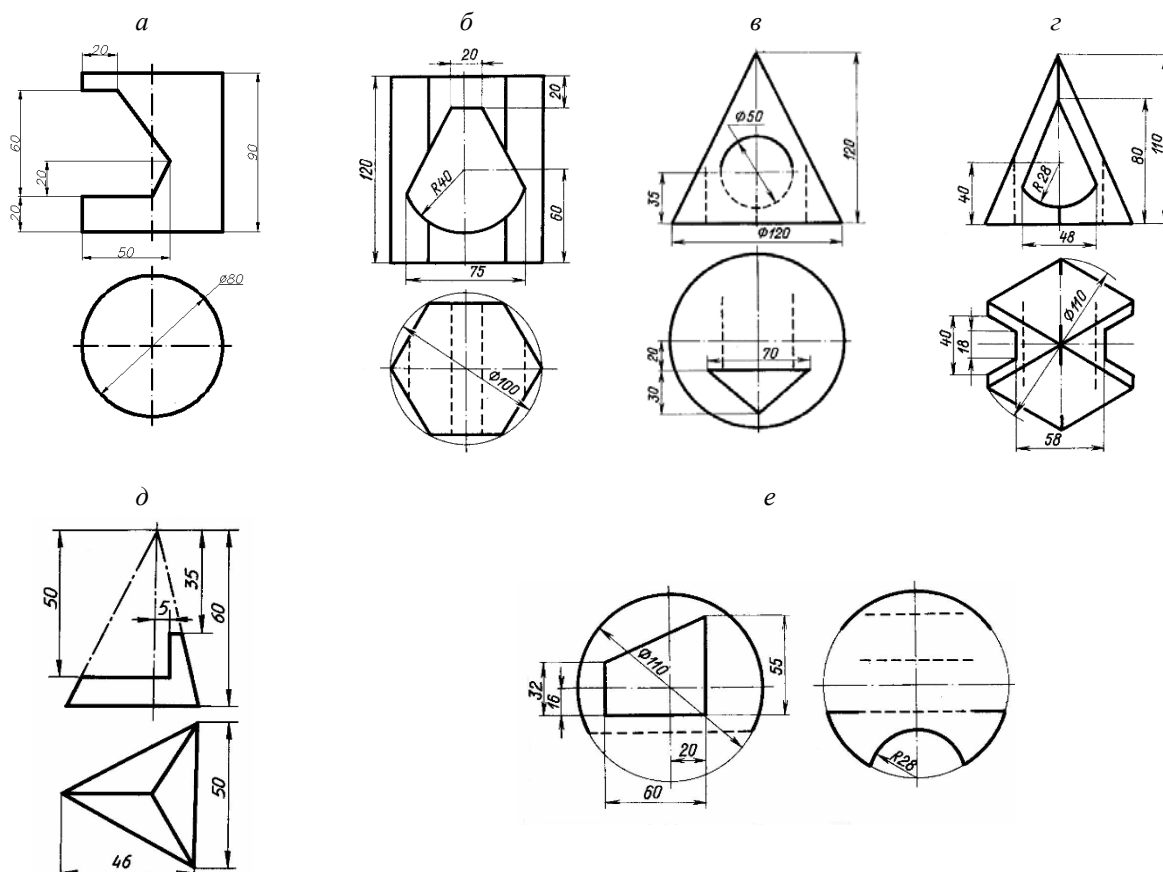


Рис. 1

Данная задача относится к проекционному черчению. Зачастую студенты даже плохо представляют себе форму модели, вследствие слабой графической подготовки, не говоря о том, чтобы выбрать построение с меньшим количеством операций.

Нами был разработан алгоритм построения 3D модели с вырезом. На рис. 2 представлена блок-схема последовательности действий при выполнении чертежа модели. На рис. 3 приведен алгоритм построения твердотельной модели геометрического тела с вырезом. В алгоритме предусмотрены различные варианты тел и ориентации вырезов.

Рассмотрим построение геометрического тела с вырезом по предлагаемому алгоритму на примере цилиндра (рис. 1, а), шаг 1-2 на блок-схеме (рис. 2).

### Шаг 2-3 – Создать рабочую среду:

- открыть AutoCAD;
- перейти в рабочее пространство 3D моделирования;
- переустановить лимиты пространства модели: координаты левого нижнего угла 0,0 и правого верхнего 100, 100 (этого пространства будет достаточно, так как габаритные размеры цилиндра – высота 90 мм, диаметр основания 80 мм);
- включить сетку;
- установить вид – ЮЗ изометрия;
- показать все поле чертежа.
- установить визуальный стиль – Реалистичный;
- создать слой с именем «Модель» и сделать его текущим.

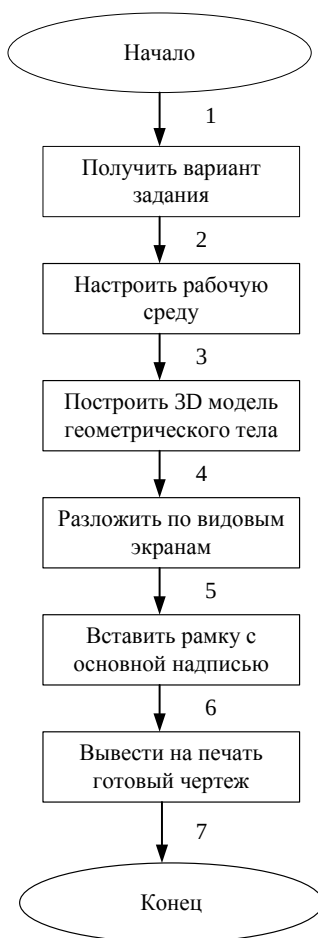


Рис. 2

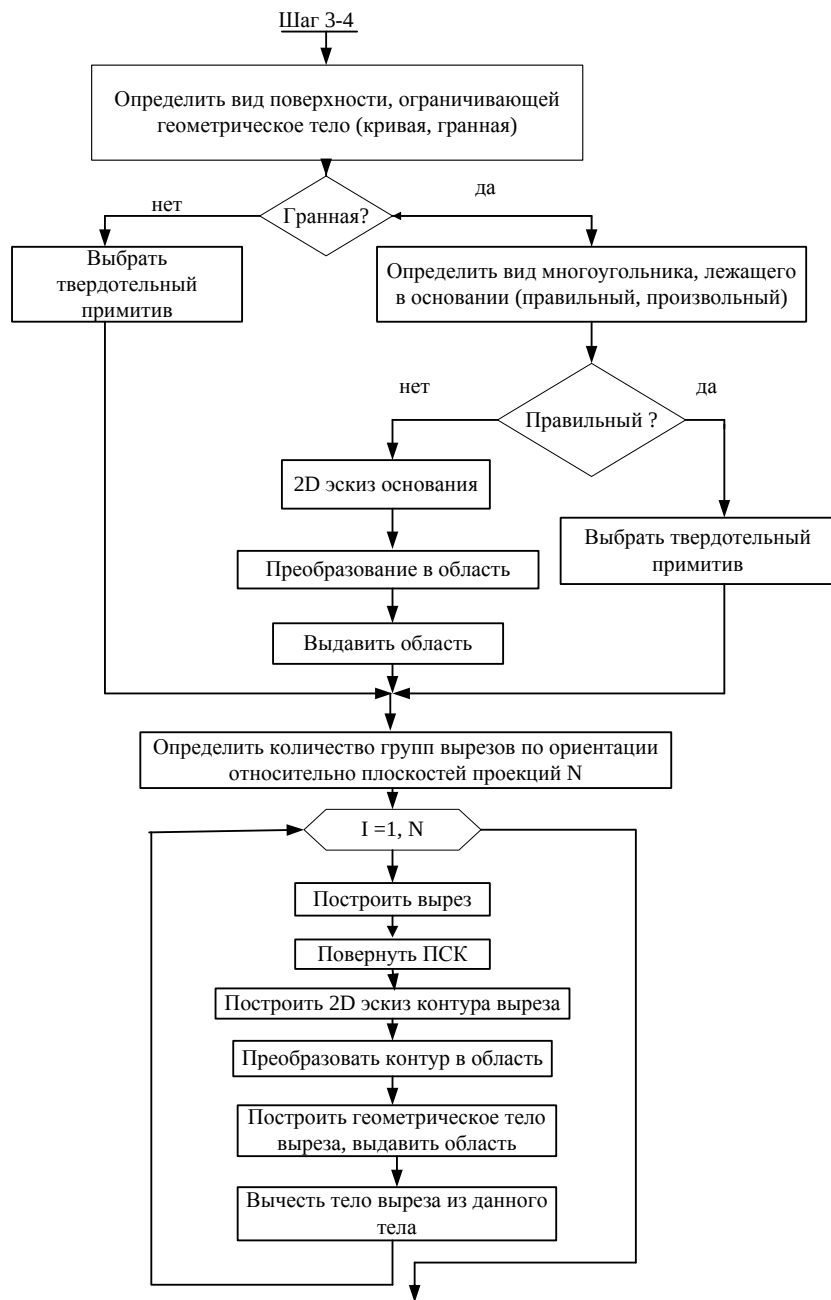


Рис. 3

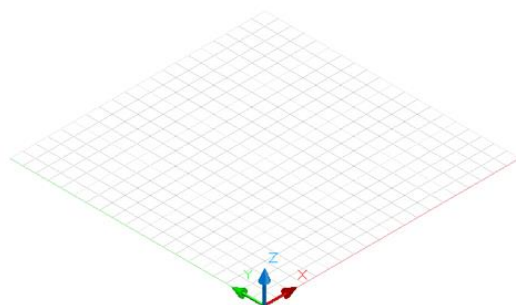


Рис. 4

На рис. 4 приведен результат наших действий на экране монитора.

**Шаг 3-4** – Построение твердотельной модели, заданного геометрического тела. Нам необходимо построить 3D модель цилиндра с одним вырезом.

– для построения используем типовое тело (твердотельный примитив) – Цилиндр, причем координаты центра основания 40, 40, задаем так, чтобы цилиндр касался осей x и y.



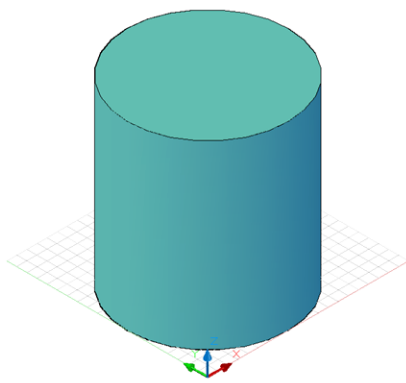


Рис. 5

– для построения выреза повернем систему координат вокруг оси  $x$  на 90 градусов (рис. 6).

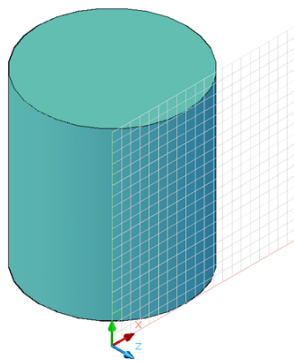


Рис. 6

– строим контур выреза. Для удобства построения используем шаговую и объектную привязки (рис. 7).

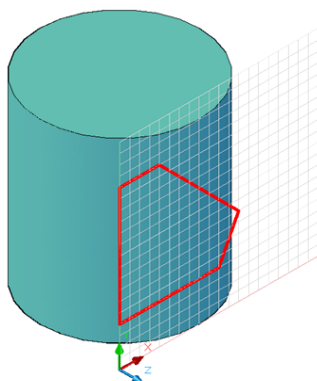


Рис. 7

– преобразуем замкнутый контур в объект-область (рис. 8).

– создадим 3D тело, выдавив созданную область на достаточную величину, так чтобы созданное тело вышло за пределы цилиндра (рис. 9).

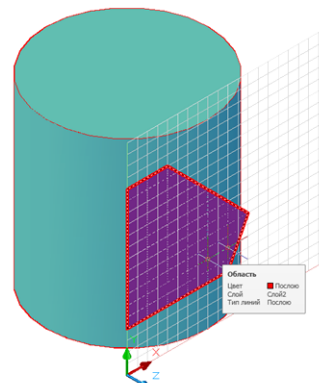


Рис. 8

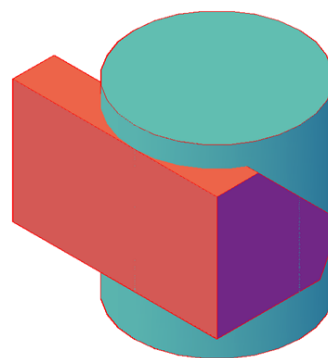


Рис. 9

– вычтем созданное тело из цилиндра, используя команду Вычитание (рис. 10).

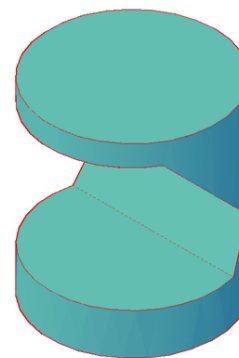


Рис. 10

Выполняем **шаги 4-7** (рис. 2).

Мы рассмотрели построение кривого тела с одним вырезом, если тело гранное, то в зависимости от того правильный или нет многоугольник лежит в основании, согласно разработанному алгоритму действий (рис. 3) мы должны или выбрать типовое тело, если правильный, в обратном случае построить многоугольник и выдавить его на заданную высоту.

Если геометрическое тело имеет несколько вырезов, идущих в разных направлениях, зада-



ча решается по тому же алгоритму, только действия повторяются в цикле (рис. 3).

Как показал опыт, при использовании алгоритма построения, время выполнения задания студентами значительно уменьшается. Их внимание не рассеивается, интерес сохраняется на протяжении всего занятия, так как они не тратят свои силы на бесконечные попытки, часто не приводящие к желаемому результату.

Алгоритмическая подача информации по построению, которая сопровождается иллюстрациями о том, что и на каком этапе происходит, не только облегчает процесс обучения, но и во многом помогает сформировать логический тип пространственного мышления.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамова, О.Ф.* Компьютерная графика : конспект лекций для студентов направлений 230100.62 "Информатика и вычислительная техника" и 231000.62 "Программная инженерия" [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Абрамова О.Ф.; ВПИ (филиал) ВолгГТУ // Учебные пособия : сб. Серия "Естественнонаучные и технические дисциплины". Вып. 3. - Волжский, 2012. - 165 с.

2. *Асеева, Е.Н.* Визуализация образов средствами компьютерного твердотельного моделирования как способ решения геометрических задач / Асеева Е.Н., Авдеюк Д.Н., Асеева С.Д. // Инновации и современные технологии в системе образования : матер. III междунар. науч.-практ. конф., 20-21 февр. 2013 г. / НИЦ «Социосфера» [и др.]. - Прага, 2013. - С. 300-301.

3. *Авдеюк, О.А.* Совершенствование форм и методов преподавания дисциплин студентам первого курса при переходе к новым стандартам образования / Авдеюк О.А., Асеева Е.Н., Крохалев А.В. // Молодой ученый. - 2012. - № 5, ч. 3. - С. 387-389.

4. *Фирсов, И.В., Чигиринский Ю.Л.* Алгоритмическое и информационное обеспечение проектирования планов механической обработки // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 16. № 8 (111). С. 113-116.

УДК 658.512.011.56:004

**Ю. Ф. Воронин, Д. В. Иванов, А. В. Матохина**

#### НАПРАВЛЕНИЯ РЕШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ПРОЕКТНЫХ ВОПРОСОВ ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ КАЧЕСТВЕННОГО ЛИТЬЯ

**Волгоградский государственный технический университет**

voronin@vstu.ru

В статье рассмотрена автоматизированная система распознавания дефектов отливок из железоуглеродистых сплавов. В основу системы положен многолетний опыт работы авторов по диагностике и устранению дефектов. Рассмотрены предпосылки разработки системы и описана ее содержание. Рассмотрены перспективные направления развития автоматизированной системы, предназначенные для обеспечения конструктора готовыми решениями по созданию условий бездефектного изготовления литых заготовок.

**Ключевые слова:** распознавание дефектов отливок, диагностика дефектов, бездефектное изготовление, интеграция с системой проектирования.

**Y. F. Voronin, D. V. Ivanov, A. V. Matokhina**

#### TOWARDS SOLVING TECHNOLOGICAL AND DESIGN QUESTION FOR QUALITY CASTINGS

**Volgograd State Technical University**

The article describes the automated recognition system defects castings of iron-carbon alloys. The basis of the system put many years of experience of the authors on the diagnosis and elimination of defects. Preconditions of development of the system and describes its contents. Perspective directions of development of an automated system designed to provide the designer ready-made solutions to create the conditions tions-defect-free manufacture of castings.

**Keywords:** casting defect detection, diagnosis of defects, defect-free manufacture, integration with the system design.

Формирование отливок из чугуна и стали происходит в закрытой форме и трудно предвидеть качество получаемого литья. Для совершенствования технологии изготовления отливок используются различные методы в производстве, начиная от подготовки и расплава металла до выбивки отливок из формы. Несмотря на значительные усилия литейщиков,

брак продолжает возникать на предприятиях в различном количестве. После получения бракованного литья начинается поиск оптимальных решений для снижения дефектности отливок. Иногда такие решения не под силу заводским технологам и процесс формирования дефектов продолжает возникать. К таким основным дефектам можно отнести:

- неметаллические включения (шлак, формовочная смесь, размыв формы в увеличенных питателях, частицы формовочной смеси в полуформах низа и верха и др.);

- газовые раковины окисленные или светлые, хорошо заметные или свищевидные, расположенные в различных местах отливки, возникших от различных факторов;

- трещины (горячие, холодные, термические, разрыв холодный) расположенные как в термических местах, так и в напряженном месте отливок;

- усадочные раковины (открытые, закрытые, газоусадочные, пористость), расположенные в термических узлах или в утолщенных стенках отливок.

В ряде случаев некоторые дефекты ликвидируются, а оставшаяся часть продолжает возникать, несмотря на усилия технологов в их ликвидации. Рассмотрим кратко причины возникновения описанных дефектов.

Часть неметаллических включений может возникнуть от неэффективной литниковой системы. На крупных заводах возможно применение литниковых систем без использования прочного зумпфа, без устройств улавливания неметаллических включений в потоке металла (трапециевидных или центробежных шлакоуловителей), с возможностью размыва потоком металла формы в местах увеличенных питателей. Кроме этого, были нарушения времени заливки металла, его температурного режима, высоты падения струи металла и т. д. Другая часть неметаллических включений, в виде частиц формовочной смеси, создается в полуформах верха и низа. В верхней полуформе частицы смеси возникают от неправильного выполнения вентиляционных наколов, вследствие чего частицы смеси в момент удаления шомпола для наколов, остаются в полости формы. Продувка верхней полуформы струей воздуха не всегда заканчивается полным удалением частиц смеси. Для полного удаления смеси необходимо использовать систему с фронтальным потоком сжатого воздуха по ширине формы. В нижней полуформе частицы смеси могут возникать от неточной установки стержня в знак формы [1].

Окисленные газовые раковины возникают вследствие отсутствия вентиляционной системы в форме и стержне. Работа с их ликвидацией не сложна. Ликвидация светлых газовых раковин несколько сложнее, поскольку они могут

возникать как от влажных формовочной смеси или стержней, так и от присутствия в форме карбамидных связующих. Для ликвидации таких дефектов необходимо изучить этапы формирования раковин при заливке металла в форму [2,3]. Наиболее сложными в ликвидации являются свищевидные окисленные и светлые газовые раковины. Такие дефекты встречаются редко и встретить литературу о их ликвидации трудно. Тем не менее, сведения о возникновении и ликвидации таких дефектов имеются [4].

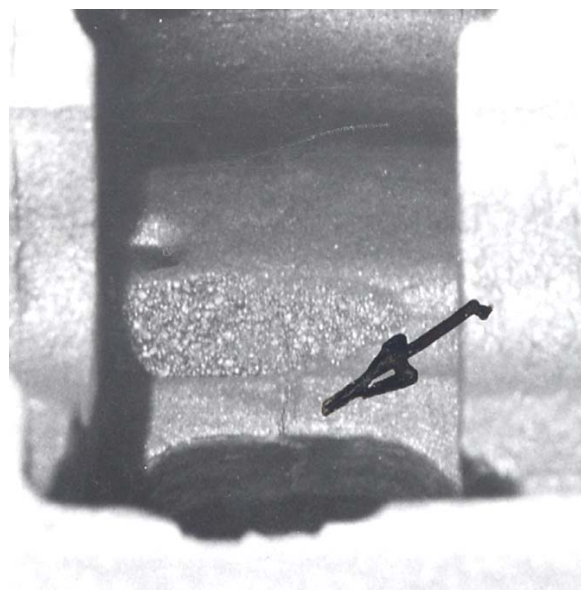


Рис. 1. Фрагмент отливки «Блок цилиндров» с холодной трещиной



Рис. 2. Фрагмент отливки «Корпус 232» с трещинами

Трещины возникают на ряде отливок и иногда вводят литейщиков в затруднения. Приведем пример. На рис. 1 и 2 представлены 2 фрагмента отливок с трещинами в утолщенной части изделия. Обе трещины возникли от напряженного состояния отливки в процессе затвер-

девания. Трещина на первом рисунке ликвидирована введением ряда элементов для повышения пластичности чугуна. Второй дефект возник от интенсивного охлаждения поверхности реза прибыли на отливке. Ликвидация рассмотренных дефектов не простое и литейщики встречают затруднения с их реализацией.

Усадочные дефекты иногда вводят литейщиков в затруднения по ряду причин, в результате которых образуется течь отливок, пористость, поверхностное невыполнение конфигурации и т. д. На рис. 3 приведены отливки «Задвижка Ду300» с пористостью, обнаруженной при гидроиспытании. Предприятие долго решало вопрос по ликвидации течи отливок. Решение оказалось простым и состояло в отсутствии вентиляционных систем в стержне и форме. Газ из формы и стержня проникал в пористость отливки, где иногда возникали сквозные отверстия. В результате при гидроиспытаниях часть отливок уходило в брак [5].



Рис. 3. Отливки «Задвижка Ду300» с течью

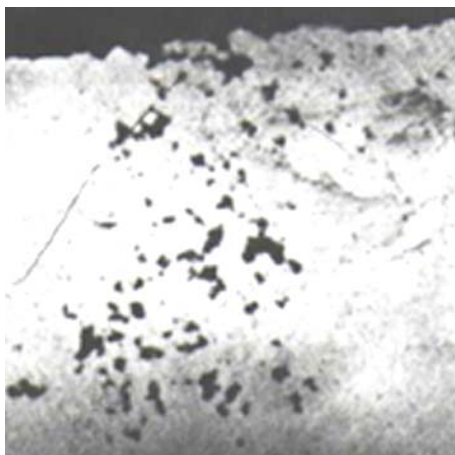


Рис. 4. Фрагмент отливки «Гильза цилиндров» с пористостью

На рис. 4 приведен фрагмент отливки «Гильза цилиндров» с пористостью в месте подвода

металла, что ставило заводских работников в затруднение при его ликвидации. Решение вопроса оказалось простым. Металл подводился в отливку через 2 питателя увеличенных размеров, что способствовало разогреву места подвода с образованием в ней пористости. После увеличения числа питателей до 3 с уменьшением площади их сечения, возникновение пористости не происходило.

Рассмотренная незначительная часть затруднений специалистов по снижению дефектов отливок, вызывает острую необходимость в ликвидации данной проблемы. Эта проблема может решаться в двух направлениях. К первому направлению, которое относится к действующему производству отливок, требуется разработка системы распознавания дефектов отливок и получения информации по их ликвидации. Второе направление заключается в обеспечении конструкторов-литейщиков информацией по созданию правильного решения условий получения отливок высокого качества в процессе выполнения проектных работ. Первое направление по разработке автоматизированной системы нами создано, но требуется практическая проверка ее на литейных заводах. Информация об этой системе разослана и будет опубликована в ряде ведущих журналов по литейному производству [6], где представлено использование автоматизированной системы по трем, выбранным из общего количества, труднораспознаваемым дефектам отливок:

- светлые свищевидные газовые раковины на отливке (ОАО «НЭВЗ»);
- горячие трещины на отливках трубопроводной арматуры (БАЗ, ООО «ЭСТОН»);
- окисленные свищевидные газовые раковины на отливке «Рабочий орган» (ОАО «АЛНАС»)

Ниже приведен первый экран автоматизированной системы.

Второе направление по оказанию помощи при разработке проекта изготовления отливок, состоит в обеспечении конструктора готовыми решениями по созданию условий бездефектного изготовления литых заготовок. Как отмечалось выше, проблемные вопросы производства качественных отливок состоят в отсутствие готовых предложений для решения ряда технологических приемов. В связи с этим, для создания условий повышения качества отливок, необходимо оказать помощь конструкторам при разработке технологии изготовления отливок в следующем направлении [7].





Рис. 5. Первый экран автоматизированной системы для быстрого распознавания дефекта отливки и получения информации по его ликвидации

1. Создать и использовать компьютерную программу для расчета литниковой системы с выдачей готовых чертежей элементов системы с требуемыми размерами для конкретной отливки. Литниковая система должна содержать требуемые элементы для полной задержки неметаллических включений и предупреждения размыва.

2. Предложить для использования схемы различных вентиляционных систем для удаления образующегося газа из стержней и формы в атмосферу. Схемы должны содержать описание процесса предупреждения возникновения газовых раковин. Кроме этого, использовать технологическую информацию по нейтрализации газовых раковин различных видов из представленной выше автоматизированной системы.

3. Рассмотреть по предложенным схемам условия образования четырех разновидностей трещин с анализом возможного предупреждения их возникновения на рассматриваемой отливке. Использовать фотографии реальных трещин для визуального сравнения их с местом возможного возникновения дефектов на разрабатываемой отливке. Применить технологическую информацию из представленной выше автоматизированной системы, по предупреждению возникновения разновидностей трещин.

4. Обратит внимание на возможность возникновения 3-х разновидностей усадочных ра-

ковин и пористости в термических узлах и утолщенных стенках отливки. Необходимо провести анализ различных соединений стенок отливки, термических узлов и стенок с увеличенной толщиной для принятия решения о конструктивном уточнении узлов отливок для предупреждения возникновения дефектов. Использовать различную предложенную информацию по предупреждению возникновения дефектов.

5. В этом разделе предусматривается предупреждение возникновения дефектов, которые возникают редко, и ликвидация их зависит от качества выполняемых работ при изготовлении и сборки форм.

Рассмотренное предложение по предупреждению возникновения дефектов отливок на стадии разработки техпроекта заинтересовало представителей компании «Топ Системы», которые готовы использовать разрабатываемую систему в своих проектах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронин, Ю. Ф. Система определения и ликвидации неметаллических включений в отливках из чугуна и стали: учеб. пособ. (гриф). Доп. УМО по образованию в области металлургии // ВолгГТУ. - Волгоград: 2014. - 178 с.
2. Воронин, Ю. Ф. Система определения и ликвидации окисленных газовых раковин в отливках из чугуна и стали: учеб. пособ. (гриф). Доп. УМО по образованию в области металлургии // ВолгГТУ. - Волгоград: 2012. - 157 с.
3. Воронин, Ю. Ф. Система определения и ликвидации светлых газовых раковин в отливках из чугуна и ста-

ли : учеб. пособ. (гриф). Доп. УМО по образованию в области металлургии // ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - 152 с.

4. Воронин, Ю. Ф. Выявление и ликвидация газовых раковин и трещин. Черные сплавы. // монография. – ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - 164 с.

5. Системное выявление условий возникновения и ликвидации течи отливки / Ю.Ф. Воронин, С.Ю. Воронин, А.Ю. Лукьяненко, В.Ю. Сухоносова // Литейщик России. - 2010. - № 2. - С. 10-13.

6. Воронин, Ю. Ф. Система быстрого выявления причин возникновения и ликвидации дефектов отливок / Воронин Ю.Ф., Матюхина А.В., Сикорский Е.О. // Литейное производство. - 2014. - № 9. - С. 24-27.

7. Применение семантической сети для анализа процесса возникновения и ликвидации литейных дефектов/ Лукьяненко А.Ю., Воронин Ю.Ф., Матюхина А.В.// Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2013. - Т. 17. № 14 (117). - С. 46-51.

УДК 66.045.123

*А. Б. Голованчиков<sup>1</sup>, С. Б. Воронцова<sup>1</sup>, Б. А. Дулькин<sup>2</sup>*

# **ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРЫ ПОТОКОВ И ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ДВУХТРУБНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА**

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет

<sup>2</sup>Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»

pahp@vstu.ru

Рассмотрено влияние структуры потоков и термического сопротивления на технологические параметры двухтрубного теплообменника. Составлены физическая и математическая модели двухтрубного теплообменника, работающего в режиме идеального смешения и идеального вытеснения, и проведено сравнение технологических и геометрических параметров.

*Ключевые слова:* структура потоков, термическое сопротивление, двухтрубный теплообменник, идеальное смешение, идеальное вытеснение.

*A. B. Golovanchikov<sup>1</sup>, S. B. Vorotneva<sup>1</sup>, B. A. Dulkin<sup>2</sup>*

# **EFFECT OF FLOW STRUCTURE AND THE HEAT-TRANSFER RESISTANCE TO TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF DOUBLE-PIPE ENCLOSED HEAT EXCHANGER**

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University

<sup>2</sup>National Research University Moscow Power Engineering Institute

The paper considers effect of the flow structure and the heat-transfer resistance to technological parameters of double-pipe enclosed heat exchanger. The physical and mathematical models of double-pipe enclosed heat exchanger operating in the regime of perfect mixing and plug flow were compiled, and the technological and geometrical parameters were compared.

*Keywords:* flow structure, heat-transfer resistance, double-pipe enclosed heat exchanger, perfect mixing, plug flow.

Рассмотрим влияние структуры потоков и термического сопротивления внутренней трубы на основные технологические параметры теплообменника типа «труба в трубе», когда по внутренней трубе движется нагреваемая жид-

кость – мазут, а в межтрубном пространстве конденсируется насыщенный водяной пар [1–5]. Исходные и справочные данные обоих теплоносителей, необходимые для расчетов, приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Исходные и справочные данные для расчета теплообменника «труба в трубе»**

| №                 | Наименование параметра                                                  | Размерность | Обозначение    | Величина |
|-------------------|-------------------------------------------------------------------------|-------------|----------------|----------|
| 1                 | 2                                                                       | 3           | 4              | 5        |
| Исходные данные   |                                                                         |             |                |          |
| 1.                | Производительность по нагреваемой жидкости – мазуту                     | кг/час      | G              | 3000     |
| 2.                | Начальная температура нагреваемой жидкости – мазута во внутренней трубе | °C          | t <sub>н</sub> | 20       |
| 3.                | Конечная температура нагреваемой жидкости                               | °C          | t <sub>к</sub> | 110      |
| Справочные данные |                                                                         |             |                |          |
| 4.                | Температура насыщенного греющего пара                                   | °C          | t <sub>d</sub> | 132,9    |

Окончание табл. 1

| 1                    | 2                                                                                      | 3                                            | 4           | 5                   |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|-------------|---------------------|
| 5.                   | Давление греющего пара                                                                 | $at$                                         | $P_d$       | 3                   |
| 6.                   | Удельная теплота конденсации                                                           | $кДж/кг$                                     | $r_d$       | 2280                |
| 7.                   | Плотность конденсата                                                                   | $кг/м^3$                                     | $\rho_d$    | 920                 |
| 8.                   | Теплопроводность конденсата                                                            | $Вт/(м \cdot K)$                             | $\lambda_d$ | 0,63                |
| 9.                   | Теплоемкость нагреваемой жидкости                                                      | $Дж/(кг \cdot K)$                            | $C_p$       | 2100                |
| 10.                  | Плотность нагреваемой жидкости при средней температуре                                 | $кг/м^3$                                     | $\rho$      | 870                 |
| 11.                  | Коэффициент объемного расширения нагреваемой жидкости                                  | $K^{-1}$                                     | $\beta$     | 0,006               |
| 12.                  | Теплопроводность нагреваемой жидкости                                                  | $Вт/(м \cdot K)$                             | $\lambda$   | 0,684               |
| 13.                  | Динамическая вязкость нагреваемой жидкости при 0 °С                                    | $Па \cdot с$                                 | $\mu_0$     | $2,2 \cdot 10^{-2}$ |
| 14.                  | Коэффициент вязкости нагреваемой жидкости                                              | $K^{-1}$                                     | $a$         | 0,022               |
| 15.                  | Внутренний диаметр внутренней трубы                                                    | $м$                                          | $D_e$       | 0,067               |
| 16.                  | Толщина стенки внутренней трубы                                                        | $м$                                          | $\delta$    | 0,004               |
| 17.                  | Теплопроводность стальной стенки                                                       | $Вт/(м \cdot K)$                             | $\lambda_w$ | 46,2                |
| Варьируемый параметр |                                                                                        |                                              |             |                     |
| 18.                  | Общее термическое сопротивление внутренней трубы с наружной и внутренней поверхностями | $\left( \frac{Bm}{м^2 \cdot K} \right)^{-1}$ | $r_s$       | 0÷0,004             |

Составим физическую и математическую модель рассматриваемого двухтрубного теплообменника, когда нагреваемая жидкость движется в режиме идеального вытеснения. Обозначим на элементе длины  $d\ell$  между сечениями I и II тепловые потоки (рис. 1).

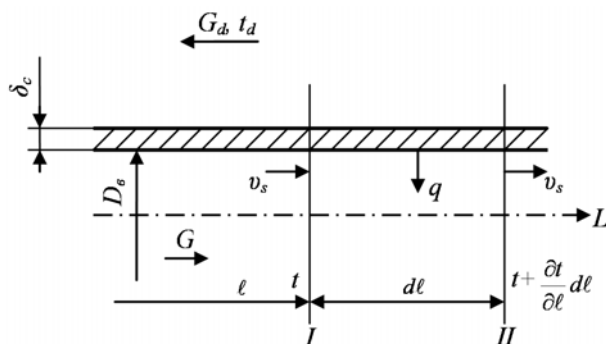


Рис. 1. Схема тепловых потоков на элементе длины  $d\ell$  внутренней трубы

Тогда элементарный тепловой баланс для выделенного элемента трубы  $d\ell$  будет иметь вид

$$Gc_p t + K_i \pi (D_e + \delta_c) d\ell (t_d - t) = Gc_p \left( t + \frac{dt}{d\ell} d\ell \right). \quad (1)$$

Пронормируем длину  $x = \ell/L$ . Тогда после алгебраических преобразований дифференциальное уравнение (1) примет вид

$$\frac{dt}{dx} = \frac{K_i \pi (D_e + \delta_c)}{c_p G} (t_d - t) \quad (2)$$

с граничным условием

$$x = 0, \quad t = t_n. \quad (3)$$

Уравнение (2) при интегрировании по параметру  $t$  с учетом граничного условия (3) приводит к расчетной зависимости температуры от безразмерной координаты длины  $x$

$$t = t_d - (t_d - t_n) \exp \left[ - \frac{K_i \pi L (D_e + \delta_c) x}{Gc_p} \right], \quad (4)$$

график которой представлен на рис. 2.

При  $x=1$  уравнение (4) принимает вид известного уравнения теплопередачи [7]

$$Gc_p (t_k - t_n) = K_i \pi (D + \delta_c) L \left[ \frac{(t_k - t_n)}{\ln \left( \frac{t_d - t_k}{t_d - t_n} \right)} \right].$$

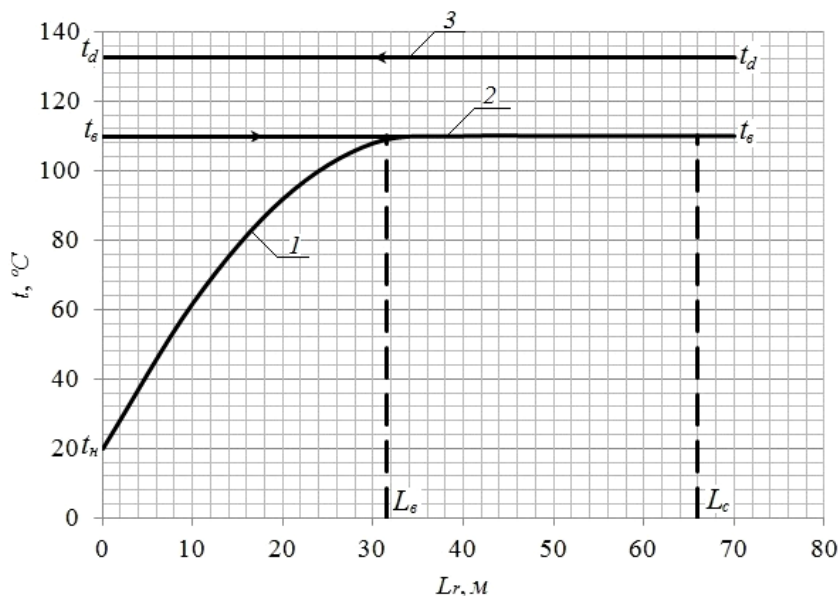


Рис. 2. Зависимость температуры нагреваемой жидкости от длины внутренней

трубы при среднем термическом сопротивлении  $r_s = 0,0004 \left( \frac{Bm}{m^2 \cdot K} \right)^{-1}$ :

1 – идеальное вытеснение, длина трубы  $L_s = 31,5$  м; 2 – идеальное смешение, длина трубы  $L_c = 65,9$  м; 3 – конденсирующий насыщенный пар

Алгоритм расчета двухтрубного теплообменника со структурой потоков идеального вытеснения хорошо известен. В данном случае в отличие от кожухотрубного теплообменника для горизонтального двухтрубного теплообменника с числом Рейнольдса для нагреваемой внутри трубы жидкости  $Re > 3500$  [6, 7]:

$$Nu = 0,022 Re^{0,8} Pr^{0,4} \left( \frac{Pr}{Pr_{cm}} \right)^{0,14},$$

а для конденсирующегося пара формула для удельной тепловой мощности

$$q_d = 7,16 \cdot \left[ \lambda d^3 \rho_d^2 r_d / \mu_d \cdot (d_s + 2\delta) \right]^{0,25} (t_d - x)^{0,75}.$$

Алгоритм расчета двухтрубного теплообменника со структурой потока идеального смешения практически полностью повторяет алгоритм расчета такого теплообменника идеального вытеснения. Отличие связано с тем, что на входе температура  $t_s$  скачком изменяется от  $t_n$  до  $t_k$  и остается постоянной на всей длине (рис. 2, линия 2 – входной ступенчатый сигнал), поэтому средняя движущая сила  $\Delta t$  и средняя температура  $t_s$  остается постоянной на всей длине теплообменника [8, 9].

На рис. 3 приведены графики изменения средних температур теплоносителей поперек стенки трубы для обеих структур потоков при

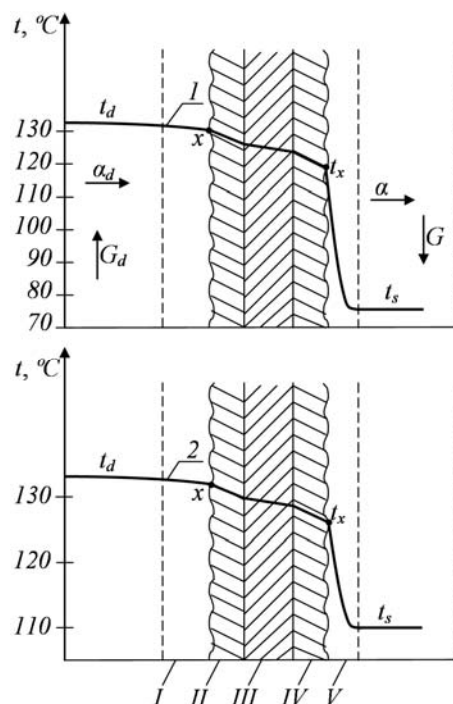


Рис. 3. Распределение температуры теплоносителей поперек стенки внутренней трубы при среднем термическом сопротив-

лении стенки  $r_s = 0,0004 \left( \frac{Bm}{m^2 \cdot K} \right)^{-1}$  [6, 7]:

1 – для режима идеального вытеснения; 2 – для режима идеального смешения; I – тепловой пограничный слой для конденсирующегося пара; II – накипь, ржавчина на внешней поверхности трубы со стороны конденсирующегося пара; III – стенка трубы; IV – накипь, ржавчина, продукты деструкции и другие отложения на внутренней поверхности трубы со стороны нагреваемой жидкости; V – тепловой пограничный слой со стороны нагреваемой жидкости

среднем рекомендуемом для расчетов термическом сопротивлении  $r_s = 0,0004 \left( \frac{Bm}{m^2 \cdot K} \right)^{-1}$  [6].

Как видно из рис. 2 и 3, структура потоков нагреваемой жидкости оказывает существенное влияние на технологические параметры и геометрические размеры двухтрубного теплообменника: прежде всего, необходимая длина и соответственно поверхность теплопередачи с переходом от идеального вытеснения к идеальному смешению увеличивается более, чем в 2 раза, что связано с резким уменьшением средней движущей силы с 56,4 K до 22,9 K.

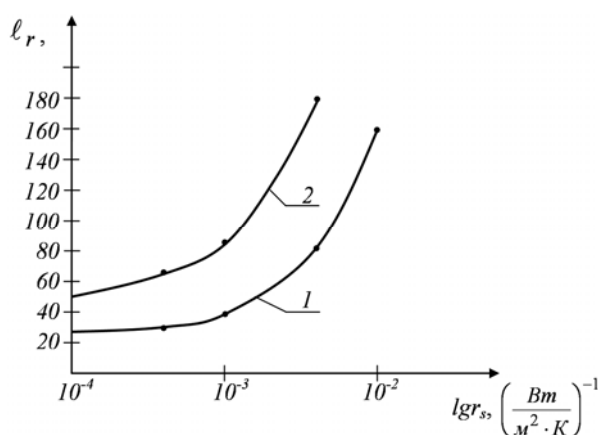


Рис. 4. Зависимости длины двухтрубного теплообменника от термического сопротивления:

1 – режим идеального вытеснения для внутренней трубы;  
2 – режим идеального смешения для внутренней трубы

Помимо структуры потоков большое влияние на длину и поверхность теплопередачи ока-

зывает термическое сопротивление. На рис. 4 приведены зависимости расчетной длины внутренней трубы от термического сопротивления для обеих анализируемых идеальных структур потоков.

Как видно из графиков этого рисунка для «чистой» трубы в начале эксплуатации или после очистки, когда термическое сопротивление загрязнений отсутствует, и потери температурного напора определяются теплопроводностью и толщиной стальной стенки трубы ( $r_s \approx 10^{-4} Bm/(m \cdot K)$ ) расчетная длина теплообменника должна быть 25,8 м для идеального вытеснения и 52,6 м для идеального смешения. При термическом сопротивлении накипи, ржавчины, солевого камня, продуктов термической деструкции на обеих теплопередающих поверхностях внутренней трубы длина теплообменника в 10 раз больше номинальной, то есть рекомендуемой при расчетах. Когда  $r_s = 0,004 \left( \frac{Bm}{m^2 \cdot K} \right)^{-1}$  длина теплообменной трубы должна составлять 79,6 м для идеального вытеснения и 181,2 м для идеального смешения, что более чем в 2,5 раза превышает номинальную расчетную длину для термического сопротивления  $r_s = 0,0004 \left( \frac{Bm}{m^2 \cdot K} \right)^{-1}$ .

В табл. 2 приведены сводные результаты расчетов двухтрубного теплообменника в зависимости от структуры потоков и термического сопротивления отложений.

Таблица 2

**Основные расчетные параметры двухтрубного теплообменника для структуры потоков идеального вытеснения и смешения по нагреваемой жидкости и различного термического сопротивления отложений**

| № | Наименование параметра                            | Размерность | Обозначение | Идеальное вытеснение | Идеальное смешение   |
|---|---------------------------------------------------|-------------|-------------|----------------------|----------------------|
| 1 | Расход греющего пара                              | кг/час      | $G_d$       | 256,2                | 256,2                |
| 2 | Температура нагреваемой жидкости на входе в трубу | °C          | $t_e$       | 20                   | 110                  |
| 3 | Средняя движущая сила теплопередачи               | °C          | $\Delta t$  | 56,4                 | 22,9                 |
| 4 | Средняя температура нагреваемой жидкости          | °C          | $t_s$       | 76,5                 | 110                  |
| 5 | Средняя вязкость нагреваемой жидкости             | Па·с        | $\mu$       | $4,09 \cdot 10^{-3}$ | $1,96 \cdot 10^{-3}$ |
| 6 | Средняя скорость нагреваемой жидкости             | м/с         | $v_s$       | 0,272                | 0,272                |
| 7 | Число Рейнольдса для нагреваемой жидкости         | —           | Re          | 3874,7               | 8099,2               |
| 8 | Число Прандтля для нагреваемой жидкости           | —           | Pr          | 12,55                | 6                    |



Окончание табл. 2

| №  | Наименование параметра                                               | Размерность                                | Обозначение  | Идеальное вытеснение |        |        |        | Идеальное смешение |        |        |        |
|----|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------|----------------------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|
| 9  | Термическое сопротивление                                            | $\left(\frac{Bm}{m^2 \cdot K}\right)^{-1}$ | $r_s$        | 0                    | 0,0004 | 0,001  | 0,004  | 0                  | 0,0004 | 0,001  | 0,004  |
| 10 | Число Нуссельта для нагревания жидкости                              | —                                          | $Nu$         | 52,8                 | 51,4   | 50,2   | 47,6   | 64,4               | 63,6   | 62,9   | 61,5   |
| 11 | Коэффициент теплоотдачи к нагреваемой жидкости                       | $\frac{Bm}{m^2 \cdot K}$                   | $\alpha$     | 538,9                | 525,1  | 511,9  | 486,1  | 657,3              | 649,3  | 641,7  | 628,3  |
| 12 | Коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара                    | $\frac{Bm}{m^2 \cdot K}$                   | $\alpha_d$   | 17087                | 18261  | 19251  | 24928  | 21684              | 23404  | 25458  | 32762  |
| 13 | Коэффициент теплопередачи                                            | $\frac{Bm}{m^2 \cdot K}$                   | $K_t$        | 500,2                | 409,3  | 323,5  | 161,9  | 604,1              | 482,2  | 372,6  | 175,3  |
| 14 | Удельная тепловая мощность                                           | $\frac{Bm}{m^2}$                           | $q$          | 28261                | 23091  | 18251  | 9135   | 13834              | 11042  | 8533   | 4015   |
| 15 | Температура на поверхности отложений со стороны пара                 | °C                                         | $x$          | 131,24               | 131,63 | 131,98 | 132,54 | 132,26             | 132,4  | 132,56 | 132,78 |
| 16 | Температура на поверхности отложений со стороны нагреваемой жидкости | °C                                         | $t_x$        | 128,8                | 120,37 | 112,16 | 95,36  | 131,07             | 127,1  | 123,28 | 116,4  |
| 17 | Суммарная движущая сила теплопроводностей стенки и отложений на ней  | °C                                         | $\Delta t_t$ | 2,44                 | 11,26  | 19,8   | 37,18  | 1,2                | 5,35   | 9,28   | 16,37  |
| 18 | Расчетная поверхность теплопередачи                                  | $m^2$                                      | $F_r$        | 5,75                 | 7,02   | 8,89   | 17,76  | 11,73              | 14,69  | 19,01  | 40,4   |
| 19 | Среднее время пребывания нагреваемой жидкости в трубе                | $c$                                        | $\tau_c$     | 94,9                 | 115,9  | 146,7  | 293    | 193,5              | 242,5  | 313,7  | 666,8  |
| 20 | Расчетная длина внутренней трубы                                     | $m$                                        | $L_r$        | 25,8                 | 31,5   | 39,9   | 79,6   | 52,6               | 65,9   | 85,3   | 181,2  |

Таким образом, структура потоков нагреваемой жидкости (как и термическое сопротивление отложений на обеих теплопередающих поверхностях внутренней трубы) оказывает существенное влияние на расчетные технологические и геометрические параметры двухтрубного теплообменника. Однако, если на своевременное удаление термических загрязнений с обеих теплопередающих поверхностей всегда обращается серьезное внимание [10–12], то на влияние структуры потоков нагреваемой жидкости и прежде всего на ее отличие от идеального вытеснения внимание практически не обращается, хотя и структура потоков нагреваемой жидкости, и термическое сопротивление вносят одинаково существенный вклад на технологические и геометрические параметры работы и проектирование двухтрубного теплообменника.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Левеншиль О. Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншиль. – М.: Химия, 1969.
2. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – М.: Химия, 1985.
3. Закгейм, А. Ю. Введение в моделирование химико-технологических процессов / А. Ю. Закгейм. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Химия, 1982.
4. Тябин, Н. В. Методы кибернетики в реологии и химической технологии: учебное пособие / Н. В. Тябин, А. Б. Голованчиков. – Волгоград: Волгоградский политехнический институт, 1983.
5. Голованчиков, А. Б. Моделирование гидромеханических и тепломассообменных процессов в аппаратах и реакторах : монография / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристов; ВолгГТУ. – Волгоград, 2013.
6. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. чл.-кор. АН России П. Г. Романкова. – 12-е изд. стереотипное. – М.: Альянс, 2005. – 576 с.
7. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии: учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонов; ВолгГТУ. – Волгоград, 1994. – Ч.1.

8. Голованчиков, А. Б. Моделирование процессов усреднения концентраций в аппаратах с комбинированной структурой потоков / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, В. В. Миняйло // Известия ВолгГТУ. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». Вып. 14 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – № 10 (97). – С. 19-22.

9. Голованчиков, А. Б. Интенсификация теплообмена в кожухотрубном реакторе / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова // Изв. ВолгГТУ. Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии». Вып. 4 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – № 1. – С. 76-77.

10. П. м. 104099 Российская Федерация, МПК В 08 В 9/023. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А.Б. Голованчиков, Л.С. Рева, Н.А. Дулькина, С.Б. Воротнева, С.Л. Рева, П.С. Васильев; заявитель и патентооб-

ладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2010144723/05; заявл. 01.11.10; опубл. 10.05.11.

11. П. м. 109675 Российская Федерация, МПК В 08 В 9/00. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А.Б. Голованчиков, С.Б. Воротнева, Н.А. Дулькина, В.А. Панов, Л.С. Рева, С.Л. Рева; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2011124488/05; заявл. 16.06.11; опубл. 27.10.11.

12. П. м. 114889 Российская Федерация, МПК В 08 В 9/00. Устройство для очистки наружной поверхности труб / А. Б. Голованчиков, Л. С. Рева, Н. А. Дулькина, С. Б. Воротнева, С. Л. Рева, П. С. Васильев; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – № 2011146514/05; заявл. 16.11.11; опубл. 20.04.12.

УДК 621.83

*А. А. Гончаров, Ан. А. Гончаров, Я. В. Калинин*

### **ВЛИЯНИЕ НАЧАЛЬНЫХ РАДИАЛЬНЫХ ЗАЗОРОВ В ПОДШИПНИКОВОМ УЗЛЕ НА НАГРУЗОЧНУЮ СПОСОБНОСТЬ КЛИНОВОГО МЕХАНИЗМА СВОБОДНОГО ХОДА**

**Волгоградский государственный технический университет**

dtm@vstu.ru

В статье приводятся результаты моделирования напряженно-деформированного состояния клинового механизма свободного хода при наличии начального радиального зазора в подшипниковом узле. Исследовано влияние величины зазора на нагрузочную способность механизма.

*Ключевые слова:* механизм свободного хода, подшипник скольжения, контактная прочность, радиальный зазор, нормальное давление, максимальное касательное напряжение.

*A. A. Goncharov, An. A. Goncharov, Y. V. Kalinin*

### **INFLUENCE OF INITIAL RADIAL CLEARANCE IN THE BEARING UNIT ON THE LOAD CAPABILITY OF WEDGE FREE-WHEEL MECHANISM**

**Volgograd State Technical University**

This paper presents the results of stress-strain analysis of wedge free-wheel mechanism with initial radial clearance in the bearing unit. The influence of clearance value on the load capability of free-wheel mechanism was investigated.

*Keywords:* freewheel mechanism, plain bearing, contact strength, radial clearance, normal pressure, maximum shear stress.

Функционирование клиновых механизмов свободного хода (МСХ) с дополнительной кинематической связью [1] полностью зависит от работоспособности триботехнической системы. По условиям сборки в зонах контакта ее элементов имеются зазоры, величина и распределение которых зависит от точности изготовления. Случайный характер распределения зазоров существенно усложняет математическую формулировку и возможности получения решения численными методами контактной задачи, позволяющей исследовать процессы силового взаимодействия элементов МСХ. Неизвестными в этом случае являются не только распределения контактных характеристик, но и границы областей контакта тел. Модифициро-

ванная плоская статическая гранично-элементная модель [2] позволяет учитывать наличие начального радиального зазора в наиболее нагруженном подшипниковом узле механизма. Изучение напряженно-деформированного состояния (НДС) с учетом зазоров между элементами указанного узла представляет значительный практический интерес для оценки контактной прочности и угловой жесткости конструкции.

В данной статье исследовано влияние геометрических параметров элементов подшипникового узла на нагрузочную способность МСХ. Решения контактной задачи были получены с помощью разработанной вычислительной системы "ВЕА", основные процедуры контактного алгоритма которой приведены в работе [3].

Рассмотрим контактное взаимодействие элементов самотормозящегося МСХ в стоповом режиме нагружения при отсутствии поджимающего клин устройства. Конструктивные элементы клинового МСХ и их геометрические параметры показаны на рис. 1. Конфигурацию звеньев определяют эксцентриситет  $e$ , радиус вала  $r_o$ , внутренний радиус подшипника  $r_i$ , толщина подшипника  $h$ , а также радиусы обойм (клина) соответственно  $r$ ,  $R$ ,  $R_1$  и углы радиальных срезов клина  $\varphi_1$ ,  $\varphi_2$ . Согласно принятым допущениям [2], вал-эксцентрик является жестким телом, и во всех областях контакта (кроме подшипника) реализуется идеальное сопряжение элементов. Упругие свойства тел задают значения материальных констант - модуля Юнга ( $E$ ) и коэффициента Пуассона ( $\nu$ ), в областях контакта клина с обоймами реализуются постоянные коэффициенты  $f_{AC}$ ,  $f_{BD}$ , значения которых соответствуют условиям граничного трения.

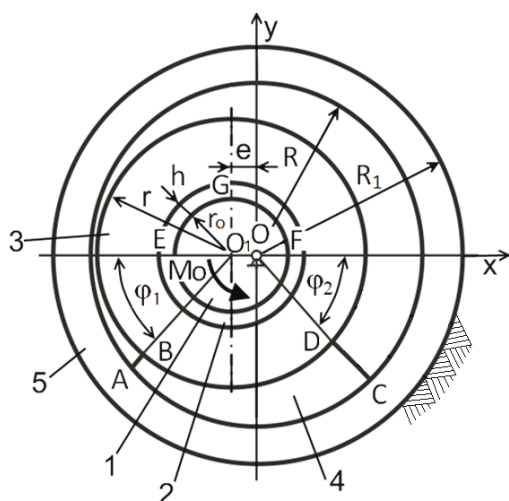


Рис. 1. Расчетная схема триботехнической системы клинового МСХ:

1 – ведущий вал-эксцентрик, 2 – подшипник скольжения, 3 – ведущая обойма, 4 – клин, 5 – ведомая обойма

В стоповом режиме внешняя нагрузка создается приложенным к ведущему валу-эксцентрику крутящим моментом  $M_o$ . При закреплении ведомой обоймы самотормозящийся механизм находится в состоянии статического равновесия. Под действием момента  $M_o$  происходит кинематический поворот вала-эксцентрика относительно центра  $O$  на угол  $\epsilon = \epsilon_0 + \epsilon_1$ , где  $\epsilon_0$  - угол поворота для выборки начального зазора,  $\epsilon_1$  - угол деформации [2]. При этом внутренняя поверхность вкладыша подшипника разбивается на две области - контактную

( $EF$ ) и свободную от нагрузки ( $EGF$ ), в пределах которой между телами возникает зазор.

Ранее установлено, что НДС конструкции при действии  $M_o$  является неоднородным, и наиболее высокий градиент контактных напряжений возникает в кинематической паре “эксцентрик-ведущая обойма” [2]. В этой связи, контактная прочность МСХ полностью определяется несущей способностью антифрикционного материала вкладыша, имеющего наиболее низкие механические характеристики. Необходимо отметить, что несущая способность МСХ существенно зависит от конструктивного исполнения подшипникового узла [4]. В МСХ возможно использование двух вариантов антифрикционного элемента: жесткого вкладыша – в виде тонкого покрытия и мягкого вкладыша – в виде массивной втулки. В данной работе исследовалось НДС клинового механизма с массивным антифрикционным вкладышем.

Варьируемыми параметрами контактной задачи являлись геометрические размеры элементов подшипникового узла: радиус пальца вала-эксцентрика  $r_o$ , величина начального радиального зазора  $\Delta$ , а также толщина антифрикционного вкладыша  $h$ . При расчетах величина зазора выбиралась с учетом значений, рекомендованных для подшипниковых узлов, толщина подшипника соответствовала параметрам толстостенного вкладыша [4]. Нагрузочная способность МСХ оценивалась величиной предельной внешней нагрузки  $M_o$ , действие которой не вызывало появление пластических деформаций в антифрикционном вкладыше. Условие прочности вкладыша при плоском напряженном состоянии представлялось в виде Треска - Сен-Венана [5]:

$$\tau_{\max} \leq [\tau_{\max}] = 0,5 \sigma_T$$

где  $\tau_{\max}$  – максимальные касательные напряжения,  $[\tau_{\max}]$ ,  $\sigma_T$  – допускаемые касательные и нормальные напряжения при линейном напряженном состоянии соответственно.

Расчеты выполнены на сетке из 900 граничных элементов при следующих геометрических и упругих параметрах:  $R = 35$  мм;  $r = 29$  мм;  $e = 5$  мм;  $R_1 = 50$  мм;  $\varphi_1 = \varphi_2 = 60^\circ$ ;  $E_2 = 0,9 \cdot 10^5$  МПа;  $E_3 = E_4 = E_5 = 2,1 \cdot 10^5$  МПа;  $\nu_2 = 0,32$ ;  $\nu_3 = \nu_4 = \nu_5 = 0,29$ . Обозначения упругих характеристик соответствуют позициям элементов на рис.1. Моделирование осуществлялось в диапазоне значений:  $\Delta = 0,025, \dots, 0,03$  мм,  $h = 0,1, \dots, 7,0$  мм;  $r_o = 13, \dots, 15$  мм при фиксированных значениях коэффициентов трения в областях контакта клина с обоймами  $f_{AC} = f_{BD} = 0,12$ .

Величина предельной внешней нагрузки была определена из условия образования идентичных областей допускаемых напряжений  $[\tau_{\max}]$  в теле вкладыша подшипника скольжения. Методика ее определения основана на использовании нагрузочных характеристик вида  $M_o = f(\varepsilon_l)$ , где  $\varepsilon_l$  – угол поворота вала-эксцентрика, для построения зависимостей  $\tau_{\max} = f(M_o)$ , где  $\tau_{\max}$  – максимальные касательные напряжения, возникающие в подшипнике при действии крутящего момента  $M_o$ .

На рис. 2 приведены построенные в условиях поэтапного кинематического нагружения линейные зависимости  $\tau_{\max} = f(M_o)$  для моделей МСХ с радиусом вала-эксцентрика  $r_o = 13$  мм

и величине радиального зазора  $\Delta = 0,025$  мм. Обозначения графиков соответствуют толщинам антифрикционных вкладышей. Величина предельного момента  $M_o^*$  для каждого варианта модели определена с учетом допускаемого значения  $[\tau_{\max}] = 26$  МПа.

Представленные зависимости показывают, что предельная нагрузка существенно зависит от толщины антифрикционного вкладыша. Данный вывод полностью соответствует известному положению – толщина вкладыша является параметром процесса деформирования, и большей несущей способностью обладает более тонкий подшипник [4,6].

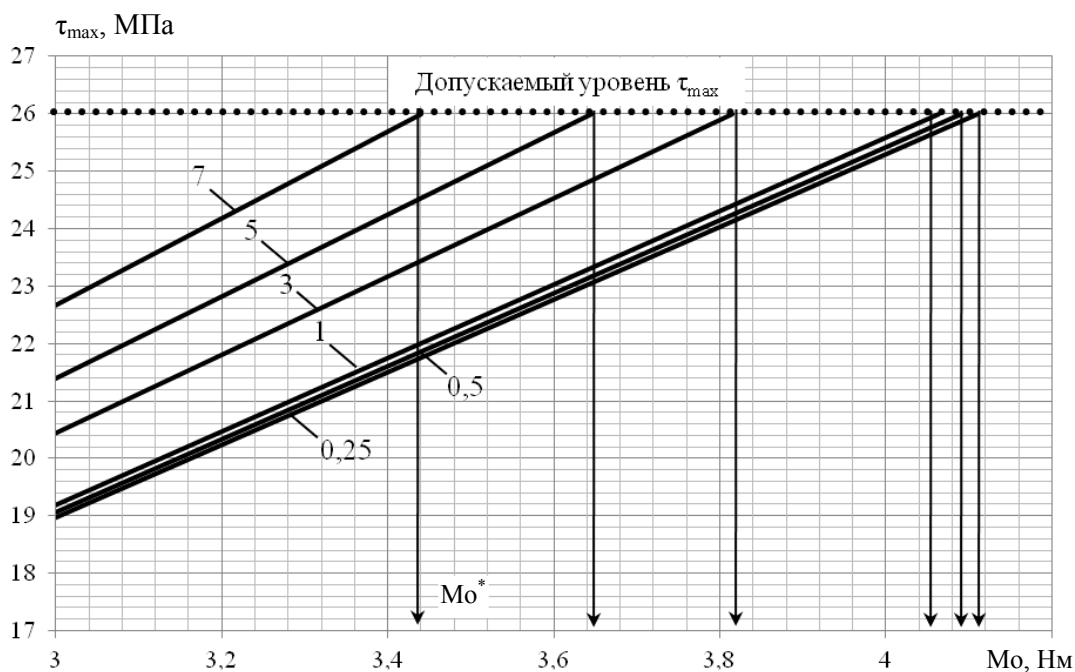


Рис. 2. Определение величины предельного момента внешней нагрузки

На рис. 3 показаны полученные при действии предельных нагрузок поля максимальных касательных напряжений (изохром) в моделях МСХ в условиях идеального сопряжения звеньев ( $\Delta = 0$ ) и при наличии начального зазора в подшипнике ( $\Delta = 0,025$  мм). Цифрами обозначены порядки изолиний максимальных касательных напряжений с ценой полосы  $\tau_{\max} = 5$  МПа соответственно.

Очевидно, что при наличии зазора предельное состояние вкладыша наступает при меньшем уровне внешнего момента  $M_o^*$ . При этом область максимальных касательных напряжений (в отличие от случая идеального сопряжения тел) находится на некоторой глубине от контактной поверхности вкладыша. Данное явление

соответствует характеру расположения опасных зон  $\tau_{\max}$  при контактном взаимодействии [6].

Наличие зазора оказывает существенное влияние на напряженное состояние модели. При уменьшении размеров области контакта изолинии концентрируются в достаточно узкой зоне, расположенной в центральной части модели. Передача нагрузки через меньшую область контакта приводит к изменению распределения напряжений в клине. При идеальном сопряжении клина с обоймами область максимальных значений  $\tau_{\max}$  смещается со стороны узкого конца клина к его центральной части. Исчезновение концентраторов напряжений в окрестностях угловых точек клина свидетельствует о перераспределении нагрузки по его длине.

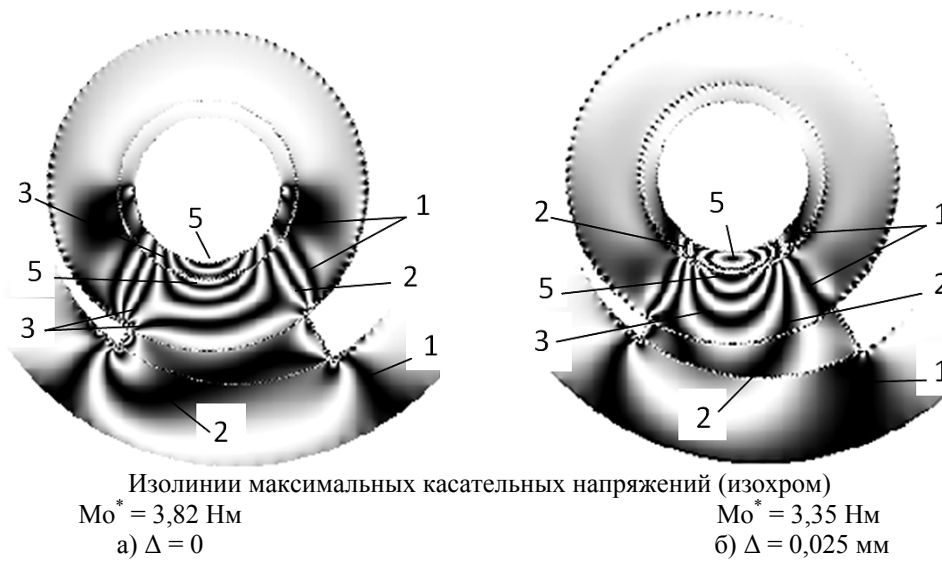


Рис. 3. Напряженное состояние МСХ при действии предельных нагрузок

Представленные картины напряженного состояния позволяют заключить, что наличие зазоров в сопряжениях элементов приводит к существенным изменениям механизма контактного взаимодействия элементов клинового МСХ, последствиями которых может быть ухудшение условий самоторможения и уменьшение его нагрузочной способности.

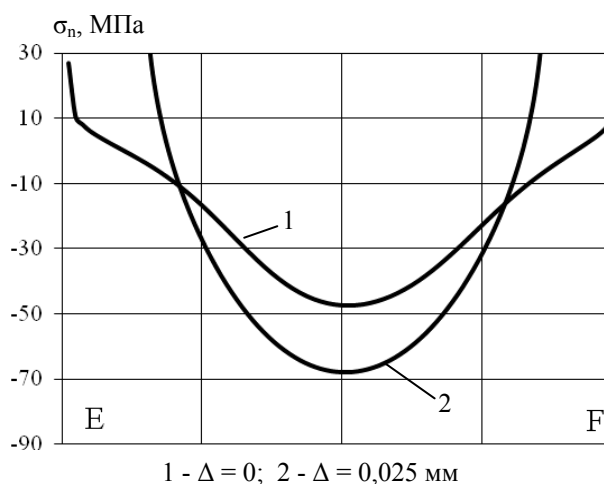


Рис. 4. Влияние величины зазора на распределение нормальных давлений в подшипнике

На рис. 4 приведены распределения нормальных давлений в области контакта вала-эксцентрика с подшипником. Они показывают, что при наличии зазора формируемая область контакта  $EF$  имеет меньшие размеры (более, чем на 30 %). Нормальные давления имеют общий симметричный характер распределения в каждой из рассматриваемых областей. При

наличии зазора возникает значительно больший уровень контактных давлений. Максимальные уровни давлений в рассмотренных вариантах отличаются на 43,8 % и более значительно (на 63,3 %) – их средние значения.

При наличии зазора в подшипнике имеет место прогрессирующая форма внутреннего контакта тел, когда размеры его области увеличиваются с ростом внешнего момента. В решениях классических контактных задач, в частности задачи И. Я. Штаермана, установлен нелинейный характер размеров области контакта от нагрузки. На рис. 5 по результатам моделирования при  $\Delta = 0,025 \text{ мм}$  построена линейная зависимость центрального угла контакта элементов подшипникового узла от величины нагружающего момента  $\theta = f(Mo)$ . Характеризующий абсолютный размер области контакта угол  $\theta$  определялся по средним точкам первых полосы изохром, выходящих на внутренний контур вкладыша (рис. 3). Наиболее вероятно, что несоответствие полученных данных с классической теорией и результатами экспериментальных исследований методом фотоупругости, объясняется использованием кинематического способа нагружения МСХ [2], когда размеры области контакта вала и вкладыша определены из чисто геометрических соотношений, линейно зависящих от угла поворота эксцентрика  $\epsilon_1$ . При данном способе однозначно задаются только нормальные смещения точек в области  $EF$ , но поверхностные усилия в этой области – многозначны. Эти обстоятельства являются причиной знакопеременного характера нормальных усилий на рис. 4. Он обусловлен осо-

бенностями напряженного состояния в окрестностях точек E и F, в которых происходит смена (скачок) граничных условий. Корректная математическая формулировка задачи теории упругости предполагает учет указанных особенностей. При постановке данной задачи разрывы граничных условий в связи с математическими трудностями изначально не учитывались. Пренебрежение данным математическим эффектом при получении оценок прочности подшипникового узла с учетом того, что существующие практические методы расчета [7] вообще не учитывают реального характера распределения нормальных давлений, на наш взгляд, является вполне допустимым.

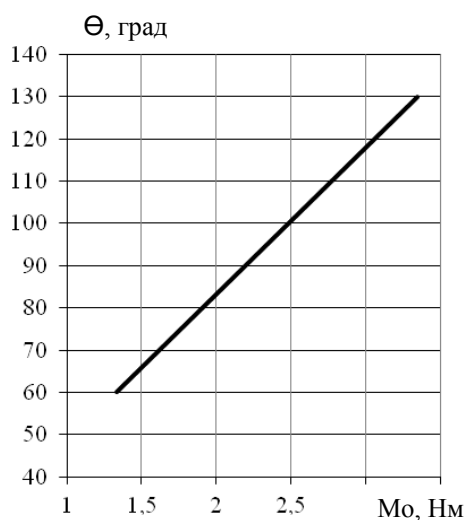


Рис. 5. Зависимость размеров области контакта вала с подшипником от величины внешнего момента

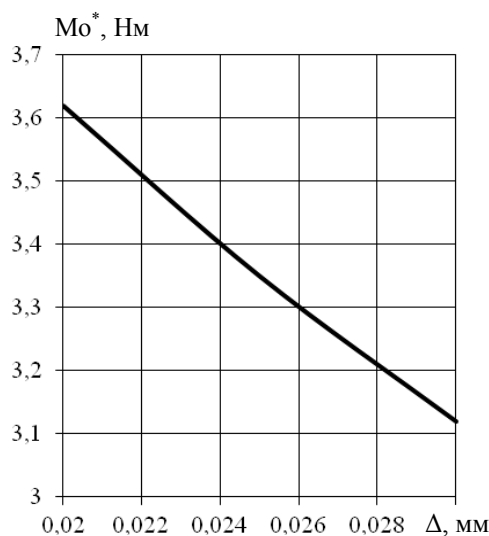


Рис. 6. Влияние величины зазора на величину предельной внешней нагрузки

Далее представлены результаты исследования влияния величины зазора на напряженное состояние механизма. Расчеты выполнены при толщине вкладыша  $h = 3$  мм. На рис. 6 приведена зависимость предельного внешнего момента от величины начального радиального зазора. Она показывает, что при увеличении величины зазора в интервале 0,02, ..., 0,03 мм происходит снижение уровня предельной нагрузки на МСХ в пределах 17 %. На рис. 7 показано влияние изменяющегося в том же интервале начального зазора в подшипнике, на протяженность формируемой области контакта EF. Данная зависимость свидетельствует о значительном уменьшении угла контакта вала с подшипником  $\Theta$  (в пределах 20 %) при увеличении зазора на 0,01 мм.

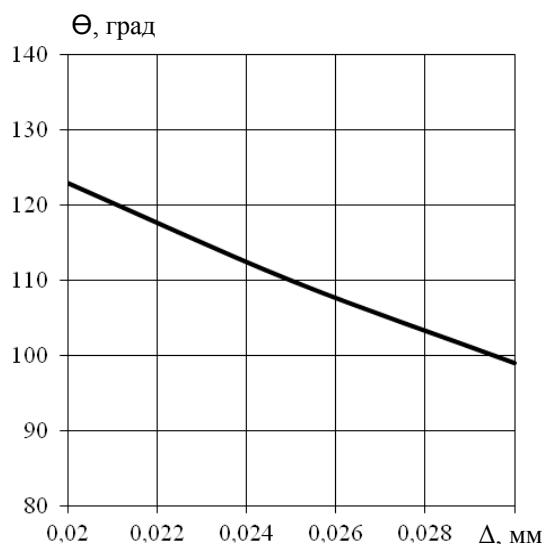


Рис. 7. Влияние начального зазора на размеры угла контакта вала с подшипником

Следствием уменьшения размеров области контакта является увеличение уровня нормальных давлений. На рис. 8 приведены распределения контактных давлений в подшипнике при действии предельных нагрузок. Графики показывают, что максимальный уровень давлений в рассмотренном диапазоне изменения зазора увеличивается незначительно (в пределах 3 %). Однако, по сравнению с вариантом идеального сопряжения элементов подшипника ( $\Delta = 0$ ) наличие зазора значительно увеличивает уровень максимальных давлений в подшипнике. В частности, при толщине вкладыша  $h = 3$  мм рост максимального значения давления составил 46,3 %. При этом значительно возрастает приблизительно в том же соотношении (на 45,5 %) и уровень средних давлений, величина которых согласно [7] ограничивает предельную нагрузку на механизм.

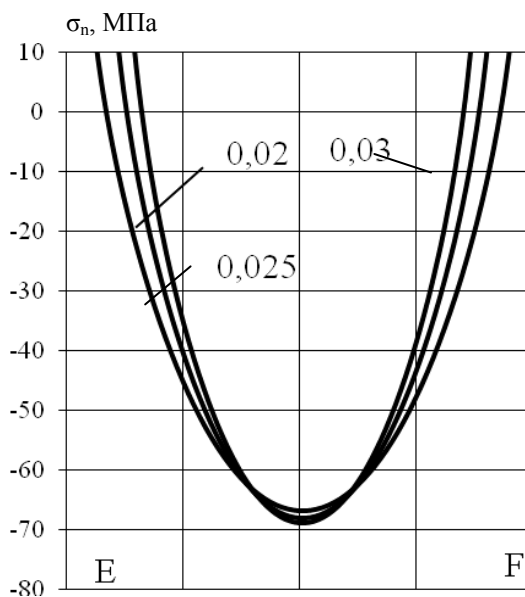


Рис. 8. Влияние начального зазора на распределение нормальных давлений в области контакта вала с подшипником

На рис. 9 показано влияние зазора в подшипнике на величину максимальных и средних значений давлений  $\sigma_s$ . Выше было отмечено, что при оценке работоспособности подшипникового узла обычно не учитывается реальный характер распределения нормальных давлений в области контакта тел. Представленные зависимости дают наглядное представление о соотношении максимальных и средних значений нормальных давлений, возникающих в подшипнике скольжения МСХ при действии предельных, а значит допускаемых по условиям прочности Треска - Сен-Венана, внешних нагрузок. Выполнение данных условий обеспечивает контактную прочность подшипника и всего механизма.

Определим работоспособность подшипникового узла по традиционной методике, базирующейся на критерии допускаемых давлений. Упрощенный расчет подшипников скольжения основан на ограничении средних (условных) давлений  $p \leq [p]$  [7].

Для анализа прочности вкладыша используем распределения контактных давлений в формируемой предельной нагрузкой области контакта эксцентрика с обоймой EF, принимая значение  $[p] = 20$  МПа для контактной пары “сталь закаленная - по бронзе БрА9Ж4” [7]. При действии предельных нагрузок представленные на рис. 9 средние давления в области контакта EF превышают допустимый уровень 20 МПа. В соответствии с методикой расчета по допускаемым давлениям прочность подшипника в рас-

смотренных случаях не обеспечивается. Таким образом, применение критериев максимальных касательных напряжений и допускаемых средних давлений при наличии зазора в подшипнике дает различные оценки прочности механизма.

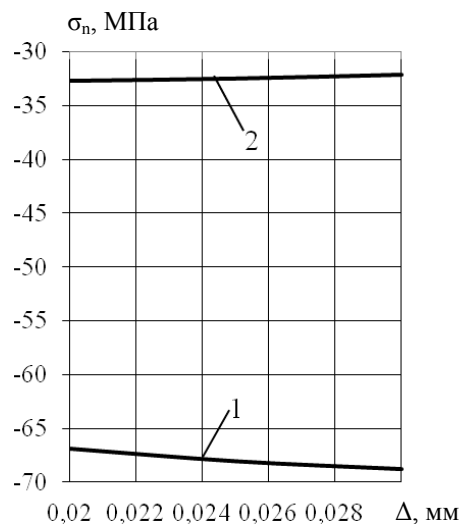


Рис. 9. Влияние зазора на распределение максимальных (1) и средних давлений (2)

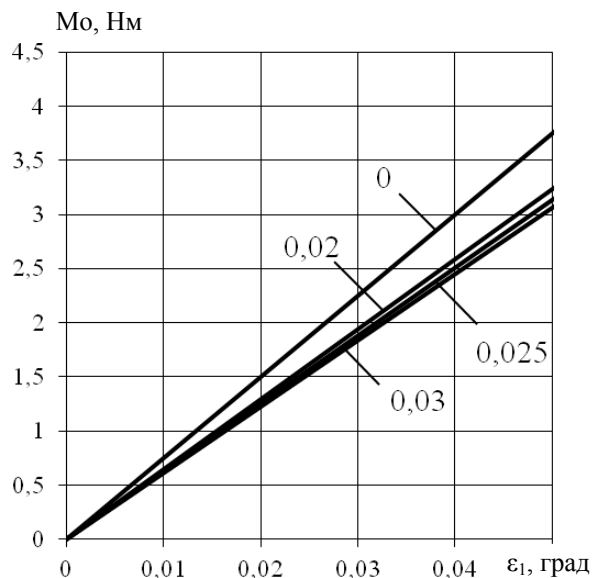


Рис. 10. Влияние величины радиального зазора в подшипнике на жесткость МСХ

Наличие зазора в подшипнике, приводящее к уменьшению области контакта элементов, снижает угловую жесткость механизма. На рис. 10 приведены линейные нагрузочные характеристики вида  $M_o = C\epsilon$  для четырех вариантов упругой модели МСХ, где  $C$  - угловая жесткость механизма. Обозначения графиков соответствуют величине радиального зазора в подшипнике. Они показывают, что при наличии максималь-

ного зазора в подшипнике жесткость МСХ снижается на 22,4 % по сравнению со случаем  $\Delta = 0$ .

На основании результатов исследований могут быть сделаны следующие выводы:

1) Наличие конструктивного зазора в радиальном подшипнике скольжения МСХ оказывает существенное влияние на процесс контактного взаимодействия элементов МСХ. Уменьшение размеров областей контакта элементов приводит к существенному повышению уровня контактных давлений в подшипниковом узле, что отрицательно сказывается на его несущей способности.

2) При увеличении зазора в подшипнике значительно снижается величина предельной нагрузки на механизм и его жесткость.

3) Величина зазора может оказывать влияние на условия нагружения МСХ зазора вследствие поворота эксцентрика для его выборки на некоторый угол. Данное явление может привести к изменению закономерностей распределения контактных характеристик в кинематических парах клина с обоймами и ухудшению работоспособности механизма.

4) При наличии начального зазора в подшипниковом узле анализы прочности МСХ, выполненные на основе критериев максимальных каса-

тельных напряжений и допускаемых давлений, дают противоположные оценки механического состояния конструкции. В соответствии с последним величина предельной нагрузки на механизм должна быть понижена на 65 %.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Благодравов, А. А. Механические бесступенчатые передачи нефрикционного типа / А.А.Благодравов. - М.: Машиностроение. 1977. - 145 с.
2. Гончаров, А. А., Модифицированная контактная модель клиновых механизмов свободного хода / А.А. Гончаров, Ан. А.Гончаров // Вестник машиностроения. - 2014. № 9. - С.24-29.
3. Гончаров, Ан. А. Контактный алгоритм конструкционного анализа клинового механизма свободного ход / Ан. А. Гончаров, А.А.Гончаров // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т.16. № 14(117). С.106-113.
4. Крагельский, И. В. Узлы трения машин: Справочник / И.В. Крагельский, Н.М. Михин. - М.: Машиностроение, 1984. - 240 с.
5. Черменский, О. Н. Расчеты на контактную прочность / О.Н. Черменский, О.А. Ряховский // Вестник машиностроения. - 2008. - №7. - С.3-8.
6. Горячева, И. Г. Контактные задачи в трибологии / И.Г.Горячева, М.Н. Добычин. - М.: Машиностроение, 1988. - 256 с.
7. Когаев, В. П. Прочность и износостойкость деталей машин / В.П. Когаев, Ю.Н. Дроздов. - М.: - Высш. шк., 1991. - 319 с.

УДК 658.512.011.56:004

*Д. В. Иванов, А. В. Матохина, Ю. Ф. Воронин*

#### ОПИСАНИЕ МЕТОДА И КОМПЛЕКСА СРЕДСТВ ВЫЯВЛЕНИЯ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ОТЛИВОК ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПОСОБОВ ИХ ЛИКВИДАЦИИ

Волгоградский государственный технический университет

voronin@vstu.ru

В статье рассмотрен процесс автоматизации диагностики и устранения газовых дефектов. Приведено описание метода выявления разновидностей дефектов, причин их возникновения и способов ликвидации. В рамках выполнения работы предложен комплекс систем поддержки проектирования технологии изготовления отливок из железоуглеродистых сплавов. Рассмотрена архитектура комплекса автоматизированных систем повышения качества литья. Описано содержание основных подсистем комплекса. Рассмотрен пример анализа отливки «Крышка 766», проведенный с использованием разработанного метода. Описан процесс диагностики дефекта отливки и поиск причин возникновения дефекта, а также приведен перечень мер для ликвидации рассмотренного дефекта.

**Ключевые слова:** дефект, отливка, литье, железоуглеродистый сплав, метод диагностики, поддержка процесса проектирования, технология изготовления отливки.

*D. V. Ivanov, A. V. Matokhina, Y. F. Voronin*

#### THE DESCRIPTION OF THE METHOD AND COMPLEX OF MEANS OF IDENTIFICATION OF THE REASONS OF APPEARANCE OF DEFECTS OF CASTINGS FROM IRON AND CARBON ALLOYS AND DEFINITION OF WAYS OF THEIR ELIMINATION

Volgograd State Technical University

In article, process of automation of diagnostics and elimination of gas defects is considered. The description of a method of identification of kinds of defects, the reasons of their emergence and ways of elimination is provided. Within performance of work, the complex of systems of support of design of manufacturing techniques of castings from the iron and carbon alloys is offered. The architecture of a complex of the automated systems of improvement of quality of molding is considered. The maintenance of the main subsystems of a complex is described. An example of the analysis of casting "the Cover 766", carried out with use of the developed method is reviewed. Process of diagnostics of defect of casting and search of the reasons of emergence of defect is described, and the list of measures for elimination of the considered defect is provided.

**Keywords:** defect, casting, iron-carbon alloy, the method of diagnosis, support the design process, manufacturing technique of casting.



Кафедра САПР и ПК на протяжении 15 лет работает над созданием комплекса средств поддержки процесса проектирования технологии изготовления отливок из черных сплавов, задача которого заключается в:

- 1) создании методологии накопления, оценки и классификация знаний о технологии производства,
- 2) автоматизации расчетов и визуализации процессов изготовления отливок,
- 3) организации механизмов обмена знаниями,
- 4) разработка методики анализа технологии на предмет возможности возникновения дефектов и определения способов их устранения,
- 5) создании автоматизированных обучающих систем для повышения квалификации технологов литейщиков и других сотрудников литейного производства.

В статье рассмотрен процесс автоматизации диагностики и устранения газовых дефектов. В рамках выполнения работы предложен комплекс систем поддержки проектирования технологии изготовления отливок из железоуглеродистых сплавов.

В качестве пользователя комплекса может выступать технолог, контролер качества готовой продукции или эксперт предметной области. Экспертом считается лицо, прошедшее курсы повышения квалификации и имеющее соответствующие рекомендации после обучения от администратора комплекса.

Метод представлена на рис. 1 и состоит из следующих этапов [1]:

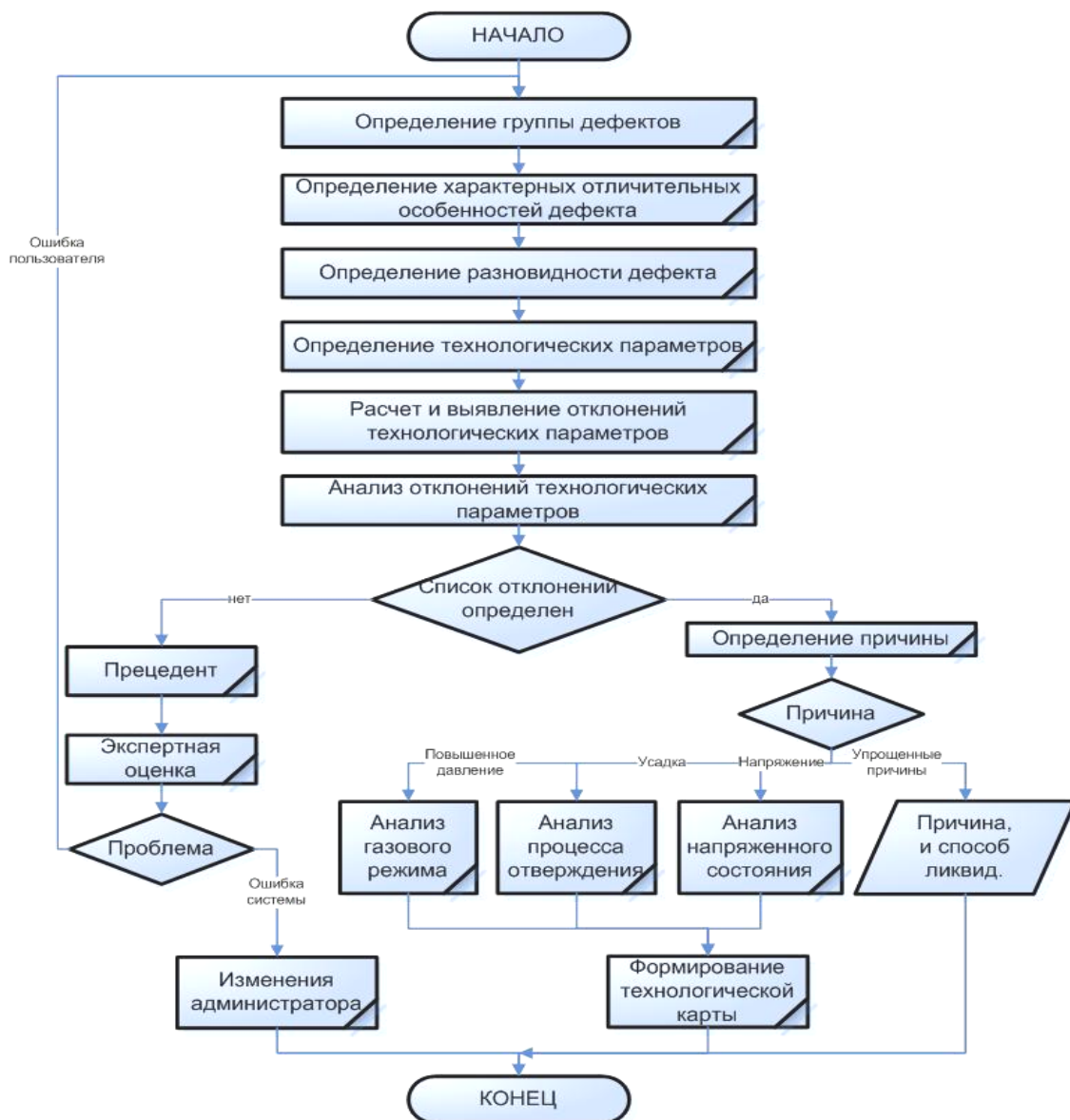


Рис. 1. Алгоритм метода выявления разновидностей дефектов, причин их возникновения и способов ликвидации

Первый этап. Определение группы дефектов.

На этом этапе пользователь, используя предложенную классификацию по родственным признакам с изображениями дефектов, выбирает группу, к которой относится рассматриваемый дефект.

Второй этап. Определение характерных отличительных особенностей дефекта.

На этом этапе пользователь определяет характерные отличия рассматриваемого дефекта, сравнивая его с предложенной классификацией отличительных особенностей дефектов.

Третий этап. Определение разновидности дефекта.

По уточненным характерным особенностям дефекта система определяет его конкретную разновидность.

Четвертый этап. Определение специфики возникновения дефекта.

После выявления разновидности дефекта пользователь уточняет специфику возникновения дефекта по представленной в системе методике, например, место его расположения по отношению к элементам формы и стержня.

Пятый этап. Определение технологических параметров.

Для последующего анализа пользователю необходимо представить технологические параметры изготовления отливок, приведшие к возникновению дефекта, отвечая на предлагаемые вопросы, задаваемые системой.

Шестой этап. Анализ отклонений технологических параметров.

На этом этапе выявляются отклонения в имеющейся технологии, которые привели к возникновению рассматриваемого дефекта.

В том случае, если список отклонений технологических параметров не определен, т. е. пользователь после проведения анализа не выявил отклонений технологических параметров, случай переводится в разряд «неопределенные», т. е. в случай, неподдающийся определенной классификации с помощью системы.

Следующим этапом является проверка неопределенности экспертом предприятия. Экспертная оценка должна выявить проблему неопределенности. Проблемой может быть:

- ошибка пользователя, который неправильно классифицировал дефект, или ошибся в технологических параметрах. В случае обнаружения ошибки пользователя эксперт возвращает его на этап ошибочного ввода для нового продолжения цепочки.

- ошибка системы, т. е. случай не определен базой знаний системы. В случае обнаружения возможной ошибки системы посылается сообщение администратору комплекса для консультации. Администратор комплекса обладает ресурсами дополнительного анализа технологической цепочки с учетом опыта эксплуатации системы всеми предприятиями. При отсутствии необходимой информации, администратор комплекса редактирует базу знаний системы с дальнейшей рассылкой обновлений по всем машинам зарегистрированных клиентов.

В том случае, если список отклонений технологических параметров выявлен, определяется основная причина дефекта и производится полномерный поиск способов ликвидации [2].

Наиболее трудоемкими для определения способов ликвидации являются газовые и усадочные раковины, трещины, для которых были специально разработаны моделирующие подсистемы [3]. Остальные дефекты, в основном, имеют достаточно простые механизмы ликвидации и в отдельном моделировании технологического процесса не нуждаются.

Причинами возникновения дефекта могут быть [4]:

1. Повышенное газовое давление, для ликвидации которого рекомендуется использовать приложение автоматизированного комплекса «Технолог» для анализа газового режима литейной формы.

2. Усадка металла с образованием дефекта, для анализа которого можно использовать подсистему моделирования процесса затвердевания отливки.

3. Напряженное состояние конструкции отливки, для ликвидации которого рекомендуется использовать систему анализа напряженного состояния отливки.

4. В случае определения более простых причин, к которым могут относиться обвал, обжим, подрыв, пригар, перекося и др., следует воспользоваться рекомендациями, предлагаемыми экспертной системой.

Архитектура системы включает две основные подсистемы, работающие удаленно (рис. 2):

1. «Подсистема администрирования комплекса». Подсистема администратора является средством работы с базой данных заводов-клиентов и инструментом обновления баз знаний системы «Технолог». Она включает следующие основные модули:

- подсистема формирования обновлений,

представляющая собой инструментальное средство обновления баз знаний, формирования обновлений и их рассылки всем зарегистрированным пользователям системы.

- интерфейс администратора, позволяющий работать с историей обновлений, клиентской базой и обрабатывать отчеты заводов-клиентов, присылаемыми экспертами.

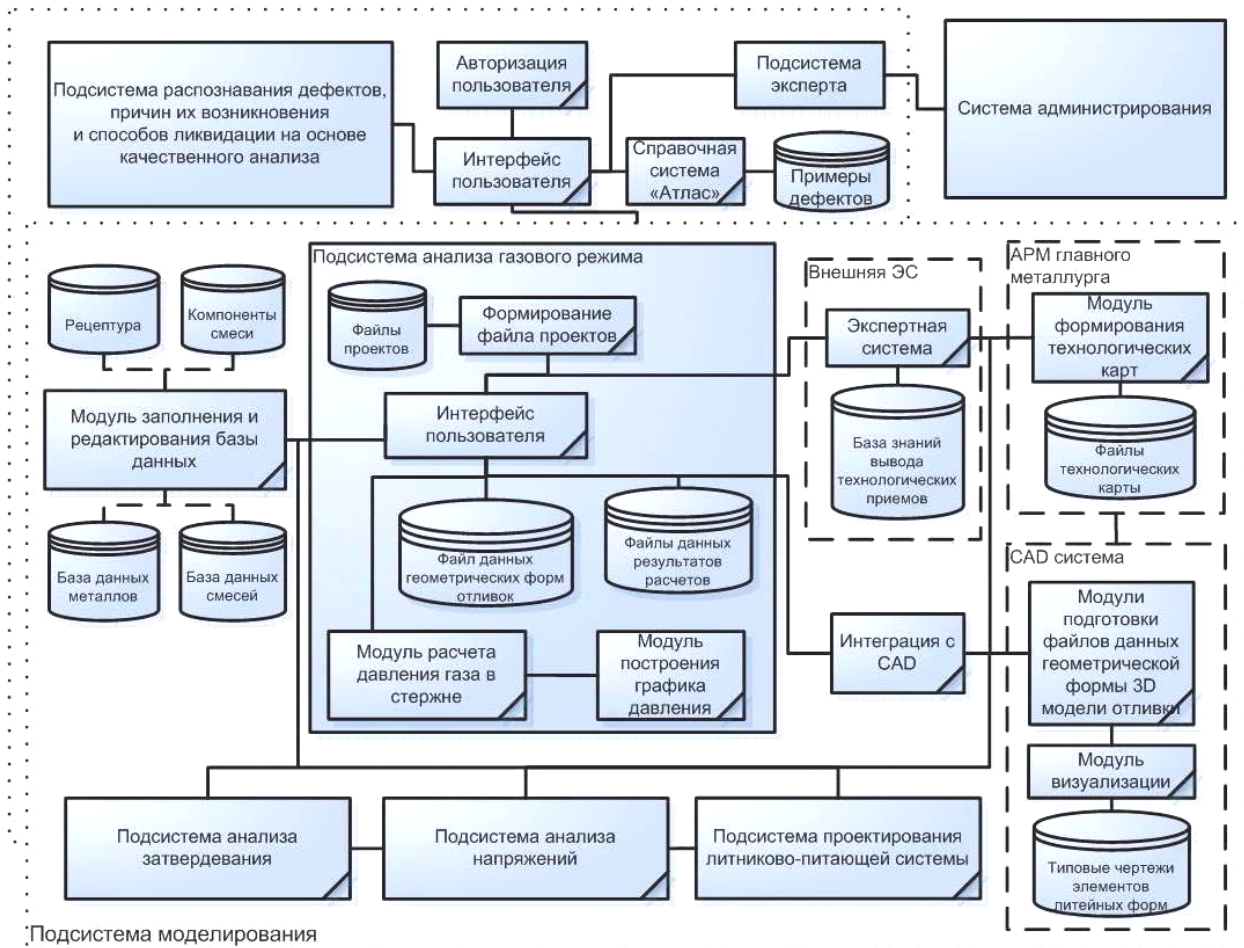


Рис. 2. Архитектура комплекса автоматизированных систем повышения качества литья

2. «Подсистема пользователей» представляет собой комплекс средств информатизации литейного производства. Комплекс включает следующие основные модули и подсистемы:

- Модуль авторизации пользователей, позволяющий ограничивать права доступа пользователей и экспертов, работающих с подсистемами, а также отслеживать действия пользователей.

- Модуль основного интерфейса пользователей системы, имеющий выход на информационно-справочную систему «Автоматизированный атлас литейных дефектов». Справочная система работает с постоянно пополняемой в процессе использования комплекса базой данных примеров дефектов.

- «Подсистема качественного распознавания дефектов, причин их возникновения и способов ликвидации».

- «Подсистема эксперт».
- «Подсистема моделирования».

Подсистемы являются самостоятельными программными продуктами и могут использоваться отдельно от комплекса.

«Подсистема качественного распознавания дефектов, причин их возникновения и способов ликвидации», содержит модули:

- визуально-логического определения дефекта;
- расчета вероятности причин возникновения дефектов и способов их ликвидации;
- анализа отклонений технологических параметров.

Также подсистема содержит обновляемые файлы деревьев визуально-логического определения группы, разновидности, характерных отличительных особенностей дефектов и специфик их возникновения, матрицы взаимодействий

причин возникновения дефектов и перечень возможных способов ликвидации дефектов.

«Подсистема эксперт» предназначена для определения причин неопределенности, отправления отчета администратору комплекса и организации работы пользователей системы (удаления, добавления, редактирования, ведения рейтингов пользователей, добавления заданий).

«Подсистема моделирования» является мощным и интуитивно понятным средством анализа и проектирования технологии. Все подсистемы моделирования имеют связь с CAD средствами, для получения и проведения анализа непосредственно на 3D модели отливки. Инструментальные средства подсистемы позволяют проводить анализ и поддерживать весь процесс формирования или редактирования технологии изготовления отливки.

Таким образом, создана и автоматизирована методология, позволяющая эффективно определять разновидность дефекта, возникшего на производстве и проектировать технологию изготовления отливок, с низкой вероятностью возникновения дефектов.

На настоящий момент реализованы системы анализа газового режима литья, усадочных режимов заливки[5], расчета литниково-питающей системы и предложен проект ЭС выбора технологических приемов, подсистема качест-

венного анализа дефектов и справочная система «Атлас литейных дефектов»[6]. На стадии выбора концепции находятся системы администрирования и АРМ главного металлурга, а также обновления модулей интеграции с CAD для проектирования элементов формы.

Разработан ряд дистанционных систем обучения и консультации технологов. Системы содержат информации по причинам дефектов и подробную информацию по способам ликвидации.

В перспективе реализация разработка системы удаленного администрирования и обновления комплекса.

Пример качественного анализа отливки «Крышка 766».

Отливка «Крышка 766» изготавливается из чугуна и после обработки в литейном цехе направляется на завод «Заказчика» для механической обработки. Внешний вид отливки показывает ее пригодность к использованию. При механической обработке отливок вскрывается пористость в месте сопряжения крышки с корпусом. Для изучения места возникновения дефектов, отливка порезана определенным образом и подвергнута анализу.

На рис. 3 и рис. 4 представлена отливка «Крышка 766», и фрагменты отливки с мелкими раковинами на обработанной поверхности.



Рис. 3. Отливка «Крышка 766»

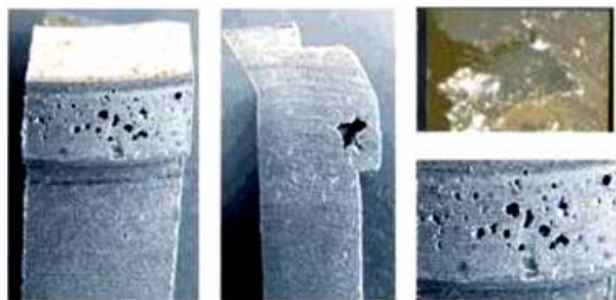


Рис. 4. Фрагмент отливки «Крышка» с газовыми раковинами

При испытании отливки на герметичность обнаруживалась течь воздуха в месте нахождения раковин, что приводило отливку в окончательный брак. Проанализируем характерные особенности дефекта и возможные причины его возникновения. Представленный фрагмент отливки на рис. 4. имеет массовое поражение кромкипористостью, состоящей из мелких светлых газовых раковин. Такой дефект отчетливо просматривается в бинокулярную лупу МБС-9 или даже в приборе МПБ-2 для определения диаметра лунки на поверхности металла при замере его твердости. При увеличении хо-

рошо просматривается светлая гладкая блестящая поверхность раковин в виде извилистых каналов, свищами пронизывающих поверхность металла. На рис. 4 представлено в увеличенном виде распределение раковин по поверхности кромки отливки. Сама кромка имеет размер не более 10 мм. Проникший в металл через поры отливки газ собирается в увеличенные раковины, которые поражают отливку на небольшую глубину. Такая раковина представлена в сечении отливки, где просматривается форма дефекта с гладкой поверхностью. При увеличении до 28 раз видна светлая поверх-



ность раковины, уходящая своим устьем в сторону поверхности с мелкими раковинами. Анализируя этот дефект с использованием идентификационных деревьев можно отметить, что:

- поверхность раковин гладкая светлая блестящая;
- диаметр дефекта от 0,5 до 2 мм при раз-

личной длине проникновения в металл;

- располагается раковина у поверхности отливки;
- на небольшой глубине обнаружены увеличенные по размеру раковины, возникшие в результате скопления газа из мелких свищевых раковин.

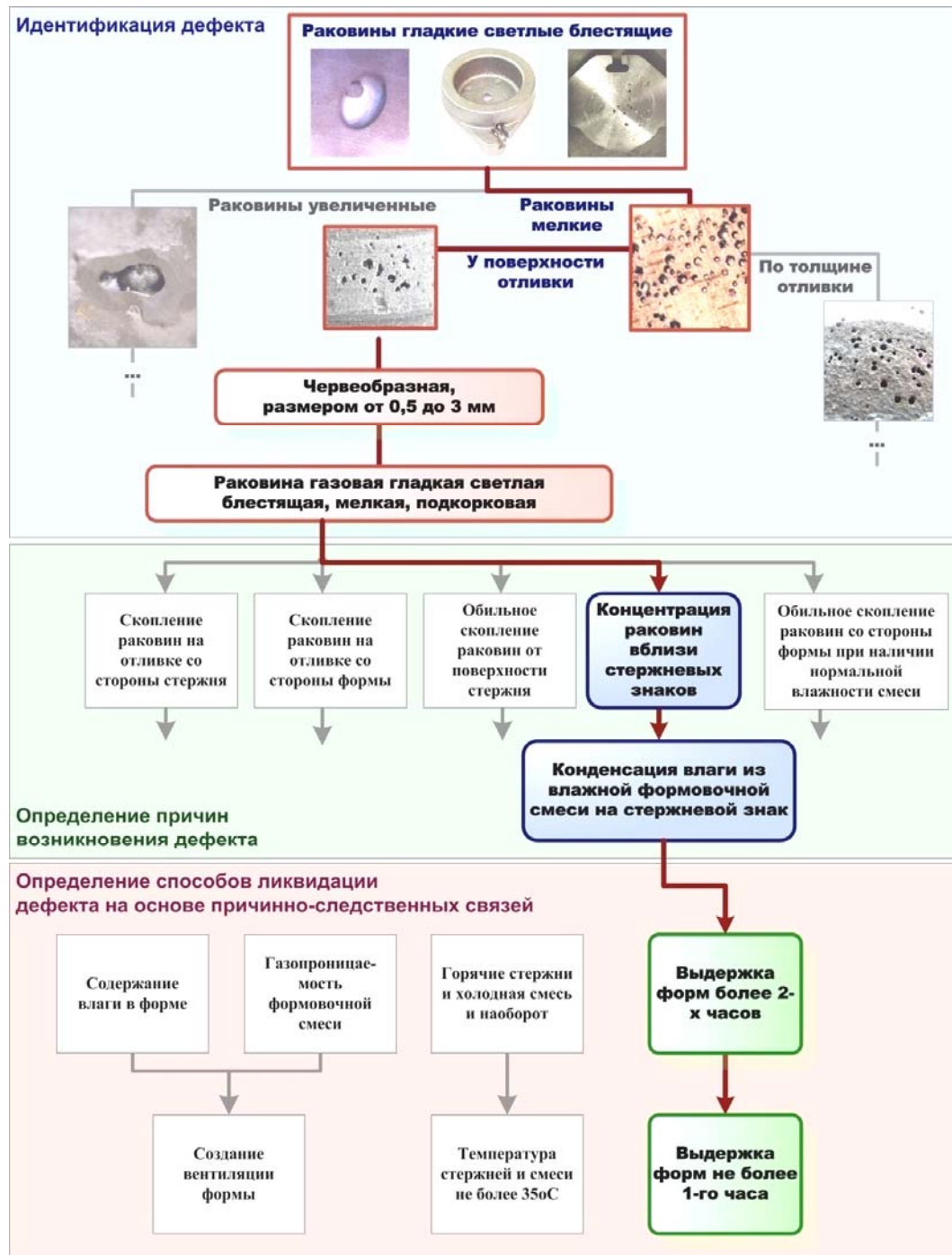


Рис. 5. Системный подход при ликвидации дефекта отливки «Крышка»

Проведенный анализ возникновения дефекта показывает, что раковина образовалась на

той поверхности отливки, которая находится рядом со стержневым знаком. В свою очередь

стержневой знак входит в контакт с влажной поверхностью знака формы. В результате длительной выдержки стержневого знака в знаке формы, происходит миграция влаги из формовочной смеси в стержень. Следует отметить, что связующим материалом в стержне служат лигносульфонаты, имеющие повышенную гигроскопичность. Это в значительной мере способствует увлажнению стержней от знака на окрашенную поверхность, где и расположена исследуемая кромка отливки. Как представлено на рис. 5. Причиной образования дефекта является увлажнение стержня от влажной песчано-глинистой смеси. Этот факт можно представить в виде цепочки из следующих этапов формирования дефекта: светлая подкорковая раковина → расположение раковин вблизи стержневого знака → увлажнение стержневого знака от влажной смеси → выдержка собранной влажной формы со стержнями более 2-х часов (в данном случае, при использовании гигроскопичных стержней и смеси с повышенной влажностью, опасное время выдержки собранной со стержнями формы должно быть не более 0,5 часа) → перемещение влаги в рабочую зону отливки → возникновение светлых, свищевидных газовых раковин.

Для ликвидации рассматриваемого дефекта необходимо выполнение следующих предложений:

1. Использовать формовочную смесь с минимальным содержанием влаги. Этот параметр определяется требованиями к прочностным характеристикам формовочной смеси.

2. Выдержка собранных форм перед заливкой должна быть не более 30 минут, что вызвано повышенной гигроскопичностью стержневых связующих (лигносульфонатов), при более длительной выдержке собранных форм, их следует разобрать и подсушить стержни.

3. Процессу проникновения влаги из стержня в отливку способствует повышенное давление газа от сгорающих органических связующих. Чем выше давление газа в стержне, тем больше вероятность проникновения паровоздушных газов из стержня в отливку. Для ликвидации избыточного давления газа, необходимо выполнить вентиляционные каналы (диаметром 5–6 мм) для сообщения стержневого знака с атмосферой (рис. 6).

По разработанным предложениям изготовлена партия отливок в количестве 500 штук. Полученные отливки отправлены на механиче-

скую обработку, где выявляется качество полученного литья. В результате применения рекомендации брак устранен. Ориентировочный экономический эффект составил 6,5 миллионов рублей.

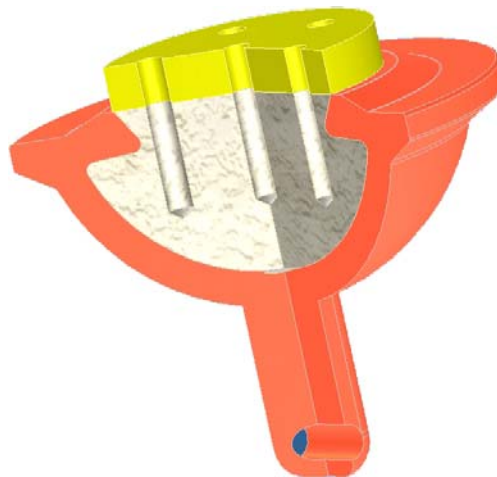


Рис. 6. Спроектированные вентиляционные каналы

Описанные модели апробированы в практике модернизации технологии изготовления отливок. Отдельные результаты работы получены в рамках выполнения государственного задания №2.1917.2014К Минобрнауки России, другие – проекта № 13-01-0079813 РФФИ.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Воронин, Ю. Ф. К вопросу об определении причин возникновения дефектов отливок // Литейщик России. – 2004. – №9. – с. 42-46
2. Воронин Ю.Ф., Воронин С.Ю. Ликвидация окисленных газовых раковин // Оборудование. Технический альманах. – март 2007. - № 1. – С. 46 – 49.
3. Воронин Ю.Ф., Воронин С.Ю. Характерные особенности окисленных газовых раковин // Оборудование. Технический альманах. – ноябрь 2006. - № 4. – С. 49 – 55.
4. Virtual Simulator for Making Castings Without Cracks Skills Development / Воронин Ю.Ф., Фоменков С.А., Кравец А.Г., Матохина А.В., Ханов Г.В. // World Applied Sciences Journal (WASJ). - 2013. - Vol. 24, Spec. Issue 24 :Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. - С. 202-207.
5. Воронин Ю.Ф. Выявление и ликвидация усадочных раковин и неметаллических включений. Черные сплавы : монография / Воронин Ю.Ф., Камаев В.А., Матохина А.В.; ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - 167 с.
6. Воронин Ю.Ф. Автоматизированная система "Атлас литейных дефектов. Чугун и сталь" / Воронин Ю.Ф., Камаев В.А., Матохина А.В. // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2007. - № 10. - С. 25-26.
7. Применение семантической сети для анализа процесса возникновения и ликвидации литейных дефектов / Лукьяненко А.Ю., Воронин Ю.Ф., Матохина А.В. // Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2013. - Т. 17. № 14 (117). - С. 46-51

УДК.685.01.:658.512.

*Ю. В. Кандырин, М. Е. Кононов***МЕТОДИКА И АЛГОРИТМ ВЫБОРА АНАЛОГОВ В ПАРЕТО РАССЛОЕНИЯХ****Национальный Исследовательский Университет «Московский энергетический институт»**

ywk@mail.ru, kme.vim@gmail.com

В работе рассмотрен метод и алгоритмы автоматизированного выбора аналогов по прототипам посредством расслоения множества при помощи Парето критерия, на подмножества, состоящие из несравнимых элементов, с последующим выбором аналогов путем анализа слоя, содержащего прототип.

*Ключевые слова:* аналоги, прототипы, многокритериальный выбор аналогов, граф частичного порядка, фактор множество, Парето расслоение.

*Y. V. Kandyrin, M. E. Kononov***METHODOLOGY AND ALGORITHM SELECT AN ANALOG IN PARETO LAYERS****National Research University «Moscow Power Engineering Institute»**

The paper presents a method and algorithms for automated selection of unique prototypes by means of a plurality of bundles using the Pareto criterion, on a subset consisting of incomparable elements, then selecting peers by analyzing the layer containing the prototype.

*Keywords:* analogs, prototypes, multicriteria choice analogues graph of the partial order, the factor set, the Pareto layers.

При ремонте, импортозамещении, инновационном проектировании, поиске взаимозаменяемых материалов конструкций, выборе радиокомпонентов при конструировании РЭС, подборе лекарственных препаратов в фармакологии часто требуется обеспечить близость вариантов к заданному базовому варианту, который назовем прототипом. Эта задача актуальна, когда возникает потребность рационального выбора возможных аналогов, способных на заданном однородном множестве вариантов выполнять те же функции с тем же, или, возможно, лучшим качеством, чем прототип.

Формализованная постановка задачи выбора аналогов по прототипу [1] может быть представлена тройкой  $\langle C, \Omega, \omega_n(\{\alpha_n\}) \rangle$ , где  $C$  – принцип оптимальности,  $\Omega$  – исходное множество вариантов,  $\omega_n(\{\alpha_n\})$  – прототип, задаваемый значениями его характеристик  $\{\alpha_n\}$ . При этом из всех допустимых вариантов  $\Omega_d \subseteq \Omega$  оптимальным (наилучшим) аналогом  $\omega_a$  считается тот вариант  $\omega_{a, \text{опт}}$ , который обладает наименьшими (в заранее установленном смысле) отличиями совокупности показателей качества аналога  $\{PK_i\}_a$  от совокупности  $\{PK_i\}_{\text{пр}}$  прототипа, при одновременном выполнении требований по допустимости.

Существуют различные методы и алгоритмы выбора аналогов [1], [2], [4]. Часть из них основана на использовании метрических интегральных критериев, другие на использовании неметрических критериев. В частности, для критерия Парето разработана методика [1], [2],

основанная на анализе графов частичного порядка, с выделением дуг входящих и исходящих из точки прототипа. Такой подход, безусловно, позволяет найти ближайшие к прототипу варианты, которые могут служить возможными аналогами. Преимуществом, предложенного в [1], [2] подхода, является отсутствие метрики при оценке близости вариантов и переход к порядковым шкалам при их ранжировке, что дает существенно меньший субъективизм при установлении приоритетов альтернатив. Недостатком является тот факт, что «в тени» остаются элементы, которые несравнимы с прототипом по показателям качества, но, тем не менее, близки к заданному критериальному смыслу.

В данной работе предлагается структурировать исходное однородное множество  $\Omega$  не с помощью орграфа частичного порядка, где все элементы связаны между собой направленными дугами, а с помощью Парето расслоений в принятом  $\pi$ - порядке заданной размерности  $\{k_i\}$ . Такой подход позволяют представить множество  $\Omega$  в виде  $\Omega_{\pi s}$ -слоев, представляющих собой упорядоченные подмножества несравнимых между собой элементов. В  $\pi$ - структурах внутри одного  $\pi_s$ - слоя ни один из элементов не соединен с другими вариантами этого слоя дугами в графе частичного порядка на множестве  $\Omega$ . При этом, для поиска аналогов предлагается анализировать  $\pi_{s\pi}$ -слой, содержащий прототип с несравнимыми значениями  $PK_i$ .

Подобное  $\pi$ - расслоение может быть сформировано в виде последовательно задаваемых

$\Omega_{\pi s}$ -слоев на  $\Omega$ . Паретовские слои  $\Omega_{\pi s}$  определяются индуктивно. К первому слою относятся

все  $\Omega_{\pi 1}$  - оптимальные (концевые, недоминируемые) альтернативы найденные из условия:

$$\Omega_{\pi 1} = \max \Omega / R_{\pi},$$

$$\text{где } R_{\pi} : \{k_l(\omega_i) \leq k_l(\omega_j), i \neq j; \{\omega_i, \omega_j\} \subseteq \Omega; \forall i, j = \{1, M\}; \forall l = \{1, N\}\}, \quad (1)$$

и для которого, хотя бы для одного  $l$ , такое неравенство является строгим.

Второй слой в структуре МВА определяется как множество Парето -  $\Omega_{\pi 2}$  на МВА  $\Omega$ , из которого удалены все элементы, принадлежащие первому Парето слою  $\Omega_{\pi 1}$

$$\Omega_{\pi 2} = \pi(\Omega / \Omega_{\pi 1}). \quad (2)$$

Аналогично для последующих слоев  $\Omega_{\pi 3}, \Omega_{\pi 4}, \dots, \Omega_{\pi s}$ .

$$\Omega_{\pi s} = \pi\left(\Omega / \bigcup_{\xi=1}^{s-1} \Omega_{\pi \xi}\right). \quad (3)$$

В каждом  $\Omega_{\pi s}$ -слое все элементы несравнимы между собой без привлечения дополнительной информации. Кроме того, каждый элемент  $\Omega_{\pi s}$ -го подмножества линейно упорядоченных

слоев принадлежит только одному классу подмножеств  $\pi$ - расслоения МВВ  $\Omega$ . Таким образом, варианты, претендующие стать аналогами должны либо принадлежать одному с прототипом  $\pi$ - слою, либо, как было показано в [1], [2] иметь с прототипом общие нетранзитивные **единичные** дуги в  $G_{\pi}(U_{\pi}, \Omega)$ .

Решение задачи выбора аналогов с помощью послойного  $\pi$ - структурирования можно интерпретировать графически. На рис. 1 представлено последовательное решение задачи выбора аналогов по заданному прототипу  $\omega_{2\star}$ , иллюстрирующее  $\pi$ - структурирование  $\Omega$  с помощью  $\pi$ - расслоения в соответствии с (3) с включением вариантов-кандидатов в аналогии из  $\pi_2$ - слоя для прототипа  $\omega_{2\star}$ .

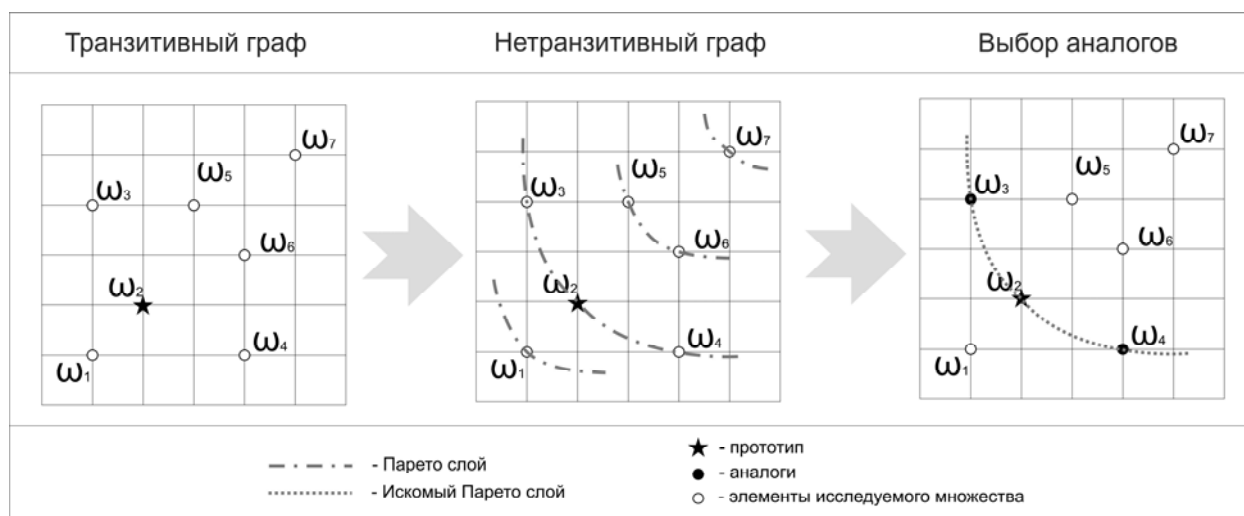


Рис. 1. Этапы выбора аналогов с помощью Парето слоев на  $\Omega$

Рассмотрим алгоритм построения  $\pi$ - структурирования  $\Omega$  в ассоциативных матрицах (АМ) фактор множеств окрестностей [3]. В примере, приведенном на рис. 1, результирующую транзитивную АМ  $A_{12}^T$  можно представить [3] как табл. 1, полученную путем конъюнкции  $A_1^T$  и  $A_2^T$  по  $\pi$ - правилу [1] (рис. 2).

<sup>10</sup>. **На первом шаге** осуществляем поиск столбцов, имеющих неулучшаемые «0»- окрестности. Парето оптимальными элементами в матрице  $A_{12}^T$  очевидно будут варианты, которые не улучшаются никакой другой альтернативой, т.е., *имеют пустые окрестности*. В данном примере (табл. 1) это будет вариант  $\omega_7$ , у которого  $|O_7(\omega_7)| = 0$ .



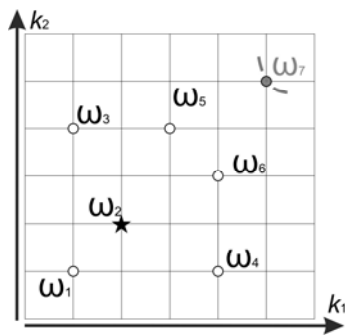


Рис. 2. Поиск первого Парето слоя в АМ

2<sup>0</sup>. **На втором шаге** проведем преобразование матрицы по следующему правилу. Сделаем для поиска второго  $\pi_2$ - слоя вариант  $\omega_7$  «хуже худшего», заменив в его окрестности все «0» на «1» (см. рис. 3), а также обнулим строку, соответствующую элементу  $\omega_7$ . Таким образом, мы как бы «оборвем» все дуги входящие в него, а его сделаем наихудшим из возможных на  $\Omega$ .

При этом концевыми элементами матрицы станут элементы  $\omega_5$  и  $\omega_6$ , а в преобразованной матрице (рис. 3) теперь содержатся уже два новых «нулевых столбца»  $O_5(\omega_5)$  и  $O_6(\omega_6)$ . Таким образом, можно утверждать, что во второй  $\pi_2$ - слой включены альтернативы  $\omega_5$  и  $\omega_6$  (рис. 3).

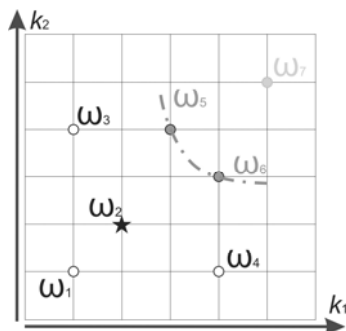


Рис. 3. Поиск второго Парето слоя в АМ

3<sup>0</sup>. **На третьем шаге алгоритма**, продолжим тактику ухудшения найденных  $\pi$ - слоев, заменяя в соответствующих окрестностях «0» на «1» и обнулим, соответственно строки 5 и 6 матрицы во всех окрестностях, кроме рассмот-

ренных ранее. Как легко заметить в матрице проявилось еще три нулевых столбца это  $O_2(\omega_2)$ ,  $O_3(\omega_3)$  и  $O_4(\omega_4)$ , очевидно, что они образуют третий Парето слой (рис. 4).

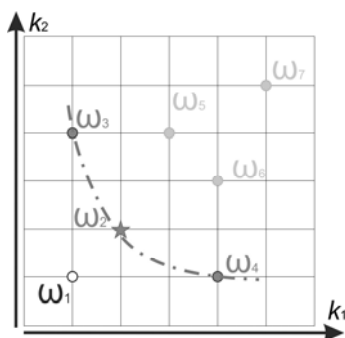


Рис. 4. Поиск третьего Парето слоя в АМ

Таблица 1

|            | $O_1(\omega_1)$ | $O_2(\omega_2)$ | $O_3(\omega_3)$ | $O_4(\omega_4)$ | $O_5(\omega_5)$ | $O_6(\omega_6)$ | $O_7(\omega_7)$ |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\omega_1$ | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_2$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_3$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_4$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_5$ | 0               | 1               | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_6$ | 0               | 1               | 0               | 1               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_7$ | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 1               | 0               |

Таблица 2

|            | $O_1(\omega_1)$ | $O_2(\omega_2)$ | $O_3(\omega_3)$ | $O_4(\omega_4)$ | $O_5(\omega_5)$   | $O_6(\omega_6)$   | $O_7(\omega_7)$   |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $\omega_1$ | 0               | 0               | 0               | 0               | 0                 | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ |
| $\omega_2$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 0                 | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ |
| $\omega_3$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 0                 | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ |
| $\omega_4$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 0                 | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ |
| $\omega_5$ | 0               | 1               | 1               | 0               | 0                 | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ |
| $\omega_6$ | 0               | 1               | 0               | 1               | 0                 | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ |
| $\omega_7$ | 0               | 0               | 0               | 0               | $1 \Rightarrow 0$ | $1 \Rightarrow 0$ | $0 \Rightarrow 1$ |

Таблица 3

|            | $O_1(\omega_1)$ | $O_2(\omega_2)$   | $O_3(\omega_3)$   | $O_4(\omega_4)$   | $O_5(\omega_5)$   | $O_6(\omega_6)$   | $O_7(\omega_7)$ |
|------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| $\omega_1$ | 0               | 0                 | 0                 | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ | $0 \Rightarrow 1$ | 1               |
| $\omega_2$ | 1               | 0                 | 0                 | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ | $0 \Rightarrow 1$ | 1               |
| $\omega_3$ | 1               | 0                 | 0                 | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ | $0 \Rightarrow 1$ | 1               |
| $\omega_4$ | 1               | 0                 | 0                 | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ | $0 \Rightarrow 1$ | 1               |
| $\omega_5$ | 0               | $1 \Rightarrow 0$ | $1 \Rightarrow 0$ | 0                 | $0 \Rightarrow 1$ | $0 \Rightarrow 1$ | 1               |
| $\omega_6$ | 0               | $1 \Rightarrow 0$ | 0                 | $1 \Rightarrow 0$ | $0 \Rightarrow 1$ | $0 \Rightarrow 1$ | 1               |
| $\omega_7$ | 0               | 0                 | 0                 | 0                 | $1 \Rightarrow 0$ | $1 \Rightarrow 0$ | 1               |

Так как полученный  $\pi_3$ - слой включает заданный вариант прототипа, поиск может быть завершен. При этом искомый слой будет включать варианты  $\{\omega_2, \omega_3, \omega_4\}$ . Особо заметим, что на поиске последующих возможных слоев, мы экономим машинное время т.к. слой, содержащий прототип уже найден.

В случае необходимости проведения полного расслоения  $\Omega$  алгоритм работает по индукции до полного заполнения АМ «1», что указывает на полное отсутствие в матрице доминирующих вариантов, которые можно было бы отнести к какому либо  $\pi$ - слою. Таким образом, поиск  $\pi$ -слоев можно считать завершенным.

Сформулируем правило поиска  $\pi$ - слоя, содержащего аналоги для прототипа.

#### Правило поиска $j$ -слоя:

Каждому очередному  $\pi$ - слою соответствует окрестность с «0» неупрощаемыми элементами («0»-столбец АМ). Для того чтобы перейти от одного слоя к другому, необходимо обнулить все строки у вариантов, соответст-

вующих «0»-окрестностям в только что найденном слое, а всем элементам окрестности, найденного  $\pi$ - слоя присвоить «1» и исключить из дальнейшего поиска, переводя их в число вариантов «хуже худших», сохраняя тем самым размерность исходной матрицы.

Рассмотрим пример выбора аналогов для ИК пожарного извещателя «DG-75», который примем за прототип:  $\omega_5 = \omega_n$ . Пусть множество вариантов  $\Omega$  представлено в виде реляционного отношения  $REL(k_1, k_2, k_3, k_4)$ , в строках которого находятся варианты  $\{\omega_i\} = \Omega$ , а по столбцам - значения каждого из показателей качества (ПК<sub>*i*</sub>) для  $\omega_i$ . Характеристики ИК пожарных извещателей, представленные в табл. 1 обозначают:

$k_1$  -  $Z_{ГОР}$ - зона обнаружения по горизонтали ( $\uparrow$ ),

$k_2$  -  $Z_{ВЕР}$  - зона обнаружения по вертикали, ( $\uparrow$ )

$k_3$  -  $I_{ПОК}$ - ток, потребляемый в режиме покоя, ( $\downarrow$ )

$k_4$  -  $I_T$  ток, потребляемый в режиме тревоги. ( $\downarrow$ )

Таблица 4

Исходное множество извещателей  $REL(k_1, k_2, k_3, k_4)$

| Вариант               | Наименование | $k_1 \uparrow = Z_{ГОР}, М$ | $k_2 \uparrow = Z_{ВЕР}, М$ | $k_3 \downarrow = I_{ПОК}, МА$ | $k_4 \downarrow = I_T, МА$ |
|-----------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------|----------------------------|
| $\omega_1$            | BV-301(D)    | 15,2                        | 18,3                        | 15                             | 18                         |
| $\omega_2$            | 476          | 12                          | 12                          | 18                             | 31                         |
| $\omega_3$            | ИО-409-10    | 12                          | 12                          | 12                             | 15                         |
| $\omega_4$            | DG85         | 11                          | 14                          | 10                             | 15                         |
| $\omega_5 = \omega_n$ | DG75         | 11                          | 11                          | 15                             | 25                         |
| $\omega_6$            | CX-502       | 15                          | 15                          | 15                             | 15                         |
| $\omega_7$            | Colt QUAD PI | 10                          | 10                          | 11                             | 12                         |
| $\omega_8$            | D&D          | 15                          | 18                          | 8,5                            | 13                         |
| $\omega_9$            | EX-35T       | 11                          | 11                          | 8                              | 18                         |

Далее, каждому из  $l$  показателей качества ставится в соответствие ассоциативная матрица  $\{AM_l\} = \{A_l^T\}$ , соответствующая фактор множеству  $\Phi(\Omega/k_1)$ , полученная из реляционной модели данных  $REL(k_1, k_2, k_3, k_4)$ . Причем, в строках  $AM_1$  располагаются описания альтернатив, а столбцы отображают окрестности  $\{O_i(\Omega/k_1)\}$ , где  $i = \{1, |\Omega|\}$ ;  $l = \{1, M\}$ .

Для приведенного примера (табл. 4), результирующая ассоциативная матрица фактор-множества для совокупности  $\{ПК_i\}$ :  $\Phi(\Omega/\{k_1, k_2,$

$k_3, k_4\})$  по критерию Парето  $\pi\{k_1, k_2, k_3, k_4\}$ , найденная по  $\pi$ - правилу [3], может быть представлена сильно транзитивным графом  $G_{\Omega}^T(\Omega, U^T)$  как  $A_{1234}^T = A_1^T \cap_{\pi} A_2^T \cap_{\pi} A_3^T \cap_{\pi} A_4^T$ .

Для перехода к нетранзитивному графу  $G_{\Omega}(\Omega, U)$  и матрице  $A_{1234}$  воспользуемся правилами, описанными в [1]. При этом получим результирующую АМ, отражающую диаграмму Хассе на  $\Omega$  (табл. 5).

В табл. 5 серым тоном обозначим элементы первого Парето слоя, соответствующие нулевым окрестностям, т.е. «0»- столбцам и отме-

тим, что к первому  $\pi_1$ - слою относятся элементы  $\{\omega_1, \omega_7, \omega_9\} \in \Omega_{\pi_1}$ .

Таблица 5

Ассоциативная матрица  $A_{1234}$

|            | $O_1(\omega_1)$ | $O_2(\omega_2)$ | $O_3(\omega_3)$ | $O_4(\omega_4)$ | $O_5(\omega_5)$ | $O_6(\omega_6)$ | $O_7(\omega_7)$ | $O_8(\omega_8)$ | $O_9(\omega_9)$ |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\omega_1$ | 0               | 1               | 0               | 0               | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_2$ | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_3$ | 0               | 1               | 0               | 0               | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_4$ | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_5$ | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_6$ | 0               | 1               | 0               | 0               | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_7$ | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_8$ | 0               | 0               | 1               | 1               | 0               | 1               | 0               | 0               | 0               |
| $\omega_9$ | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               |

Теперь обнулим строки соответствующие элементам  $\{\omega_1, \omega_7, \omega_8, \omega_9\}$   $\pi_1$ - слоя и заменим в столбцах-окрестностях этих элементов «0» → «1». При этом пометим столбцы с элементами

следующего, второго слоя другим тоном (табл. 6).

Как видно строка  $\omega_7$  содержит только нулевые элементы, потому она остается без изменений.

Таблица 6

Ассоциативная матрица  $A_{1234}$

|            | $O_1(\omega_1)$ | $O_2(\omega_2)$ | $O_3(\omega_3)$ | $O_4(\omega_4)$ | $O_5(\omega_5)$ | $O_6(\omega_6)$ | $O_7(\omega_7)$ | $O_8(\omega_8)$ | $O_9(\omega_9)$ |
|------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\omega_1$ | 1               | 1=>0            | 0               | 0               | 1=>0            | 0               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_2$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_3$ | 1               | 1               | 0               | 0               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_4$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_5$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_6$ | 1               | 1               | 0               | 0               | 1               | 0               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_7$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 0               | 0               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_8$ | 1               | 0               | 1=>0            | 1=>0            | 0               | 1=>0            | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_9$ | 1               | 0               | 0               | 0               | 1=>0            | 0               | 1               | 1               | 1               |

Как видно из табл. 6 элементы второго слоя  $\omega_3, \omega_4, \omega_6$  теперь стали концевыми и неулучшаемыми. Добавим их в карту слоев (табл. 7) и продолжим расслоение множества  $\Omega$  в АМ.

Для поиска элементов третьего слоя обнулим строки с вариантами второго  $\pi_2$ - слоя  $\{\omega_3, \omega_4, \omega_6\}$  и заменим «0» → «1» в столбцах второго

Таблица 7

Карта Парето слоев

| Номер слоя | Элементы слоя                            |
|------------|------------------------------------------|
| Слой 1     | $\omega_1, \omega_7, \omega_8, \omega_9$ |
| Слой 2     | $\omega_3, \omega_4, \omega_6$           |

слоя, сделав их самыми худшими. При этом элементами третьего слоя будут элементы  $\omega_2$  и  $\omega_5$  (табл. 8). По заданию вариант  $\omega_5 = \omega_{\Pi}$  явля-

ется прототипом, поэтому дальнейший поиск слоев с целью идентификации аналогов методом  $\pi$ -расслоений не имеет смысла.

Таблица 8

Ассоциативная матрица  $A_{1234}$ 

|            | $O_1(\omega_1)$ | $O_2(\omega_2)$   | $O_3(\omega_3)$ | $O_4(\omega_4)$ | $O_5(\omega_5)$   | $O_6(\omega_6)$ | $O_7(\omega_7)$ | $O_8(\omega_8)$ | $O_9(\omega_9)$ |
|------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| $\omega_1$ | 1               | $1 \Rightarrow 0$ | 1               | 1               | $1 \Rightarrow 0$ | 1               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_2$ | 1               | 0                 | 1               | 1               | 0                 | 1               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_3$ | 1               | $1 \Rightarrow 0$ | 1               | 1               | $1 \Rightarrow 0$ | 1               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_4$ | 1               | 0                 | 1               | 1               | 1                 | 1               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_5$ | 1               | 0                 | 1               | 1               | 0                 | 1               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_6$ | 1               | $1 \Rightarrow 0$ | 1               | 1               | $1 \Rightarrow 0$ | 1               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_7$ | 1               | 0                 | 1               | 1               | 0                 | 1               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_8$ | 1               | 0                 | 1               | 1               | 0                 | 1               | 1               | 1               | 1               |
| $\omega_9$ | 1               | 0                 | 1               | 1               | $1 \Rightarrow 0$ | 1               | 1               | 1               | 1               |

Карта для рассмотренных  $\pi_s$ -слоев представлена в табл. 9.

Таблица 9

Итоговая карта слоев

| Номер слоя | Элементы слоя                            |
|------------|------------------------------------------|
| Слой 1     | $\omega_1, \omega_7, \omega_8, \omega_9$ |
| Слой 2     | $\omega_3, \omega_4, \omega_6$           |
| Слой 3     | $\omega_2, \omega_5 = \omega_{\Pi}$      |

Из рассмотренного примера следует, что аналогом для заданного прототипа при его выборе методом Парето расслоений является вариант  $\omega_2$ . Основным свойством элементов лежащих в одном Парето слое является их несравнимость между собой. Другими словами варианты превосходят друг друга по одной из характеристик и проигрывают по другим. Результирующая реляционная таблица для выбранного аналога представлена в табл. 10.

Таблица 10

Результирующая таблица выбора аналогов

| Вариант                   | Наименование | $k_1 \uparrow = Z_{\text{ТОР}}, \text{М}$ | $k_2 \uparrow = Z_{\text{ВЕР}}, \text{М}$ | $k_3 \downarrow = I_{\text{ПОК}}, \text{МА}$ | $k_4 \downarrow = I_{\text{Т}}, \text{МА}$ |
|---------------------------|--------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|
| $\omega_2$                | 476          | 12                                        | 12                                        | 18                                           | 31                                         |
| $\omega_5 = \omega_{\Pi}$ | DG75         | 11                                        | 11                                        | 15                                           | 25                                         |

Таким образом, в работе предложена методика и алгоритм выбора аналогов по заданному прототипу с использованием  $\pi$ -расслоения на множестве исходных вариантов  $\Omega$ . Показано, что эффективность такого подхода при выборе аналогов весьма высока, так как не всегда возникает необходимость выявления всех  $\pi$ -слоев и остановка алгоритма происходит при достижении слоя, включающего прототип. Это дает возможность не просматривать все  $\pi$ -слои на  $\Omega$ , число которых равно числу максимальных

цепей в соответствующей диаграмме Хассе. Предлагаемый метод является целесообразным в случае выбора альтернатив, являющихся несравнимыми вариантами для Парето слоя, содержащего прототип.

В статье приведены этапы работы алгоритма и рассмотрен реальный пример выбора аналога пожарного извещателя.

В заключение следует отметить, что представленный материал является продолжением разработок серии методов выбора аналогов [1],

[2], [3], [4] с помощью неметрических критериев, в которых в частности используются подходы, позволяющие решать аналогичные задачи в графах частичного порядка, представленных фактор множествами.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кандырин, Ю. В. Многокритериальный анализ, выбор и структурирование вариантов в САПР. Учебное пособие для вузов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2013. – 320 с.
2. Кандырин Ю.В., Кононов М.Е. Алгоритм автоматизированного выбора аналогов по прототипам в частичных порядках // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т.16, №8(111). С. 137-145.
3. Кандырин Ю.В. Методы и модели многокритериального выбора вариантов в САПР. Учебное пособие для вузов. М.: Издательство МЭИ, 2004г. – 172с.
4. Кононов М.Е. Алгоритм установления частичного по-

рядка вариантов при решении задач выбора в САПР. Международная научно-практическая конференции «Теория и практика современной науки». Сборник докладов Вып.8. – Москва: Издательство «Спецкнига». 2012. – С.277-283.

5. Кононов М.Е. Выбор аналогов по прототипу по совокупности показателей качества в программе «Структура» // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т.20. №6(133). С. 75-83.

6. Камаев В.А., Андрейчиков Ю.Ю. Применение структурирования функции качества для изменения технических характеристик продукции на основе требований потребителей / Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах": межвуз. сб. науч. ст. ВолгГТУ. – Волгоград, Выпуск 1 №1(27) 2007. –С. 59-64.

7. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. – М.: Наука. Гл. Ред. Физ. –Мат. лит., 1986. –296 с.

8. Горбатов В.А. Теория частично упорядоченных систем. –М.: Сов. радио, 1976.–336 стр.

УДК 004.4'242

*А. Д. Кравец*

### РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ГЕНЕРАЦИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ\*

Волгоградский государственный технический университет

kad@gde.ru

В данной статье приведены результаты анализа современного состояния исследований и методов реализации проектов, связанных с мультиагентными системами. Выявлено наличие широкого интереса в проведении исследований мультиагентных систем среди российских и иностранных ученых. Проанализирован ряд крупных систем, функционал которых позволяет осуществлять проектирование мультиагентных систем, таким образом, являющихся аналогами разрабатываемому генератору интеллектуальных мультиагентных систем. В ходе проведенного анализа аналогов были выявлены недостатки существующего подхода к проектированию и разработке мультиагентных систем. В данной статье предложены методы решения данной проблемы путем создания новой методологии проектирования мультиагентных систем. В качестве демонстрации преимуществ данной методологии разработана платформа генерации интеллектуальных мультиагентных систем, основанная на компонентно-ориентированном подходе.

*Ключевые слова:* мультиагентные системы, генерация систем, интеллектуальные методы, визуальное программирование, компонентно-ориентированный подход.

*Andrey D. Kravets*

### DEVELOPMENT OF METHODS OF INTELLECTUAL MULTI-AGENT SYSTEM GENERATION

Volgograd State Technical University

Following article contains results of an analysis of current state in a field of researching and development methods of multi-agent based projects. It is shown that the object of multi-agent system is of great interest of a number of Russian and foreign scientists. In addition, the article contains analysis of a set of major systems which functionality allows performing of multi-agent systems development, so these systems are similar to an intellectual multi-agent systems generator in development. During the analogue analysis, authors identified several common gaps in current approach to the process of development and design of multi-agent system. Also the article contains a proposal of new methodology of multi-agent system development. A platform of intellectual multi-agent systems generation is developed as a demonstration of the methodology usage benefits. The platform uses a component-oriented approach as main generation method.

*Keywords:* multi-agent systems, system code generation, intellectual methods, visual programming, component-based approach.

\* Работа выполнялась при поддержке Министерства образования РФ (проект № 2.1917.2014К\_2014).

### Введение

Причиной изучения и создания мультиагентных систем обычно является потребность в организации работы набора программных или аппаратных агентов, таких как, например, программные агенты, осуществляющие свою деятельность в Интернете. В данном случае, Интернет можно рассматривать как основную платформу взаимодействия между распределенными вычислительными единицами, оснащенными механизмами мотивации и самообучения. На данный момент применение теоретического аппарата распространяется на информационные технологии, включая искусственный интеллект и распределенные системы, а также экономику, в основном, на микроэкономическом уровне, исследование операций, аналитическую философию, психологию и лингвистику. Одновременно с расширением теоретических познаний мультиагентных систем развивается и сфера практического применения этих знаний. Применение мультиагентного подхода является широкой и быстроразвивающейся областью программного обеспечения, особенно это развитие заметно в сочетании с технологией распределенных вычислений, которые охватывают примерно 80 % всего применения мультиагентных технологий в программном обеспечении [1, 2]. На сегодняшний день мультиагентные информационные системы (МАС), широко применяются в технике, медицине, сельском хозяйстве и экономике.

При определении понятия «агент» удобно опираться на представления об объекте, развитии школой объектно-ориентированного программирования (ООП). При этом компонентно-ориентированная парадигма программирования и проектирования открывает новые перспективы. Тогда искусственный агент может пониматься как метаобъект, наделенный некоторой долей субъектности, т. е. способный манипулировать другими объектами, создавать и уничтожать их, а также имеющий развитые средства взаимодействия со средой и себе подобными. Иными словами, это «активный объект» или «искусственный деятель», находящийся на заметно более высоком уровне сложности по отношению к традиционным объектам в ООП и использующий их для достижения своих целей путем управления, изменяющего их состояния. Соответственно минимальный набор базовых характеристик произвольного агента включает такие свойства, как: активность - спо-

собность к организации и реализации действий; автономность - относительная независимость от окружающей среды или наличие некоторой «свободы воли», связанное с хорошим ресурсным обеспечением его поведения; общительность - свойство вытекающее из необходимости решать свои задачи совместно с другими агентами и обеспечиваемая развитыми протоколами коммуникации; целенаправленность - свойство, предполагающее наличие собственных источников мотивации, а в более широком плане, специальных интенциональных характеристик. В настоящее время развиваются новые подходы к разработке алгоритмов поведения интеллектуальных агентов (ИА), основанные на визуальном программировании, которые оказываются более удобными и эффективными. Однако они пока недостаточно хорошо проработаны. Выбор многоагентной технологии в качестве базовой при проектировании распределенных систем доступа позволяет легко сочетать в единой системе как универсальные протоколы, так и любые другие частные средства работы с конкретными типами баз данных. Еще на этапе проектирования в такую систему закладывается гибкость, горизонтальная и вертикальная расширяемость, существенно упрощается решение задач распределения нагрузки между серверами. Использование интеллектуальных методов в структуре агента позволяет добиться наиболее адекватного, современного и оптимального результата действий агента.

### Анализ платформ и библиотек для создания мультиагентных систем

В целях реализации концепта универсальной генерации агента была выработана модель генерации, основанная на двух основных блоках: банка интеллектуальных методов и генератора кода агентов. Банк интеллектуальных агентов состоит из предварительно разработанных интеллектуальных методов, которые могут применяться в структуре агентов. Банк включает в себя методы различных направлений, таких как поведенческие алгоритмы, распознавание образов, интеллектуальный анализ информации и другие. В распоряжении генератора агентов находится ряд структур агентов и систем их взаимодействия. Основываясь на выбранных интеллектуальных методах, а также ключевых выборках и настройках, отражающих представление эксперта о поведении мультиагентной системы в среде, генератор создает код

системы, реализуя поставленные перед системой задачи.

В ходе работы авторами был исследован ряд популярных платформ и библиотек для создания мультиагентных систем [3]. В их число вошли: мультиагентная программируемая среда NetLogo, библиотека мультиагентной разработки JADE, ядро мультиагентной библиотеки MASON. Эти системы могут быть использованы в целях создания мультиагентной

системы с любой структурой агентов и их взаимодействия, однако, добавление новых или изменение существующих структур и алгоритмов, выполняемое в целях соответствия потребностям пользователей и сохранения адекватности по отношению к окружающей среде, вынуждает организацию, заинтересованную в данной мультиагентной системе (МАС), привлекать значительные ресурсы, начиная разработку практически с самого начала.

Таблица 1

Сравнительный анализ аналогов системы

| Наименование системы        | Критерии |   |   |   |   |   |   |   |   |
|-----------------------------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
|                             | 1        | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| AgentTool                   | 3        | 2 | 4 | 1 | 2 | 1 | 4 | 5 | 2 |
| Magenta Toolkit             | 1        | 4 | 5 | 1 | 3 | 1 | 4 | 1 | 2 |
| The Multi-Agent Systems Lab | 1        | 2 | 4 | 1 | 2 | 1 | 3 | 1 | 2 |
| CogniTAO                    | 5        | 4 | 1 | 3 | 5 | 3 | 3 | 4 | 5 |

Критерии сравнения аналогов системы:

- 1) Способность к внедрению интеллектуальных методов;
- 2) Скорость внесения изменений в структуру агентов;
- 3) Скорость изменения структуры межагентного взаимодействия;
- 4) Потребность в степени квалификации пользователя как программиста;
- 5) Способность к расширению мультиагентной системы;
- 6) Наличие возможностей повторного использования созданных структур;
- 7) Возможность подключения стандартных протоколов обмена данными;
- 8) Независимость от наличия и работы сторонних программ;
- 9) Кроссплатформенность.

Таким образом основными недостатками проанализированных систем являются:

– Потребность системы в наличии квалифицированного разработчика. На данный момент процесс разработки проекта мультиагентной системы требует безостановочного взаимодействия разработчика и эксперта, хотя некоторые жизненно важные для всего проекта шаги могут выполняться без привлечения эксперта. Примером такого шага может являться шаг выбора средства разработки, который критически влияет на структуру будущей системы и на процесс проектирования в целом. К тому же, многие мультиагентные системы избегают ис-

пользования сложной структуры агентов, использующей интеллектуальные методы и поведенческие алгоритмы, так как вопрос их использования решается разработчиком.

– Неспособность ряда систем к внедрению интеллектуальных методов. Несмотря на то, что некоторые системы преуспели в разработке поведенческих алгоритмов на своей платформе, ни одна из проанализированных систем не способна к реализации интеллектуальных методов, не связанных с управлением, таких как анализ данных, прогнозирование, распознавание образов.

#### Концепция универсальной платформы генерации МАС

На основе проведенного анализа был выработан ряд требований, позволяющих устранить выявленные недостатки при проектировании МАС, а именно [4]:

1) предоставить эксперту возможность выбора структуры агентов и системы их взаимодействия согласно его представлению о предметной области;

2) обеспечить возможность разработки агентов, основанных на интеллектуальных методах, что позволит системе адаптироваться к изменяющимся условиям функционирования;

3) выполнять генерацию агентов на основе подготовленного набора интеллектуальных методов при непосредственном участии эксперта.

Использование интеллектуальных методов позволит не только сделать систему более гиб-

кой, но также наиболее полно отразит идею передачи прав, что сделает систему генерации универсальной.

Данное исследование направлено на решение сложной научно-технической задачи: разработка методов и средств быстрого прототипирования интеллектуальных систем на основе мультиагентной технологии [5]. На сегодняшний день успешно применяется во множестве научных отраслей изначально разработанная для представления процессов взаимодействия набора объектов схожей структуры модель мультиагентной системы. Использование этой модели в сферах робототехники и интеллектуального анализа данных привело к выработке концепта агента, как объекта, наделенного правами пользователя и способного к совершению схожего спектра задач. Таким образом, агент является сложной системой, которая может быть основана на интеллектуальных методах, внутри системы мультиагентного взаимодействия. В то же время нарастающая сложность как самих агентов, так и мультиагентных систем требует разработки методики ускорения и оптимизации разработки мультиагентных систем. На данный момент процесс разработки проекта мультиагентной системы требует безостановочного взаимодействия разработчика и эксперта, хотя некоторые жизненно важные для всего проекта шаги могут выполняться без привлечения эксперта. Примером такого шага может являться шаг выбора средства разработки, который критически влияет на структуру будущей системы и на процесс проектирования в целом. К тому же, многие мультиагентные системы избегают использования сложной структуры агентов, использующей интеллектуальные методы и поведенческие алгоритмы, так как вопрос их использования решается разработчиком. Таким образом, предлагаемое решение включает следующие шаги [6]:

- разработка и тестирование моделей агентов, основанных на интеллектуальных методах;
- разработка набора структур взаимодействия агентов, адекватных различным задачам и сферам применения;
- разработка и тестирование метода универсальной генерации агентов мультиагентной системы.

Таким образом, задачей исследования является создание эффективной платформы разработки систем различной предметной и функциональной направленности, основанных на при-

менении компонент-ориентированного подхода и интеллектуальных мультиагентных технологий.

### Проектирование универсальной платформы генерации МАС

Достижение поставленных целей осуществляется путем реализации в разрабатываемом генераторе следующих функций [7]:

- составление наборов агентов на основе данных об их типизации;
- генерация кода агентов на основе современных алгоритмов, позволяющих получить наиболее адекватную реакцию на окружающую среду в кратчайшие сроки;
- генерация структур мультиагентных систем на основе набора требований эксперта;
- возможность обучения создаваемых мультиагентных модулей, основанное на внесении пользователем ключевых шаблонов и образцов функционирования, отражающих экспертное представление о функционировании системы в окружающей среде.

Система состоит из двух основных блоков, реализующих данные функции и необходимых для создания мультиагентной системы: банка интеллектуальных методов и генератора кода агентов [8]. Взаимодействие пользователя с системой реализовано на основе методологии визуального программирования.

Банк интеллектуальных агентов состоит из предварительно разработанных интеллектуальных методов, которые могут применяться в структуре агентов. Банк включает в себя методы различных направлений, таких как поведенческие алгоритмы, распознавание образов, интеллектуальный анализ информации и другие. Таким образом реализуется компонент – ориентированная парадигма проектирования.

В распоряжении генератора агентов находятся наборы типов агентов, готовых к генерации, и типов связей для организации структуры агентного взаимодействия в генерируемой системе [9]. С точки зрения генератора каждый агент может быть представлен в виде кортежа:

$$A = \{I, M, S, O\}, \quad (1)$$

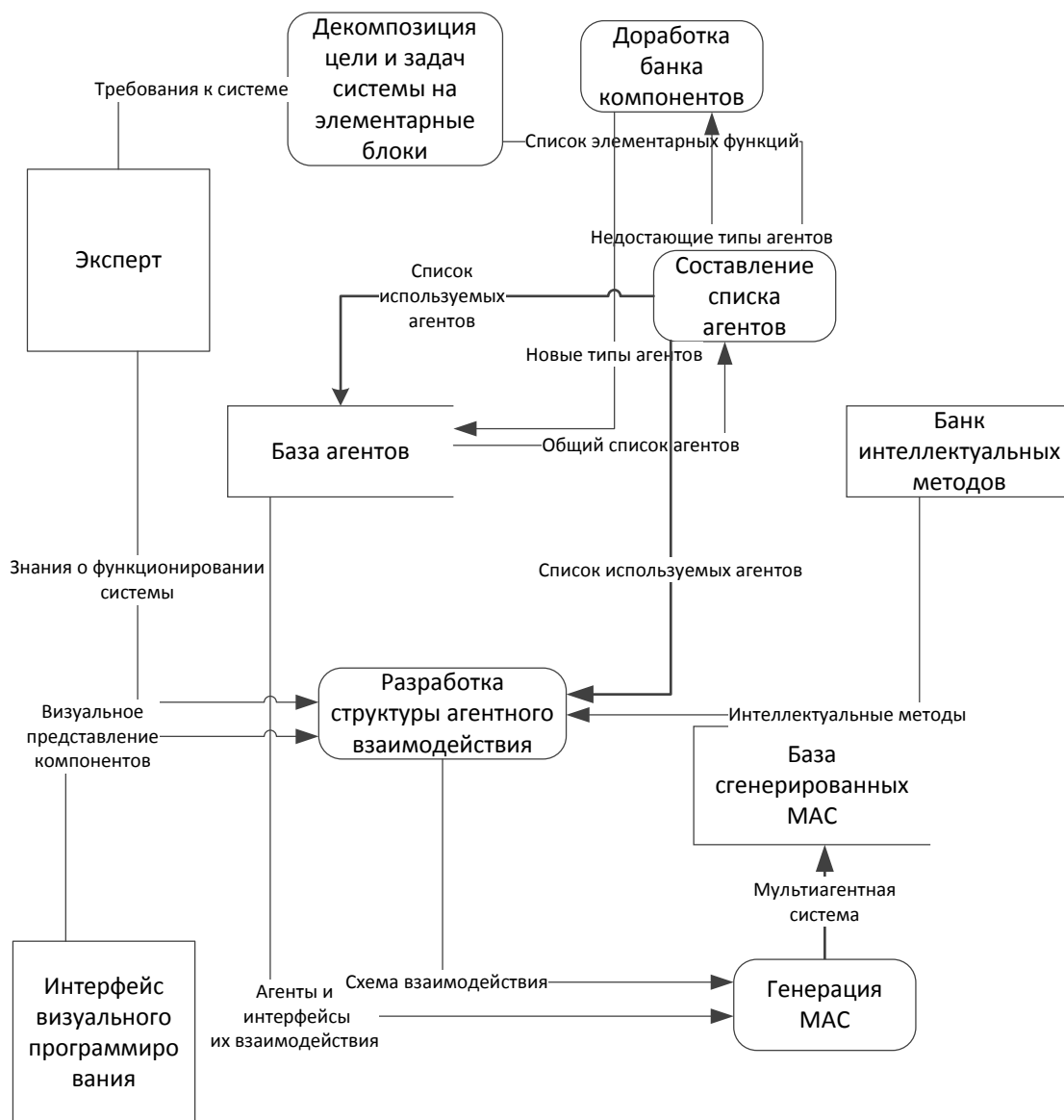
где  $I$  – множество входных параметров агента,  $M$  – примененный в агенте интеллектуальный метод, реализующий основную функцию агента,  $S$  – множество частных настроек агента, позволяющих уточнить поведение и спектр работы агента,  $O$  – множество выходных параметров агента. Основываясь на выбранных интеллектуальных методах, а также ключевых вы-



борках и настройках, отражающих представление эксперта о поведении МАС в среде, генератор создает код системы, реализуя поставленные перед системой задачи.

Использование методов визуального программирования в сочетании с банком предварительно разработанных компонентов не только позволяет эксперту предметной области осуществлять проектирование МАС, но и реализует идею быстрого прототипирования системы на основе мультиагентной технологии. Такой подход позволит раз-

работчику МАС максимально быстро получить рабочий вариант системы для проверки ее функционирования в целевой окружающей среде. Получение прототипа генерируемой системы позволит выбрать наиболее адекватный предполагаемому функционированию агента интеллектуальный метод и произвести более точную настройку каждого агента, что положительно отразится на качестве работы МАС в целом. Потoki данных, возникающие между подсистемами в ходе создания МАС, показаны на рисунке.



### Диаграмма потоков данных системы

## Результаты опытного внедрения универсальной платформы генерации МАС

Основным результатом данной работы авторы считают разработку методов, позволяющих использовать наборы предварительно соз-

данных компонентов при проектировании мультиагентных систем, что позволяет повысить эффективность процесса разработки и уменьшить потери при выполнении и управлении процессов, основанных на использовании мультиагентной системы.

Для проверки предложенных моделей и методов имеется экспериментальная база разработанных мультиагентных систем в следующих предметных областях: складская логистика, маркетинг, туризм, прогнозирование опасности

химических веществ, техническое обслуживание и ремонт оборудования [10]. На табл. 1 представлены результаты использования мультиагентных систем, разработанных с использованием генератора.

Таблица 2

Результаты внедрения генератора MAC

| Название MAC                                    | Время разработки MAC в часах |       |            | Использование клиентами (количество организаций) |       |            | Затраты на управление в тыс. руб. |       |            |
|-------------------------------------------------|------------------------------|-------|------------|--------------------------------------------------|-------|------------|-----------------------------------|-------|------------|
|                                                 | До                           | После | Уменьшение | До                                               | После | Увеличение | До                                | После | Уменьшение |
| MAC сбора и анализа данных о нанотехнологиях    | 16                           | 10    | 38%        | 18                                               | 21    | 17%        | 24.0                              | 15.6  | 35%        |
| MAC поддержки ремонта и содержания оборудования | 23                           | 10    | 57%        | 56                                               | 62    | 11%        | 115.0                             | 98.0  | 15%        |
| MAC CRM-системы туристического предприятия      | 7                            | 4.5   | 36%        | 34                                               | 43    | 26%        | 76.0                              | 56.2  | 26%        |

### Заключение

В ходе исследования была разработана методология проектирования MAC, позволяющая предоставить эксперту возможность выбора структуры агентов и системы их взаимодействия согласно его представлению о предметной области. Разработана система, благодаря использованию концепции визуального программирования, осуществляющая генерацию агентов и схемы их взаимодействия при непосредственном участии эксперта. Данная система также позволяет использовать в структуре агентов генерируемой MAC интеллектуальные методы и алгоритмы работы, что позволит улучшить взаимодействие с окружающей средой каждого агента и системы в целом. Таким образом в ходе исследования удалось достичь всех поставленных ранее задач, что позволит устранить имеющиеся недостатки процесса проектирования и существенно повысить качество разрабатываемых мультиагентных систем.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Кравец, А.Г.* Corporate intellectual capital management: learning environment method / Кравец А.Г., Гуртяков А.С., Кравец А.Д. // Multi Conference on Computer Science and Information Systems 2013 (Prague, Czech Republic, July 23-26, 2013) : Proceedings of the IADIS International Conference ICT, Society and Human Beings 2013 and IADIS International Conference e-Commerce 2013 / IADIS (International Association for Development of the Information Society). – [Prague], 2013. – P. 3-10.
2. *Кравец А.Г., Шевченко С.В., Кравец А.Д.* Генератор агентов мультиагентной системы сбора данных о перспективных технологиях // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Тематичний випуск «Системний аналіз, управління та інформаційні технології», 29'2012, стр. 92-97.
3. *Кравец, А.Д.* Проектирование генератора интеллектуальных мультиагентных систем / Кравец А.Д., Фомен-

ков С.А., Кравец А.Г. // Сборник научных трудов Sworld по материалам междунар. науч.-практ. конф. "Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2012". - 2012. - Т. 13, № 4. - С. 42-46.

4. *Кравец, А.Г.* Usage of multi-agent system generator in component-based automated system and modules development / Кравец А.Г., Кравец А.Д., Фоменков С.А. // Congress on Intelligent Systems and Information Technologies IS-IT'14 (Divnomorskoe, Russia, 2014, September, 2-9) : proceedings. In 4 vol. Vol. 4 / Russian Association of Artificial Intelligence, Southern Federal University. - Moscow, 2014. - С. 79. - Англ.

5. *Кравец, А.Г.* Component-Based Approach to Multi-Agent System Generation / Кравец А.Г., Фоменков С.А., Кравец А.Д. // Knowledge-Based Software Engineering : Proceedings of 11th Joint Conference, JCKBSE 2014 (Volgograd, Russia, September 17-20, 2014): Springer International Publishing, 2014. – P. 483-490. – (Series: Communications in Computer and Information Science ; Vol. 466).

6. *Alla G. Kravets, Andrey D. Kravets, Sergey A. Fomenkov, Valeriy A. Kamaev.* Multi-agent systems component-based generator: development approach. IADIS Applied Computing 2013 conference, Forth Worth, Texas, USA. – 2013.

7. *А. Д. Кравец* Генерация интеллектуальных агентов / А. Д. Кравец, Д.А. Абрамичев // Конференция-конкурс научных, конструкторских и технологических работ студентов ВолгГТУ : тез. докл. / редкол. : В. И. Лысак (отв. ред.) [и др.] ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – С. 45-48.

8. *Кравец, А.Г.* Intelligent Multi-Agent Systems Generation / Кравец А.Г., Кравец А.Д., Коротков А.А. // World Applied Sciences Journal (WASJ). - 2013. - Vol. 24, Spec. Issue 24 : Information Technologies in Modern Industry, Education & Society. - С. 98-104.

9. *Кравец А.Д.* Разработка модели генерации интеллектуальных агентов / А.Д. Кравец, С.А. Фоменков, А.Г. Кравец // Сборник научных трудов SWORLD. – 2012. – т.5 №3. – С. 59–61.

10. *Кизим, А.В.* Генерация интеллектуальных агентов для задач поддержки технического обслуживания и ремонта / Кизим А.В., Кравец А.Д., Кравец А.Г. // Известия Томского политехнического университета [Тема выпуска "Управление, вычислительная техника и информатика"]. - 2012. - Т. 321, № 5. - С. 131-134.

## ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.942, 519.246, 519.25, 519.872.8

*С. В. Гаевой, С. А. Фоменков*

### МОДЕЛИ АППРОКСИМАЦИИ НАГРУЗКИ КЛАСТЕРА НА ПРИМЕРЕ LANL CM5 ДЛЯ СТОХАСТИЧЕСКОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

gaevserge@mail.ru

В связи с актуальностью вопроса высокопроизводительных вычислений актуально моделирование работы таких систем. Вопросы моделирования кластерных систем в данной работе будут рассмотрены с позиции аппроксимации входного потока заданий. В настоящей статье рассматривается другой аспект – построение случайных вариантов нагрузки для стохастического моделирования подобных систем. Предложены, сравнены и оценены пять модель аппроксимации нагрузки кластерных систем.

*Ключевые слова:* кластерная система, имитационное моделирование, нагрузка, гипер-гамма-распределение, немасштабируемые задания, метод моментов, метод наибольшего (максимального) правдоподобия.

*S. V. Gaevoy, S. A. Fomenkov*

### THE APPROXIMATIONS FOR A WORKLOAD OF CLUSTER SYSTEMS FOR STOCHASTIC SIMULATION

Volgograd State Technical University

Due to a wide spread of the high performance computing simulation of such systems is topical. In this paper the issue of this simulation is considered as related to approximating incoming jobs. An issue of generating job streams is considered. Some models. Five models of cluster workload are proposed, compared and assessed.

*Keywords:* the cluster system, the simulation, the workload, hypergamma distribution, rigid jobs, the method of moments, the maximum likelihood.

#### Введение

В [1, 2] приведены результаты исследования работы элемента кластерных и Грид-систем путем детерминированного имитационного моделирования. В настоящей работе осуществляется построение стохастической модели нагрузки. В кластерную систему поступают задания для выполнения. Кластера построены из вычислительных машин равной производительности [3]. Каждое задание может исполняться параллельно на нескольких машинах. Будем использовать терминологию [1, 2]. Количество вычислительных машин, требуемое заданием, прописано в нем в момент создания и называется шириной. Длиной задания назовем время его выполнения на требуемом числе машин. Описание потока заданий содержит время прихода задания, его ширину и длину. Будем оперировать не временем прихода заданий, а временем между приходами [4]. Целью ставится аппроксимации стохастических величин: интервалов между приходами заданий, длин и ширин

заданий. Предсказание нагрузки необходимо для моделирования обслуживания на кластерных системах, поэтому оно сопровождается моделированием выполнения этой нагрузки в соответствии с [1, 2]. В качестве эталона мы берем известную нагрузку кластера из [1].

#### Аппроксимация входного потока и моделирование

##### 1. Используемые распределения

В настоящей работе будут рассмотрены несколько распределений, которые дали относительно хорошие результаты. В [4] был рассмотрен набор распределений и способов аппроксимации ими. Методами аппроксимации являются метод моментов (ММ) и метод наибольшего правдоподобия (МНП). В качестве распределений были взяты следующие (из [4]): 1)  $M$  - экспоненциальное распределение (оценки ММ и МНП совпадают); 2)  $^{LN}$  - логнормальное распределение (ММ); 3)  $^{LA}$  - логарифмическая кусочно-линейная аппроксимация,

которой не было в [4]; 4)  $\Gamma$  - гамма-распределение (ММ); 5)  $H\Gamma(2)$  - гипер-гамма-распределение с 2 ветками (МНП).

Идея  $LA$  взята из [5], где аппроксимируют не саму случайную величину, а ее логарифм. Преобразуем неотрицательную случайную величину  $X$  в неотрицательную случайную величину  $Y = \ln(1 + X)$ . Область значений величины  $Y$  разобьем на отрезки  $[0; \zeta]$ ,  $[\zeta; 2\zeta]$ ,  $[2\zeta; 3\zeta]$  и т. д. На каждом из них будем полагать величину  $Y$  равномерно распределенной. Вероятность попадания величины  $Y$  на отрезок можно принять равной доли измерений, попадающих на этот отрезок (при попадании на границу надо засчитывать по 0,5 попаданий в каждый из отрезков). Используя эти данные, можно сгенерировать случайную величину  $Y$  и по ней найти  $X$ . По умолчанию примем  $\zeta = 0,1$ . Использование  $LA$  при наличии других подходящих вариантов является плохим решением из-за большого объема данных.

## 2. Модели аппроксимации нагрузки

В данной статье нами представлены пять моделей нагрузки [6]. Для описания моделей будет использована наша модификация нотации Кендалла [7]. В [8] предоставлены логи работы реальных вычислительных систем, где указываются времена прихода заданий, длины и ширины. Будет использован лог LANL-CM5-1994-3.1-cln.swf, который содержит задания ширины 32, 64, 128, 256, 512, 1024 и принадлежит кластеру шириной 1024.

Ширину и длину нельзя рассматривать как независимые величины. Т. к. ширина может принимать конечное число значений, вероятность того, что задание обладает некоторой шириной, можно определить в виде массива значений. Для каждой ширины нам потребуется использовать свое распределение длины задания. Законы этих распределений могут быть различными, однако для удобства будем полагать их одинаковыми, но различающимися по параметрам:

1) запись  $A/GB^*/1024$  будет означать следующее. Задания приходят по закону  $A$ . Для каждой задачи после этого определяется ширина. В качестве вероятностей появления заданий конкретной ширины можно использовать доли заданий соответствующей ширины из логa (табл. 1). Длина задания для каждой из

конкретных ширин определяется законом  $B$  с определенными для этой ширины параметрами. Это первая модель стохастической нагрузки;

Таблица 1

Вероятности появления заданий некоторой ширины

| Ширина | Вероятность | Ширина | Вероятность |
|--------|-------------|--------|-------------|
| 32     | 0,51111     | 256    | 0,06441     |
| 64     | 0,19522     | 512    | 0,06931     |
| 128    | 0,15989     | 1024   | 0,00005     |

2) в соответствии с [9] для каждой ширины заданий введем свой поток входных заявок, полагая эти потоки независимыми. Обозначим эту модель  $A/GB^*/1024$ . В данной модели нет необходимости хранить доли задач разной ширины. Эти параметры уже неявно заложены в интенсивности потоков;

3) [5] предлагают анализировать поток входных заявок модели № 1 как нестационарный. В данной работе будет рассмотрено изменение интенсивности потока заявок в течение недели. На рис. 1 видны явные колебания интенсивности в течение семи дней. Будем полагать, что интенсивность остается постоянной в течение получаса (как в [5]): это один из подходов имитации нестационарных пуассоновских потоков [10].

Для генерации интервала между событиями нестационарного пуассоновского потока можно использовать решение уравнения [10]:

$$\int_{t_0}^t \lambda(t) dt = -\ln R, \text{ где } t_0 - \text{точка отсчета (обычно}$$

предыдущее событие),  $t$  - искомое время,  $R$  - случайная величина, равномерно распределенная по полуинтервалу  $(0; 1]$ . В левой части этого уравнения находится величина, которую можно назвать приведенным временем между заданиями: одна минута между заданиями в часы пик, будет в некотором смысле длиннее той же минуты в часы простоя. В правой стороне этого уравнения находится случайная величина, распределенная по экспоненте, с единичным матожиданием. В [5] вместо экспоненциально распределенной величины, по сути, предлагается использовать другие. Уравнение

$$\text{преобразуется в } \int_{t_0}^t \lambda(t) dt = R^*, \text{ где } R^* - \text{неотрицательная случайная величина с единичным}$$

матожиданием. Назовем ее случайным приведенным временем между приходами заданий. При  $\lambda(t) = \lambda$  решение имеет вид  $t = t_0 + R \cdot \lambda$ , что соответствует рекуррентному потоку собы-

тий Пальма со средним временем между событиями  $\lambda^{-1}$ . Обозначим эти модели как  $\sim A/B\wedge/1024$ ;

Интенсивность прихода заданий в течение недели

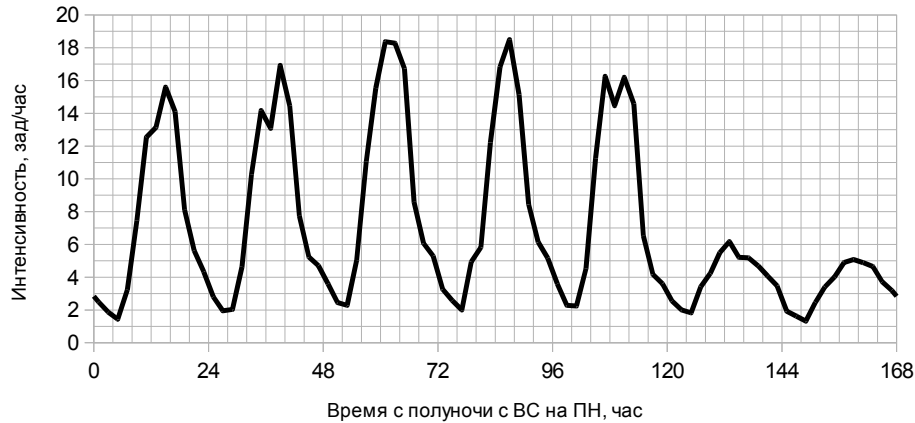


Рис. 1. Изменение интенсивности потока заявок в течение недели для LANL CM5

Интенсивность прихода заданий разной ширины в течение недели

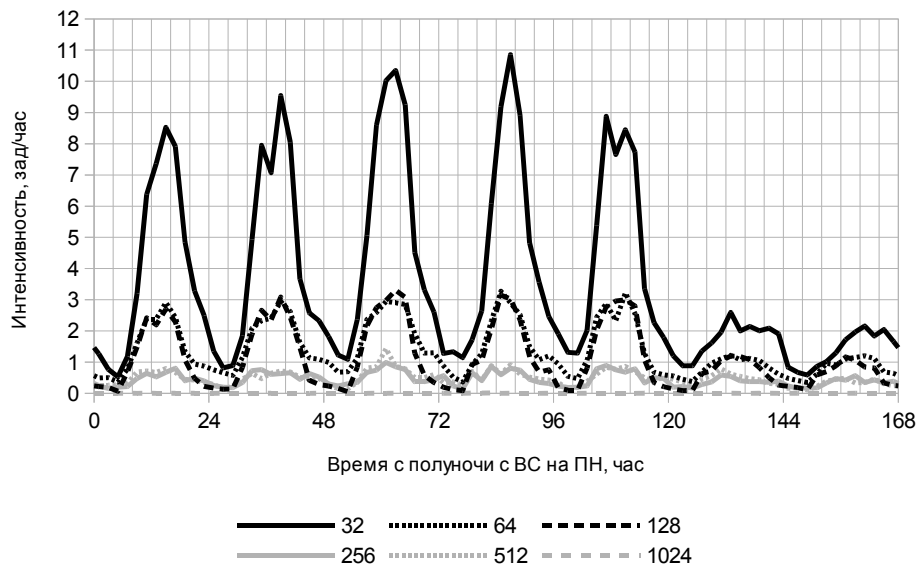


Рис. 2. Изменение интенсивности потоков заявок разной ширины в течение недели для LANL CM5

4) четвертая модель объединяет две предыдущие: разделение потоков заданий и нестационарность. У каждого подпотока будет своя интенсивность как функция времени (рис. 2), поэтому вероятности прихода заданий разной ширины тоже будут функциями времени. Будем обозначать эти модели как  $\sim A/B\wedge/1024$ ;

5) интенсивность появления заданий шириной 64 примерно пропорциональна интенсив-

ности появления заданий шириной 32 (рис. 2), поэтому логично отбросить зависимость вероятности появления задания определенной ширины от времени суток. В этом случае  $\lambda_i(t) = \gamma_i \cdot \lambda(t)$ , где  $\lambda_i(t)$  - интенсивность появления заданий  $i$ -й ширины,  $\lambda(t)$  - интенсивность появления заданий,  $\gamma_i$  - вероятность появления (доля) заданий  $i$ -й ширины. Пятая модель представляет собой упрощение модели

№ 4 (только одна интенсивность). Будем обозначать эти модели префиксом как  $\sim \$A/\$B^{}/1024$

### 3. Аппроксимации кластера LANL CM5

Функции распределения аппроксимации времени между приходами заданий для кластера LANL CM5 изображены на рис. 3, а на рис. 4 представлены аналогичные графики для длины заданий шириной 32. Более широкие задания встречаются реже, поэтому эмпирическая функция распределения (ЭФР) будет для них менее гладкой (рис. 5). График логарифмической аппроксимации не виден на рис. 3–5, т. к.

полностью скрыт графиком ЭФР. Для модели № 2 необходимо воссоздать свой собственный поток входных заявок (примеры на рис. 6 и 7). Для приведенного времени между приходами заданий из модели №3 аппроксимация представлена на рис. 8. Для  $IA$  использовался шаг дискретизации 0,01. Этот график полностью совпал с ЭФР. Аналогичным образом осуществлена аппроксимация приведенных временем между приходами заданий для моделей № 4 и 5, но в виду ограничений на размер эти данные здесь не приводятся.

Функции распределения интервала времени между приходами заданий

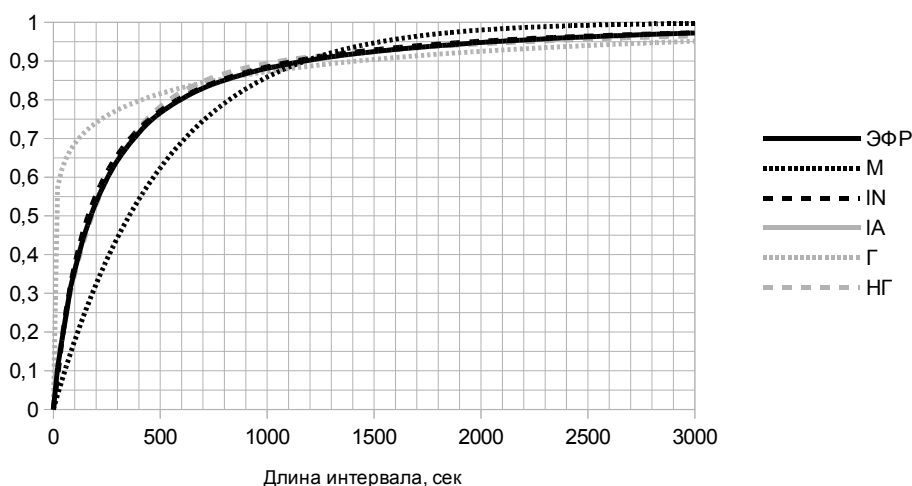


Рис. 3. Функции распределения интервала времени между приходами заданий для кластера LANL CM5

Функции распределения длины заданий шириной 32

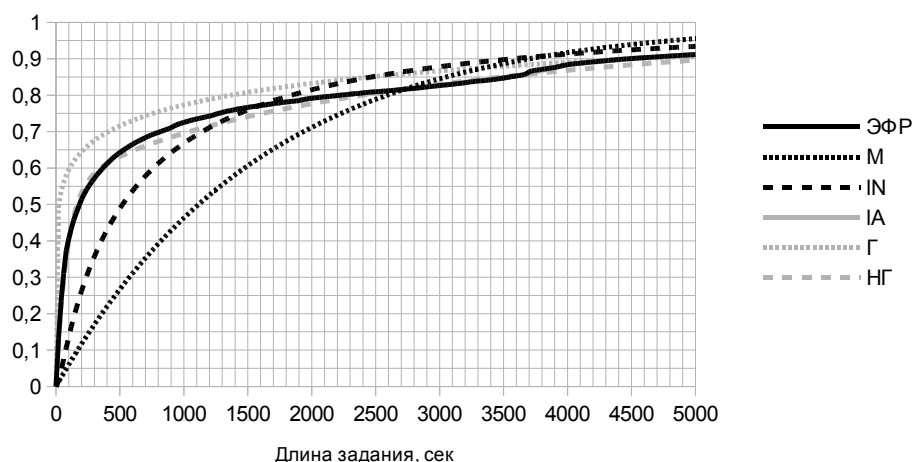


Рис. 4. Функции распределения длины заданий шириной 32 для кластера LANL CM5

## Функции распределения длины заданий шириной 512

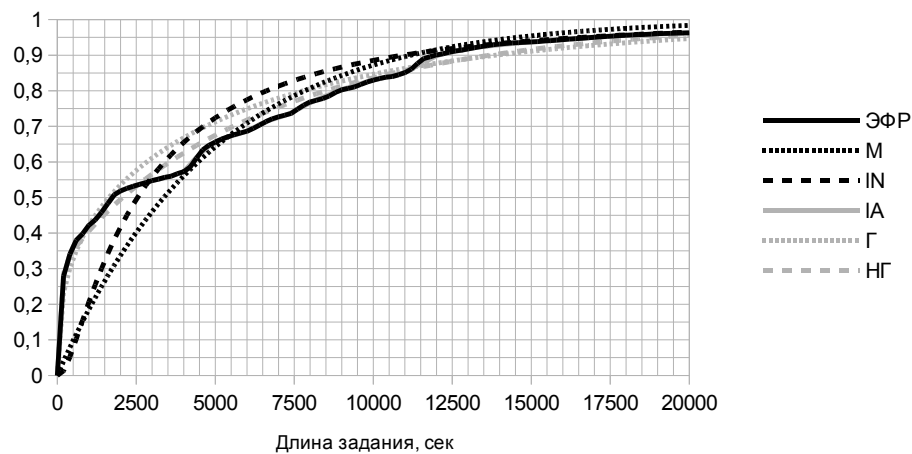


Рис. 5. Функции распределения длины заданий шириной 512 для кластера LANL CM5

## Функции распределения интервала времени между приходами заданий шириной 32

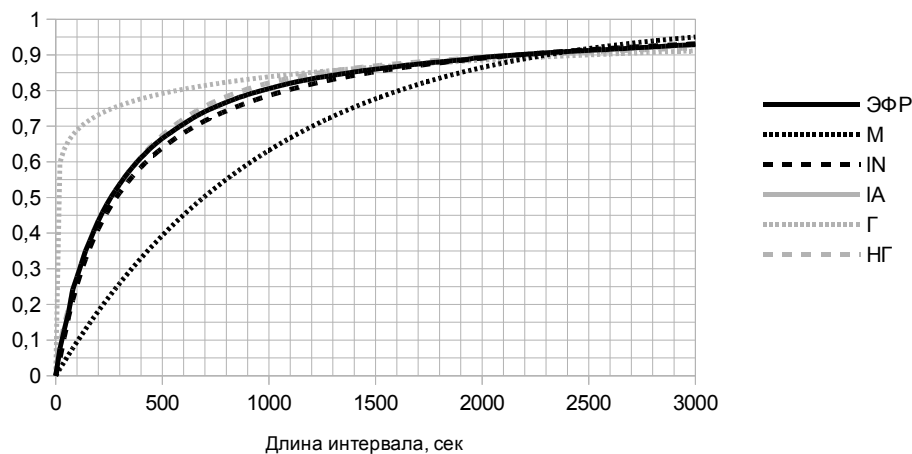


Рис. 6. Функции распределения интервала времени между приходами заданий шириной 32 для кластера LANL CM5

## Функции распределения интервала времени между приходами заданий шириной 512

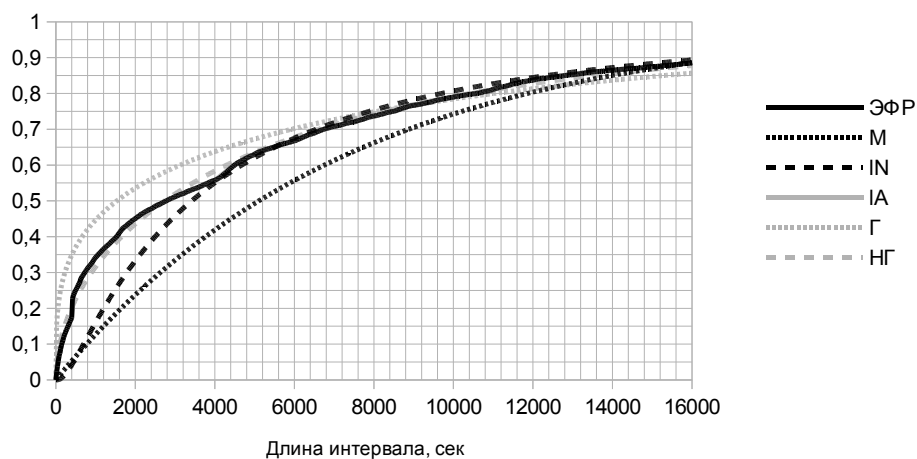


Рис. 7. Функции распределения интервала времени между приходами заданий шириной 512 для кластера LANL CM5

Функции распределения приведенного интервала времени  
между приходами заданий

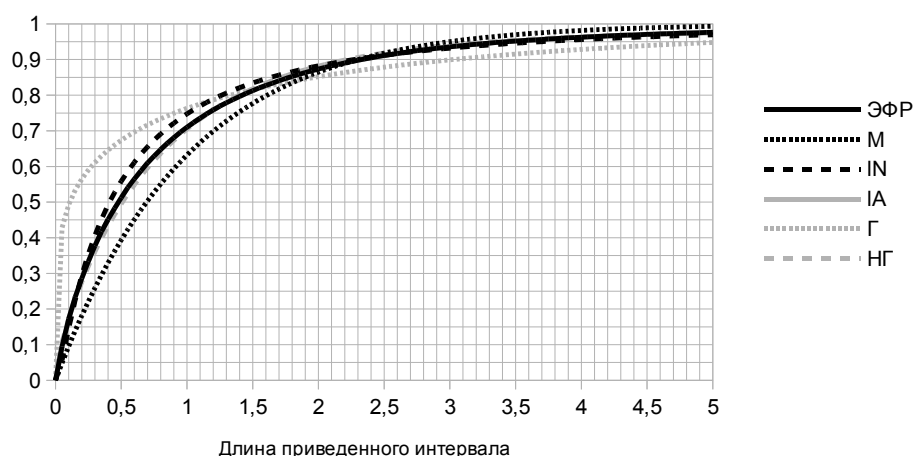


Рис. 8. Функции распределения приведенного интервала времени между приходами заданий для кластера LANL CM5

#### 4. Имитация полученных нагрузок

Для моделей нагрузки были проведены имитации обслуживания при максимальной погрешности 5 %. Отдельно было проведено детерминированное моделирование исходной нагрузки для сравнения как эталонное.

В модели № 1 (табл. 2) очередь моделируется неправильно, но выполнение заданий моделируется достаточно точно. В модели № 2 (табл. 3) очередь стала моделироваться гораздо лучше для случаев  $\Gamma$  и  $НГ$ . Данные результаты уже приемлемы. Из-за отсутствия последствия нет смысла разделять пуассоновский

поток на несколько подпотоков, но это оправдано для проверки достоверности модели (см. табл. 2 и 3). При допущении нестационарности (модель № 3) все модели дают приемлемый результат (табл. 4). При модели № 4 (табл. 5) все аппроксимации, кроме  $\sim M/M^{1/1024}$ , дают результат лучше, чем в предыдущем случае. Переход от № 4 к № 5 (табл. 6) приводит к резкому падению качества, поэтому оно нецелесообразно. Разделение пуассоновского потока снова бессмысленно, т. к. ведет к вырождению в модель № 3, но дается для контроля модели (см. табл. 2 и 6).

Таблица 2

Испытание моделей № 1 для LANL CM5

|                                                 | $M/M^{1/1024}$ | $\Gamma/\Gamma^{1/1024}$ | $IN/IN^{1/1024}$ | $НГ/НГ^{1/1024}$ | $IA/IA^{1/1024}$ | Эталон  |
|-------------------------------------------------|----------------|--------------------------|------------------|------------------|------------------|---------|
| Среднее время пребывания задания в системе, сек | 4220,01        | 7206,44                  | 6276,45          | 5844,01          | 6375,13          | 8876,86 |
| Среднее время ожидания в очереди, сек           | 1638,02        | 4625                     | 3695,99          | 3263,03          | 3791,27          | 6295,27 |
| Среднее время обслуживания, сек                 | 2581,99        | 2581,44                  | 2580,46          | 2580,98          | 2583,85          | 2581,59 |
| Среднее число используемых узлов                | 761,628        | 761,586                  | 761,426          | 760,127          | 762,228          | 761,369 |
| Среднее число заданий под обслуживанием         | 5,05946        | 5,05872                  | 5,05989          | 5,05155          | 5,05823          | 5,05866 |
| Среднее число заданий в системе                 | 8,26992        | 14,1272                  | 12,3112          | 11,4404          | 12,4835          | 17,3944 |
| Средняя длина очереди                           | 3,21046        | 9,06848                  | 7,25132          | 6,38882          | 7,42524          | 12,3357 |



Таблица 3

## Испытание моделей №2 для LANL CM5

|                                                 | $\$M/\$M^{\wedge}/1024$ | $\$Г/\$Г^{\wedge}/1024$ | $\$IN/\$IN^{\wedge}/1024$ | $\$НГ/\$НГ^{\wedge}/1024$ | $\$IA/\$IA^{\wedge}/1024$ | Эталон  |
|-------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------|
| Среднее время пребывания задания в системе, сек | 4232,3                  | 8338,9                  | 6639,66                   | 8957,71                   | 12380,3                   | 8876,86 |
| Среднее время ожидания в очереди, сек           | 1651,05                 | 5759,2                  | 4059,06                   | 6340,28                   | 9733,35                   | 6295,27 |
| Среднее время обслуживания, сек                 | 2581,25                 | 2579,69                 | 2580,6                    | 2617,43                   | 2646,91                   | 2581,59 |
| Среднее число используемых узлов                | 761,899                 | 761,618                 | 762,008                   | 778,279                   | 797,294                   | 761,369 |
| Среднее число заданий под обслуживанием         | 5,06047                 | 5,05866                 | 5,06192                   | 5,12017                   | 5,18534                   | 5,05866 |
| Среднее число заданий в системе                 | 8,29803                 | 16,3577                 | 13,0281                   | 17,5292                   | 24,269                    | 17,3944 |
| Средняя длина очереди                           | 3,23757                 | 11,299                  | 7,96619                   | 12,409                    | 19,0837                   | 12,3357 |

Таблица 4

## Испытание моделей №3 для LANL CM5

|                                                 | $\sim M/\$M^{\wedge}/1024$ | $\sim Г/\$Г^{\wedge}/1024$ | $\sim IN/\$IN^{\wedge}/1024$ | $\sim НГ/\$НГ^{\wedge}/1024$ | $\sim IA/\$IA^{\wedge}/1024$ | Эталон  |
|-------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------|
| Среднее время пребывания задания в системе, сек | 7918,89                    | 10116,5                    | 9638,09                      | 9377,6                       | 9836,96                      | 8876,86 |
| Среднее время ожидания в очереди, сек           | 5337,39                    | 7536,18                    | 7056,89                      | 6796,97                      | 7254,32                      | 6295,27 |
| Среднее время обслуживания, сек                 | 2581,5                     | 2580,36                    | 2581,21                      | 2580,63                      | 2582,63                      | 2581,59 |
| Среднее число используемых узлов                | 760,997                    | 760,213                    | 761,607                      | 761,126                      | 763,094                      | 761,369 |
| Среднее число заданий под обслуживанием         | 5,05754                    | 5,05616                    | 5,06146                      | 5,05768                      | 5,06315                      | 5,05866 |
| Среднее число заданий в системе                 | 15,5159                    | 19,8273                    | 18,9033                      | 18,382                       | 19,2884                      | 17,3944 |
| Средняя длина очереди                           | 10,4583                    | 14,7711                    | 13,8419                      | 13,3244                      | 14,2253                      | 12,3357 |

Таблица 5

## Испытания моделей №4 для LANL CM5

|                                                 | $\sim M/\$M^{\wedge}/1024$ | $\sim Г/\$Г^{\wedge}/1024$ | $\sim IN/\$IN^{\wedge}/1024$ | $\sim НГ/\$НГ^{\wedge}/1024$ | $\sim IA/\$IA^{\wedge}/1024$ | Эталон  |
|-------------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|---------|
| Среднее время пребывания задания в системе, сек | 6319,21                    | 9493,69                    | 8470,49                      | 8455,26                      | 9058,33                      | 8876,86 |
| Среднее время ожидания в очереди, сек           | 3737,17                    | 6913,5                     | 5888,24                      | 5873,79                      | 6475,69                      | 6295,27 |
| Среднее время обслуживания, сек                 | 2582,04                    | 2580,2                     | 2582,26                      | 2581,47                      | 2582,63                      | 2581,59 |
| Среднее число используемых узлов                | 761,905                    | 760,841                    | 761,513                      | 761,423                      | 762,836                      | 761,369 |
| Среднее число заданий под обслуживанием         | 5,05969                    | 5,05927                    | 5,06135                      | 5,0607                       | 5,06026                      | 5,05866 |
| Среднее число заданий в системе                 | 12,3841                    | 18,6192                    | 16,6045                      | 16,5777                      | 17,7512                      | 17,3944 |
| Средняя длина очереди                           | 7,32436                    | 13,5599                    | 11,5431                      | 11,517                       | 12,6909                      | 12,3357 |

Таблица 6

Испытание моделей №5 для LANL CM5

|                                                 | $\sim M/M^{1/024}$ | $\sim F/F^{1/024}$ | $\sim N/N^{1/024}$ | $\sim H/H^{1/024}$ | $\sim A/A^{1/024}$ | Эталон   |
|-------------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------|
| Использование                                   | 0,744404           | 0,743568           | 0,742938           | 0,743111           | 0,744985           | 0,743525 |
| Среднее время пребывания задания в системе, сек | 7966,96            | 10998,7            | 9937,58            | 10146,3            | 10666              | 8876,86  |
| Среднее время ожидания в очереди, сек           | 5384,59            | 8417,64            | 7356,94            | 7564,95            | 8083,18            | 6295,27  |
| Среднее время обслуживания, сек                 | 2582,37            | 2581,04            | 2580,64            | 2581,37            | 2582,82            | 2581,59  |
| Среднее число используемых узлов                | 762,27             | 761,414            | 760,769            | 760,945            | 762,864            | 761,369  |
| Среднее число заданий под обслуживанием         | 5,06172            | 5,05925            | 5,05759            | 5,05747            | 5,06401            | 5,05866  |
| Среднее число заданий в системе                 | 15,6175            | 21,5625            | 19,4782            | 19,8814            | 20,9155            | 17,3944  |
| Средняя длина очереди                           | 10,5558            | 16,5033            | 14,4207            | 14,8239            | 15,8515            | 12,3357  |

### Заключение

Таким образом, были предложены пять моделей входного потока заданий кластера и способы аппроксимации этих моделей. Моделирование было проведено на примере LANL CM5: были продемонстрированы различные модели нагрузки и в частном случае были определены оптимальные варианты. Лучшие результаты показала модель  $\sim H/H^{1/024}$ , но неплохой аппроксимацией является и  $\sim F/F^{1/024}$ .

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гаевой, С. В. Детерминированная имитационная модель кластеров грид-системы, обслуживающих задания / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х., Лукьянов В.С. // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2014. - № 6. - С. 39-43.
2. Детерминированная имитационная модель кластеров грид-системы для сравнения эффективности использования эвристик распределения заданий / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х., Фоменков С.А., Лукьянов В.С. // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2014. - № 2. - С. 148-157.
3. Имитационное моделирование грид-систем : монография / Лукьянов В.С., Андреев А.Е., Жариков Д.Н., Островский А.А., Гаевой С.В.; ВолгГТУ. - Волгоград, 2012. - 215 с.
4. Гаевой, С.В. Аппроксимация времени выполнения заданий на примере вычислительного кластера LPC EGEE 2004 / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х., Фоменков С.А. //

Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 21 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - № 12 (139). - С. 135-141.

5. Lublin, U. The Workload on Parallel Supercomputers: Modeling the Characteristics of Rigid Jobs [Электронный ресурс] / U. Lublin, D. G. Feitelson // The Rachel and Selim Benin School of Computer Science and Engineering. - [2013]. - Режим доступа : <http://www.cs.huji.ac.il/~feit/papers/Rigid01TR.pdf>

6. Гаевой, С. В. Моделирование работы вычислительного кластера на примере LANL CM5 [Электронный ресурс] / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х. // SCI-ARTICLE.RU : электронный периодический научный журнал. - 2013. - № 3 (ноябрь). - С. 304-313. - Режим доступа : [http://sci-article.ru/stat.php?i=modelirovanie\\_raboty\\_vychislitelnogo\\_klastera\\_na\\_primere\\_LANL\\_CM5](http://sci-article.ru/stat.php?i=modelirovanie_raboty_vychislitelnogo_klastera_na_primere_LANL_CM5)

7. Kendall's notation [Электронный ресурс] // Wikipedia. - [2013]. - Режим доступа : [http://en.wikipedia.org/wiki/Kendall%27s\\_notation](http://en.wikipedia.org/wiki/Kendall%27s_notation)

8. Logs of Real Parallel Workloads from Production Systems [Электронный ресурс] // The Rachel and Selim Benin School of Computer Science and Engineering. - [2013]. - Режим доступа : <http://www.cs.huji.ac.il/labs/parallel/workload/logs.html>

9. Modeling of Workload in MPPs [Электронный ресурс] / J. Jann [et al.] // The Rachel and Selim Benin School of Computer Science and Engineering. - [2013]. - Режим доступа : <http://www.cs.huji.ac.il/~feit/parsched/jsspp97/p-97-5.pdf>

10. Фоменков, С. А. Математическое моделирование системных объектов: учеб. пособ. (гриф). Доп. УМО вузов по университетскому политехн. образованию / Фоменков С.А., Камаев В.А., Орлова Ю.А.; ВолгГТУ. - Волгоград, 2014. - 335 с.

УДК 004.942, 519.872.8

*С. В. Гаевой<sup>1</sup>, С. А. Фоменков<sup>1</sup>, Ф. А. Х. Аль-Хадша<sup>2</sup>, В. С. Лукьянов<sup>1</sup>***СРАВНЕНИЕ ЭВРИСТИК РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАДАНИЙ В ГРИД-СИСТЕМЕ  
ПУТЕМ ДЕТЕРМИНИРОВАННОГО ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет, Волгоград<sup>2</sup>Sana'a University, Sana'a (Yemen)

gaevserge@mail.ru, alhadsha@mail.ru

В связи с массовым распространением распределенных вычислительных систем стала актуальной проблема их эффективного использования. Поэтому необходим анализ алгоритмов работы подобных систем. В данной статье проанализированы существующие алгоритмы распределения заданий по вычислительным центрам гетерогенной вычислительной системы. На основе анализа предложены несколько собственных алгоритмов.

*Ключевые слова:* грид-системы, брокер заданий, имитационное моделирование, распределение заданий, эвристики.

*S. V. Gaevoy<sup>1</sup>, S. A. Fomenkov<sup>1</sup>, F. A. H. AL-hadsha<sup>2</sup>, V. S. Lukyanov<sup>1</sup>***COMPARISON OF HEURISTICS FOR TASK DISTRIBUTION IN  
GRID-SYSTEM BY DETERMINISTIC SIMULATION**<sup>1</sup>Volgograd State Technical University, Volgograd<sup>2</sup>Sana'a University, Sana'a (Yemen)

Due to wide spread of the distributed computing systems a problem of its effective usage became actual. Therefore the analysis of algorithms used in similar systems is necessary. In this paper some algorithms of the distribution of tasks between computer centers of a heterogeneous computing system are analyzed. The already offered algorithms have been considered. Based on that the new algorithms have been proposed.

*Keywords:* Grid-systems, resource broker, simulation modeling, simulation, task distribution, heuristics.

**Введение**

Вопросы моделирования Грид-систем уже поднимались в [1]. Тогда был создан программный продукт [2]. Грид-системы строятся не базе кластеров и позволяют балансировать нагрузку между ними.

В [3] представлено моделирование работы элемента Грид-системы — отдельного кластера. В настоящей статье уделено внимание другому аспекту данной проблемы, а именно способам распределения заданий по узлам системы, которые основываются на эвристических оценках. Необходимо рассмотреть существующие методы распределения заданий и предложить собственные методы разделения заданий по узлам системы с различными характеристиками.

В [3] была построена и верифицирована детерминированная имитационная модель для анализа работы отдельного кластера Грид-системы. В статье она будет обобщена на случай Грид-системы. Предлагаемая модель является обобщенной: она может быть использована при передаче не только сообщений в сетях, но и в иных случаях, например, при обработке документации, обслуживании клиентов в организациях, в цехах и т. д.

**Моделирование распределения заданий***1. Постановка задачи*

Система Грид в рамках данной работы состоит из узлов, именуемых кластерами. Каждый кластер в свою очередь построен из вычислительных машин одинаковой производительности. Согласно [4] было введено понятие эталонной машины. Ее производительность обозначим за единицу. Все остальные производительности пересчитываются относительно неё. В систему поступают задания, которые надо рассчитать. Весь расчет ведется в пределах одного кластера [4]. Этот кластер выбирается после появления задания в системе.

Каждое задание может выполняться параллельно на нескольких машинах. Количество вычислительных машин, требуемое заданием, прописано в нем в момент создания. Назовем эту величину шириной [5]. Длиной задания назовем время его выполнения на требуемом числе эталонных машин. Площадью задания назовем произведение длины на ширину.

Каждый кластер имеет неограниченную и неприоритетную очередь [3]. Шириной (площадью) очереди назовем сумму ширин (площадей), входящих в нее заданий. Длиной очереди назовем число заданий в ней.

## 2. Стратегии распределения заданий

Стратегии распределения заданий являются эвристиками, то есть позволяют определить кластер путем эмпирических оценок [4-5]. Все стратегии, кроме одной, работают следующим образом. Узлам присваивается стоимость исполнения задания ( $Z$ ). Узлы, которые не имеют достаточное число машин для исполнения задания, получают оценку, равную бесконечности. Выбирается узел с наименьшей оценкой (стоимостью исполнения). При совпадении оценок будем выбирать кластер с меньшим номером. Предполагается, что для всякого задания существует хотя бы один кластер, способный его выполнить.

Перечислим рассматриваемые эвристики [6]. Начнем с той, которая не использует целевые функции.

1) Rotate. Список кластеров просматривается циклически, начиная со следующего за тем, который получил последнее задание. Если кластер не обладает достаточным числом машин для исполнения задания, то он пропускается;

2) FreeExes:  $\frac{W}{N+W}$ . Эта предложенная нами оценка считает «более дорогим» более загруженный кластер. Используется при быстром выполнении заданий в отсутствие очереди:

3) QueueWidth. Оценка из [5]:

$$Z = \frac{w_{зад} + \sum_j w_{заdj}}{W};$$

4) QueueLen (модификация оценки из [5]):

$$Z = \frac{1+Q}{W};$$

5) QueueDif (оценка из [5]):

$$Z = \frac{c_{зад} + \sum_j c_{заdj}}{W};$$

6) QueueProd (наша модификация оценки

$$\text{№ 5): } Z = \frac{c_{зад} + \sum_j c_{заdj}}{W \cdot P};$$

7) MaxProd:  $Z = (W \cdot P)^{-1}$ ;

8) EqualLoading:  $Z = \sum_j c_{заdj}$ ;

9) EqualQueueLen:  $Z = Q$ ;

10) EqualQueueWidth:  $Z = \sum_j w_{заdj}$ .

Обозначения:  $W$  - количество машин кла-

стера,  $N$  - количество свободных машин кластера,  $w_{зад}$  - ширина задания, для которого определяется кластер,  $w_{заdj}$  - ширина j-го задания в очереди кластера,  $Q$  - длина очереди кластера,  $c_{зад}$  - сложность задания, для которого выбирается исполнитель,  $c_{заdj}$  - сложность j-го задания в очереди кластера,  $P$  - производительность узла.

Введем «одиннадцатую» стратегию — «Self» — отсутствие стратегии, когда каждый кластер исполняет свои задания без обмена.

## 3. Метод решения

Для оценки стратегий воспользуемся методом дискретно-событийного имитационного моделирования [7, 8]. Построенная ранее модель является детерминированной [6]. Использование детерминированной модели освобождает нас от необходимости проведения серии экспериментов: достаточно одного, так как они все будут одинаковыми.

Модель была ранее рассмотрена нами в [3], поэтому изложим кратко основные моменты, учитывая особенности поставленной задачи.

Событиями модели являются:

1) поступления заданий. Все эти события происходят в строго заданные моменты времени. Задания передаются кластеру в соответствии с эвристикой. Внутри кластера задания ведут себя так же, как и в [3]: либо, если возможно, ставятся на исполнение, либо отправляются в очередь;

2) завершения обслуживания задания (не изменилось по сравнению с [3]). Задание удаляется из системы как обслуженное. После этого производится попытка изъятия заданий из очереди на исполнение.

Других событий в модели нет. Если разместить все времена завершения в бинарной куче [9], время поиска следующего события сокращается с  $O(n)$  до  $O(\log(n))$ .

## 4. Использование логов работы кластеров

В [10] представлены реальные логи работы вычислительных систем. В [3] уже проводилась валидация построенной модели, для чего использовался набор кластеров, содержащий в том числе и RICC. На примере это кластера было показано, что модель работает с большими (8,192 машины) кластерами. Однако для этой задачи он оказался слишком большим (способен в одиночку обслужить все задания) по сравнению с остальными. Поэтому было

решено заменить его на более похожий на остальные) HPC2N.

Использование логов «как есть» нерационально по двум причинам: во-первых, входной поток заданий обладает определенной циклической закономерностью в течение рабочей недели ( $w=7 \text{ дн.}$ ), а, во-вторых, логи имеют разную длину. Из-за такой цикличности (рис. 1) кластера будут испытывать пики нагрузки синхронно, поэтому этот фактор надо учесть при моделировании.

Пусть неотрицательные числа  $\theta_i^{(j)}, i=\overline{1, n_j}, j=\overline{1, m}$  - это времена прихода  $i$ -го задания по логу  $j$ -го кластера. Введем параметр  $\delta_j$  - время, прошедшее с последней

полуночи с воскресенья на понедельник до момента времени, принятого в логе  $j$ -го кластера за нулевой ( $0 \leq \delta_j < w$ ). Как правило, нулевым моментом является приход первого задания, но бывают и исключения. Тогда исправленными временами прихода заданий будут  $\tau_i^{(j)} = \theta_i^{(j)} + \delta_j, i=\overline{1, n_j}, j=\overline{1, m}$ .

Теперь необходимо продолжить логи кластеров на неограниченное время, сохранив при этом цикличность. Очевидно, что можно зациклить приход заданий, избегая наложения, то есть принять  $\tau_{i+n_j}^{(j)} = \tau_i^{(j)} + \zeta_j$ , где  $\zeta_j$  - любое значение, которое не меньше  $\theta_{n_j}^{(j)}$  и кратно  $w$ .



Рис. 1. Пример изменения интенсивности потока заявок в течение недели

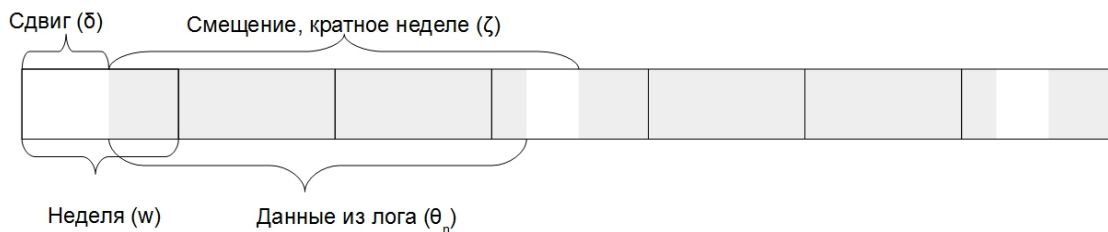


Рис. 2. Схема преобразования логов

Если мы хотим избежать в продолженном логе пустых недель, то необходимо взять минимальное из возможных значений, то есть  $\zeta_j = w \cdot \text{ceil}\left(\theta_{n_j}^{(j)} / w\right)$ , где  $\text{ceil}()$  - функция округления с избытком.

Схема преобразования логов дана на рис. 2. Выберем для моделирования все такие задания,

что  $\tau_i^{(j)} \leq \max_{j=1}^m \tau_{n_j}^{(j)}$ . Это обеспечит нам присутствие каждого задания в системе хотя бы один раз.

#### 5. Пример использования стратегий

Возьмем из [10] очищенные логи, выполнив все вышеуказанные преобразования. В качестве Grid-системы возьмем систему из соответствующих этим логам кластеров. Кластера разнесены

во времени и пространстве, поэтому их производительности могут различаться на порядки.

Расчет дается для демонстрации модели, так что возьмем длины и ширины заданий из логов, а в качестве производительностей машин примем следующие значения (см. таблицу). Исследования проводятся в двух вариантах. Вариант, заявленный выше, назовем Parallel. Альтернативный вариант – исполнение с выделением для каждого задания только одной машины (Sequential): площадь берется как в случае Parallel, но ширина принимается равной единице, а длина, соответственно, равной площади.

Принимаемая производительность машин

| Кластер    | Количество CPU | Производительность в единицах эталонной |
|------------|----------------|-----------------------------------------|
| NASA iPSC  | 128            | 0.7                                     |
| LANL CM5   | 1,024          | 0.8                                     |
| SDSC Par95 | 400            | 0.9                                     |
| SDSC Par96 | 400            | 1.0                                     |
| CTC SP2    | 338            | 1.1                                     |
| HPC2N      | 240            | 1.2                                     |
| LPC EGEE   | 140            | 1.3                                     |

Время выполнения последнего задания

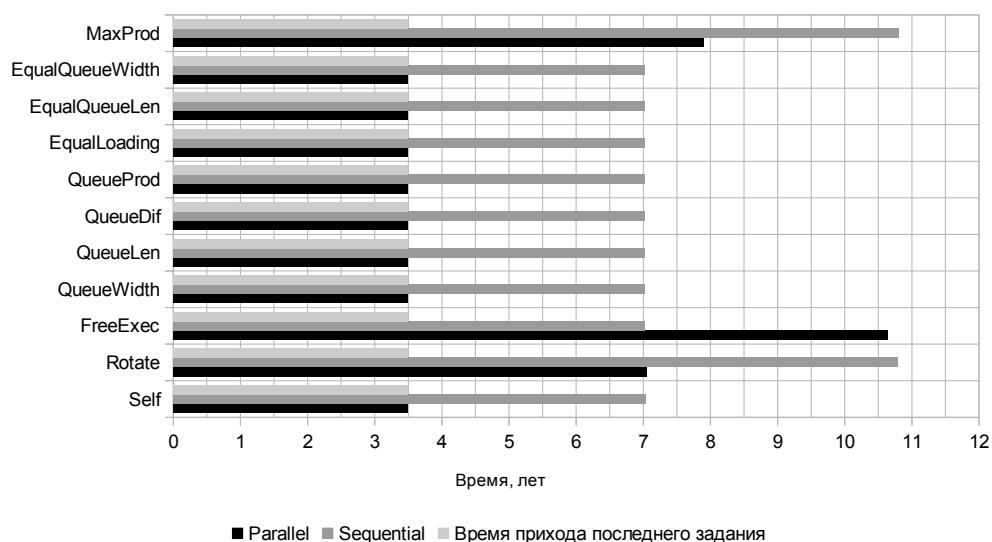


Рис. 3. Время завершения расчета сгенерированной нагрузки

Среднее время до получения результата

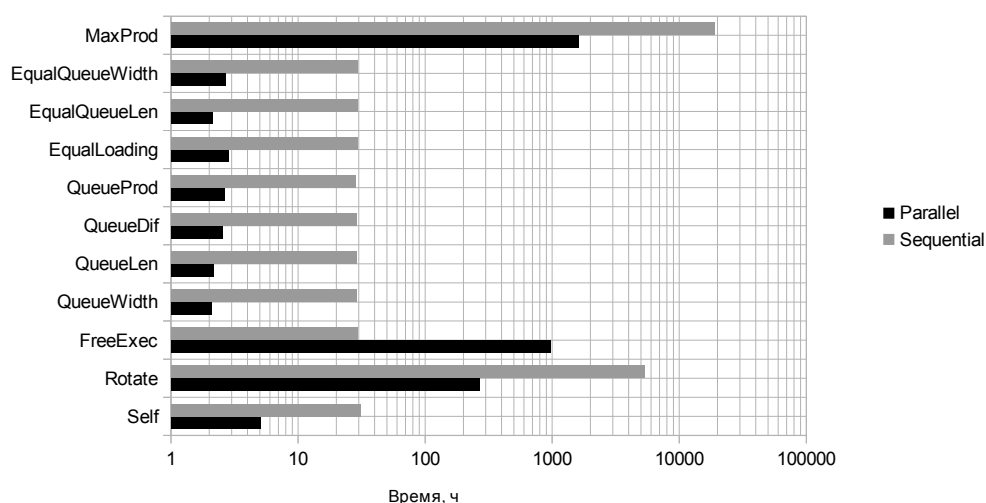


Рис. 4. Среднее время ожидания результата расчета задания с момента его появления в системе

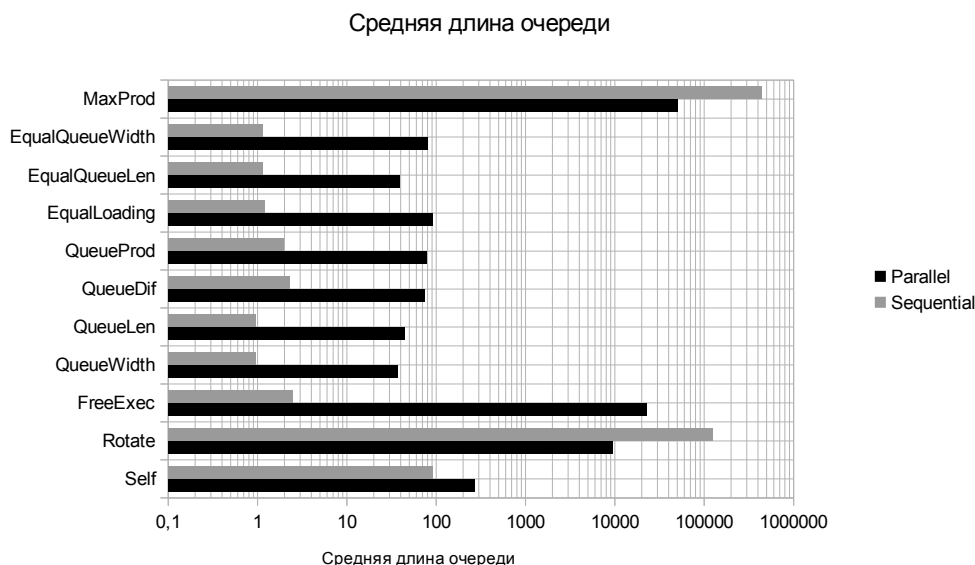


Рис. 5. Средняя длина очереди

Моделирование в обоих случаях будем производить до момента, когда будет обслужено последнее задание. Нас интересуют показатели: завершение работы системы, т. е. время выполнения последнего задания (рис. 3), среднее время получения результата (рис. 4), средняя длина очереди (рис. 5).

На основе этих измерений можно сделать следующие выводы:

1) в большинстве случаев, распараллеливание оправдывает себя. Использование последовательного исполнения в большинстве случаев сокращает длину очереди лишь за счет того, что задания занимают машины, лишь по одной каждое;

2) стратегии Rotate и MaxProd не оправдывают себя ни в последовательном, ни в параллельном случае. В случае MaxProd это значит, что систему нельзя заменить лишь ее самым производительным звеном, что сильно бы упростило задачу;

3) стратегия FreeExec создана, чтобы работать в условиях отсутствия очереди, поэтому в случае последовательного исполнения она дает хороший результат, но при параллельном исполнении – чрезвычайно неудовлетворительный;

4) при последовательном исполнении заданий ширина и длина очереди совпадают, поэтому стратегии QueueWidth и EqualQueueWidth дают абсолютно тот же результат, что и QueueLen и EqualQueueLen, соответственно. Времена до получения результата почти у всех стратегий в последовательном варианте практически совпадают, но в с точки зрения очереди QueueWidth/QueueLen немного выигрывают у EqualQueueWidth/EqualQueueLen. На третьем месте – EqualLoading;

5) самые хорошие результаты в параллельном случае дают (в порядке незначительного ухудшения) минимизация удельной ширины очереди (QueueWidth), минимизация длины очереди (EqualQueueLen) и минимизация удельной длины очереди (QueueLen);

6) таким образом, наилучшие результаты получаются на основе наиболее легко вычисляемого критерия. Это дает основание для того, чтобы не учитывать сложность задания. Такое допущение позволяет не учитывать оценки времени выполнения заданий, которые являются крайне неточными [11]. Учет дополнительных показателей, например, сложности очереди (QueueDif) и соотношения «сложность - производительность» (QueueProd) лишь ухудшает результат.

Следует заметить, что полученные выводы не являются абсолютными. Результаты сильно изменяются в зависимости от потока заданий и структуры Grid-системы.

### Заключение

Таким образом, были предложены эвристики распределения заданий между несколькими исполнителями. Для оценки качества эвристик была построена детерминированная имитационная модель и получены показатели их производительности.

Впоследствии, после получения стохастической аппроксимации [12] потока заданий кластера, возможно обобщение детерминированной модели кластерной системы до стохастической, т.е. генерация достаточного количества вариантов входного потока заданий на отрезке моделирования с последующим детерминированным моделированием каждой нагрузки и объединением результатов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Имитационное моделирование грид-систем : монография / Лукьянов В.С., Андреев А.Е., Жариков Д.Н., Островский А.А., Гаевой С.В.; ВолГГТУ. - Волгоград, 2012. - 215 с.
2. Свид. о гос. Регистрации программы для ЭВМ № 2010610693 от 20 янв. 2010 г. РФ, МПК (нет). Имитационная модель грид-системы (GridModel) / В. С. Лукьянов, Д. Н. Жариков, С. В. Гаевой, Ю. В. Шафран; ВолГГТУ. - 2010.
3. Гаевой, С.В. Детерминированная имитационная модель кластеров грид-системы, обслуживающих задания / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х., Лукьянов В.С. // Вестник компьютерных и информационных технологий. - 2014. - № 6. - С. 39-43.
4. Эвристики распределения задач для брокера ресурсов Grid [Электронный ресурс] / А.И. Аветисян [и др.]. - [2009]. - Режим доступа : <http://www.citforum.ru/nets/digest/grid/index.shtml>
5. Проблемы моделирования GRID-систем и их реализация [Электронный ресурс] / О. И. Самоваров [и др.] // Портал «Информационно-коммуникационные технологии в образовании». - [2010]. - Режим доступа : <http://www.ict.edu.ru/vconf/files/9451.pdf>
6. Детерминированная имитационная модель кластеров грид-системы для сравнения эффективности использования эвристик распределения заданий / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х., Фоменков С.А., Лукьянов В.С. // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. - 2014. - № 2. - С. 148-157.
7. Фоменков, С.А. Математическое моделирование системных объектов: учеб. пособ. (гриф). Доп. УМО вузов по университетскому политехн. образованию / Фоменков С.А., Камаев В.А., Орлова Ю.А.; ВолГГТУ. - Волгоград, 2014. - 335 с.
8. Шеннон, Р. Имитационное моделирование систем – искусство и наука / Р. Шеннон; пер. с англ. под ред. Е. К. Масловского. – М. : Мир, 1978. – [418 с.]
9. Binary Heaps [Электронный ресурс]. – [2013]. – Режим доступа : <http://www.cs.cmu.edu/~adamchik/15-121/lectures/Binary%20Heaps/heaps.html>
10. Logs of Real Parallel Workloads from Production Systems [Электронный ресурс] // The Rachel and Selim Benin School of Computer Science and Engineering. – [2013]. – Режим доступа : <http://www.cs.huji.ac.il/labs/parallel/workload/logs.html>
11. Tsafir, D. Modeling User Runtime Estimates [Электронный ресурс] / D. Tsafir, Y. Etsion, and D. G Feitelson // The Rachel and Selim Benin School of Computer Science and Engineering. – [2013]. – Режим доступа : <http://www.cs.huji.ac.il/labs/parallel/workload/papers/Est05JSSPP.pdf>
12. Гаевой, С.В. Аппроксимация времени выполнения заданий на примере вычислительного кластера LPC EGEE 2004 / Гаевой С.В., Аль-Хадша Ф.А.Х., Фоменков С.А. // Известия ВолГГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 21 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолГГТУ. - Волгоград, 2014. - № 12 (139). - С. 135-141.

УДК 004.4'22

**В. А. Камаев<sup>1</sup>, А. Г. Финогеев<sup>2</sup>, И. С. Неведова<sup>2</sup>, Е. А. Финогеев<sup>2</sup>**  
**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЕ СРЕДСТВА «ОБЛАЧНОГО» МОНИТОРИНГА**  
**РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ИНЖЕНЕРНЫХ СЕТЕЙ\***

<sup>1</sup>Волгоградский государственный технический университет

<sup>2</sup>Пензенский государственный университет

Vkamaev40@mail.ru, finogeev@sura.ru, nefedya2008@yandex.ru

В статье рассматриваются инструментальные средства облачного мониторинга на основе конвергенции модели «туманных» вычислений для организации распределенной обработки больших сенсорных данных (BigSensorData) и модели «облачных» вычислений на серверном кластере для интеллектуального анализа данных в облачном хранилище. Сбор, первичная обработка, структуризация и агрегирование сенсорных данных предлагается производить на узлах беспроводной сенсорной сети (WSN) при условии достаточной вычислительной мощности и наличии операционной платформы для загрузки интеллектуальных программных агентов, либо в контроллерах приборов промышленной автоматизации при условии открытости протоколов и платформы со стороны разработчика. Передача исходных данных и агрегатов в процессе облачного мониторинга обеспечивается посредством беспроводной гетерогенной сети. Классы объектов и показателей для реализации процедур и этапов облачного мониторинга рассматриваются в отношении инженерных коммуникаций системы городского теплоснабжения. Инструментальные средства облачного мониторинга включают приложения, работающие на стороне серверного кластера и распределенные по узлам сенсорной сети интеллектуальные агенты. Для обработки больших данных на облачном серверном кластере разработан и реализован механизм структуризации и визуализации данных в виде динамической гипертаблицы на платформе Java Enterprise Edition с использованием технологий Spring и ORM Hibernate.

**Ключевые слова:** облачный мониторинг, большие сенсорные данные, облачные вычисления, туманные вычисления, интеллектуальный анализ данных, облачное хранилище, поддержка принятия решений, инженерные сети, SCADA, беспроводная сенсорная сеть, кластерная архитектура

**V. A. Kamaev<sup>1</sup>, A. G. Finogeev<sup>2</sup>, I. S. Nefedova<sup>2</sup>, E. A. Finogeev<sup>2</sup>**  
**CLOUD MONITORING TOOLS FOR DISTRIBUTED ENGINEERING NETWORKS**

<sup>1</sup>Volgograd State Technical University

<sup>2</sup>Penza State University

The article discusses cloud monitoring tools based at convergence model "fog" computing for the organization of distributed processing of big sensor data and the model of cloud computing on a server cluster for data mining in cloud storage. The collection, primary processing, structuring and aggregation of sensory data is proposed to carry on the nodes of a wireless sensor network (WSN) with sufficient computing power and the availability of operating platform to download intelligent software agents or controllers devices industrial automation with open protocols and platform from the developer. Transfer source data and aggregations in the process of cloud monitoring is provided via a wireless heterogeneous network. Classes of objects and indicators for the implementation of procedures and stages of cloud monitoring are considered in relation to engineering communications systems urban heating. Tools cloud monitoring include applications running on the side of a server cluster and distributed over the nodes of the sensor network intelligent agents. For processing big data on cloud server cluster developed and implemented a mechanism for structuring and visualization of data in the form of dynamic hypertable on the Java Enterprise Edition platform using technologies such as Spring and Hibernate ORM.

**Keywords:** cloud monitoring, big sensor data, cloud computing, fog computing, data mining, cloud storage, decision support, engineering networks, SCADA, wireless sensor network, cluster architecture

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 14-37-50893.



## Введение

Основная цель теплоснабжения микрорайонов города заключается в обеспечении потребителей бесперебойной подачей холодной и горячей воды требуемой температуры и качества с заданным уровнем комфорта и соответствующими условиями оплаты данных услуг в зависимости от объема потребления. Задачей разработки и внедрения системы интеллектуального анализа данных для поддержки принятия решений является достижение энергетической результативности тепловой сети за счет повышения эффективности предприятий теплоснабжения, снижения потерь при генерации и транспортировке энергоносителя, регулирования энергопотребления на тепловых пунктах, в общественных и жилых зданиях городских районов с учетом различных факторов [1,2].

Тепловое снабжение города традиционно обеспечивается за счет систем централизованного теплоснабжения на основе паротурбинных ТЭЦ. Система инженерных коммуникаций теплоснабжения использует центральные тепловые пункты (ЦТП) для подогрева теплоносителя. В ЦТП размещается теплоэнергетическое, водопроводное, газовое, электротехническое и противопожарное оборудование. К зданиям различных типов от ЦТП подаются энергоносители по распределительным трубопроводам. В современной системе теплоснабжения также используются автономные блочно-модульные котельные (БМК) и индивидуальные тепловые пункты (ИТП) зданий, которые позволяют уменьшить себестоимость тепловой энергии за счет сокращения затрат на транспортировку теплоносителя и снижения потерь при транспортировке.

### Классификация объектов инженерных сетей и показателей для мониторинга в системе городского теплоснабжения

Нормативы потребления услуг по отоплению и горячему водоснабжению устанавливаются в соответствии с требованиями к качеству коммунальных услуг, предусмотренными законодательными и нормативными правовыми актами федерального и муниципального уровней. При определении нормативов учитываются конструктивные и технические параметры дома: материал стен, крыши, объем жилых помещений, площадь ограждающих конструкций и окон, износ внутридомовых инженерных коммуникаций и оборудования, а также количество

этажей и год постройки. Обычно в норматив отопления включается расход тепловой энергии исходя из расчета расхода на 1 м<sup>2</sup> площади помещений для обеспечения комфортного температурного режима, содержания имущества дома, с учетом требований к качеству услуги.

Объект потребления тепла представляется как  $O = (T, (N, E), (S), (P))$ , где  $T$  – значение временного интервала, через которое осуществляется считывание показателей с прибора учета, установленного на объекте, пара  $(N, E)$  – географическая широта и долгота объекта,  $(S)$  – множество приборов и сенсорных узлов, информация с которых используется для поддержки принятия решения,  $(P)$  – множество поведенческих шаблонов теплоснабжения для объекта (температурных графиков).

Определим основные классы схем теплоснабжения зданий городской застройки:

- 1) схема централизованного теплоснабжения зданий от ЦТП и БМК;
- 2) схема частично централизованного теплоснабжения зданий от ЦТП и БМК с подогревом в ИТП отдельных зданий;
- 3) схема частично децентрализованного теплоснабжения зданий от собственных ИТП;
- 4) схема полностью децентрализованного теплоснабжения зданий от множества ИТП отдельных помещений;
- 5) схема комбинированного теплоснабжения зданий от ЦТП, БМК, ИТП.

Для всех схем узлы сбора данных устанавливаются:

- 1) на тепловых пунктах генерации и подогрева теплоносителя (ЦТП, БМК, ИТП);
- 2) на наземных терминалах тепловых магистралей с системой проводного контроля;
- 3) на ИТП и/или на домовых тепловых счетчиках (тепловычислителях) зданий городской застройки, включающих: жилые индивидуальные дома, многоквартирные жилые дома с индивидуальным поквартирным отоплением, многоквартирные жилые дома с ИТП, многоквартирные жилые дома, подключенные к тепловым пунктам ЦТП и БМК, общественные здания с ИТП, общественные здания, подключенные к тепловым пунктам ЦТП и БМК.

Для анализа потребления тепловой энергии здания делятся по площади на: малые, средние и крупные. Также определены классы зданий по показателю энергоэффективности, исходя из фактического показателя удельного годового расхода тепловой энергии на отопление, вентили-

ляцию и горячее водоснабжение на: класс с очень высоким показателем (А и А+), класс с высоким показателем (В и В+), класс с нормальным показателем (С), класс с пониженным показателем (D), класс с низким показателем (Е).

Для облачного мониторинга разделим здания по степени декомпозиции системы учета потребления энергии:

1) здание 1 типа с системой учета без декомпозиции, когда имеется один общий прибор учета потребления для всего объекта в целом;

2) здание 2 типа с системой учета малой декомпозиции, когда имеются только индивидуальные приборы учета;

3) здание 3 типа с системой учета средней декомпозиции, когда имеются общий и индивидуальные приборы учета;

4) здание 4 типа с системой учета высокой декомпозиции, когда имеются общий, групповые (для групп помещений или этажей) и индивидуальные приборы учета для отдельных помещений.

Выделим группы показателей, которые являются исходными данными для интеллектуального анализа и прогнозирования теплопотребления в системе городского теплоснабжения:

1) характеристики объектов мониторинга (тепловых пунктов, зданий) с пространственной привязкой к цифровой картографической основе, в частности: температура наружных и внутренних стен  $T_{ext}$  (K) и  $T_{in}$  (K), тип объекта, объемы и площади помещений  $V$  ( $m^3$ ) и  $S$  ( $m^2$ ), коэффициент теплопроводности стен  $\lambda$ , площадь окон  $S_w$  ( $m^2$ ) и наружных стен  $E_{out}$  ( $m^2$ ), число этажей  $N$  и т.д.,

2) нормативные показатели, включая такие как: нормативы расхода тепловой энергии на подогрев 1  $m^3$  воды  $Q$  (Гкал), потребления отопления (Гкал/ $m^2$ ), горячей (Гкал/чел) и холодной воды в здании и т.д.

3) приборные показатели. К ним относятся измеряемые показатели расхода газа ( $m^3$ ), потребления электроэнергии (Квт/ч), тепловой энергии (Гкал), в также [4]:

- температура горячей воды в системе подогрева/отопления в прямой и обратной трубе  $T_{win}^f, T_{win}^b$  ( $^{\circ}C$ );

- температура холодной воды  $T_c$  ( $^{\circ}C$ );

- температура горячей воды в системе горячего водоснабжения  $d$  в прямой и обратной трубе  $T_{hw}^f, T_{hw}^b$  ( $^{\circ}C$ );

- давление в системе отопления и горячего водоснабжения  $P_w$  (Па);

- средняя температура внутри помещения  $T_{in}$  ( $^{\circ}C$ ) и давление внутри помещения  $P_{int}$  (Па);

- среднедневной и среднемесячный объем потребляемой тепловой энергии зданием  $Q_d$  и  $Q_m$  и удельный объем тепловой энергии (Гкал/ $m^2$ ) и т. д.;

4) магистральные характеристики тепловой сети:

- средняя длина трассы тепловой сети от источников до потребителей в области мониторинга  $L_{av}$  (м);

- средняя удаленность потребителей от источника тепла (м);

- суммарная длина трубопроводов тепловой сети, образующей зону действия источника тепла  $L_{total}$  (м);

- средний диаметр тепловой сети в зоне действия источника тепла  $d_{cp}$  (м);

- общая тепловая нагрузка в зоне действия источника тепла относительно присоединенных к нему тепловых сетей;

- температурные показатели на входе тепловой магистрали и на выходе для прямой и обратной трубы;

- показатели контроля утечек теплоносителя на отрезках тепловых магистралей и т.д.;

5) метеорологические показатели. К ним относятся: температура воздуха снаружи здания  $T_{out}$  ( $^{\circ}C$ ), точка росы  $D$  ( $^{\circ}C$ ), относительная влажность воздуха  $RH$  (%), направление и скорость ветра  $W_D$  и  $W_S$  (м/с), давление воздуха снаружи здания  $P_{out}$  (Па), количество выпавших осадков  $A$  (мм) и т.д.;

6) поведенческие факторы, включающие градусо-дни отопления ( $^{\circ}C/дни$ ), режимы работы здания и теплового пункта и другие, как например: часы открытия/закрытия, число рабочих и выходных дней, распределение числа людей в здании по времени суток, индекс комфорта по Фангеру и т.д.

#### **Облачный мониторинг распределенных объектов и систем на основе беспроводных сенсорных сетей**

В последнее время предприятия рассматривают возможности использования облачных технологий для аналитической обработки информации. Можно выделить две основные парадигмы технологий: облачные и туманные вычисления.

С понятием облачные вычисления тесно связано понятие параллельных распределенных вычислений (Grid computing). Термин Grid вы-

числения относится преимущественно к архитектуре компьютерных сетей и представляет собой ориентированный на виртуализацию способ организации вычислительного процесса, когда части задачи распределяются по свободным в данный момент ресурсам сети для решения задач, сложных для отдельно взятого узла, что требует использования специального ПО. В свою очередь, облачные вычисления (cloud computing) не всегда означают распределение частей задачи по узлам “решетки” распределенных вычислительных ресурсов.

Облачные вычисления (cloud computing) – это модель предоставления повсеместного сетевого доступа к общему пулу конфигурируемых вычислительных ресурсов (сетям, серверам, устройствам хранения данных, приложениям и сервисам) любой момент времени. Пользователь фактически использует только клиентское обеспечение в качестве средства доступа к сервисам, платформам и данным, а вся инфраструктура информационной системы находится у сервис-провайдера.

Национальным институтом стандартов и технологий США определены следующие характеристики облачных технологий [3, 4]:

1) самообслуживание. Пользователь самостоятельно определяет требования к вычислительным ресурсам (время доступа, скорость обработки данных, объем хранимых данных и т.п.);

2) свободный сетевой доступ. Пользователю предлагается универсальный повсеместный доступ к ресурсам сети передачи данных вне зависимости от типа его оконечного устройства (компьютер, ноутбук, планшет, смартфон, телевизор, бытовая техника и т.д.);

3) пул ресурсов. Провайдер облачного сервиса объединяет свои ресурсы в единый пул для динамического перераспределения мощностей в процессе обслуживания множества пользователей с обеспечением масштабируемости услуг при изменении спроса, т.е. требуемые услуги должны предоставляться с гарантированным качеством сервиса (QoS);

4) эластичность. Услуги должны быть быстро и эластично предоставлены, расширены или сужены в автоматическом режиме в любой момент времени, без дополнительных затрат на взаимодействие с провайдером. Фактически вычислительные ресурсы и объем выделяемого пространства может постоянно изменяться в зависимости от требований пользователя;

5) учет потребления и мониторинг. Провайдер выполняет автоматический контроль, оценку и оптимизацию потребляемых пользователем ресурсов (объема хранимых данных, трафика, пропускной способности, количества транзакций и т.п.). По результатам мониторинга представляется отчет, что обеспечивает прозрачность использования «облачных» сервисов.

Со стороны провайдера, «облачные» технологии позволяют использовать меньшие программно-аппаратные вычислительные ресурсы, за счет представления их в аренду пользователям только на время использования сервиса, вместо постоянного выделения мощностей для абонентов.

Со стороны пользователя, «облачные» технологии позволяют получить услуги в любое время и в любом месте с вычислительных средств небольшой мощности, используя парадигму «тонкого» клиента, благодаря высокому уровню доступности, масштабирования и эластичности без необходимости закупки, установки, обслуживания, администрирования и модернизации собственной программно-аппаратной платформы.

В настоящее время распространены три основных модели облачного сервиса:

1. Программное обеспечение как услуга (SaaS, Software-as-a-Service). Пользователь арендует прикладное ПО у провайдера облачной инфраструктуры и использует его через «тонкий» клиент (браузер, интерфейс программы) независимо от аппаратной платформы своего устройств. Администрирование физической и виртуальной инфраструктуры «облачной» платформы, включающей сети, сервера, контроллеры домена, ОС, БД, осуществляется провайдером.

2. Инфраструктура как услуга (IaaS, Infrastructure-as-a-Service). Пользователю предоставляется возможность использования облачной инфраструктуры для управления вычислительными ресурсами с целью обработки и хранения данных, удаленной установки ОС и прикладного ПО, контроля и администрирования ОС, хранилища данных и установленных приложений, систем информационной безопасности и т.д. Фактически пользователь арендует виртуальный сервер с набором адресов и часть системы хранения данных для установки ОС или прикладного ПО и управления сетевыми сервисами.

3. Платформа как услуга (PaaS, Platform-as-a-Service). Пользователю предоставляется воз-

возможность использования облачной платформы для создания и интеграции программного обеспечения, которое в дальнейшем используется для размещения на нем собственных или приобретенных приложений. В данном случае облачная платформа представляет собой группу виртуальных серверов и включает инструментальные средства для создания, конфигурирования, тестирования и использования прикладного программного обеспечения пользователя (СУБД, шлюзы и интерфейсы, языковые среды программирования и т.п.).

К данным моделям могут добавляться другие, например, данные как услуга (DaaS, Data as a Service), коммуникации как услуга (CaaS, Communication as a Service) и т.д.

Туманные вычисления (fog computing) – это виртуальная платформа распределенных вычислений и служб хранения информации на оконечных терминальных устройствах, а также сетевые службы передачи данных между ними и центрами облачных вычислений [5]. Концепция туманных вычислений определяет распределенные вычисления, которые выполняются терминальными устройствами с ограниченными вычислительными и энергетическими ресурсами, к которым прежде всего следует отнести узлы сенсорной сети. Данные узлы имеют непосредственную связь с датчиками, приборами бытовой и промышленной автоматики, исполнительными механизмами и т.п.

Туманные вычислительные ресурсы в нашем случае представляют беспроводные сенсорные сети, узлы которых способны решать некоторые аналитические задачи. Каждый элемент «тумана» (сенсорный узел) является интеллектуальным агентом, обладающим небольшой вычислительной мощностью, флеш-памятью, интерфейсом связи с датчиками или устройствами, радиоинтерфейсом для связи с другими аналогичными узлами, прошивкой с операционной системой и прикладным ПО обработки данных.

Ресурсы распределены по периферии сети и обработка данных в них производится в режиме реального времени вне зависимости от координатной привязки сенсорного узла к цифровой картографической основе. Такая возможность обеспечивается тем, что большинство ОС для беспроводных сенсорных узлов являются операционными системами реального времени. Протоколы ретрансляции и динамической маршрутизации позволяют строить гетерогенную

среду ячеистой топологии для сбора и передачи информации с географически распределенных сенсорных узлов, выполняющих задачи по плану структуризации и агрегирования первичных неструктурированных данных. Повсеместный доступ к первичным неструктурированным данным и агрегатам может быть предоставлен с мобильных платформ с «тонкими» клиентами, которые подключаются к сенсорным узлам.

Таким образом, согласно парадигме туманных вычислений можно использовать сенсорные узлы не только для сбора, оцифровки и передачи данных в центр накопления, но и выполнять определенные операции по обработке информации в зависимости от вычислительных возможностей устройств. Подобная обработка информации уже реализована на ретранслирующих узлах сенсорных сетей, где выполняются операции алгоритмов динамической маршрутизации. В нашем случае предлагается перенести на сенсорные узлы ряд операций связанных с накоплением первичных данных, очисткой и нормализацией, вычислением агрегированных показателей и возможно краткосрочных прогнозов.

Во-первых, это позволит снять нагрузку на низкоскоростные сенсорные сети передачи данных (стандарт 803.15.4 определяет пропускную способность до 250 кб/с в частотном диапазоне 2,4 ГГц), так как будут передаваться не все данные, а интеграционные и прогнозные показатели за определенное время работы. Координатор сенсорной сети может увеличить интервалы опросов сенсорных узлов, что приведет к повышению энергетической эффективности работы узлов-маршрутизаторов и автономности сенсорной сети в целом.

Во-вторых, уменьшится вычислительная нагрузка подсистемы предварительной обработки данных перед погружением их в хранилище и общий объем данных в хранилище.

В-третьих, появляется возможность реализации потоковой интеллектуальной аналитики агрегатов данных и прогнозов в реальном времени, минуя стадии погружения в хранилище и извлечения данных в облачном вычислительном кластере обработки больших сенсорных данных (BigSensorData).

В-четвертых, открываются широкие возможности мониторинга работы приборов автоматики и исполнительных механизмов путем анализа интегрированных и прогнозных показателей на интеллектуальном сенсорном узле

через подключение к нему переносного мобильного устройства с соответствующим программным приложением.

В нашем случае предлагается рассматривать парадигму облачного мониторинга как концепцию синтеза единой распределенной системы сбора и обработки сенсорных данных для диспетчерского управления и поддержки принятия решений. Система определяет конвергенцию технологий туманных и облачных вычислений для решения информационно-аналитических задач путем обработки больших объемов неструктурированных (в рамках концепции fog computing) и структурированных (в рамках концепции cloud computing) данных.

#### **Облачный мониторинг инженерных коммуникаций системы теплоснабжения**

Для мониторинга, учета и анализа параметров энерго-, тепло-, водо- и газопотребления, показателей энергоэффективности и энергопотерь при генерации, транспортировке, потреблении и утилизации энергоносителей разрабатываются и внедряются диспетчерские SCADA системы. Для информационной поддержки работы таких систем используются различные способы сбора и обработки данных, получаемых с датчиков, приборов промышленной автоматики, приборов учета и контроля энергопотребления [6-8]. Несмотря на достижения в плане внедрения телекоммуникационных, информационных и геоинформационных технологий для автоматизации технологических процессов производства и потребления энергоносителей существуют проблемы, сдерживающие широкое использование подобных систем, такие как «непрозрачность» исходных данных и протоколов, рассогласованность данных и информационных потоков, отраслевой специфики учета данных [9].

Повсеместное внедрение интеллектуальных датчиков, приборов учета и контроля энергоносителей, накопление архивных данных в SCADA системах и требование учета множества различных показателей при синтезе прогнозных моделей для поддержки принятия решений привело к появлению проблемы, связанной с обработкой больших массивов неструктурированных и структурированных данных (Big-Data). Оперативность принятия решений также требует разработки новых технологий потоковой обработки информации, получаемой с пространственно-распределенных источников сен-

сорных данных в режиме реального времени. Для решения подобных задач предлагается внедрение новых методов сбора и анализа данных с использованием модели облачного мониторинга систем инженерных коммуникаций к которым относятся системы городского энерго-, тепло-, водо- и газоснабжения.

Целью внедрения модели облачного мониторинга является достижение энергетической результативности процессов генерации, распределения, потребления и утилизации энергоносителей, снижение энергетических потерь и повышение энергоэффективности тепловых источников и объектов теплопотребления при условии выполнения нормативных температурных режимов.

Основные процедуры облачного мониторинга включают:

1) наблюдение за состоянием объектов и технологическими процессами посредством целенаправленного и периодически повторяемого процесса сбора данных, их первичной обработки (очистки, нормализации, агрегатирования) с последующей передачей через гетерогенную транспортную среду на облачный серверный кластер и «погружению» в многомерное облачное хранилище данных;

2) ранжирование и классификацию полученных данных по различным критериям, связанным с целями мониторинга, «погружение» в хранилище. Сравнение агрегированных групп показателей с аналогичными данными в другие временные интервалы или пространственные границы;

3) периодический контроль параметров системы облачного мониторинга на предмет соответствия запланированным целям и необходимая корректировка;

4) интеллектуальную аналитическую обработку данных из хранилища для решения задач по извлечению знаний об объектах теплоснабжения и технологических процессах. Процесс может включать следующие операции:

моделирование объектов мониторинга;

статистический анализ оперативных и архивных данных;

оперативный анализ данных (OLAP), построение срезов данных и информационных выборок;

синтез динамической гипертаблицы для представления данных в наглядном виде для персонала и руководителей;

пространственный анализ географически распределенных объектов мониторинга;

синтез прогнозных моделей, прогнозирование и корректировка;

построения дерева решений и решение задач ситуационного анализа в процессе выбора вариантов принятия решений и т.д.;

5) управление и процесс принятия решений на основе полученной информации в структурированном и графическом формате вместе с рекомендациями для принятия управленческих решений в сложных многофакторных условиях.

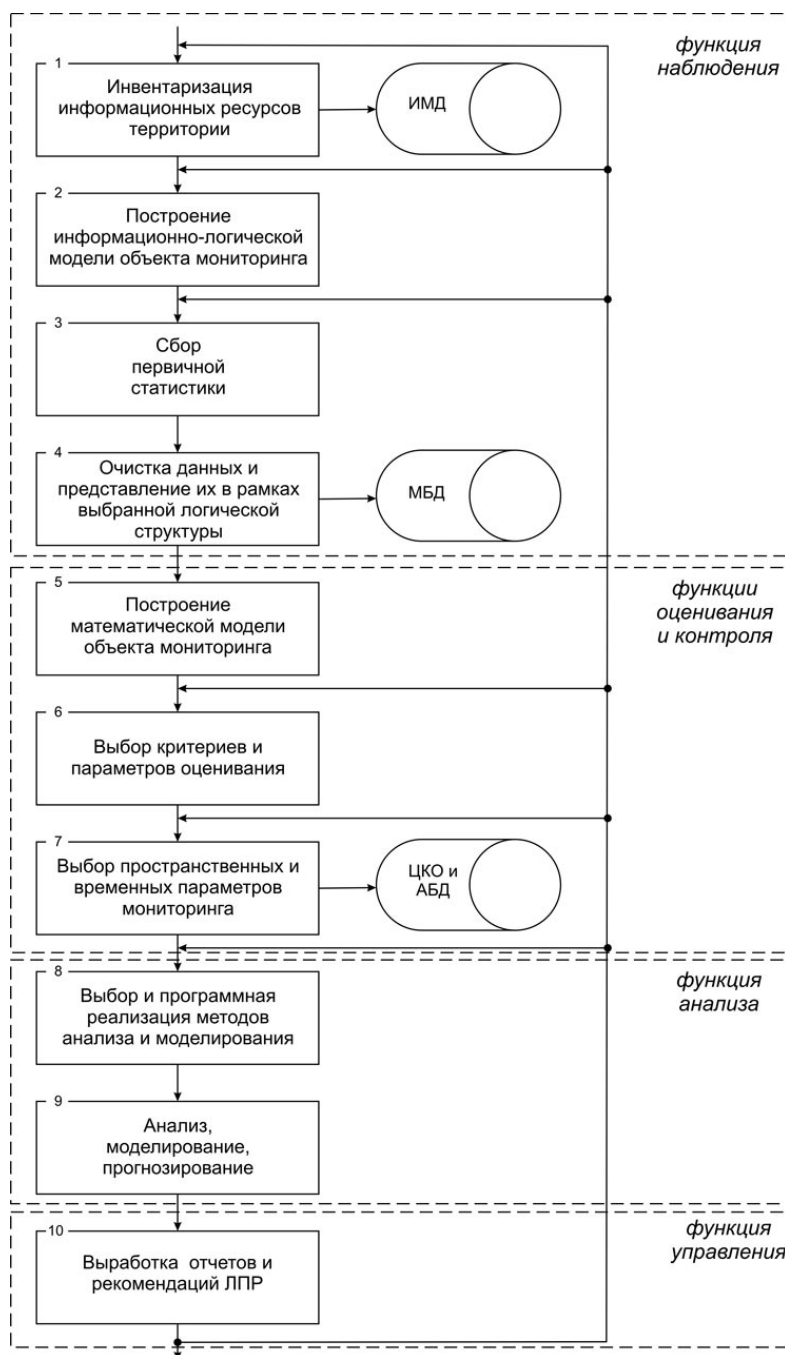


Рис. 1. Этапы облачного мониторинга распределенных систем

Процесс облачного мониторинга объектов инженерных коммуникаций является инвариантным к любым сложным пространственно распределенным системам и включает ряд этапов (рис. 1) [10,11]:

Шаг 1. Инвентаризация объектов инженерных сетей с заполнением инвентаризационной метабазы данных (ИМД).

Шаг 2. Построение информационно-логической модели для представления объектов мони-

торинга в многомерной БД.

Шаг 3. Сбор первичных данных (оперативных и архивных) с ОРС серверов, связанных с приборами учета и промышленными контроллерами, их агрегация в рамках парадигмы туманных вычислений.

Шаг 4. Очистка, нормализация и верификация данных и агрегатов на интеллектуальных узлах сенсорной сети перед их передачей и погружением в многомерную базу данных (МБД) облачного хранилища.

Шаг 5. Построение модели объекта мониторинга в соответствии с выбранным формальным аппаратом и представление структуры объекта мониторинга в формализованном виде для интеллектуального анализа и прогнозирования.

Шаг 6. Выбор тематических критериев и задание ограничений, в рамках которых будут проводиться процедуры интеллектуального анализа, классификации и сведения временных и пространственных срезов данных и агрегатов в динамическую гипертаблицу для синтеза дерева решений, прогнозных моделей, сценарного анализа и прогнозирования.

Шаг 7. Выбор пространственных (привязка объектов мониторинга к ЦКО) и временных параметров мониторинга – определение граничных условий для выборки данных из МБД и геопространственного анализа. Граничными параметрами являются принадлежность данных к территориальным зонам (пространственные параметры) и к временным периодам (временные параметры).

Шаг 8. Выбор и программная реализация методов интеллектуального анализа Data Mining, синтез табличной модели представления данных. Для поддержки процессов анализа данных, агрегатов и срезов строится модель данных в виде динамической гипертаблицы, которая объединяет функциональность классической таблицы и элементы управления и позволяет просматривать динамические изменения параметров и результатов мониторинга в реальном времени.

Шаг 9. Синтез прогнозных моделей с учетом различных групп показателей, прогнозирование, анализ влияния факторов на результаты прогнозирования, анализ штатных, внештатных и аварийных ситуаций, которые могут возникнуть при принятии выбранного варианта управленческого решения и прогноз развития ситуации в службе городского теплоснабжения.

Корректировка прогнозных моделей в соответствии с меняющимися внешними воздействиями и оценка факторов риска.

Шаг 10. Выработка отчетов и рекомендаций ЛПР. Отчеты и рекомендации представляют собой структурированные знания, полученные в результате обработки больших массивов неструктурированных сенсорных данных.

#### **Инструментальные средства облачного мониторинга**

Инструментальные средства облачного мониторинга включают приложения, работающие на стороне серверного кластера и распределенные по узлам сенсорной сети интеллектуальные агенты, решающих задачи обработки данных перед передачей и погружением в центральное облачное хранилище. Такие программные агенты дистанционно загружаются по беспроводной сети на терминальные устройства и несут полезную нагрузку в плане накопления, структуризации и свертки первичных неструктурированных данных, вычисления агрегируемых показателей, краткосрочного прогнозирования и т.п.

Внедрение распределенной обработки на основе парадигмы туманных вычислений позволяет снизить вычислительную нагрузку центральных облачных серверов, уменьшить объемы памяти облачного хранилища, так загрузка производится не всех «сырых» исходных данных, а срезов данных, агрегатов и результатов прогноза. Также снижается трафик через беспроводную транспортную сенсорную сеть, что приводит к повышению вычислительной и энергетической эффективности всей системы мониторинга в целом.

Инструментальные средства для обеспечения к облачному серверному кластеру разрабатываются на платформе Java Enterprise Edition (J2EE) с использованием универсального фреймворка с открытым исходным кодом Spring 4.0, который предоставляет функции построения событийно-ориентированной архитектуры и библиотеки Hibernate для решения задач объектно-реляционного отображения (object-relational mapping – ORM) объектов JavaBeans на реляционные данные [12]. Библиотека Hibernate предоставляет средства для генерации и обновления срезов данных в гипертаблице МБД, построения SQL-запросов и обработки ответов.

В качестве серверной платформы для создания системы облачного мониторинга выбран сервер приложений WildFly (JBoss Application



Server) с открытым исходным кодом. Обмен данными между клиентскими приложениями и облачным сервером реализован посредством протокола HTTPS. Для создания бизнес-логики «тонкого» клиента и пользовательского интерфейса используется комплект средств разработки Apache Flex 4.13.0 с набором классов, который расширяет возможности мультимедийной платформы Adobe Flash и позволяет описывать интерфейс веб-приложений на языке XML. Для добавления интерактивности и обработки структурированных срезов данных и агрегатов в клиентских Flex-приложениях выбран объектно-ориентированный язык программирования ActionScript 3.0.

Система интеллектуального анализа работает на облачном кластере и включает три уровня: представления, сервиса и данных [13]. На уровне представления реализован механизм взаимодействия с удаленными клиентскими приложениями. На сервисном уровне работают серверы приложений, который по запросам от клиентов выполняет необходимые действия с данными, взаимодействуя с уровнем данных, и передает ответные данные клиенту. Работа на уровне данных обеспечивается СУБД Oracle и программными агентами (Data Feeds), с которыми серверы приложений взаимодействуют через библиотеку Hibernate, обеспечивающую сопоставление Java-классов с таблицами МБД с помощью конфигурационных XML файлов или Java-аннотаций.

В МБД Oracle хранятся временные и пространственные срезы данных, агрегированные показатели функционирования приборов промышленной автоматики, теплосчетчиков и тепловычислителей и краткосрочные прогнозы, полученные от программных агентов, загружаемых на сенсорные узлы и промышленные контроллеры. Многомерные таблицы с большим объемом накопленных данных разбиваются на части по определенным признакам и хранятся на физическом уровне на узлах виртуального кластера, образуя облачное хранилище. В рамках реализуемой событийно-ориентированной модели интеллектуального анализа данных для обработки различных событий в распределенной системе облачного мониторинга используются триггеры, которые запускают различные процедуры и обеспечивают требуемый функционал.

Для обработки больших массивов сенсорных данных (BigSensorData) реализован меха-

низм структуризации данных и визуализации их в виде динамической гипертаблицы. Фактически гипертаблица представляет собой нестандартный элемент пользовательского интерфейса системы облачного мониторинга, и позволяет пользователям работать со срезами гиперкуба данных, группируя их по параметрам и уровням агрегации. Отличительными особенностями гипертаблицы является то, что число строк не является статичной величиной, строки по характеру и функциональности не равнозначны, некоторые из них являются агрегатами, связанными в иерархические структуры. Агрегаты являются узловыми и показывают суммарную информацию по соответствующим колонкам, принадлежащих им строк нижних уровней агрегации. Иерархическая организация агрегатов означает то, что строки-агрегаты могут принадлежать строкам более верхнего уровня. С агрегатами связаны элементы управления в виде кнопок, которые работают аналогично узлу древовидного списка и позволяют скрыть или показать содержимое агрегируемых показателей. Число строк гипертаблицы динамично и изменяется в зависимости от числа поступающих в каждый момент времени агрегатов от интеллектуальных агентов, распределенных по узлам сети в соответствии.

Интеллектуальные агенты собирают и агрегируют данные на различных уровнях древовидной иерархической структуры сенсорной сети, узлы которой связаны с измерительными и вычислительными приборами и счетчиками, установленными на разных иерархических уровнях системы теплоснабжения города. Таким образом, уровни агрегации данных определяются в соответствии со структурой системы инженерных коммуникаций городской тепловой сети и включают уровни: город, район, микрорайон, группа зданий (тепловой пункт группы зданий), здание (тепловой пункт здания), помещение или квартира (индивидуальный тепловой пункт), прибор учета (датчик).

Важным свойством гипертаблицы является возможность просмотра и анализа изменения агрегированных показателей энерго- и теплопотребления во времени в потоковом режиме. При поступлении новых срезов или агрегатов в гипертаблице происходит изменение значений данных для всех строк и каждого интервала времени. Временной интервал определяется из требований анализа и прогноза. Таким образом, гипертаблица позволяет просматри-



вать графики изменения выбранного показателя или агрегируемых показателей за различные интервалы времени, прогнозные значения данных показателей на заданный горизонт прогноза. Внедренные в гипертаблицу, элементы управления позволяют выбирать наборы строк-агрегатов для визуализации, тем самым представляя пространственные срезы показателей для отдельных иерархических уровней системы инженерных коммуникаций или для групп объектов.

Для поддержки процессов интеллектуального анализа существует возможность многоуровневой группировки строк-агрегатов с возможностью отображения древовидной структуры данных в гипертаблице. Для задания уровня агрегации можно выбрать колонку значений, по которой будут группироваться строки, а затем воспользоваться соответствующими инструментами. Пользователю предоставляется возможность задать до шести уровней агрегации (в соответствии с уровнями иерархии). В строках могут группировать агрегаты по различным критериям. Для каждого уровня иерархии есть возможность задать цветовой индикатор для наглядности.

Агрегирующие строки и координаты передаются в web-приложение для пространственного анализа и в браузер для визуализации на карте города или района. Для этого строки с агрегированными показателями, поступающими от конкретных сенсорных узлов или промышленных контроллеров, также содержат пространственные координаты объектов мониторинга для интеграции их на цифровую картографическую основу. Таким образом, пользователь может видеть изменения значений энергетических показателей и агрегатов как в гипертаблице, так и на карте с выделением областей отображения текущих, архивных или прогнозных результатов мониторинга для различных временных интервалов и групп объектов. Группа объектов мониторинга определяется путем выбора из перечня или задания области на карте, где отображаются элементы инженерных сетей в координатной привязке. Визуализация результатов анализа и мониторинга производится в Web-браузере с использованием технологии mash-up.

Параметры загрузки данных в гипертаблицу от различных источников или из облачного хранилища задаются с помощью специальной панели инструментов, в которой настраиваются следующие элементы:

1. Начальные даты анализа и прогноза.
2. Временные интервалы извлечения и визуализации среза данных и агрегатов.
3. Горизонты событий и прогнозов.
4. Выбор уровней, групп и объектов для анализа и прогноза.
5. Выбор типа данных: архивных (OPC Historical Data Access), оперативных (OPC Data Access), прогнозных [DPWS, Devices Profile for Web Services Version 1.1, OASIS Std., February 2011, <http://docs.oasis-open.org/ws-dd/dpws/1.1/os/wsdd-dpws-1.1-spec-os.pdf>].
6. Выбор или задание событий для моделирования внештатных и аварийных ситуаций в системе теплоснабжения и проведения сценарного анализа.
7. Выбор показателей и факторов, влияющих на тепло- и энергопотребление для анализа и прогноза.
8. Выбор прогнозной модели и методики прогнозирования для объектов или групп в соответствии с горизонтом прогноза.
9. Задание режимов сбора и обновления данных с распределенных объектов.
10. Выбор режимов агрегации данных.
11. Выбор настройка фильтров данных для анализа и прогноза и т.д.

В гипертаблице пользователь, не являясь специалистом в области анализа больших данных, может выполнять необходимые действия, оперируя понятиями своей предметной области. Например, модуль извлечения срезов данных из гиперкуба позволяет отбирать данные для анализа конкретной ситуации, возникающей в системе городского теплоснабжения. Для задания критериев выбора используются многоуровневые запросы и фильтры, которые ограничивают выборку данных, отображаемых в сводных таблицах и диаграммах. Специальный модуль позволяет персоналу просто и наглядно создавать запросы на выбор нужной информации, группировать условия выбора с помощью логических операторов. Пользовательский интерфейс модуля включает две части: конструктор критериев выборки данных и интерпретатор совокупности критериев. Конструктор критериев выборки данных содержит компоненты, определяющие временные и пространственные условия выборки и получения данных. Структура запроса отражается в окне для контроля корректности составленного условия. Также задается режим агрегации, который будет определять вид и содержание гипер-

таблицы архивных, текущих и прогнозных показателей. При настройке режима пользователя следует определить набор свойств конкретного объекта или группы, которые будут показаны в формируемой гипертаблице. Доступные свойства выбираются из выпадающего списка, который определяет характеристики объектов тепловой сети и технологических процессов по каждому временному циклу загрузки агрегатов с распределенных устройств. В другом списке отображаются параметры, которые необходимо выбрать для анализа и прогноза.

Сформированный запрос на языке XML передается на виртуальный сервер в виде сериализованной структуры Action Script, где конвертируется в Java-объекты. Сервер приложений в свою очередь генерирует многоуровневый запрос на языке Hibernate Query Language (HQL), который в отличие от SQL-запроса, не зависит от конкретной БД и может быть направлен как СУБД облачного хранилища, так и интеллектуальному агенту на удаленном узле. Данный механизм абстрагирования позволяет скрыть от пользователя низкоуровневые операции с данными и работать только с конструктором в рамках своих компетенций.

#### Архитектура облачного серверного кластера

Обработка больших массивов данных, как правило, реализуется в вычислительных кластерах, включающих множество серверов и специальные программные решения, основанные на модели распределенных вычислений «Отображение-Свертка», которая представлена компанией Google и основана на функциях: отображения (map) и свертки (reduce), используемых в функциональном программировании.

Для диспетчерских служб предприятий городского масштаба использовать такие структуры экономически нецелесообразно. Аналитическую обработку массивов данных можно выполнять также в графических процессорах современных видеоплат, используя специальный интерфейс доступа к графическому процессору (GPU), который называется унифицированной архитектурой устройства вычислений (Compute Unified Device Architecture - CUDA). Архитектура основана на расширении языка Си и дает возможность организации доступа к набору инструкций графического ускорителя и управления его памятью при организации параллельных вычислений.

Модель облачного кластера с интеграцией серверов приложений WildFly (JBoss Server) на среднем сервисном уровне и распределенных компонент МБД Oracle на нижнем уровне данных представлена на рис. 2.

Для облачного мониторинга целесообразно использовать метод обработки больших массивов сенсорных данных и агрегатов в потоковом режиме на базе модели «Отображение-свертка». При потоковой обработке больших данных ряд алгоритмов, требующих высокой скорости вычислений, может выполняться в графических видеопроцессорах серверов при помощи технологии CUDA.

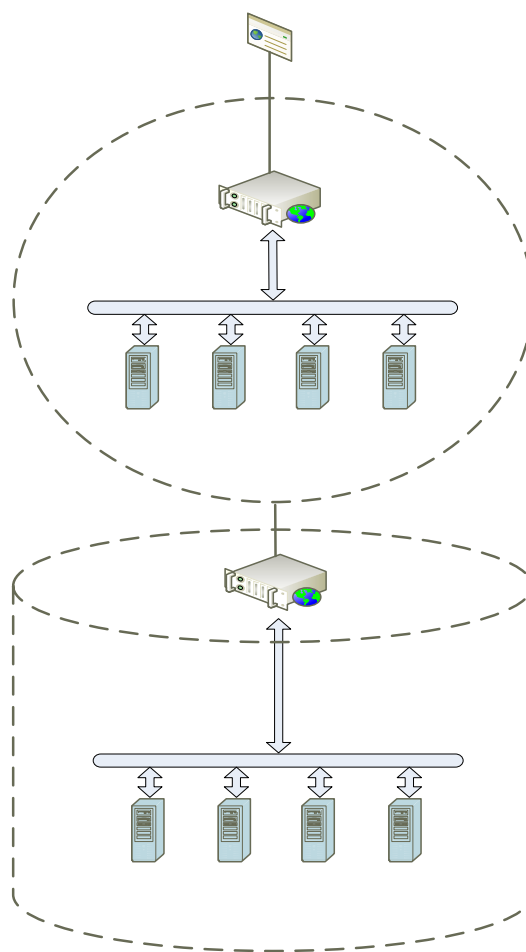


Рис. 2. Модель облачного кластера системы мониторинга

Облачный кластер будет иметь трехуровневую архитектуру (рис. 3), состоящую:

- 1) из главного сервера облака на первом уровне;
- 2) кластера серверов небольшой мощности диспетчерской службы на втором уровне;
- 3) множества графических процессоров серверных узлов на третьем уровне.

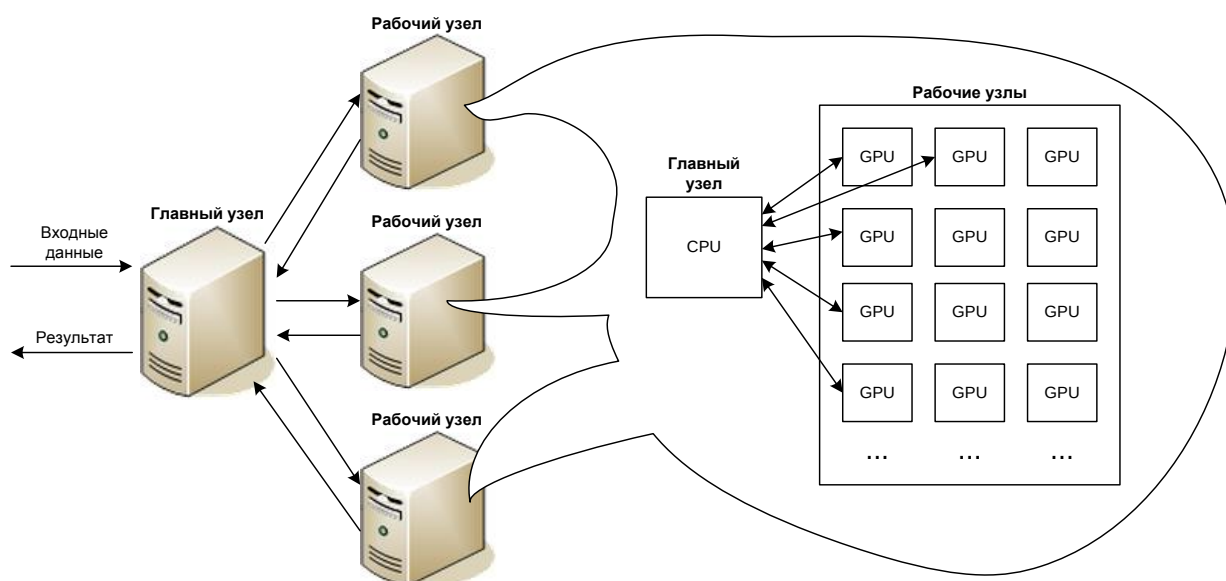


Рис. 3. Трехуровневая архитектура облачного кластера

На первом уровне главным сервером выполняется распределение входных данных между серверными узлами кластера локальной сети. На втором уровне серверные узлы распределяют данные между ядрами графических процессоров. Результаты параллельной обработки данных ядрами графических процессоров принимаются процессором каждого сервера второго уровня, агрегируются и передаются главному серверу облака, где отрабатываются запросы пользователей и собираются данные от интеллектуальных агентов на удаленных узлах. Инструментарий, реализующий функцию отображения, выполняет предварительную обработку входных данных и порождает множество пар «ключ-значение», которые после группировки передаются в инструментарий функции свертки, где производится работа над группами пар. Операции отображения работают независимо друг от друга и могут производиться параллельно всеми узлами кластера. На этапе свертки все узлы параллельно выполняют заданную функцию, которая складывает все значения для входного списка, порождая пару с названием объекта мониторинга в качестве ключа.

#### Выводы и апробация работы

Для обеспечения процессов облачного мониторинга используются технологии:

- облачных и туманных вычислений;
- миграции программных агентов по узлам беспроводной сенсорной сети;

– распределенной обработки данных множеством агентов;

– обработки больших массивов сенсорных данных (BigSensorData) в потоковом режиме на базе модели «Отображение-свертка»;

– представления агрегатов данных в виде динамической гипертаблицы;

– сценарного анализа и прогнозирования для моделирования и исследования внешних и аварийных ситуаций и т.п.

Результаты интеллектуального анализа и исходные агрегаты данных визуализируются в «тонком» клиенте-браузере с картографической координатной привязкой на мобильных и стационарных вычислительных устройствах.

На программно-аппаратном уровне для поддержки работы инструментальных средств облачного мониторинга предложена трехуровневая архитектура серверного дата-центра для аналитической обработки больших данных с реализацией параллельной обработки на множестве графических процессоров видеокарт с поддержкой технологии CUDA. Для практической реализации выбраны 4 сервера DL580 G2 Intel(R) Xeon(TM) MP x64 (4x CPU 2.80GHz) с видеокартами Nvidia Quadro FX 5800 4GB (240 графических процессоров). Производительность вычислений при использовании архитектуры CUDA позволяет достичь эффективности агрегации данных, сравнимой с решением аналогичных задач на одноплатформенном кластере из 800 серверов.

Это позволяет сделать вывод о том, что предложенная аппаратно-программная платфор-

ма и инструментальные средства для практической реализации концепции облачного мониторинга на основе конвергенции облачных и туманных вычислений является инновационным функциональным и эффективным решением для создания новых систем управления и поддержки принятия решений.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бождай А.С., Богатырев В.Е., Финогеев А.Г. Формализация методологии и принципов поддержки принятия решений по результатам мониторинга инженерных коммуникаций ЖКХ // Научно-практический журнал «Открытое образование». - №2(86). - ч.2. - с.210-214.,
2. Финогеев А.Г., Богатырев В.Е., Маслов В.А., Финогеев А.А. Мониторинг и поддержка принятия решений в системе городского теплоснабжения на базе гетерогенной беспроводной сети // Известия Волгоградского государственного технического университета. Межвузовский сборник научных статей. Серия Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах». – Волгоград: Изд-во ВолГТУ. – 2011. - Т. 3. - № 10. - С. 73-81.
3. NIST Cloud Computing Program [Электронный ресурс] // National Institute of Standards and Technology [сайт]. URL: <http://csrc.nist.gov/publications/nistpubs/800-145/SP800-145.pdf> (дата обращения: 20.10.2013),
4. NIST Референтная (эталонная) архитектура облачных вычислений (Cloud Computing Reference Architecture) Версия 1.0. [Электронный ресурс] // О Cloud Computing на русском [сайт]. URL: [http://cloud.sorlik.ru/reference\\_architecture.html](http://cloud.sorlik.ru/reference_architecture.html) (дата обращения: 20.10.2013)
5. Flavio Bonomi, Rodolfo Milito, Jiang Zhu, Sateesh Addepalli Fog Computing and Its Role in the Internet of Things // Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing. , 2012. С. 13–16.
6. Камаев В.А., Щербаков М.В., Бребельс А. Интеллектуальные системы автоматизации управления энергосбережением / ж. Открытое образование. - 2011. - № 2-2. - с. 227-231.
7. Автоматизированная система прогнозирования транспортно-эксплуатационного состояния дорог / Камаев В.А., Щербаков М.В., Скоробогатченко Д.А. Вестник компьютерных и информационных технологий. 2004. № 4. С.2
8. Финогеев А.Г., Дильман В.Б., Финогеев А.А., Маслов В.А. Оперативный дистанционный мониторинг в системе городского теплоснабжения на основе беспроводных сенсорных сетей // ж. Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. - Пенза: Изд-во ПГУ. - 2010. - № 3. - с. 27-36.
9. Финогеев А.Г., Нефедова И.С., Финогеев Е.А., Куланг Винь Тхай, Камаев В.А., Шевченко С.В., Финогеев А.А. Анализ данных в системе диспетчеризации городского теплоснабжения // ж. «Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии» - Астрахань: Изд-во АГУ (Астраханский Государственный Университет), ISSN - 2074-1707 - 2014. - №2 (26). – с. 182-197
10. Брумиштейн Ю.М., Тарков Д.А., Дюдилов И.А. Анализ моделей и методов выбора оптимальных совокупностей решений для задач планирования в условиях ресурсных ограничений и рисков // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. -2013, №3-СС.169-179.
11. Финогеев А.Г., Дильман В.Б., Маслов В.А., Финогеев А.А. Система удаленного мониторинга и управления сетями теплоснабжения на основе беспроводных сенсорных сетей // Прикладная информатика. – № 3(33).- Москва: Изд. Маркет DS. 2011 – с.83-93.
12. Финогеев А.Г., Нефедова И.С., Финогеев А.А., Финогеев Е.А., Камаев В.А., Финогеева А.З., Шевченко С.В. Инструментальные средства сбора и анализа данных диспетчерских SCADA систем городского энергоснабжения // Надежность и качество-2014: труды Международного симпозиума: / Под ред. Н.К. Юркова. - Пенза: Изд-во ПГУ, 2014. – т.2. – с. 216-220
13. Valery Kamaev, Alexey Finogeev, Anton Finogeev, and Sergiy Shevchenko Knowledge Discovery in the SCADA Databases Used for the Municipal Power Supply System / Knowledge-Based Software Engineering // Springer International Publishing Switzerland - (ISSN 1865-0929/e-ISSN 1865-0937, ISBN 978-3-319-11853-6/e-ISBN 978-3-319-11854-3, DOI 10.1007/978-3-319-11854-3). - 11th Joint Conference, JCKBSE 2014 Proceedings. - Volgograd, Russia, September 17–20, 2014. – pp. 1-15.

УДК 004.75, 519.876.5

*А. Г. Кравец, Ле Суан Куен*

## МИНИМИЗАЦИЯ РАЗГЛАШЕНИЯ ЛИЧНОЙ ИНФОРМАЦИИ В СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЯХ

Волгоградский государственный технический университет

agk@gde.ru, lexuanquyen@gmail.com

Общение в социальных сетях стало важной частью онлайн-деятельности в Интернете и одним из самых влиятельных средств массовой информации (СМИ). Социальные сети предлагают веб-пользователям новое интересное средство общения и взаимодействия. «Межпользовательская» коммуникация осуществляется мгновенно. Более 1 млрд. пользователей подключено к социальным сетям, в связи с чем возрастает угроза конфиденциальности пользователей и, следовательно, актуальность проблемы контроля доступа. Конфиденциальность пользователей широко обсуждается в СМИ и в академических исследованиях. В статье рассматриваются проблемы контроля доступа (сохранения конфиденциальности) и минимизации разглашения личной информации при доступе к услугам в социальных сетях с помощью протоколов, описанных в главе «Получение учетных данных» и «Доступ к услуге в социальных сетях».

**Ключевые слова:** социальная сеть, учетные данные, доказательство с нулевым разглашением, конфиденциальность, анонимность, аутентификация, система массового обслуживания, аналитическая модель.

*A. G. Kravets, Le Xuan Quyen*

## MINIMIZATION OF DISCLOSURE OF PERSONAL INFORMATION IN SOCIAL NETWORKS

Volgograd State Technical University

Online social networks became an important part of the online activities on the Internet and one of the most influential media. Social networks offer Web users interesting new funds to communicate. These networks make frequent exchange of information, so inter-user communication is instantaneous. More than 1 billion people are connected through social networks. So the threat to the privacy of users increases and the problem of access control is actual. User's privacy is becoming increasingly important and widely discussed in the media and researched in academic circles. In the article the problem of access control (maintaining the confidentiality) is solved and the disclosure of personal information when accessing services in social networks is minimized by using the given protocols.

**Keywords:** social network credentials, zero-knowledge proof, privacy, anonymity, authentication, queuing system, the analytical model.

### Введение

С ростом влияния социальных сетей на современную жизнь человека, все большее внимание уделяется заботе о неприкосновенности его личной информации [1]. Несмотря на то, что раскрытие подобных данных в сети интернет является добровольным для каждого человека, пользователь зачастую не подозревает о том, кто может получить к ним доступ и как их можно защитить. Большинство социальных сетей, таких как Facebook, Vkontakte, LinkedIn, обеспечивают разнообразные формы взаимодействия пользователей друг с другом: сообщества, группы по интересам, дискуссионные форумы (паблики) [2]. Пользователи же, имеют возможность создавать свои профили, делиться своими предпочтениями, мнениями, комментариями, а также размещать свои фото, видео, книги или музыку [3,4]. При создании профиля пользователем указываются его личные атрибуты: имя, возраст, пол, адрес, дата рождения, географическое положение, номер телефона и т.д. Исходя из этого, можно утверждать, что разработчики какой – либо социальной сети, имеют непосредственный доступ к личным

данным всех ее пользователей и могут делиться этими данными с внешними сторонами, такими как целевые рекламные компании. Таким образом, пользователь не имеет полного контроля над своими данными.

В статье авторы представили методы сохранения анонимных атрибутов профилей с помощью доказательств с нулевым разглашением. Разглашение личной информации при доступе к услугам минимизировано. Эти методы использованы в протоколах: «Получение учетных данных» и «Доступ к услуге в социальных сетях».

### Получение учетных данных

Используя данные Alla G. Kravets [1] и M. Maffei [5], обозначим через  $s$  подпись автора  $A$  в утверждении  $F$  с ключами  $k$ :  $sign_k(s, A, F)$ . Эквивалентом выражения  $sign_k(s, A, F)$  является метод “says”:  $A$  says  $F$ . Описание профиля пользователя выглядит так:  $Profile(att_i, \dots)$ , где  $att_i$  – атрибут  $i$ -го профиля (имя, возраст, пол, адрес, дата рождения, географическое положение и т. д.).

Модель системы использует подход Camenisch [6,7,8], который включает пять видов субъектов: пользователь, эмитент, верификатор, инспектор, отзыв управления (рис. 1).

Пользователь собирает учетные данные от различных эмитентов, контролирует информацию учетных данных, предоставляет токен для верификаторов.

Эмитент выдает учетные данные для пользователей, поэтому он ручается за правильность информации, содержащейся в учетных данных. Каждый эмитент генерирует секрет-

ный ключ, публичный ключ, параметры. Эмитент публикует публичный ключ и параметры.

Верификатор защищает доступ к ресурсу или услуге, на которые задаются ограничения учетных данных. Отзыв управления несет ответственность за отмену учетных данных, выданных эмитенту. Каждый отзыв управления генерирует параметры, которые публикуются.

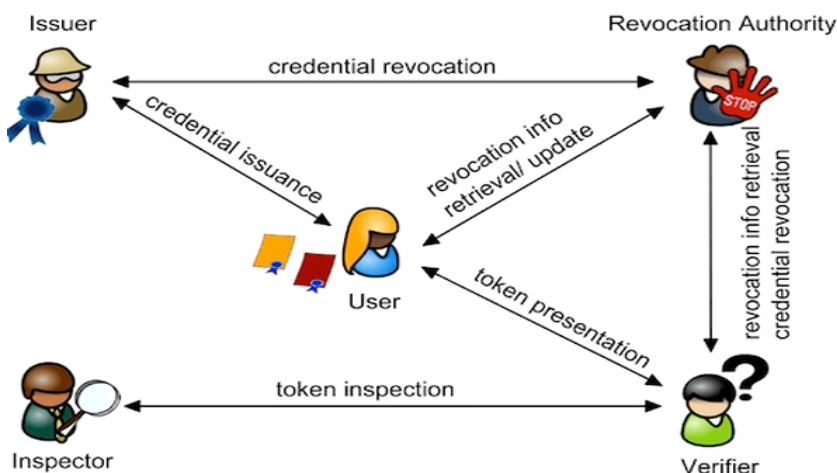


Рис. 1. Субъекты модели системы для социальной сети

Каждый инспектор генерирует секретный ключ и публичный ключ. Секретный ключ используется для расшифровывания сообщения, а публичный ключ используется для шифрования сообщения.

Пользователь обладает сертифицированными учетными данными, полученными от эмитентов на рис. 2 и 3.

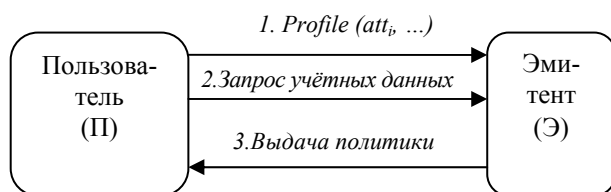


Рис. 2. Получение политики услуг от эмитента

На основе политики, полученной в шаге 3 на рис. 2, пользователь будет генерировать запрос для получения учетных данных. Обозначим эмитента через  $L$ . При помощи метода “says” пользователь строит запрос на шаге 1 на рис. 3. Формат запроса:  $\Pi \text{ says } RequestCredential(att_i) \wedge att_i \in L$ , где атрибут  $att_i$  разглашен. Задача эмитента заключается в аутентификации подписи, полученной пользователем. Кроме того, Эмитент создает подпись в атрибутах профиля, что выражено на шаге 2 на рис. 3. Пользователь получит учетные данные:  $\Pi \text{ says } Credential(att_i) \wedge att_i \in L$ , которые будут использоваться при создании токена.

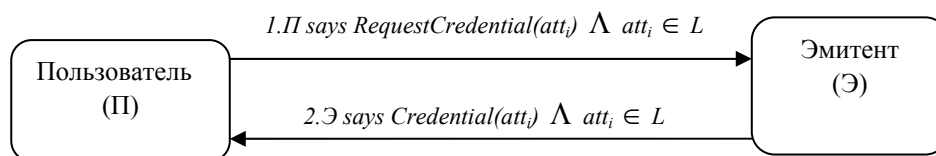


Рис. 3. Протокол получения учетных данных

#### Доступ к услуге в социальных сетях

На основе политики на рис. 2, которая соответствует каждой услуге от эмитента, и на основе полученных учетных данных на рис. 3, Пользователь строит доказательство, которое

отсылается на сервер. Далее пользователь успешно проходит проверку подлинности, для доступа к услугам поставщиков. Анонимные учетные данные системы представили протоколы, использованные для предотвращения от-

слеживания пользователей по различным услугам. Matteo Maffei [9] представил протоколы *SSP* (специфический псевдоним услуги), *EscrowInfo* и *EscrowId* (соглашение идентичности). Кроме того, IBM Research –Zurich [10]

также исследует понятие, названное доменным псевдонимом. На рисунке 4 использованы протоколы *SSP* и *EscrowId*, чтобы построить доказательство, где через *S* обозначаем описание услуги.

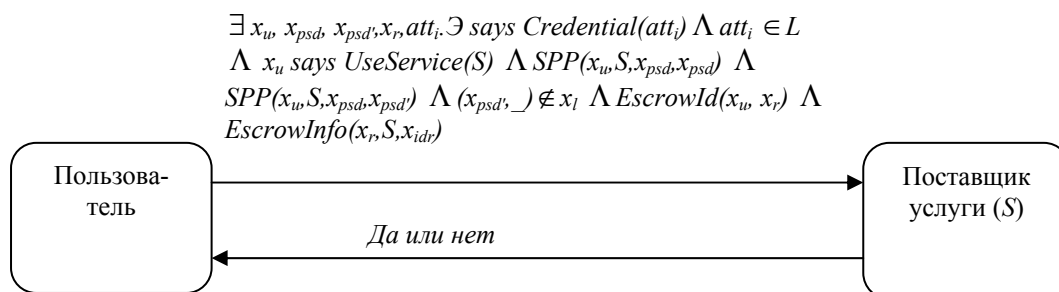


Рис. 4. Протокол доступа к услуге в социальных сетях

Минимизация разглашения личной информации при доступе к услугам выражена утверждением:  $\exists x_u, x_{psd}, x_{psd'}, x_r, att_i. \exists \text{ says } Credential(att_i) \wedge att_i \in L \wedge x_u \text{ says } UseService(S) \wedge SPP(x_u, S, x_{psd}, x_{psd'}) \wedge SPP(x_u, S, x_{psd}, x_{psd'}) \wedge (x_{psd'}, \_) \notin x_l \wedge EscrowId(x_u, x_r) \wedge EscrowInfo(x_r, S, x_{idr})$ , где пользователь может выбрать атрибуты  $att_i$ , которые разгласятся или не разгласятся. Эта проблема зависит от условий в политике, полученной на рис. 1. Роль поставщика услуги – аутентификация с анонимным атрибутом.

#### Реализация протоколов

Учетные данные являются контейнером сертифицированных атрибутов, выданных эмитентом пользователю. Формат атрибутов описывается типом: «название атрибута: значение атрибута». Эмитент ручается за правильность содержания учетных данных. Эта правильность выражена через атрибуты, когда пользователь представляет токен для поставщиков.

За последние годы был разработан ряд технологий, чтобы повысить конфиденциальность атрибутов на основе учетных данных системы. Для анонимных учетных данных систем [11,12] – сертификат X.509. Эти системы являются списками пар «атрибут: значение». Эмитент использует секретный ключ, чтобы подписать пары и отправить подпись пользователю. В отличие от сертификатов X.509, учетные данные системы имеют преимущества, при которых владелец учетных данных может выбирать разглашение о подмножествах атрибутов учетных данных и доказывает удовлетворение условиями политики на атрибутах учетных данных. Кроме того, анонимные учетные данные обес-

печивают дополнительную гарантию конфиденциальности как несвязываемости. Это означает, что, несмотря на договор с эмитентом, сервер не может связать несколько посещений того же самого пользователя. Три основных анонимных учетных данных системы были реализованы сегодня именно Identity Mixer [10,13,15] и UProve [14] и Matteo Maffei[9], но в этой статье реализация протоколов осуществлена с помощью библиотеки Identity Mixer на языке Java. Identity Mixer является анонимными учетными данными системы, разработанной в IBM. Identity Mixer позволяет, реализовать в протоколах сильную аутентификацию, личные данные разглашены минимально. Структура системы Identity Mixer является основой в схеме подписи [7,12] Camenisch-Lysyanskaya (CL). CL имеет отличительную особенность – доказательство пользователя обладания своей подписью, но не разглашает сообщения и подпись, когда пользователь использует доказательства с нулевым разглашением.

#### Вывод

Контроль доступа остается очень важной проблемой для социальных сетей. Он обеспечивает конфиденциальность пользователя. В статье проблема конфиденциальности решена с помощью протоколов: «Получение учетных данных», и «Доступ к услуге в социальных сетях». Использование этих протоколов, сводит разглашение пользовательской информации к минимуму. Сама же суть протоколов состоит в комбинации доказательства с нулевым разглашением, а также особой схемой подписи.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alla G. Kravets. Development of a Protocol to Ensure the Safety of User Data in Social Networks, Based on the Backes Method / Le Xuan Quyen, Alla G. Kravets // Knowledge - based software engineering. Communications in Computer and Information Science, Vol. 466, Springer. – 2014. – С. 393 – 399.
2. Chumak A.A., Ukustov S.S., Kravets A.G., Voronin J.F. Social networks message posting support module. World Applied Sciences Journal. 2013. T. 24. № 24. С. 191-195.
3. Alexander A. Chumak, Sergei S. Ukustov, and Alla G. Kravets. Analysis of User Profiles in Social Networks. Knowledge - based software engineering. Communications in Computer and Information Science, Vol. 466, Springer. – 2014. pp. 70 – 76.
4. Укустов С.С., Кравец А.Г. Подход к решению задачи идентификации влиятельных разработчиков в социальной сети ГИТХАБ. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2012. Т.15. №15. С. 61-66.
5. Maffei, M. Privacy-Aware Proof-Carrying Authorization / M. Maffei and K. Pecina // ACM SIGPLAN Workshop on Programming Languages and Analysis for Security (PLAS'11). – 2011. – № 7. – С. 87-95.
6. A Card Requirements Language Enabling Privacy-Preserving Access Control / J. Camenisch, S. Moedersheim, G. Neven, F. - S. Preiss // 15th ACM Symposium on Access Control Models and Technologies. – 2010. – № 15. – С.119-128.
7. A signature scheme with efficient protocols / Jan Camenisch, Anna Lysyanskaya // Security in Communication Networks Lecture Notes in Computer Science Volume 2576. – 2003. – С. 268-289.
8. A Comprehensive Framework Enabling Data-Minimizing Authentication // Patrik Bichsel, Jan Camenisch, Franz-Stefan Preiss // Proceeding DIM'11 Proceeding of the 7<sup>th</sup> ACM workshop on Digital identity management. – 2011. – № 7. – С. – 13-22.
9. Maffei, M. Security and Privacy by Declarative Design / Maffei, M., Saarland Univ., Saarbrücken, Germany // IEEE - Computer Security Foundations Symposium (CSF). – 2013. № - 26. – С. 81-96.
10. Specification of the Identity Mixer Cryptographic Library / Camenisch J, Gross T, Heydt-Benjamin TS, Sommer D // IBM Research Report. – 2013. – С. 48.
11. Rethinking Public Key Infrastructure and Digital Certificates Building in Privacy / Dr. Stefan Brands, The MIT Press. – 2000. – С.182-217.
12. An efficient system for non-transferable anonymous credentials with optional anonymity revocation / J. Camenisch, A. Lysyanskaya // EUROCRYPT 2001, volume 2045 of LNCS. Springer-Verlag. – 2001. – С. 93.
13. Design and implementation of the idemix anonymous credential system / J. Camenisch, E. Van Herreweghen // ACM on Computer and communications security. – 2002. – № - 9. – С. 21-30.
14. Credentica. U-Prove SDK [ Электронный ресурс ]. – 2011. – Режим доступа: <http://www.credentica.com/>
15. Concepts and Languages for Privacy-Preserving Attribute-Based Authentication / Jan Camenisch, Maria Dubovitskaya, Anja Lehmann // Policies and Research in Identity Management IFIP Advances in Information and Communication Technology Volume 396, Springer. – 2013. – С. 34-52.

УДК 004.02

Э. З. Мудеев, С. А. Овчинников

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЛИЧЕСТВА ЭТАПОВ ПРОЕКТА  
ПРИ РАЗРАБОТКЕ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

emil.muleev@gmail.com, stepan.ovchinnikov@gmail.com,

Рассмотрен вопрос определения размера этапов проекта для сдачи выполненных работ заказчику. Для решения данного вопроса предложен метод теории игр. Приведен пример применения предложенного метода для определения стратегии сдачи выполненных работ для получения максимальной прибыли.

*Ключевые слова:* этап проекта, стратегия сдачи выполненных работ заказчику, метод теории игр.

E. Z. Muleev, S. A. Ovchinnikov

METHOD FOR DETERMINING THE NUMBER OF STAGES  
OF THE PROJECT IN SOFTWARE DEVELOPMENT

Volgograd State Technical University

The problem of the determining the size of the stages of the project for delivering the work to the customer is considered. We propose a method of game theory in order to solve this issue. We also represent the example of application based on this method to determine the strategy of delivering the work in order to maximize profits.

*Keywords:* stage of the project, the strategy of delivering the work to the customer, the game theory method.

Согласно SWEBOK программная инженерия определяется как системный подход к анализу, проектированию, оценке, реализации, тестированию, обслуживанию и модернизации программного обеспечения. В программной инженерии определены такие понятия, как: проект, этап, менеджер проекта, заказчик [1].

Проект – ограниченное во времени целенаправленное создание новой или изменение уже существующей программной системы с установленными требованиями к качеству результатов, рамками расхода средств и ресурсов и специфической организацией.



Этап – определенный временной интервал разработки программного обеспечения. Этап характеризуется детальным планом, конкретным результатом, возможным пересмотром планов на следующие этапы.

Менеджер проекта – лицо, ответственное за качественное и своевременное исполнение проектов. Принимает проектные решения, контролирует их реализацию. Непосредственно руководит всеми людьми в проектной группе.

Заказчик – лицо (физическое или юридическое), которое инициирует проект и получает выгоду.

При планировании проекта менеджер выбирает и использует некоторую модель процессов жизненного цикла. При этом необходимо выделить такие этапы сдачи выполненных работ, которые позволяют получать отзывы от заказчика и своевременно корректировать процесс разработки для достижения поставленной задачи с желаемым качеством [2].

При этом, не всегда мнение о размере этапов сдачи выполненных работ менеджера проекта и заказчика совпадает.

Ситуации, в которых сталкиваются интересы двух сторон и результат любой операции, осуществляемой одной из сторон, зависит от действий другой стороны, называются конфликтными.

Конфликтующие стороны называются игроками, а действия, которые могут выполнять игроки, – стратегиями.

Математическая модель конфликтной ситуации называется игрой [3].

В нашей игре принимают участие 2 игрока:

- менеджер проекта (игрок А);
- заказчик (игрок В).

Таблица 1

Общий вид платежной матрицы

|       | $Y_1$    | $Y_2$    | ... | $Y_m$    |
|-------|----------|----------|-----|----------|
| $X_1$ | $w_{11}$ | $w_{12}$ | ... | $w_{1m}$ |
| $X_2$ | $w_{21}$ | $w_{22}$ | ... | $w_{2m}$ |
| ...   | ...      | ...      | ... | ...      |
| $X_n$ | $w_{n1}$ | $w_{n2}$ | ... | $w_{nm}$ |

В общем случае игра двух сторон может быть задана в виде множества:

$$G = \{X, Y, W\},$$

где  $X$  - множество стратегий 1-ой стороны;  $Y$  - множество стратегий 2-ой стороны;  $W$  - платеж

(цена) игры, который в частности может быть задан в виде матрицы.

Общий вид платежной матрицы представлен в табл. 1.

С точки зрения обеспечения наибольшей стоимости проекта наилучшей в условиях имеющейся информации о проекте будет та стратегия, при которой будет максимальный средний платеж, то есть максимальна сумма:

$$\sum_{j=1}^n w_{ij} \rightarrow \max.$$

Классификация задачи исследования как игры приведена в табл. 2.

Таблица 2

Классификация задачи исследования

|                                                        |                        |
|--------------------------------------------------------|------------------------|
| По количеству стратегий                                | конечная               |
| По взаимоотношению участников                          | бескоалиционная        |
| По характеру выигрышей                                 | с ненулевой суммой     |
| По виду функции выигрыша                               | матричная              |
| По количеству ходов                                    | одноходовая            |
| В зависимости от объема имеющейся у игроков информации | с неполной информацией |

Для заказчика лучшей стратегией будет являться постоянный мониторинг за ходом реализации проекта и получение исчерпывающей информации в реальном режиме времени. Однако, мониторинг требует временных и материальных затрат, поэтому с точки зрения минимизации затрат на управление заказчику хотелось бы осуществлять контроль как можно реже. С другой стороны, не получив вовремя информацию об отклонениях от плана, менеджер проекта может не успеть вовремя принять решение о необходимости компенсирующих воздействий и результате этого понести потери [4].

Отметим же, что эти потери могут быть критическими для проекта, когда разработка выходит за рамки оговоренного бюджета и сроков поставки заказчику проекта надлежащего качества.

Таким образом, задача о выборе размера этапов сдачи выполненных работ заказчику актуальна.

Заказчик формирует заказ, включающий необходимые требования, сроки, стоимость. Чтобы проект состоялся, менеджер проекта оценивает заказ и решает, что он может его выполнить. Принимая решение о выполнимости, менеджер проекта делает некоторое предполо-

жение, которое может оправдаться или нет в зависимости от поведения сторон [5].

В частности принимается решение о представлении стратегии сдачи выполненных работ заказчику.

Рассмотрим решение этой задачи на следующем примере: над проектом с бюджетом 8 000 000 рублей, трудоемкость которого оценивается в 16 000 человеко-часов, в рамках 10 месяцев работает группа из 10 разработчиков. Стоимость работы часа одного разработчика равна 500 рублей. При этом примем:

- количество рабочих дней в неделю равным 5;
- количество рабочих часов в день равным 8;
- минимальный размер одного этапа равным 40 часов (1 рабочая неделя).

Примем гипотезу:

- что стоимость проекта не должна превышать более чем на 15% от заявленной суммы;
- время на реализацию не должно превышать более чем на 7% от заявленного срока.

Ограничения:

- $t$  - длительность этапа - целое число;
- $k$  - количество этапов - целое число.
- $t \geq 40$  час;
- $t \leq 1712$  час;
- $k \geq 1$  шт;
- $k \leq 43$  шт;
- $t * k * 500 \text{ руб/час} * 10 \text{ чел} \leq 9\,200\,000 \text{ руб.}$

лей.

Таблица 3

Стратегии игрока А

| Стратегия       | Количество этапов | Длительность каждого этапа (час) |
|-----------------|-------------------|----------------------------------|
| A <sub>1</sub>  | 40                | 40                               |
| A <sub>2</sub>  | 41                | 40                               |
| A <sub>3</sub>  | 42                | 40                               |
| A <sub>4</sub>  | 20                | 80                               |
| A <sub>5</sub>  | 21                | 80                               |
| A <sub>6</sub>  | 14                | 120                              |
| A <sub>7</sub>  | 10                | 160                              |
| A <sub>8</sub>  | 8                 | 200                              |
| A <sub>9</sub>  | 7                 | 240                              |
| A <sub>10</sub> | 6                 | 280                              |
| A <sub>11</sub> | 5                 | 320                              |
| A <sub>12</sub> | 4                 | 400                              |
| A <sub>13</sub> | 3                 | 560                              |
| A <sub>14</sub> | 2                 | 800                              |
| A <sub>15</sub> | 2                 | 840                              |

Воспользовавшись алгоритмом BruteForce, определим возможные стратегии планирования сдачи выполненных работ. При этом подбор длительности этапа будем вести с шагом 40 часов.

В табл. 3 приведены стратегии для игрока А. Стратегии игрока В:

1) В<sub>1</sub> – активно сотрудничать с менеджером проекта (готов встретиться с менеджером проекта в любое время);

2) В<sub>2</sub> – умеренно сотрудничать с менеджером проекта (готов встретиться с менеджером проекта не чаще, чем раз в 1-3 месяца);

3) В<sub>3</sub> – ограниченно сотрудничать с менеджером проекта во время разработки (готов встретиться с менеджером проекта 2-3 раза за все время разработки).

В табл. 4 представлена платежная матрица.

Таблица 4

Платежная матрица решения задачи

|                 | В <sub>1</sub> | В <sub>2</sub> | В <sub>3</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| A <sub>1</sub>  | 8 000 000      | 0              | 0              |
| A <sub>2</sub>  | 8 200 000      | 0              | 0              |
| A <sub>3</sub>  | 8 400 000      | 0              | 0              |
| A <sub>4</sub>  | 8 000 000      | 0              | 0              |
| A <sub>5</sub>  | 8 400 000      | 0              | 0              |
| A <sub>6</sub>  | 8 400 000      | 0              | 0              |
| A <sub>7</sub>  | 8 000 000      | 8 000 000      | 0              |
| A <sub>8</sub>  | 8 000 000      | 8 000 000      | 0              |
| A <sub>9</sub>  | 8 400 000      | 8 400 000      | 0              |
| A <sub>10</sub> | 8 400 000      | 8 400 000      | 0              |
| A <sub>11</sub> | 8 000 000      | 8 000 000      | 0              |
| A <sub>12</sub> | 8 000 000      | 0              | 0              |
| A <sub>13</sub> | 8 400 000      | 0              | 8 400 000      |
| A <sub>14</sub> | 8 000 000      | 0              | 8 000 000      |
| A <sub>15</sub> | 8 400 000      | 0              | 8 400 000      |

Выигрыши для всех комбинаций стратегий были получены из расчета оплаты рабочего времени при разработке программного обеспечения. Отметим, что этот способ достаточно груб для оценки выигрышной стратегии, но достаточно прост в вычислении. В частности, имитационное моделирование позволяет более качественно провести анализ выигрыша стратегий, но не рамках этой статьи. От качества оценки стратегий и будет зависеть успех следования выигрышной стратегии сдачи выполненных работ заказчику.

Используя данные из платежной матрицы, определим искомые стратегии, при которых будет максимальный средний платеж. Получим следующую табл. 5.

Таблица 5

**Лучшие стратегии сдачи выполненных работ**

| Стратегия | Количество этапов | Длительность каждого этапа (час) |
|-----------|-------------------|----------------------------------|
| A9        | 7                 | 240                              |
| A10       | 6                 | 280                              |
| A13       | 3                 | 560                              |
| A15       | 2                 | 840                              |

Используя методы теории игр, мы рассмотрели возможные варианты деления процесса разработки программного обеспечения на этапы сдачи выполненных работ. В условиях частой смены динамических требований, особенностей группы разработчиков и других причин, влияющий на процесс разработки необходимо учитывать все возможные варианты и, исходя из своего состояния процесса разработки, выбирать наилучший вариант.

Рассмотрим пример с точки зрения использования одной из самых популярных методологий гибкой разработки. Методология Scrum – это набор принципов, на которых строится процесс разработки, позволяющий в жестко фиксированные и небольшие по времени итерации предоставлять заказчику работающий программный продукт.

Спринт – этап разработки в scrum, в ходе которой создается функциональный рост программного обеспечения. Жестко фиксирован по времени. Длительность одного спринта от 2 до 4 недель. В отдельных случаях, к примеру согласно Scrum стандарту Nokia, длительность спринта должна быть не более 6 недель.

Таблица 6

**Стратегии при выборе методологии Scrum**

| Стратегия | Размер спринта       | Прибыль (рублей) |
|-----------|----------------------|------------------|
| A5        | 80 часов = 2 недели  | 8 400 000        |
| A6        | 120 часов = 3 недели | 8 400 000        |
| A9        | 240 часов = 6 недель | 8 400 000        |

В табл. 6 приведены стратегии выбора длительности этапов проекта, с учетом использования методологии Scrum, которые обеспечат

наибольшей стоимостью разработку. При этом мы будем рассматривать от заказчика только стратегии  $B_1$ , потому как другие недопустимы.

Получаем, что при выборе спринта длительностью 4 или 5 недель, стоимость проекта будет ниже максимальной.

Отметим же, что чем короче спринт, тем более гибким является процесс разработки, релизы выходят чаще, быстрее поступают отзывы от потребителя, меньше времени тратится на работу в неправильном направлении. С другой стороны, при более длительных спринтах команда имеет больше времени на решение возникших в процессе проблем, а владелец проекта уменьшает издержки на совещания, демонстрации продукта и т.п. Разные команды подбирают длину спринта согласно специфике своей работы, составу команд и требований, часто методом проб и ошибок [6].

Данный пример демонстрирует применение рассмотренного метода для составления плана сдачи выполненных работ с целью повешения стоимости проекта. Методы теории игр позволяют рассмотреть интересы обеих сторон, что положительно влияет на проект в целом. Учитывая возможные стратегии сдачи выполненных работ, менеджер проекта может выбрать оптимальный вариант, ведущий к максимальной стоимости при текущих условиях разработки.

Данная статья содержит ряд допущений, которые можно детально рассмотреть в следующих работах, например, рассмотрение стратегий выбора размера этапа проекта с учетом того, что некоторые этапы и работы могут выполняться параллельно, последовательно или независимо друг от друга.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Орлик С. Основы программной инженерии (по SWEBOOK) [Электронный ресурс]/С. Орлик – 2014. – Режим доступа : [http://swebok.sorlik.ru/software\\_engineering.html](http://swebok.sorlik.ru/software_engineering.html)
2. Лысаков А.В. Договорные отношения в управлении проектами / А.В. Лысаков, Д.А. Новиков; – М.: ИПУ РАН, 2004.
3. Губко М.В. Теория игр в управлении организационными системами / М.В. Губко, Д.А. Новиков; Издание 2, М.: 2005.
4. Новиков Д.А. Управление проектами: организационные механизмы / Д.А. Новиков; – М.: ПМСОФТ, 2007. – 140 с.
5. Овчинников С.А. Управление проектом по разработке программного обеспечения с целью повышения качества на основе анализа проектных рисков. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т.16. №8 (111). С. 67-72.
6. Майк Кон. Scrum: гибкая разработка ПО / Кон Майк; — М.: «Вильямс», 2011. — С. 576.

## РОБОТОТЕХНИКА

УДК 004.021

*В. А. Беликов, В. В. Жога, В. Н. Скакунов, С. Е. Терехов, И. В. Шаманов*

### СИСТЕМЫ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ РОБОТОВ\*

**Волгоградский государственный технический университет**

zhoga@vstu.ru, svn@vstu.ru

Разработан ряд схмотехнических решений для создания систем машинного зрения мобильных роботов, программное обеспечение для навигации роботов и поиска объектов с заданными параметрами. Проведены экспериментальные испытания робототехнических устройств при дистанционном управлении и в автономном режиме.

*Ключевые слова:* мобильный робот, система технического зрения, камеры структурированного света, компьютер Raspberry Pi, трехмерные облака точек, цветовая модель, поиск маркера.

*V. A. Belikov, V. V. Zhoga, V. N. Skakunov, S. E. Terekhov, I. V. Shamanov*

### MACHINE VISION FOR MOBILE ROBOTS

**Volgograd State Technical University**

A number of circuit solutions for the creation of machine vision-based mobile robots, software for robot navigation and search for objects with the specified parameters. Experimental tests of robotic devices for remote control and autonomous operation.

*Keywords:* mobile robot, machine vision system, camera of structured light, computer Raspberry Pi, 3D point clouds, color model, search for marker.

#### Введение

В современной робототехнике проблема разработки систем пространственной ориентации и навигации мобильных роботов до настоящего времени остается одной из наиболее актуальных задач. В информационно-измерительной и управляющей системе робота при дистанционном управлении или автономной работе анализ данных и формирование цели управления выполняется на основе информации до 80% доставляемой через зрение [1].

Цель настоящей работы заключается в создании нескольких аппаратно-программных вариантов построения систем технического зрения (СТЗ) для последующего применения их как отдельных встраиваемых модулей в других проектах, ориентированных на различные приложения и задачи управления. В этом случае СТЗ должна решать проблемы идентификации препятствий, измерения расстояний, построения карты местности и формирования маршрута движения робота к заданной цели. Основные ограничения при решении задач навигации ро-

бота устанавливаются вычислительные возможности бортовой системы управления и параметры сенсорных камер: телевизионных, веб-камер, камер в ИК-диапазоне.

Рассматривается несколько структур СТЗ, предназначенных для решения разных по сложности задач управления мобильным роботом (МР). Условно их можно отнести к трем типам задач: дистанционное управление с помощью СТЗ, автономное поведение робота и простейшие задачи управления игровыми роботами.

#### Система технического зрения для дистанционного управления МР

Система зрения построена на отладочной плате iMX-233, в основе которой микроконтроллер Atmel ARM926EJ-S, работающий на частоте 454 МГц. Плата включает: динамическое ОЗУ DDR емкостью 64 Мбайт; flash-память емкостью 256 Мбайт; интерфейсы I/O, USB 2.0, SD/MMC card, аудио, видео (аналоговый), I2C, SPI, Ethernet 100M.

В системе используются две вебкамеры Logitech C270, подключенные к материнской плате через интерфейс USB. Разработанные алгоритмы используют библиотеки и функции сис-

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 12-08-00301-а).

темы компьютерного зрения OpenCV. Реализован алгоритм, определяющий расстояние до точек в пространстве перед стереокамерой и строящий приблизительную карту расстояний [2,3]. В разработанном алгоритме сопоставляются ключевые точки, полученные с помощью метода SURF, на левом и правом изображении. Для всех найденных пар точек рассчитывается реальное расстояние от стереокамер до точки. С этой целью две вебкамеры жестко закрепляются относительно друг друга так, чтобы их центральные лучи были параллельны, а камеры калибруются средствами OpenCV.

Для построения карты расстояний требуется знать границы предметов, поэтому выполняется

аппроксимация расчетного расстояния с заливкой области, обведенной контуром. На левом изображении выделяются границы с использованием детектора границ Кенни [4]. Далее из исходного изображения вычитается изображение с границами и выполняется ряд последующих преобразований, уточняющих границы изображений. Точки, полученные после процедуры сравнения, передаются в функцию `cvTriangulatePoints()`, которая также в качестве входных параметров принимает матрицы параметров стереокамер. На выходе формируется матрица расстояний до точек. На рис. 1 приведены виды от левой и правой камер. На изображении от левой камеры нанесены границы объектов.



Рис. 1. Изображения от левой (а) и правой (б) камер с нанесенными границами объектов

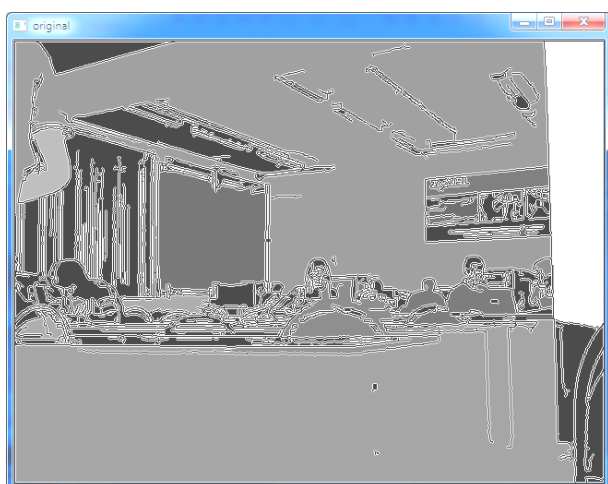


Рис. 2. Карта расстояний

После нахождения ключевых точек, расчета расстояний, выполнена заливка карты расстояний, которая представлена на рис. 2. Более светлый оттенок означает ближний контур, бо-

лее темный – дальний. На черных контурах не найдено ни одной ключевой точки. Для пространственной визуализации карты расстояний создана программа, использующая средства OpenGL и OpenCV. На рис. 3 представлена визуализация карты расстояний.

Более красная область означает ближний контур, более синяя – дальний. К достоинствам разработанного алгоритма можно отнести возможность обнаружения препятствия, достаточно точное определение расстояния до ближних объектов и хорошее разделение объектов с контрастными границами от фона.

К плате контроллера через USB-порт подключен WiFi-приемопередатчик ASUS USB-N10. Для шифрования передаваемых данных применяется стандарт WPA2 с программной поддержкой пакетом `wpa_supplicant` и запускается одноименный процесс в режиме службы. Обработка видеоданных выполняется на удаленном компьютере.

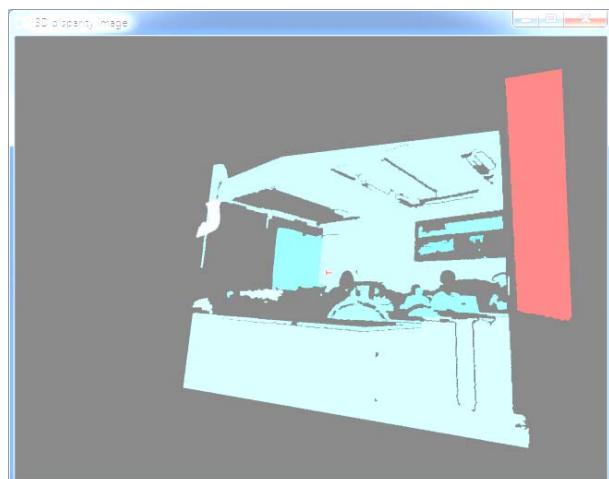


Рис. 3. Пространственная визуализация карты расстояний

Как и многие алгоритмы, обрабатывающие стереоизображение от вебкамер, реализованный алгоритм имеет и существенные недостатки: плохо детектируются границы между объектами похожей яркости, контуры располагаются по плоскостям, поэтому нет объемного изображения объектов, и ряд других, характерных для видеокамер.

#### **Система технического зрения на основе камер структурированного света**

Новые возможности при обработке изображений появляются в СТЗ на основе камер структурированного света [5, 6]. К камерам этого типа относятся сенсорные камеры MS Kinect и ASUS Xtion PRO Live. Камеры работают по технологии разработанной компанией Prime Sense [7]. Камера включает проектор, излучающий свет в ИК-диапазоне в виде псевдослучайного узора, и специально откалиброванный монохромный CMOS сенсор, снимающий полученную картину, а также цветную RGB-камеру и микрофонную решетку. ИК-камера используется для получения данных о расстоянии, а RGB-камера находит применение для телеуправления роботом. Расстояние определяется по искажению известного излучаемого узора на полученной картине. Расчет расстояния происходит на встроенном в камеру контроллере.

В то же время трехмерный массив точек представляет собой начальные данные, над которыми должны выполняться преобразования, необходимые, например, при распознавании объектов или реконструкции поверхностей.

Большинство методов, используемых на отдельных этапах преобразования, имеют вычислительную сложность, быстро возрастающую

с увеличением количества точек в обрабатываемых данных. Для обеспечения выполнения задачи навигации в приемлемое время данные, полученные с камеры структурированного света, должны быть предварительно отфильтрованы для уменьшения количества точек в них без потери информации о препятствиях. В разработанном алгоритме [8] обработки изображений для идентификации препятствий предлагается следующий порядок базовых операций: удаление лишних точек, подавление шумов, уменьшение плотности облака, выделение главных плоскостей, построение дескрипторов облаков точек, классификация объектов, оценка расстояния до объекта. На основе предложенного метода реализован макет СТЗ, состоящий из камеры MS Kinect и ноутбука с процессором Intel SU7300 на тактовой частоте 1,3 ГГц [8]. Экспериментальные исследования проводились для распознавания типовых препятствий вида: объемные объекты простой геометрической формы, дверной проем, лестница, цель которых заключалась в измерении скорости и точности распознавания различных объектов. В ходе экспериментов замерялось время, затраченное на отдельных этапах работы алгоритма при обработке каждого кадра. Общее время обработки одного кадра не превышало 0,7с, а достоверность распознавания была не меньше 0,65.

Камеры структурированного света представляют собой мощный программно-аппаратный комплекс оптического пространственного восприятия, наиболее эффективный в применении для малых мобильных роботов, где критичное значение имеют физические размеры сенсорных камер и бортовых блоков управления. В настоящее время к маломощным вычислительным блокам относятся системы с одноядерными процессорами с частотой до 1 ГГц, небольшим объемом ОЗУ (512 МБ) и отсутствием дискретного графического ускорителя. Исходя из этих ограничительных параметров, выбраны компоненты СТЗ для малых роботов, в частности, в структуру системы включены камера ASUS Xtion Pro Live, имеющая меньшие габариты, чем MS Kinect, одноплатный компьютер Raspberry Pi Model B и радиомодуль Wi-Fi. Все устройства соединяются по интерфейсу USB. Компьютер работает под ОС Debian Linux.

Для обработки изображений использовались библиотеки с открытым кодом: библиотека для решения типичных робототехнических задач ROS Groovy Galapagos и библиотека для работы с облаками точек PCL.



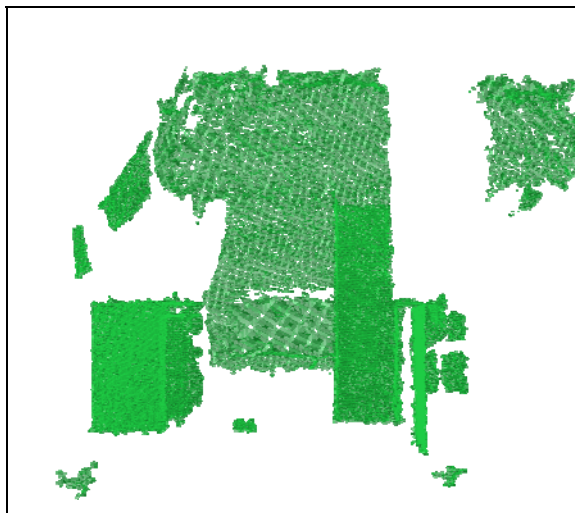
Разработаны алгоритмы обнаружения препятствий, в которых применяется аналогичная последовательность операций с трехмерным облаком точек, как и в макете СТЗ на базе камеры MS Kinect. Однако в этом случае все эта-

пы преобразования выполняются на бортовом компьютере Raspberry Pi.

Для иллюстрации одного из этапов преобразования используется сцена, приведенная на рис. 4.



а



б

Рис. 4. Изображение с камеры (а) и соответствующее ему облако точек (б)

На первом этапе преобразования исходного облака точек выполняется уменьшение плотности. Для снижения количества точек без искажений объектов используется воксельная сетка. Воксельная сетка строится на облаке и все точки внутри каждой ячейки аппроксимируются их центроидом. Этот метод немного медленнее, чем аппроксимация центром ячейки, но позволяет избежать искажений.

Следующие этапы преобразования облака точек зависят от поставленной цели. Реализованы два варианта алгоритмов. В первом алгоритме решалась задача обнаружения препятствий. При этом использовались возможности карты глубины для измерения расстояния до близлежащих объектов с учетом вводимых ограничений по высоте, удаленности объектов, объему классификатора. Во втором алгоритме по данным из предварительно прореженного облака точек строилась карта окружающей местности и маршрут движения робота. Работа с камерой поддерживалась с помощью свободно распространяемого драйвера OpenNI2.

#### **Система технического зрения для малых мобильных роботов**

В аппаратной основе СТЗ минимальный набор технических средств: одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi Model B и камера

Raspberry Pi Camera (специализированная видеочамера для Raspberry Pi).

В системе зрения помимо типового ПО: Raspbian (свободная операционная система для Raspberry, построенная на базе Debian) и библиотеки OpenCV использовалось следующее программное обеспечение:

- MMAL (фреймворк, который предоставляет интерфейс для взаимодействия с модулем камеры);
- gspicam (библиотека для языка программирования C++, позволяющая программно управлять камерой и использовать ее в связке с OpenCV).

Работа СТЗ основана на распознавании образов в получаемом с видеочамеры изображении в режиме реального времени. Система позволяет роботу следовать за маркером и контролировать расстояние до него. Маркер выделяется из изображения на основе цвета и формы. С целью упрощения алгоритма в качестве маркера использовался шар, окрашенный одним цветом. Применение такого объекта гарантирует неизменность контура и площади маркера на полученном изображении в любой проекции, при условии, что расстояние до маркера неизменно.

Алгоритм управления передвижением робота за маркером состоит из трех основных последовательно выполняемых этапов, из кото-

рых самые затратные по времени подзадачи – это считывание кадра с камеры и дальнейшая обработка полученного кадра с целью поиска на нем объекта-маркера. Третья подзадача – формирование команд управления двигателями не требует сложных вычислений.

**Считывание кадра с камеры.** От частоты кадров в видеопотоке камеры зависит быстрота и точность реакции робота на изменения положения маркера, но и объем ресурсов для обработки видеопотока.

Изначально, вместо специализированной камеры для Raspberry использовалась обычная вебкамера Logitech C270. Однако при обработке изображения нагрузка на процессор не опускалась ниже 95% при разрешении входного видеопотока 320x240 точек и частоте 24 кадра в секунду. Высокая загрузка объяснялась тем, что видеопоток декодировался и обрабатывался только процессором микрокомпьютера Raspberry. В камере Logitech C270 используется формат сжатия Motion JPEG, который не поддерживался сопроцессором GPU микрокомпьютера.

Данная проблема решается при подключении камеры Raspberry Pi Camera [10]. Видеоускоритель Raspberry поддерживает аппаратное ускорение декодирования видеопотока в формате H264, MPEG-1 и MPEG-2. Использование аппаратного ускорения позволило существенно уменьшить нагрузку на центральный процессор и увеличить быстродействие: декодирование видео с разрешением 640x480 точек и частотой 29 кадров в секунду нагружает процессор менее чем на 70%.

**Обработка полученного кадра – поиск маркера.** Обработку изображения можно разбить на несколько этапов: конвертирование кадра в удобную для распознавания цветовую модель; наложение цветового фильтра на кадр; выделение контура маркера и отсечение объектов, с совпадающим цветом, но иной формой.

Поиск маркера на кадре выполняется средствами библиотеки OpenCV. В соответствии с предложенным алгоритмом сначала происходит цветовая фильтрация обрабатываемого кадра, затем поиск контуров в кадре. Среди полученных контуров выделяется тот, который удовлетворяет определению маркера, то есть является окружностью. Для проверки формы контуров и выявления окружностей используется отношение периметра и площади у круга:

$$\frac{S}{P^2} = \frac{1}{4\pi},$$

где  $S$  – площадь контура в пикселях, а  $P$  – периметр контура в пикселях.

Каждый найденный контур проверяется на соответствие данному условию. Существуют другие более гибкие и точные алгоритмы поиска фигур по форме, но они требуют больших вычислительных мощностей, что отразится на времени реакции робота. Также на этом этапе вычисляются координаты центра найденного контура для определения направления движения робота.

Особое внимание заслуживает выбор цветовой модели, на основе которой будет выполняться распознавание маркера. Выбор оптимальной цветовой модели становится определяющим, когда основным критерием поиска объекта является цвет. Использование цветового пространства RGB неэффективно для такого поиска. В условиях, когда предмет может освещаться с разной степенью интенсивности, невозможно выделить диапазоны для компонент пространства RGB так, чтобы каждая компонента ограничивалась неразрывным интервалом. Нелинейность этого цветового пространства не позволяет выделить определенный цвет неразрывными интервалами компонент R, G и B. Данная особенность RGB не позволяет использовать определение маркера по цвету – при изменении освещенности объект переставал отслеживаться СТЗ. Кроме того, цвет, представленный в пространстве RGB, зависит от устройств съемки, что приводит к невозможности синхронизации диапазонов компонент цветового пространства на разных камерах. Аналогичные проблемы были выявлены при использовании цветового пространства HSV.

Экспериментально было установлено, что оптимальные цветовые пространства для поставленной задачи – это Luv, Lab и YCbCr, которые лишены вышеописанных недостатков цветовых пространств RGB и HSV. В тоже время, эти пространства не универсальны и разные задачи требуют разных подходов. В рабочей версии СТЗ используется пространство Lab, показавшее лучшие результаты наряде практических тестов. На рис. 5 изображены кадры, получающиеся после обработки кадра, при использовании цветового пространства Lab. Исходный кадр показан на рис. 7, б). После цветовой фильтрации данного кадра, как итог получается кадр, изображенный на рис. 5. Данный кадр имеет уже глубину 1 бит, где белыми пикселями обозначаются области, которые попа-



дают в требуемый диапазон цветов. После поиска замкнутых областей на кадре рис. 5, формируется контейнер, хранящий найденные об-

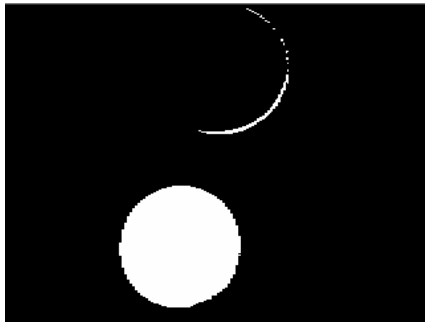


Рис. 5. Цветовая фильтрация кадра

ласти. Для поиска замкнутых областей используется функция поиска границ на изображении – детектор границ Кэнни, реализованная в библиотеке OpenCV. В результате получается массив контуров, среди которого осуществляется поиск нужного в конкретной задаче. Можно осуществлять поиск нескольких контуров, а также анализировать их положение относительно друг друга.

**Формирование команд управления двигателями.** Данная подзадача содержит алгоритм формирования команд управления двигателями робота, от него зависит адекватность реакции устройства на обнаружение объекта. На рис. 6 представлена блок-схема алгоритма.

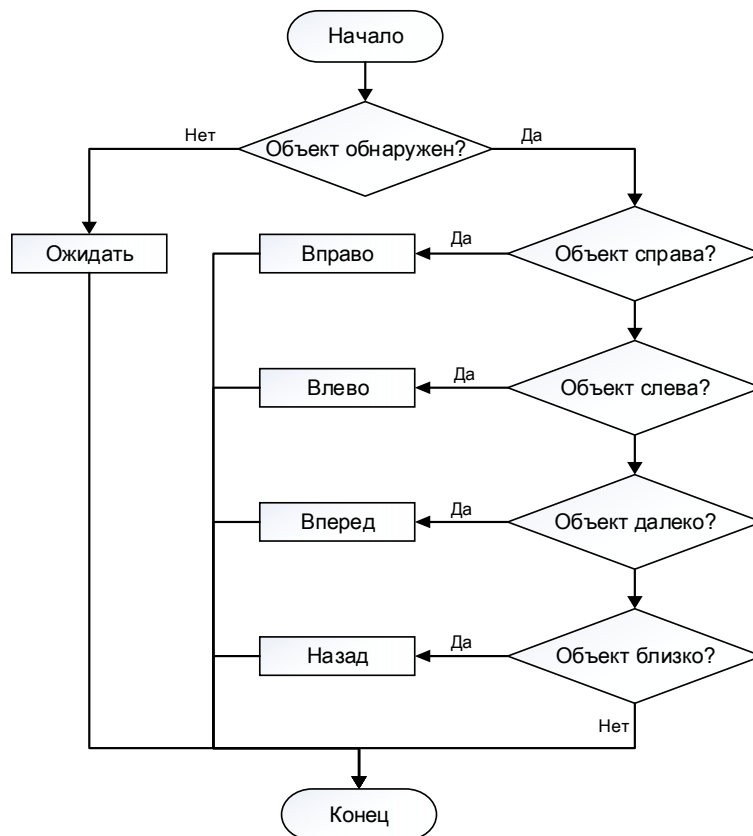


Рис. 6. Блок-схема управления движением робота

Условия основаны на анализе видимой площади маркера (количество пикселей), которая вычисляется на предыдущем этапе. Курс движения робота направлен к центру объекта. Робот перестает поворачивать в сторону объекта только тогда, когда центр объекта находится в заданном заранее окне кадра (рис. 7, а). Чем

меньше окно, тем точнее происходит позиционирование робота. Минимально возможный размер такого окна зависит от многих факторов, но главным образом от плавности движения робота и качества получаемого с камеры изображения.

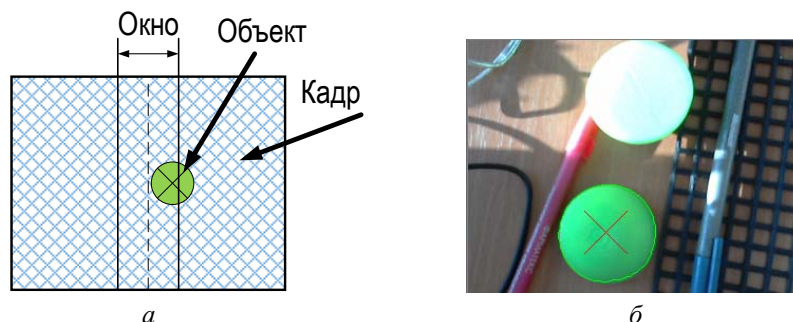


Рис. 7. Анализ положения маркера (а) и обнаружение объекта (б)

Описанный выше алгоритм выполняется на Raspberry Pi, который передает управляющие команды, используя последовательный порт UART, в блок управления приводом.

### Заключение

Изготовлен прототип мобильного робота на колесной платформе с установленной системой технического зрения, выполненной в разных аппаратно-программных вариантах. В качестве сенсорных элементов СТЗ исследовались видеокамеры и ИК-камеры структурированного света. Аппаратная платформа также реализована в нескольких вариантах: на основе 32-разрядных контроллеров с архитектурой ARM 9, Cortex – M4F и одноплатного компьютера Raspberry Pi Model B. Проведенные эксперименты показали, что ограниченные вычислительной мощности бортовой системы в большинстве случаев допускают только дистанционное или супервизорное управление роботом. Сложные задачи навигации и построения маршрута движения робота в недетерминированной среде в реальном времени могут быть решены с помощью многоядерных процессоров, включающих графические ускорители, DSP-процессоры.

Для экспериментальной проверки разработанных алгоритмов распознавания изображений, измерения расстояний, построения маршрута движения были изготовлены макеты СТЗ. Построенные системы зрения позволяют разрабатывать и проверять новые алгоритмы навигации и управления мобильным роботом с наиболее перспективными сенсорными контроллерами.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мобильные технологические роботы и тренажеры: интеграционное программное обеспечение группового взаимодействия / В.П. Андреев, К.Б. Кирсанов, А.В. Костин и др. // Информационно-измерительные и управляю-

щие системы. №4.-М. 2013.- С. 74 – 79.

2. Абрамов, А.Ю. Разработка алгоритма определения расстояния по данным со стереокамер / А.Ю. Абрамов, В.Н. Скакунов, В.О. Лесных // Инновационные информационные технологии : матер. междунар. науч.-практ. конф., г. Прага, Чехия, 22-26 апр. 2013 г. В 4 т. Т. 3 / МИЭМ НИУ ВШЭ [и др.]. - М., 2013. - С. 7-9.

3. Адаптация алгоритмов технического зрения для систем управления шагающими машинами / С.А. Быков, А.В. Еременко, А.В. Гаврилов, В.Н. Скакунов // Известия Волгоградского государственного технического университета. Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»: межвуз. сб. науч. ст. / ВолГТУ. – Волгоград, 2011. – Вып. 10, № 3. С. 52-56.

4. G. Bradski, A. Kaehler. Learning OpenCV. – 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA, USA: O'Reilly, 2008. 555с, ил.

5. The Control System of the Eight-Legged Mobile Walking Robot, Andrey Andreev, Victor Zhoga, Valeriy Serov, Vladimir Skakunov, 11th Joint Conference on Knowledge-Based software Engineering JCKBSE, 2014, 17th-20th, September, Volgograd, Russia, Knowledge-Based Software Engineering Communications in Computer and Information Science Volume 466, 2014, pp. 383-392.

6. Walking Mobile Robot with Manipulator-Tripod / V. Zhoga, A. Gavrilov, V. Gerasun, I. Nesmianov, V. Pavlovsky, V. Skakunov, V. Bogatyrev, D. Golubev, V. Dyashkin-Titov, N. Vorobieva // Proceedings of Romansy 2014 XX CISM-IFTOMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators.- Series: Mechanisms and Machine Science. - Springer International Publishing Switzerland.- Volume 22, 2014, pp 463-471.

7. Sanmartín G. et al. PrimeSense sensors as a low-cost method for motion capture on clinical tests //Spanish Computer Graphics Conference. – The Eurographics Association, 2012. – С. 133-136.

8. Быков, С.А. Применение метода анализа облаков трёхмерных точек в системах технического зрения роботов / С.А. Быков, В.Г. Леонтьев, В.Н. Скакунов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2012. Т.4, №13. С. 37-41.

9. Аппаратная реализация бортовой системы управления шагающим роботом с ортогональными движителями / В.В. Жога, В.Н. Скакунов, А.В. Еременко, А.А. Кравчук // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т.19. № 24 (127). С. 29-35.

10. RaspiCam: C++ API for using Raspberry camera with/without OpenCv: [Электронный ресурс] // Aplicaciones de la Visión Artificial. URL: <http://www.uco.es/investigacion/grupos/ava/node/40/>.

УДК 629.1.03

*Я. В. Калинин, С. А. Устинов, Д. В. Шкутан***ОБ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ОПТИМАЛЬНОМ ДВИЖЕНИИ  
ШАГАЮЩЕЙ МАШИНЫ «ВОСЬМИНОГ» С ЦИКЛОВЫМИ ДВИЖИТЕЛЯМИ\*****Волгоградский государственный технический университет**

dtm@vstu.ru

Рассматриваются шагающие машины с цикловыми движителями. Синтезируется программное движение машины и ее движителей, обеспечивающее минимум реактивной мощности.

*Ключевые слова:* алгоритмы управления, цикловой движитель, ортогональный движитель, шагающая машина, энергетическая эффективность.

*Ya. V. Kalinin, S. A. Ustinov, D. V. Schkutan***ABOUT ENERGETICALLY OPTIMUM MOVEMENT  
OF THE WALKING MACHINE «VOSMINOG» WITH CYCLIC PROPELLERS****Volgograd State Technical University**

Walking machines with cyclic propellers are considered. Program movement of the machine and its propellers, providing a minimum of jet power is synthesized.

*Keywords:* control algorithm, cycle mover, orthogonal mover, walking machine, energy efficiency.

К настоящему времени результаты исследования шагающих машин привели к тому, что уже создан ряд натурных образцов [1, 2, 3].

Однако испытания выявили, что наиболее существенно с ростом скорости шагающей машины растут энергозатраты, связанные с переносом неуровновешенного механизма шагания из одного положения в другое. Общепринято [1, 4], что требуемая выходная мощность привода курсового движения пропорциональна кубу скорости, при этом рост происходит в основном за счет вклада реактивной мощности, которая возникает в связи с разгоном-торможением неуровновешенных масс шагающего движителя. При чем уравновесить динамически полностью шагающие движители крайне сложно и это является одним из главных факторов, сдерживающих повышение скорости движения шагающей машины. Задача повышения энергетической эффективности ставится и эффективно решается уже достаточно давно [5, 6, 7].

В ВолгГТУ создана и прошла испытания в условиях реальной местности мобильная шагающая машина «Восьминог» массой 4,5 т (рис. 1). При средней скорости движения машины  $V_{cp}=0,068$  м/с, максимальное значение мощности привода на курсовое движение машины без учета энергозатрат на работу по преодолению сил тяжести и сил сопротивления (реактивная мощность привода) менее 5 Вт, а при скорости 1,5 м/с требуемая мощность превышает 53 кВт.

**1. Постановка задачи.** Ставится задача определения такого закона изменения горизонтальной скорости опорной точки механизма шагания в относительном движении, при котором реактивная мощность привода равна нулю в каждый момент времени движения. При этом рассматриваются и сравниваются два варианта: задание закона движения центра масс корпуса без учета и с учетом подъема-опускания корпуса.

Для наглядности реализуемости предлагаемого способа снижения энергозатрат и оценки значений параметров динамики движения машины используются простые модельные методы описания курсового движения машины.



Рис. 1. Шагающая машина «Восьминог»

**2. Математическая модель.** Принципиальная схема шагающей машины в режиме курсового движения изображена на рис. 2. Машина моделируется системой трех твердых тел: корпуса и двух стоп, соединенных друг с другом безынерционными обратимыми механизмами

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ: проекты 14-01-00655-А, 14-01-31376-мол\_а, 14-08-31214-мол\_а, 13-08-01144-А, гранта Президента РФ МК-6434.2014.1.

и приводимых в движение одним двигателем. Такая модель соответствует кинематической схеме шагающих движителей машины «Восьминог» и не может быть распространена на общий случай движителей с индивидуальными приводами.

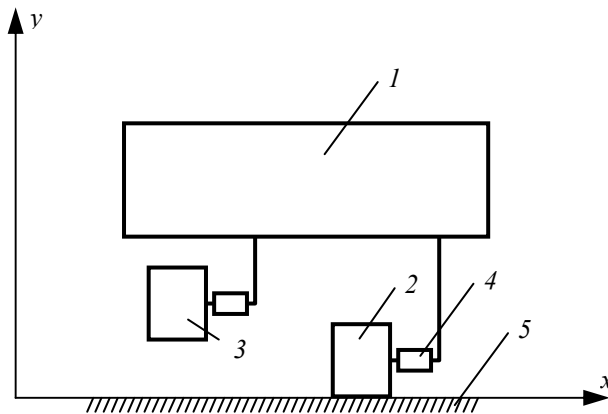


Рис. 2. Модельная схема поступательного движения шагающей машины:

1 – корпус; 2 – эквивалентный механизм шагания (ЭМШ) в фазе опоры; 3 – ЭМШ в фазе переноса; 4 – привод курсового движения; 5 – грунт

Рекуперация энергии происходит следующим образом. В той фазе шагового цикла, когда требуется ускоренное движение стопы находящейся в переносе, вторая стопа, находящаяся в опоре, а вместе с ней и корпус машины движутся замедленно. За счет инерции корпуса, момент на ведущем валу второго механизма шагания становится отрицательным, и, при постоянстве момента развиваемого двигателем, момент на ведущем валу первого механизма возрастает. Таким образом, рекуперация кинетической энергии осуществляется от корпуса к ускоренно движущемуся механизму шагания, и аналогично в обратном направлении при замедлении механизма шагания. Следовательно, при соответствующем управлении можно добиться того, чтобы мощность, развиваемая двигателем, оставалась постоянной.

Движение стоп относительно корпуса задается таким образом, что в каждый момент времени одна из стоп находится в опоре, а вторая в переносе, то есть длительность опорной и переносной фаз равны друг другу.

Считается, что в фазе опоры абсолютная скорость опорной точки равна нулю (отсутствует проскальзывание опорной стопы по грунту). Тогда полная механическая энергия системы, состоящей из корпуса, совершающего поступательное движение в горизонтальной и вертикальной плоскостях (движение корпуса по

вертикали приводится к горизонтальному за счет введения передаточной функции между вертикальной и горизонтальной скоростями корпуса  $V_{\text{верт}} = (dy/dx)V_1$ , обеспечивающей голономную связь), и переносимого механизма шагания, моделируемого абсолютно твердым телом и совершающего поступательное движение относительно корпуса в горизонтальной плоскости, равна

$$E = \frac{1}{2}MV_1^2 + \frac{1}{2}M\left(\frac{dy}{dx}\right)^2V_1^2 + \frac{1}{2}mV_2^2 + Mgy(x), \quad (1)$$

где  $M$ ,  $m$  — масса корпуса машины и масса звеньев механизмов шагания, находящихся в фазе переноса;  $V_1$ ,  $V_2$  — абсолютные горизонтальные скорости машины и опорной точки механизма шагания, находящегося в переносе,  $y(x)$  — зависимость высоты подъема центра масс машины от его горизонтального перемещения, аппроксимируемая прямыми, так как в таком случае обеспечивается равнопеременное движение корпуса с минимальным и постоянным по модулю ускорением,  $g$  — ускорение свободного падения.

$$\begin{cases} y = kx, & \text{при } 0 < x < L/2; \\ y = -kx, & \text{при } L/2 < x < L. \end{cases} \quad (2)$$

**3. Решение поставленной задачи.** Для равенства нулю мгновенной реактивной мощности привода необходимо, чтобы в любой момент времени выполнялось равенство

$$E = \frac{1}{2}MV_1^2 + \frac{1}{2}M\left(\frac{dy}{dx}\right)^2V_1^2 + \frac{1}{2}mV_2^2 + Mgy(x) = \frac{1}{2}MV_{10}^2 + \frac{1}{2}Mk^2V_{10}^2 = \text{const}. \quad (3)$$

где  $V_{10}$  — скорость шагающей машины в момент смены опорных точек механизмов шагания, входящих в движитель (в момент переступания),  $k = 2y_{\text{max}}/L = \text{const}$ , так как  $y(x) = (2y_{\text{max}}x)/L$ , где  $L$  — длина шага,  $y_{\text{max}}$  — максимальная высота подъема центра масс корпуса в отсчете от начального положения.

Тогда из (1)–(2) скорость опорной точки механизма шагания в фазе переноса должна изменяться в соответствии с законом

$$V_2(t) = \sqrt{\frac{2}{m} \sqrt{(1+k^2) \frac{MV_{10}^2}{2} - (1+k^2) \frac{MV_1^2}{2} - Mgy(x)}}, \quad (4)$$

Для обеспечения лучшей равномерности движения (минимума ускорений корпуса) приняты зависимости, обеспечивающие постоянство ускорения центра масс машины и его минимальность при сохранении неизменной длины шага:

$$\begin{cases} 0 \leq t \leq T/4, \\ V_1 = V_{10} - at, \\ x = V_{10}t - \frac{at^2}{2}, \end{cases} \quad \begin{cases} T/4 \leq t \leq T/2, \\ V_1 = V_{min} + at, \\ x = L/2 + V_{10}t + \frac{at^2}{2}, \end{cases} \quad (5)$$

где  $a$  – ускорение машины в горизонтальном движении,  $V_{min}$  – минимальная скорость корпуса машины.

Тогда, подставляя (5) в (4), получаем:

$$V_2(t) = \sqrt{t[a(1+k^2) - gk] \left( \frac{2V_{10}}{\beta} - \frac{a}{\beta}t \right)}, \quad (6)$$

где  $\beta = m/M$  – относительная суммарная масса звеньев механизмов шагания, находящихся в переносе.

Для совместного перемещения корпуса машины и движителей должно выполняться условие

$$\int_0^{T/4} V_2(t) dt = 2 \int_0^{T/4} V_1(t) dt = L. \quad (7)$$

Тогда из (5) и (7) получаем:

$$\begin{cases} V_{cp} = V_{10} - \frac{aT}{8}; \\ \left( \frac{T}{4} - \frac{V_{10}}{a} \right) \sqrt{\frac{V_{10}}{2\beta} [a(1+k^2) - gk] T - \frac{a}{\beta} [a(1+k^2) - gk] \frac{T^2}{16}} - \\ - \frac{V_{10}^2 \sqrt{a(1+k^2) - gk}}{\sqrt{\beta a^3}} \left[ \arcsin \left( 1 - \frac{aT}{4V_{10}} \right) - \arcsin 1 \right] = 2L. \end{cases} \quad (11)$$

**4. Результаты исследования.** При задании параметров механизма, например как у машины «Восьминог»:  $L = 0,756$  м,  $M = 4500$  кг, и требуемой средней скоростью движения,  $V_{cp} = 1,5$  м/с, получаем (12).

$$\begin{cases} \left( V_{10}t - \frac{at^2}{2} \right) \Big|_0^{T/4} = L/2, \\ \int_0^{T/4} \sqrt{t[a(1+k^2) - gk] \left( \frac{2V_{10}}{\beta} - \frac{a}{\beta}t \right)} dt = L. \end{cases} \quad (8)$$

Условие  $t[a(1+k^2) - gk] \left( \frac{2V_{10}}{\beta} - \frac{a}{\beta}t \right) > 0$  рас-

падает на два, при  $0 < t < T/4$ :

$$\begin{cases} \frac{2V_{10}}{\beta} - \frac{a}{\beta}t > 0; \\ a(1+k^2) - gk > 0. \end{cases} \quad (9)$$

Первое условие выполняется из (5) в силу однонаправленности движения корпуса машины. Тогда объединение (5) и (10) дает

$$\begin{cases} 0 < T < \frac{8V_{10}}{g}; \\ \frac{gk}{1+k^2} < a < \frac{4V_{10}}{T}. \end{cases} \quad (10)$$

Таким образом, выбранный способ движения ограничивает максимальную скорость движения машины, а также максимальные ускорения корпуса независимо от конкретной конструкции циклового механизма шагания.

Решая систему (8) и задавая параметрами  $k$  и  $L$  (параметры механизма), а также требуемой средней скоростью движения машины  $V_{cp}$  получаем зависимости вида

$$a = a(\beta) \text{ и } V_{cp} = V_{cp}(\beta):$$

Таким образом, появляется поле для дальнейшего исследования возможных вариантов увеличения максимальной скорости движения машины при неизменной длине шага за счет, например, снижения масс механизмов шагания,

при выполнении условий (11). На рис. 3 представлены зависимости абсолютной горизонтальной скорости опорной точки в фазе пере-

носа и абсолютной горизонтальной скорости шагающей машины.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{cp} = V_{10} - \frac{aT}{8}; \\ \sqrt{a(1+k^2) - gk} \left\{ \left( \frac{4aL - 8V_{cp}^2 - TV_{cp}a}{8aV_{cp}} \right) \sqrt{\frac{8V_{cp} + aT}{8V_{cp}}} L - \frac{aL^2}{4\beta V_{cp}^2} - \right. \\ \left. - \frac{\left( V_{cp}^2 + \frac{aTV_{cp}}{4} + \frac{a^2T}{64} \right)}{\sqrt{\beta a^3}} \left[ \arcsin \left( \frac{2V_{cp}^2 + \frac{aTV_{cp}}{4} - aL}{2V_{cp}^2 + \frac{aTV_{cp}}{4}} \right) - \arcsin 1 \right] \right\} = 2L. \end{array} \right. \quad (12)$$

Корпус машины в этом случае движется неравномерно, его ускорение определяется выражением  $a = a(\beta)$ .

Для приведенного ранее расчета (рис. 3)  $V_{cp}=1,5$  м/с,  $\beta=0,05$ ,  $V_{10}=1,89$  м/с,  $V_{min}=1,11$

м/с,  $L=0,756$  м,  $k=0,148$  и  $a=3,1$  м/с<sup>2</sup>. Для сравнения, максимальное ускорение туловища человека при нормальной ходьбе составляет 2,5 м/с<sup>2</sup> [5].

$V_1, V_2$ , м/с

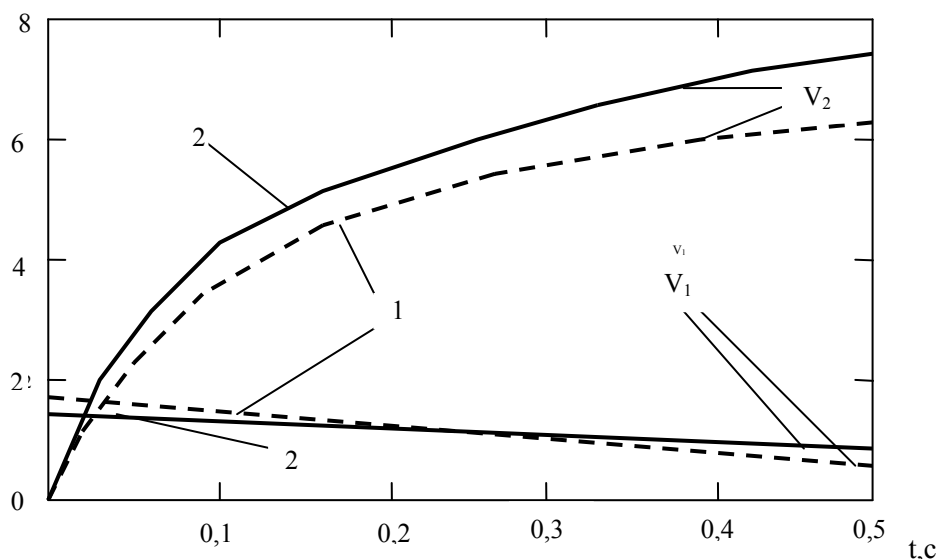


Рис. 3. Зависимости скорости от времени на первой половине периода шага (при  $V_{cp}=1,5$  м/с,  $\beta=0,05$ ): 1 – с учетом подъема-опускания корпуса; 2 – без учета подъема-опускания корпуса.

В случае если подъем-опускание корпуса не учитывается, получаем из (12)

$$\left\{ \begin{aligned} V_{cp} &= V_{10} - \frac{aT}{8}; \\ \left( \frac{4aL - 8V_{cp}^2 - TV_{cp}a}{8aV_{cp}} \right) \sqrt{\frac{\left( \frac{8V_{cp} + aT}{8V_{cp}} \right)}{\beta}} aL - \frac{L^2 a^2}{4\beta V_{cp}^2} - \\ - \frac{\left( V_{cp}^2 + \frac{aTV_{cp}}{4} + \frac{a^2 T}{64} \right)}{a\sqrt{\beta}} \left[ \arcsin \left( \frac{2V_{cp}^2 + \frac{aTV_{cp}}{4} - aL}{2V_{cp}^2 + \frac{aTV_{cp}}{4}} \right) - \arcsin 1 \right] &= 2L. \end{aligned} \right. \quad (13)$$

Для тех же значений параметров, что и в приведенном выше расчете,  $V_{10}=1,78$  м/с,  $V_{min}=1,22$  м/с и  $a=2,2$  м/с<sup>2</sup>.

При учете подъема-опускания корпуса, колебания скорости корпуса машины и возникающие при этом ускорения больше при одном

и том же  $\beta$ , чем в случае если это явление не учитывается; необходимая для равенства нулю реактивной мощности масса движителей меньше, чем, в случае если подъем-опускание не учитывается, однако с ростом  $\beta$  это различие нивелируется (рис. 4).

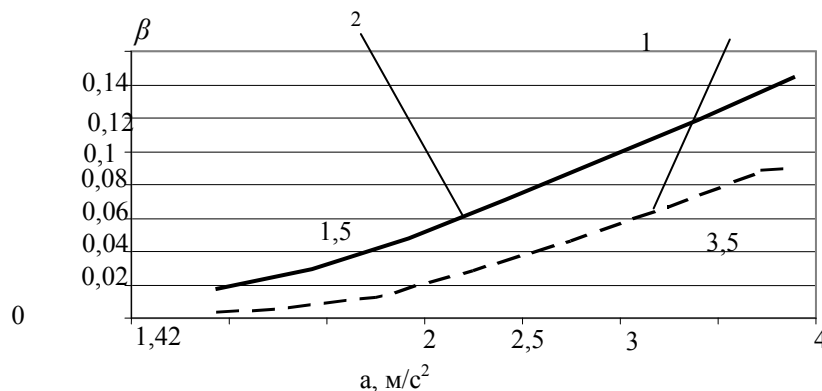


Рис. 4. Коэффициент  $\beta$  (при  $V_{cp}=1,5$  м/с), необходимый для обеспечения минимального ускорения корпуса: 1 – с учетом подъема-опускания корпуса; 2 – без учета подъема-опускания корпуса

**5. Выводы.** Таким образом, при игнорировании требования равномерности движения шагающей машины, получается значительное снижение требуемой мощности привода за счет исключения реактивной мощности, необходимой для переноса движителей. Установлено, что движение шагающей машины с равномерным прямолинейным движением точки подвеса (комфортабельное движение) ног требует больших энергозатрат, чем некомфортабельное с периодическим разгоном и торможением центра масс машины, что совпадает с решениями полученными другими способами [6, 7].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Охоцимский Д.Е., Голубев Ю.Ф. Механика и управление движением автоматического шагающего аппарата. – М.: Наука, 1984. – 310с.

2. Брискин Е.С., Жога В.В., Чернышев В.В., Малолетов А.В. Основы расчета и проектирования шагающих машин с цикловыми движителями. – М.: ООО «Изд-во Машиностроение-1», 2006. – 164 с.

3. Warren H.A. CLAWAR2 – Mobile machines operating in outdoor unstructured terrains //Climbing and Walking Robots: Proc. of the Fifth International Conference CLAWAR 2002. – London, 2002.— С.907–916.

4. Лапшин В.В. Модельные оценки энергозатрат шагающего аппарата //Известия АН СССР. МТТ. № 1. – 1993. – С.38–43.

5. Калинин Я.В. Задачи поиска энергетически эффективных алгоритмов движения шагающих машин / Калинин Я.В., Устинов С.А., Шкутан Д.В. // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 24 (127). С. 36-38.

6. Брискин Е.С. Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями / Брискин Е.С., Калинин Я.В. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2011. № 2. С. 170-176.

7. Брискин Е.С. Об энергетической эффективности цикловых механизмов / Брискин Е.С., Калинин Я.В., Малолетов А.В., Чернышев В.В. // Изв. РАН. МТТ. 2014. № 1. С. 18-25.



УДК 629.1.03

*А. В. Леонард, А. В. Малолетов, А. Е. Гаврилов, Я. В. Калинин***ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИВОДА КУРСОВОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ  
ШАГАЮЩЕГО АППАРАТА «ЦИКЛОН»\*****Волгоградский государственный технический университет**

Alex-Leonard@yandex.ru, dtm@vstu.ru

Рассматривается идентификация параметров приводов курсового перемещения робота «Циклон» и характеристик управления усилителями.

*Ключевые слова:* цикловой движитель с направляющей, идентификация параметров робота.

*A. V. Leonard, A. V. Maloletov, A. E. Gavrilov, I. V. Kalinin***IDENTIFICATION OF FORWARD DRIVE PARAMETERS  
OF WALKING MACHINE «CYCLONE»****Volgograd State Technical University**

Identification of the drive parameters of the course moving robot "Cyclone" and the characteristics of the control amplifiers has been considered.

*Keywords:* cycle walking propeller with directing, identification of robot parameters

**Введение.** В рамках задачи построения программного комплекса для управления [1–5] шагающим аппаратом «Циклон» (рис. 1) [6] необ-

ходимо знать параметры приводов и характеристики системы управления, влияющие на процесс регулирования [7,8].

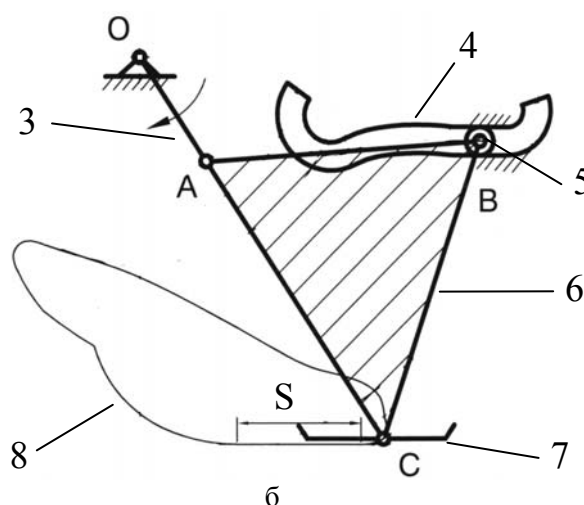
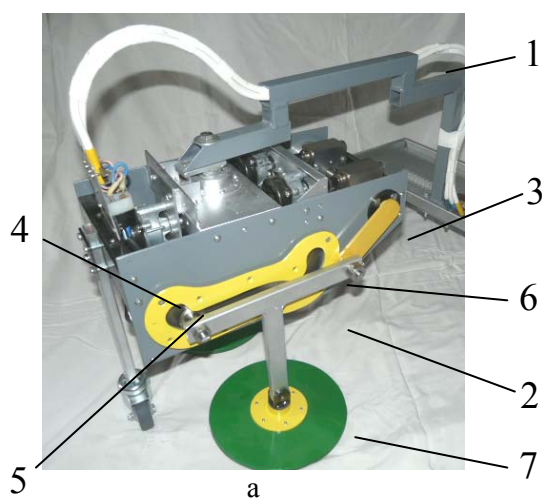


Рис. 1. Шагающий аппарат «Циклон» (а) и Цикловый механизм шагания (б):

1 – поддерживающая рама, 2 – цикловой движитель, 3 – кривошип, 4 – направляющая, 5 – ролик, 6 – шатун, 7 – стопа, 8 – траектория т. С

В качестве бортового устройства, генерирующего с заданным временным интервалом значения управляющих напряжений, выбран микроконтроллер Atmega 2560 (рис. 2) с высокой тактовой частотой до 16 МГц. Выбор этого типа процессора корпорации Atmel обусловлен наличием у него 6 таймеров – счетчиков и вместительной программной Flash-памятью на 256 Кб.

Ввиду того, что приводами курсового перемещения аппарата являются двигатели постоянного тока, подсоединенные к червячным передачам, характеризующимся повышенным трением, в качестве усилителей тока используются макетные платы с мощными Н – мостовыми схемами (рис. 3.) на биполярных транзисторах пропускной способностью до 20 А [9].

\* Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 862) и РФФИ (грант 14-08-31214 мол\_а, 14-01-00655 а, 14-01-31376\_мол\_а)



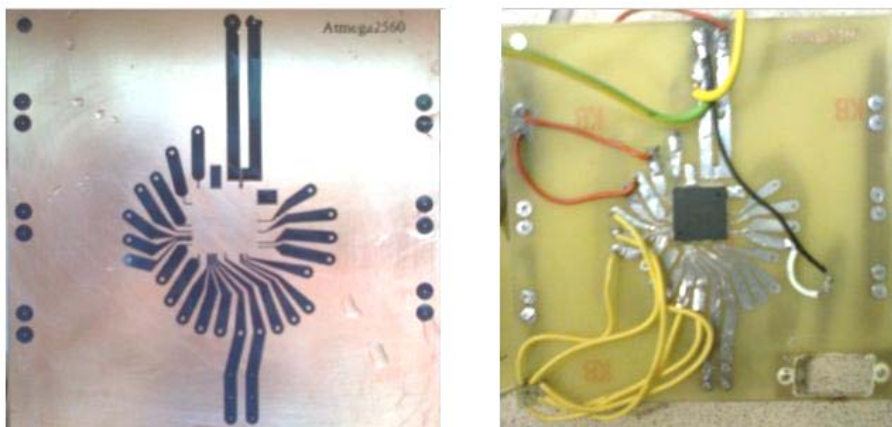


Рис. 2. Микропроцессор Atmega 2560 (разводка пинов / плата)

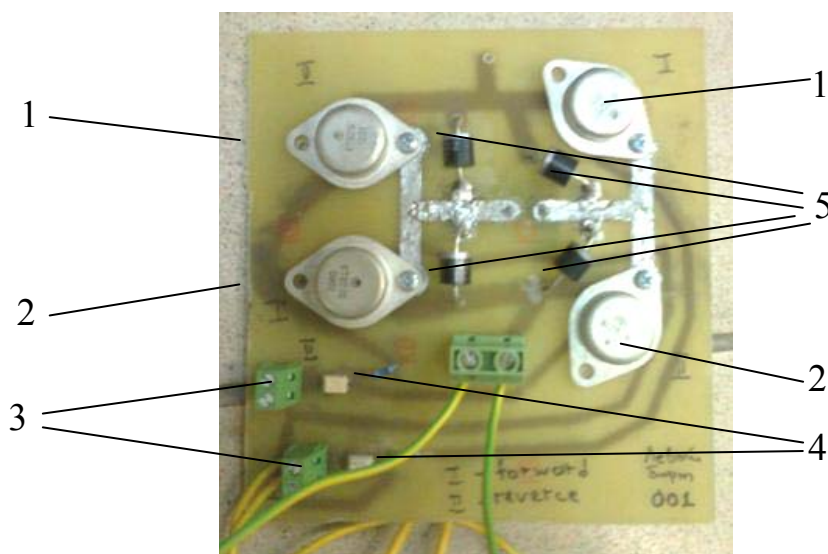


Рис. 3. Усилитель на биполярных транзисторах:

1 – транзистор КТ825Г; 2 – КТ827В; 3 – оптопара TLP627 (F), 60 мА; 4 – резистор 360 Ом; 5 – диод FR602 импульсный

**Метод идентификации.** Для идентификации параметров привода правого и левого борта движителя принимается уравнение следующего вида:

$$I\dot{\omega} = M_{м.-р.} - M_{мп.},$$

где  $I$  – момент инерции, приведенный к оси вращения кривошипа;  $\dot{\omega}$  – угловое ускорение кривошипа;  $M_{м.-р.}$  – момент развеваемый приводом;  $M_{мп.}$  – момент сопротивления, обусловленный трением в приводе. С учетом вида статической характеристики двигателя постоянно-го тока уравнение переписывается в форме:

$$I\dot{\omega} = \gamma_1 U - \gamma_2 \omega - M_{мп.}$$

Таким образом, идентификации подлежат коэффициенты пропорциональности  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и момент сопротивления  $M_{мп.}$  внутри привода. Так как угловые ускорения при перемещении

движителя не значительны [1], то уравнение можно переписать:

$$\gamma_1 U - \gamma_2 \omega - M_{мп.} = 0.$$

Для старта привода в отсутствии нагрузки и при приложении заранее известного момента сопротивления к оси кривошипа можно сформировать систему уравнений:

$$\begin{cases} M_{мп.} = \gamma_1 U_{\min}, \\ M_{мп.} + \Delta M = \gamma_1 U. \end{cases}$$

Измерение напряжений  $U_{\min}$  и  $U$ , соответствующих началу движения, позволяет разрешить систему относительно неизвестных  $\gamma_1$  и  $M_{мп.}$ :

$$\gamma_1 = \frac{\Delta M}{U - U_{\min}},$$

$$M_{мп.} = \frac{\Delta M}{U - U_{\min}} U_{\min}.$$

При работе привода с максимальной угловой скоростью определяется параметр  $\gamma_2$ :

$$\gamma_2 = \frac{\gamma_1 U_{\max} - M_{\text{тр.}}}{\omega_{\max}}.$$

Для точности управления за каждым бортом машины закрепляется отдельный драйвер (уси-

литель) двигателя. Измерения производятся для диагонали Н – мостовой схемы усилителя ответственной за движение вперед.

**Результаты экспериментов.** В результате проведенных экспериментов была сформирована таблица, в которой приведены искомые параметры приводов.

#### Идентификация параметров

##### Левый борт

| $\Delta M, \text{ Нм}$ | $U_{\min}, \text{ В}$ | $U, \text{ В}$ | $\gamma_1, \text{ Нм/В}$ | $M_{\text{тр.}}, \text{ Нм}$ | $U_{\max}, \text{ В}$ | $\omega_{\max}, \text{ рад/с}$ | $\gamma_2$ |
|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------|
| 2,53                   | 3,28                  | 3,475          | 12,97                    | 42,56                        | 11,76                 | 0,276                          | 398,43     |

##### Правый борт

| $\Delta M, \text{ Нм}$ | $U_{\min}, \text{ В}$ | $U, \text{ В}$ | $\gamma_1, \text{ Нм/В}$ | $M_{\text{тр.}}, \text{ Нм}$ | $U_{\max}, \text{ В}$ | $\omega_{\max}, \text{ рад/с}$ | $\gamma_2$ |
|------------------------|-----------------------|----------------|--------------------------|------------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------|
| 2,53                   | 2,27                  | 2,43           | 15,81                    | 35,89                        | 11,76                 | 0,326                          | 460,23     |

В соответствии с приведенной таблицей построены механические характеристики приводов при напряжении питания  $U = 11.76 \text{ В}$ .

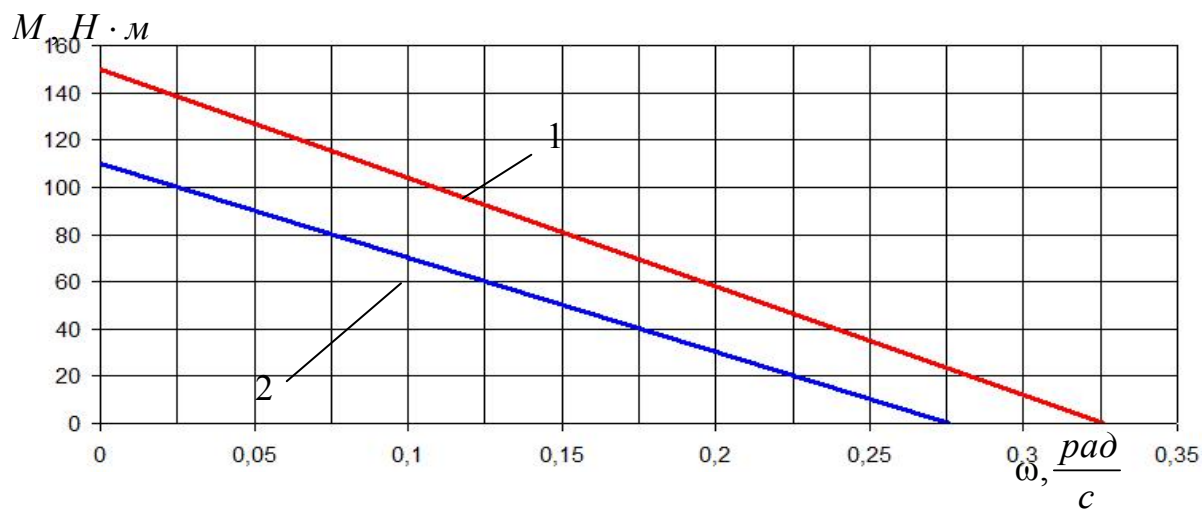


Рис. 4. Механические характеристики приводов курсового движения:  
1 – правый борт, 2 – левый борт

Из рис. 4 видно, что развиваемый левым приводом механический момент меньше момента привода правого борта шагающего аппарата. Для каждого из усилителей сняты управляющие характеристики. Под управляющей характеристикой понимается зависимость напряжения, снимаемого с клемм Н-мостовой схемы усилителя, от управляющего уровня (целого

числа  $i$ ) регистра сравнения таймера – счетчика (рис. 5, 6) без нагрузки на валу двигателя.

На основе полученных экспериментальных зависимостей были построены аппроксимирующие прямые, устанавливающие линейную связь между напряжением на клеммах двигателей и управляющими уровнями для правого и левого борта движителя (рис. 7).

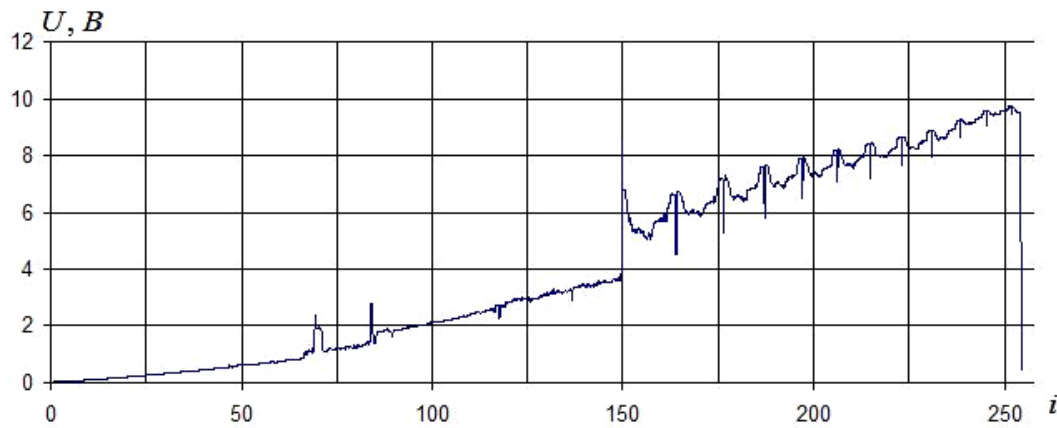


Рис. 5. Характеристика управления усилителем привода левого борта

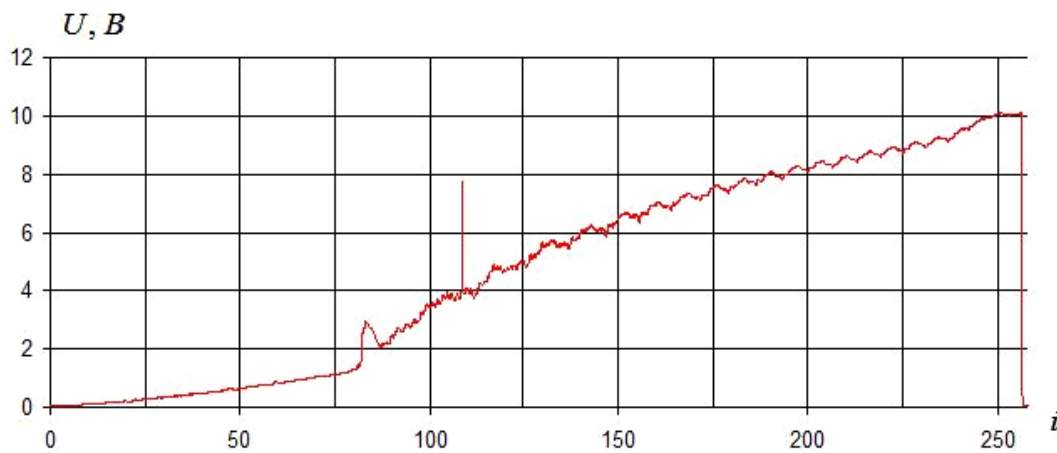


Рис. 6. Характеристика управления усилителем привода правого борта

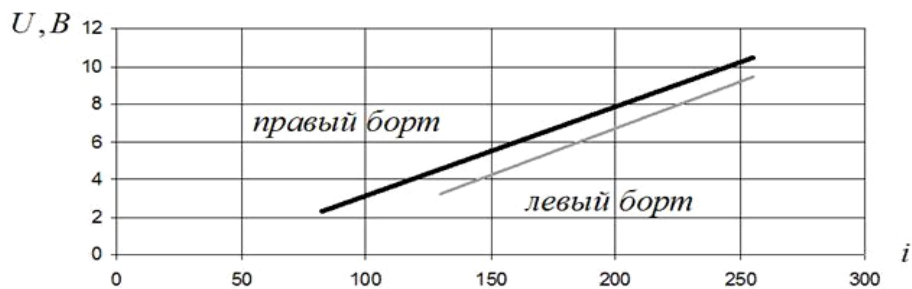


Рис. 7. Характеристики управления приводами курсового движения

Из рис. 7 следует, что привод левого борта запускается при большем значении напряжения на клеммах двигателя. Измерения производились при помощи измерительной системы (рис. 8) состоящей: из 1 – привода двигателя, 2 – усилителя, 3 – микропроцессора, задающего управляющие уровни, 4 – источников питания микропроцессора и привода, 5 – цифрового мультиметра, подключенного к ПК через интерфейс UART, 6 – программатора, кодирующего требуемое время смены управляющих уровней (равные интервалы времени изменения параметра  $i$  в микроконтроллере).

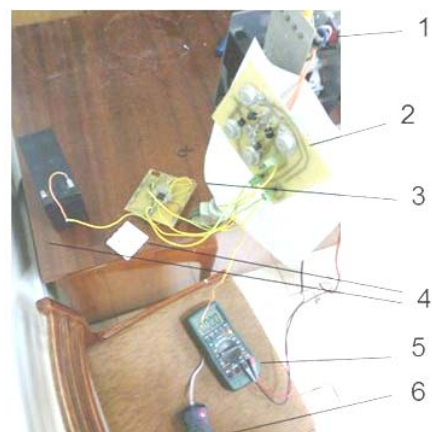


Рис. 8. Измерительная система

**Заключение.** Установлено, что привод левого борта шагающего аппарата характеризуется значительным трением. Данные проведенных экспериментов позволили определить значения коэффициентов  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$  и построить характеристики управления каждого из приводов курсового перемещения, введение которых в математическую модель программного управления способствует реализации точного энергетически эффективного регулирования шагающим аппаратом «Циклон» [10].

Работы по организации точного и энергетически эффективного управления шагающим аппаратом на основе полученных характеристик управления могут быть продолжены в целях обеспечения оптимального рекуперативного закона движения, как, например, это показано в работе [11] для шагающего аппарата в целом и в работе [12] для отдельного циклового механизма. Необходимость учитывать особенности работы движителей является актуальной проблемой, например, для шагающих машин типа «Восьминог». Не достаточно точная отработка двигателями программных законов движения приводит к повышенным энергозатратам и невозможности реализовать такие алгоритмы управления, как преодоление твердых препятствий и коррекция курсовой неустойчивости машины [13, 14]. Особенно важным учет характеристик цикловых движителей в математических моделях управления шагающей машиной становится при использовании механизмов с дополнительными степенями свободы [15].

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Брискин, Е.С. Устойчивость поступательного движения шагающей машины с цикловыми движителями / Е.С. Брискин, А.В. Леонард // Изв. РАН. Теория и системы управления. - 2013. - № 6. - С. 131-138;
2. Брискин, Е.С. О безударном режиме движения шагающей машины со сдвоенным поворотным движителем / Брискин Е.С., Леонард А.В. // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2013. - № 11. - С. 25-27 + 2-я и 3-я стр. обложки.
3. Леонард, А.В. Разработка системы управления для поворотного-циклового шагающего движителя / Леонард А.В., Павловский В.Е. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 19 : межвуз. сб. науч. тр. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 24 (127). - С. 52-57.
4. Problems of Increasing Efficiency and Experience of Walking Machines Elaborating / Брискин Е.С., Шурыгин В.А., Чернышев В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г., Калинин Я.В., Леонард А.В., Серов В.А., Мироненко К.Б., Устинов С.А. // Advances on theory and practice of robots and manipulators : proceedings of ROMANSY 2014 XX CISM-IFToMM Symposium on Theory and Practice of Robots and Manipulators (Moscow, 23-26 June 2014) / ed. by Marco Ceccarelli, V.A. Glazunov ; Bauman Moscow State Technical University [etc.]. - [Switzerland] : Springer International Publishing, 2014. - P. 383-390. - (Mechanisms and Machine Science ; Vol. 22).
5. Жога, В.В. Динамический алгоритм стабилизации походки шагающей машины / Жога В.В., Гаврилов А.Е. // Искусственный интеллект / НАН Украины. - 2008. - № 3. - С. 428-433
6. Леонард А.В. Цикловый шагающий механизм с направляющей // Изв. вузов. Машиностроение. 2011. № 10. С. 18-22.
7. Адаптация алгоритмов технического зрения для систем управления шагающими машинами / Быков С.А., Еременко А.В., Гаврилов А.Е., Скакунов В.Н. // Изв. ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 10 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2011. - № 3. - С. 52-56.
8. Еременко, А.В. Микропроцессорная система управления роботизированными манипуляторами / Еременко А.В., Малолетов А.В., Скакунов В.Н. // Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2010. - Т. 3. № 4. - С. 88-94.
9. Никулин Ю. В., Ермолаев М., Куралина Н. Проектирование и расчет различных схем управления высокомоментным двигателем постоянного тока [электронное научно – техническое издание]. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/255498.html>
10. Леонард, А.В. Цикловый шагающий движитель с направляющими. Свойства. Управление. Пути совершенствования / Леонард А.В. // Известия ВолгГТУ. Серия "Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах". Вып. 16 : межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. - Волгоград, 2013. - № 8 (111). - С. 81-85.
11. Брискин Е.С., Калинин Я.В. Об энергетически эффективных алгоритмах движения шагающих машин с цикловыми движителями Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2011. №2. С.170-176
12. Брискин Е.С., Калинин Я.В., Малолетов А.В., Чернышев В.В. Об энергетической эффективности цикловых механизмов Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2014. №1. С.18-25
13. Брискин, Е.С. Концепция проектирования, динамика и управление движением шагающих машин. Ч.3. Алгоритмы управления движением шагающих машин серии Восьминог и экспериментальные исследования / Брискин Е.С., Чернышев В.В., Жога В.В., Малолетов А.В., Шаронов Н.Г., Фролова Н.Е. // Мехатроника, автоматизация, управление. - 2005. - № 7. - С. 13-18.
14. Брискин, Е.С. Курсовая устойчивость шагающей машины «Восьминог» / Брискин Е.С., Шурыгин В.А., Жога В.В., Чернышев В.В., Малолетов А.В. // Информационно-измерительные и управляющие системы. - 2006. - № 1-3. - С. 56-58.
15. Малолетов, А.В. Управление цикловым шагающим движителем на основе шарнирного четырехзвенника с изменяемой длиной коромысла / Малолетов А.В., Брискин Е.С. // Известия Волгоградского государственного технического университета. - 2014. - Т. 21. № 12 (139). - С. 163-169.