Главный редактор научного журнала
«Известия Волгоградского государственного технического университета»
академик РАН, профессор, доктор химических наук,
президент Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ)
И. А. НОВАКОВ

Редакционная коллегия:

Байбурин В. Б., д-р физ.-мат. наук, проф., академик РАЕН, засл. деятель науки РФ,
Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Безъязычный В. Ф., д-р техн. наук, проф.,
Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева (г. Рыбинск, Россия)
Бодров В. Н., д-р, проф., Университет прикладных наук (г. Берлин, Германия)
Бребельс А., PhD, доцент факультета инженерных наук университета г. Левена (г. Левен, Бельгия)
Буренин А. А., чл.-корр. РАН, Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН
(г. Комсомольск-на-Амуре, Россия)
Головančиков А. Б., д-р. техн. наук, проф. ВолгГТУ
Гринберг Б. А., д-р физ.-мат. наук, Институт физики металлов УрО РАН (г. Екатеринбург, Россия)
Гуревич Л. М., д-р техн. наук, доц. ВолгГТУ
Добрушин Л. Д., д-р техн. наук, Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины (г. Киев, Украина)
Злотин С. Г., д-р хим. наук, проф., Институт органической химии им. Н. Д. Зелинского РАН (г. Москва, Россия)
Иванов А. М., д-р техн. наук, проф.,
Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ, г. Москва, Россия)
Иващенко Н. А., д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, МГТУ им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)
Королев А. В., д-р техн. наук, проф., Саратовский государственный технический университет (г. Саратов, Россия)
Кузьмин С. В., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Кураев А. А., д-р физ.-мат. наук, проф., Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(БГУИР, г. Минск, Республика Беларусь)
Лысак В. И., чл.-корр. РАН, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Марков В. А., д-р техн. наук, проф., Московский государственный технический университет
(МГТУ) им. Н. Э. Баумана (г. Москва, Россия)
Мертен Клеменс, д-р техн. наук, проф. Universität Stuttgart Institut für Chemische Verfahrenstechnik
(г. Штутгарт, Германия)
Навроцкий А. В., д-р хим. наук, проф. ВолгГТУ
Нижегородцев Р. М., д-р экон. наук, главный научный сотрудник,
Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова РАН (г. Москва, Россия)
Пай В. В., д-р физ.-мат. наук, Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)
Полянчиков Ю. Н., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Пустовойт В. Н., д-р техн. наук, проф., засл. деятель науки РФ, Донской государственный технический университет
(г. Ростов-на-Дону, Россия)
Ревин А. А., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Русинов В. Л., чл.-корр. РАН, Химико-технологический институт Уральского федерального университета
(ХТИ УрФУ, г. Екатеринбург, Россия)
Рыбин В. В., чл.-корр. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.,
Санкт-Петербургский политехнический университет (г. Санкт-Петербург, Россия)
Трюэль Жан-Луи, д-р экон. наук, проф., Университет «Париж-12», Сорбонна, Франция,
вице-президент Международного клуба экономистов «Круг Кондратьева»
Тхай Куанг Винь, д-р философии, Институт информационных технологий (г. Ханой, Вьетнам)
Федянов Е. А., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Фролов В. А., д-р техн. наук, проф., МАТИ – Российский государственный технологический университет
им. К. Э. Циолковского (г. Москва, Россия)
Шарипов В. М., д-р техн. наук, проф.,
Московский государственный технический университет (МАМИ, г. Москва, Россия)
Шаховская Л. С., д-р экон. наук, проф. ВолгГТУ
Шеин А. Г., д-р физ.-мат. наук, проф. ВолгГТУ
Щербаков М. В., д-р техн. наук, проф. ВолгГТУ
Яковлев И. В., д-р техн. наук,
Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН (г. Новосибирск, Россия)

Серия

«АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ И ИНФОРМАТИКИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»

ИЗВЕСТИЯ

ВОЛГОГРАДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

Председатель
Щербаков М. В., д.т.н., проф.

Аверченков В. И., д.т.н., проф. (БрГТУ, г. Брянск, Россия)
Бершадский А. М., д.т.н., проф. (ПензГУ, г. Пенза, Россия)
Брискин Е. С., д.ф.-м.н., проф.
Горобцов А. С., д.т.н., проф.
Дворянкин А. М., д.т.н., проф.
Заболеева-Зотова А. В., д.т.н., проф.
Кравец А. Г., д.т.н., проф.
Курейчик В. М., д.т.н., проф. (ТагГРТУ, г. Таганрог, Россия)
Петрова И. Ю., д.т.н., проф. (АИСИ, г. Астрахань, Россия)
Проталинский О. М., д.т.н., проф. (АстрГТУ, г. Астрахань, Россия)
Тхай Куанг Винь, д-р философии (Институт информационных технологий, г. Ханой, Вьетнам)
Фоменков С. А., д.т.н., проф.
Шилин А. Н., д.т.н., проф.
Юрген Баст, д.т.н., проф. (Технический университет Горной Академии, г. Фрайберг, Германия)

Международный индекс журнала
ISSN 1990-5297

Журнал распространяется по подписке.
Индекс журнала по каталогу Агентства «Роспечать» для Российской Федерации – 80811(ОК+ЭК). По вопросам подписки обращаться в издательство.
Тел. издательства ВолгГТУ:
(8442) 24-84-06
Факс (8442) 24-84-06
otr@vstu.ru

Научный журнал
Издается с января 2004 г.
Выходит двенадцать раз в год

№ 1 (196) Январь 2017

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет»

Адрес редакции:
Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Волгоградского государственного технического университета

Авторское право на журнал в целом принадлежит Учредителю, на отдельные статьи – сохраняется за автором

Перепечатка из журнала «Известия Волгоградского государственного технического университета» категорически запрещена без оформления договора в соответствии с действующим законодательством РФ

При перепечатке материалов ссылка на журнал «Известия Волгоградского государственного технического университета» обязательна

© Волгоградский государственный технический университет,
«Известия Волгоградского государственного технического университета», 2017

Head Editor of the scientific journal “Izvestiya VSTU”:
Novakov I. A. – Academician of RAS, Prof., Doctor of Chemistry, President of VSTU

Editorial board:

Baiburin V. B., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Academician of RANS, Honored Scientist of the Russian Federation, State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)
Bezyazychny V. F., D. Sc. (Engineering), Prof., Rybinsk State Aviation Technical University named after P.A. Solovyov (Rybinsk, Russia)
Bodrov V. N., D. Sc., Prof., University of Applied Sciences (Berlin, Germany)
Brebels A., PhD, Associate Prof., Faculty of Engineering Science of University of Leuven (Leuven, Belgium)
Burenin A. A., Corresponding Member of RAS, Institute of Machinery and Metallurgy of the FEB RAS (Komsomolsk-on-Amur, Russia)
Golovanchikov A. B., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Grinberg B. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Institute of Metal Physics, Ural Division of RAS (Ekaterinburg, Russia)
Gurevich L. M., D. Sc. (Engineering), Associate Prof. of VSTU
Dobrushin L. D., D. Sc. (Engineering), E.O. Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kiev, Ukraine)
Zlotin S. G., D. Sc. (Chemistry), Prof., N.D. Zelinsky Institute of Organic Chemistry Russian Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Ivanov A. M., D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow Automobile and Road Construction University (MADI) (Moscow, Russia)
Ivashchenko N. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)
Korolev A. V., D. Sc., Prof., State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)
Kuzmin S.V., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Kurayev A. A., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR) (Minsk, Republic of Belarus)
Lysak V. I., Corresponding Member of RAS, Honored Scientist of the Russian Federation, D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Markov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., Bauman Moscow State Technical University (Moscow, Russia)
Merten K., D. Sc. (Engineering), Prof., Institute of Chemical Process Engineering (Stuttgart, Germany)
Navrotskiy A. V., D. Sc. (Chemistry), Prof. of VSTU
Nizhegorodtsev R. M., D. Sc. (Economy), Chief research worker, Institute of Control Sciences V. A. Trapeznikov Academy of Sciences (Moscow, Russia)
Pai V. V., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)
Polyanchikov Y. N., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Pustovoit V. N., D. Sc. (Engineering), Prof., Honored Scientist of the Russian Federation, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)
Revin A. A., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Rusinov V. L., Corresponding Member of RAS, Institute of Chemical Technology of Ural Federal University (Ekaterinburg, Russia)
Rybin V. V., Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof., St. Petersburg Polytechnic University (St.Petersburg, Russia)
Thai Quang Vinh, D. Sc. (Philosophy), Institute of Information Technology (Hanoi, Vietnam)
Truel J.-L., D. Sc. (Economy), Prof., University Paris Est Créteil, Sorbonne, France, Vice-president of International economists club “Kondratiev Circle”
Fedyanov E. A., D. Sc. (Engineering), Prof. of VSTU
Frolov V. A., D. Sc. (Engineering), Prof., “MATI Russian State Technological University named after K.E. Tsiolkovsky” (Moscow, Russia)
Sharipov V. M., D. Sc. (Engineering), Prof., Moscow State Technical University “ MAMI” (Moscow, Russia)
Shakhovskaya L. S., D. Sc. (Economy), Prof. of VSTU
Shcherbakov M. V., D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU
Sheyin A. G., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof. of VSTU
Yakovlev I. V., D. Sc. (Economy), Lavrentyev Institute of Hydrodynamics of SB RAS (Novosibirsk, Russia)

SERIES "ACTUAL PROBLEMS OF MANAGEMENT, COMPUTING HARDWARE AND INFORMATICS IN ENGINEERING SYSTEMS"

IZVESTIA

VOLGOGRAD STATE TECHNICAL UNIVERSITY

The Journal is included to the list of peer-reviewed scientific journals and publications of the Higher Attestation Commission (HAC) of the RF for publishing of results of candidates for scientific degrees

Editorial board:

Chairman
Shcherbakov M. V., D. Sc. (Engineering), Prof.

Averchenkov V. I., D. Sc. (Engineering), Prof. (BSTU, Bryansk, Russia)
Berdshadskiy A. M., D. Sc. (Engineering), Prof. (PSU, Penza, Russia)
Briskin E. S., D. Sc. (Physical and Mathematical Sciences), Prof.
Gorobtsov A. S., D. Sc. (Engineering), Prof.
Dvoryankin A. M., D. Sc. (Engineering), Prof.
Zaboleeva-Zotova A. V., D. Sc. (Engineering), Prof.
Kravets A. G., D. Sc. (Engineering)
Kureytchik V. M., D. Sc. (Engineering), Prof. (TRTU, Taganrog, Russia)
Petrova I. Y., D. Sc. (Engineering), Prof. (AICE, Astrakhan, Russia)
Protalinskiy O. M., D. Sc. (Engineering), Prof. (ASTU, Astrakhan, Russia)
Thai Quang Vinh, D. Sc. (Philosophy), Institute of Information Technology (Hanoi, Vietnam)
Fomenkov S. A., D. Sc. (Engineering), Prof.
Shilin A. N., D. Sc. (Engineering), Prof.
Jurgen Bast D. Sc. (Engineering), Prof. (TU Bergakademie Freiberg, The University of Resources, Freiberg, Germany)

International index of the journal
ISSN 1990-5297

The journal is distributed by subscription.
Index of the journal in the catalogue of the Agency "Rospechat" for the Russian Federation – 80811(ОК+ЭК).
Concerning subscription turn to the editorial office.

Tel. Of VSTU editorial office:
(+7 8442) 24-84-06
Fax: (+7 8442) 24-84-06
otr@vstu.ru

Scientific journal

Published since January 2004

12 times a year

№ 1 (196) January 2017

FOUNDER:
FSBEI of Higher Education
"Volgograd State Technical University"

Editorial office address:
Volgograd, Lenin avenue, 28.
Tel.**:** Head Editor – (+7 8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

The journal is registered at the Federal Service on Control in the Sphere of Communication, IT and Mass Communications (Roscomnadzor)
Registration certificate ПИ № ФС77–61113 of March 19, 2015

Is printed according to the decision of editorial-review board of Volgograd State Technical University

The copyright for the journal in general belongs to the Founder, for separate articles – to authors.

Reprint from the journal "Izvestia VSTU" is strongly forbidden without conclusion of an agreement in accordance with the legislation of the RF
When reprinting the materials, the citation to the journal "Izvestia VSTU" is obligatory

© Volgograd State Technical University, "Izvestia VSTU", 2017

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Айвазян А. В. *59*
Андреев А. Е. *27, 32*
Анцыперов С. А. *7, 14, 21*
Брискин Е. С. *116*
Брумштейн Ю. М. *50*
Быков Д. В. *103, 107*
Васьковский Е. Ю. *50*
Воронина Т. Т. *103*
Воронцова С. Б. *7, 14, 21*
Гетманский В. В. *27, 32*
Головачиков А. Б. *7, 14, 21*
Горбов И. А. *116*
Горемыкин С. А. *78*
Горобцов А. С. *27, 32*
Давыдова С. В. *59*
Егунов В. А. *56*
Жукова И. Г. *97*
Карачунова Г. А. *65*
Кирносенко С. И. *56*
Кобликов И. А. *65*
Козлов Д. В. *112*
Коробкин Д. М. *59, 65*
Кравченя П. Д. *56*
Куаншкалиев Т. Х. *50*
Кульцова М. Б. *89*
Леонард А. В. *116*
Лобейко В. И. *78*
Ляпина О. Н. *97*
Матохина А. В. *83*
Мохов А. А. *107*
Нгуен Т. М. Ч. *73*
Подборский П. Э. *34*
Подборский Э. Н. *39*
Поцелуйко А. С. *89*
Рашевский Н. М. *46*
Романенко Р. Р. *89, 97*
Савкин А. Н. *32*
Санжапов Б. Х. *46*
Синицын А. А. *46*
Скориков А. В. *97*
Старусев А. В. *78*
Тюменцева Е. В. *83*
Угновенок Е. К. *83*
Фоменков С. А. *59*
Харламова Н. В. *78*
Шабалина О. А. *78*
Шумейко О. О. *56*
Щербаков М. В. *73*

СОДЕРЖАНИЕ

Часть I. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

Голованчиков А. Б., Анцыперов С. А., Воронцова С. Б.
Моделирование теплового процесса в кожухотрубном теплообменнике типа «Конденсатор – нагреватель» с учетом продольной теплопроводности… 7

Анцыперов С. А., Голованчиков А. Б., Воронцова С. Б.
Утилизация тепла дымовых газов в кожухотрубном теплообменнике с учетом продольной теплопроводности..... 14

Голованчиков А. Б., Воронцова С. Б., Анцыперов С. А.
Алгоритм расчета двухтрубного теплообменника с учетом продольной теплопроводности по обоим теплоносителям..... 21

Горобцов А. С., Гетманский В. В., Андреев А. Е.
Численный метод решения задач упругости твердого деформируемого тела..... 27

Горобцов А. С., Савкин А. Н., Гетманский В. В., Андреев А. Е.
Моделирование напряженно-деформированного состояния методом дискретных элементов..... 32

Подборский П. Э., Подборский Э. Н.
Точное аналитическое решение двухточечной краевой задачи оптимального управления..... 39

Санжапов Б. Х., Синицын А. А., Рашевский Н. М.
Использование комплекса открытых программ WRF и CALPUFF для моделирования рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере города Волгограда..... 46

Часть II. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

Брумштейн Ю. М., Васьковский Е. Ю., Куаншкалиев Т. Х.
Поиск информации в Интернете: анализ влияющих факторов и моделей поведения пользователей..... 50

Егунов В. А., Кирносенко С. И., Кравченя П. Д., Шумейко О. О.
Оценка эффективности программной реализации QR-разложения на многоядерных архитектурах..... 56

Коробкин Д. М., Фоменков С. А., Давыдова С. В., Айвазян А. В.
Статистический анализ патентного массива для задач поиска и извлечения структурированной информации..... 59

Коробкин Д. М., Фоменков С. А., Кобликов И. А., Карачунова Г. А.
Методика семантического патентного поиска..... 65

Нгуен Т. М. Ч., Щербаков М. В.
Метод формирования профиля пользователей FACEBOOK на основе анализа реакции и чувствительности текста……..…….... 73

Старусев А. В., Лобейко В. И., Горемыкин С. А.
Системный подход к обеспечению надежности и безопасности моделирования при полунатурных испытаниях автоматизированных систем управления..... 78

Часть III. УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Матохина А. В., Харламова Н. В., Шабалина О. А., Тюменцева Е. В., Угновенок Е. К.
Применение игровых технологий для преподавания русского языка как иностранного в вузе..... 83

Поцелуйко А. С., Романенко Р. Р., Кульцова М. Б.
Метод адаптации графического интерфейса для людей с ограниченными возможностями на основе онтологической модели пользователя и паттернов интерфейса..... 89

Скориков А. В., Ляпина О. Н., Жукова И. Г., Романенко Р. Р.
Применение подхода на основе паттернов при разработке адаптивного пользовательского интерфейса для людей с ограниченными возможностями..... 97

Часть IV. ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Быков Д. В., Воронина Т. Т.
Модуль биометрической аутентификации по изображению лица человека….. 103

Быков Д. В., Мохов А. А.
Система защиты от несанкционированного доступа на основе анализа спектральных характеристик голоса..... 107

Козлов Д. В.
Анализ методов обнаружения и предотвращения угроз мошенничества в информационных системах..... 112

Часть V. РОБОТОТЕХНИКА

Леонард А. В., Брискин Е. С., Горбов И. А.
О влиянии «характера» группы роботов на их движение..... 116

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ

УДК 66.045.122

А. Б. Голованчиков, С. А. Анцыперов, С. Б. Воронцова

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО ПРОЦЕССА В КОЖУХОТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ ТИПА «КОНДЕНСАТОР – НАГРЕВАТЕЛЬ» С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

anciperovsergey@mail.ru

На основании дифференциальных уравнений теплового баланса и теплопередачи, учитывающих продольную теплопроводность, получено дифференциальное уравнение II порядка, описывающее профиль температур по длине труб в кожухотрубном теплообменнике, имеющее аналитическое решение. Предложен алгоритм расчета и проведено сравнение с типовым алгоритмом расчета. Показано, что при Пекле продольной теплопроводности *Pe*<12 необходимо увеличивать число труб и поверхность теплопередачи на 10 и более процентов.

Ключевые слова: кожухотрубный теплообменник, тепловой баланс, теплопередача, продольная теплопроводность, продольная температуропроводность, число Пекле продольной теплопроводности.

A. B. Golovanchikov, S. A. Antsyperov, S. B. Vorontsova

MODELING OF THERMAL PROCESS IN KOZUHAROVA THE HEAT EXCHANGER «CONDENSER – HEATER» TAKING INTO ACCOUNT LONGITUDINAL HEAT CONDUCTION

Volgograd State Technical University

On the basis of differential equations of heat balance and heat transfer, taking into account the longitudinal conductivity, the differential equation of II order, describing the temperature profile along the length of the tubes in the heat exchanger kojuharova has an analytical solution. The proposed algorithm and comparison with the model calculation algorithm. It is shown that the longitudinal Heat conductivity Pe<12 need to increase the number of tubes and the heat transfer surface for 10 percent or more.

Keywords: shell and tube heat exchanger, heat balance, heat transfer, longitudinal conductivity, and longitudinal diffusivity, the Peclet number longitudinal thermal conductivity.

Известный алгоритм расчета кожухотрубного теплообменника предполагает, что структура потоков обоих теплоносителей соответствует режиму идеального вытеснения, то есть не учитывает продольную диффузию и продольную теплопроводность [1–4].

Большое влияние продольной диффузии в химических реакторах и массообменных аппаратах на технологические и геометрические параметры показано в монографиях и статьях [5–9].

Выведем дифференциальные уравнения теплового баланса и теплопередачи в кожухотрубном теплообменнике с учетом продольной теплопроводности.

Для этого выделим между произвольными сечениями I–I и II–II высотой dZ и поверхностью теплообмена.

$$dF = \pi(d_в + \delta) \cdot dZ \cdot n$$

с площадью сечения трубок, в которых движется нагреваемая жидкость или газ

$$S = \pi d_в^2 n / 4$$

(обозначения см. в приведенной ниже таблице) и обозначим входящие и выходящие материальные и тепловые потоки как показано на рис. 1.

Запишем дифференциальное уравнение прихода и расхода тепла для выделенного элементарного объема

$$Gc_p t + G_d(c_w t_d + r_d D) + SV_t = Gc_p(t + \frac{dt}{dZ}dZ) + G_d\left[c_w t_d + r_d(D + \frac{dD}{dZ}dZ)\right] + S(V_t + \frac{dV_t}{dZ}dZ),$$

где D – доля пара в пароконденсате, которая уменьшается при движении паракондексатной смеси сверху вниз.

© Голованчиков А. Б., Анцыперов С. А., Воронцова С. Б., 2017

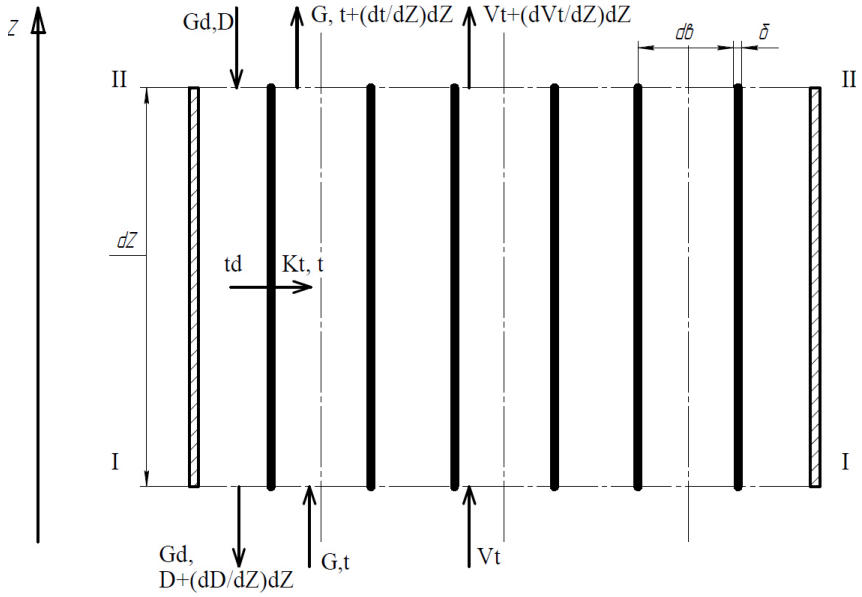


Рис. 1. Схема материальных и тепловых потоков в кожухотрубном теплообменнике, в котором нагревание жидкости или газа происходит конденсирующимся водяным паром

После алгебраических преобразований получаем выражение

$$Gc_p\frac{dt}{dZ}-G_d r_d\frac{dD}{dZ}+S\frac{dV_t}{dZ}=0,$$

которое с учетом модифицированного уравнение Фурье – Кирхгофа (молекулярная теплопроводность λ заменена на продольную теплопроводность λ_t [9]).

$$V_t=-\lambda_t\frac{dt}{dZ} \qquad (1)$$

и обозначения продольной температуропроводности

$$\alpha_t=\frac{\lambda_t}{c_p\rho},$$

а числа Пекле продольной теплопроводности

$$Pe=\frac{VH}{\alpha_t}$$

и перехода к безразмерной высоте $dh=\frac{dZ}{H}$, преобразуется к виду

$$-\frac{1}{Pe}\cdot\frac{d^2t}{dh^2}+\frac{dt}{dh}+\left(\frac{G_d}{G}\right)\frac{r_d}{c_p}\cdot\frac{dD}{dh}=0 \qquad (2)$$

Введем дополнительное обозначение безразмерного градиента температуры

$$g=\frac{dt}{dh}$$

и возьмем определенные интегралы в выражении (2)

$$-\frac{1}{Pe}\int_{g_{вх}}^{g_к}\frac{dg}{dh}+\int_{t_{вх}}^{t_к}\frac{dt}{dh}+\left(\frac{G_d}{G}\right)\frac{r_d}{c_p}\int_1^0\frac{dD}{dh}=0.$$

Тогда получаем

$$-\frac{1}{Pe}(g_к-g_{вх})+(t_к-t_{вх})-\frac{G_d\cdot r_d}{G\cdot c_p}=0, \qquad (3)$$

где температура на входе $t_{вх}$ и безразмерный градиент температуры на входе $g_{вх}$ связаны граничным условием скачка входной температуры [9]

$$t_н=t_{вх}-\frac{1}{Pe}g_{вх}. \qquad (4)$$

Тогда уравнение (3) с учетом граничного условия на входе (4) преобразуется к виду

$$-\frac{1}{Pe}g_к+\left[\left(t_к-t_н\right)-\frac{G_d\cdot r_d}{G\cdot c_p}\right]=0.$$

Выражение, стоящее в квадратных скобках соответствует уравнению теплового баланса

$$G\cdot c_p\left(t_к-t_н\right)=G_d r_d,$$

из чего следует, что безразмерный градиент температуры хладогента на выходе из кожухотрубного теплообменника

$$g_к=0. \qquad (5)$$

Выведем дифференциальное уравнение теплопередачи для рассматриваемого элементарного объема кожухотрубного теплообменника (рис. 1)

$$Gc_p t+SV_t+k_t\pi(d_в+\delta)dZ(t_d-t)n=$$

$$=Gc_p(t+\frac{dt}{dZ}dZ)+S(V_t+\frac{dV_t}{dZ}dZ),$$

которое после алгебраических преобразований и с учетом принятых выше обозначений принимает вид

$$\frac{d^2t}{dh^2} = Pe\frac{dt}{dh} + \frac{\pi(d_в + \delta)H \cdot n \cdot Pe \cdot k_t(t_d - t)}{G \cdot c_p}$$

Так как интегральное уравнение теплопередачи имеет вид

$$G \cdot c_p(t_к - t_н) = k_t\left[\pi(d_в + \delta) \cdot H \cdot n\right] \cdot \Delta t_{ср},$$

где $\Delta t_{ср} = \dfrac{(t_k - t_{вх})}{\ln\left(\dfrac{t_d - t_{вх}}{t_d - t_k}\right)}$,

то дифференциальное уравнение зависимости температуры от числа Пекле продольной теплопроводности записывается следующим образом

$$\frac{d^2t}{dh^2} = Pe\frac{dt}{dh} + Pe\frac{(t_k - t_н)}{(t_k - t_{вх})} \cdot \ln\left(\frac{t_d - t_{вх}}{t_d - t_k}\right) \cdot (t_d - t). \quad (6)$$

При $Pe \to \infty$ ($\alpha_t \to 0$) получаем дифференциальное уравнение для профиля температуры нагреваемой жидкости или газа, когда его структура потока соответствует режиму идеального вытеснения, то есть скачка температуры на входе нет и $t_{вх} = t_н$

$$\frac{dt}{dh} = \ln\left(\frac{t_d - t_н}{t_d - t_k}\right) \cdot (t_d - t).$$

После разделения переменных и интегрирования по параметру получаем интегральную зависимость температуры t от относительной координаты длины h для режима идеального вытеснения (типовой расчет)

$$t = t_d - \frac{t_d - t_н}{\left(\dfrac{t_d - t_н}{t_d - t_k}\right)^h}. \quad (7)$$

Вернемся к полученному дифференциальному уравнению второго порядка с постоянными коэффициентами (6), которое заменой переменной $T = t_d - t$ преобразуется к виду

$$\frac{d^2T}{dh^2} - Pe\frac{dT}{dh} - qT = 0,$$

где $$q = Pe\frac{(t_k - t_н)}{(t_k - t_{вх})} \cdot \ln\left(\frac{t_d - t_{вх}}{t_d - t_k}\right) \quad (8)$$

и имеет аналитическое решение [10]

$$T = C_1 \exp(r_1 h) + C_2 \exp(r_2 h)$$

или, возвращаясь к температуре t,

$$t = t_d + C_1 \exp(r_1 h) + C_2 \exp(r_2 h), \quad (9)$$

где $r_{1,2} = Pe/2 \pm \sqrt{\left(Pe/2\right)^2 + q}$ – корни характеристического уравнения $r^2 - Pe \cdot r - q = 0$, C_1 и C_2 – постоянные интегрирования, которые находятся из граничных условий на выходе из теплообменника: $h=1$,

$$\left.\begin{aligned} t &= t_k; \\ g &= g_k = 0. \end{aligned}\right\}$$

Тогда

$$\left.\begin{aligned} C_1 &= \frac{(t_k - t_d) \cdot \exp(-r_1)}{(1 - r_1/r_2)}; \\ C_2 &= -C_1\left[\exp(r_1 - r_2)\right] \cdot (r_1/r_2). \end{aligned}\right\}$$

Предлагается следующий алгоритм расчета зависимости температуры нагреваемой жидкости или газа конденсирующимся паром:

I. Первый блок формул включает стандартный алгоритм расчета, изложенный в справочной литературе, то есть не учитывающий продольную теплопроводность и соответствующий режиму идеального вытеснения для нагреваемой жидкости или газа (расход греющего пара, средней движущей силы и средней температуры жидкости или газа, а также для заданного числа трубок в трубном пучке скорость, определяемые и определяющий критерий теплоотдачи, уравнивание удельных тепловых мощностей конденсирующего пара и нагреваемой жидкости или газа и сравнение заданной и расчетной поверхности теплопередачи [1–3], при их рассогласовании изменяют число трубок и повторяют вышеперечисленные расчеты до тех пор, пока заданная и расчетная поверхности теплопередачи не уравниваются с заданной точностью).

II. 1. Второй блок расчетов начинается с определением параметра q по уравнению (8) при $t_{вх} = t_н$, затем на каждой итерации, увеличивая скачок температуры, например, на один градус $t_{вх} > t_н$, рассчитывают новые значения числа трубок n и соответствующие им параметры первого блока формул типового расчета, записанного выше.

2. При заданном числе Pe, для рассчитанного при заданной температуре $t_{вх}$ значений параметра q по уравнению (8) определяются корни характеристического уравнения $r_{1,2}$ и постоянные интегрирования C_1 и C_2, и для $h=0$ из формулы (9) находятся значения параметров

$$t_{вх} = t_d + C_1 + C_2$$

$$g_{вх} = C_1 \cdot r_1 + C_2 \cdot r_2$$

и проводится их сверка с граничным условием на входе (4).

При выполнении этого условия с заданной точностью расчеты прекращают, при невыполнении увеличивают еще $t_{вх}$ по сравнению с предыдущей итерацией.

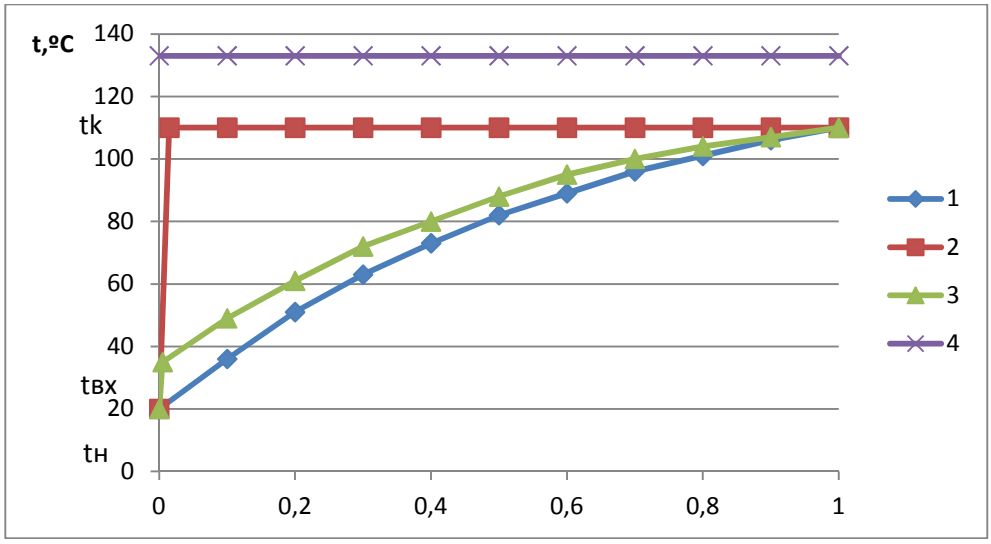


Рис. 2. Профили температур нагреваемого дизельного топлива в кожухотрубном теплообменнике по высоте трубок: *1* – типовой расчет – структура потока идеального вытеснения ($\lambda_r \to 0$, Pe→∞, n=55); *2* – модель структуры потока идеального смешения ($\lambda_r \to \infty$, Pe→0, n=532); *3* – структура потока с продольной теплопроводностью (Pe=10, n=68); *4* – конденсирующий водяной пар

В таблице приведены исходные и справочные данные для нагревания дизельного топлива конденсирующимся водяным паром, а так же результаты сравнительных расчетов кожухотрубных теплообменников идеального вытеснения и смешения по типовым алгоритмам и по предлагаемому алгоритму с учетом продольной теплопроводности при числе Pe=10. Коэффициенты расчетного уравнения (10) для этого значения Пекле следующие: q= 18,25; r_1=11,58; r_2=-1,58; C_1=-2,57-10^{-5}; C_2=-97,91.

На рис. 2 представлены профили температур нагреваемого дизельного топлива по относительной длине трубок в трубном пучке. Как видно из расчетных данных таблицы и рис. 2 уже при Пекле Pe=10 поверхность и число трубок возрастают на 24 %, а скачок температуры на входе за счет обратной теплопроводности составляет 15 градусов, то есть входная температура $t_{вх}$=35 °С, а начальная $t_н$=20 °С (см. графики *1* и *3* на рис. 2), при этом средняя движущая сила теплопередачи снижается с 56,4 °С до 49,3 °С, скорость жидкого потока в трубках за счет увеличения их числа снижается с 0,118 м/с до 0,096 м/с, соответственно уменьшается число Рейнольдса, коэффициент теплоотдачи жидкой фазы и коэффициент теплопередачи с 503,6 Вт/(м^2 -с) до 460,3 Вт/(м^2 -с), а удельная тепловая мощность с 28416 Вт/м^2 – до 22705 Вт/м^2.

Исходные, справочные и расчетные параметры при расчетах теплообменника типа «Нагреватель – конденсатор» при нагревании дизельного топлива конденсирующимся водяным паром

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина параметра
Исходные данные [1,4,11]				
1	Расход нагреваемой жидкости	кг/ч	G_X	10000
2	Температура нагреваемой жидкости – начальная	^oC	$t_н$	20
3	Температура нагреваемой жидкости – конечная	^oC	$t_к$	110
Справочные данные				
4	Температура конденсирующегося пара	^oC	$t_Д$	132,9
5	Удельная теплота конденсации	кДж/кг	$r_Д$	2280
6	Плотность конденсата	кг/м^3	$\rho_Д$	920
7	Вязкость конденсата	Па·с	$\mu_Д$	0,00012
8	Теплопроводность конденсата	Вт/(м · к)	$\lambda_Д$	0,63
9	Плотность нагреваемой жидкости при средней температуре	кг/м^3	ρ	870

Окончание таблицы

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина параметра		
10	Теплоемкость нагреваемой жидкости	Дж/(кг · к)	C_p	2150		
11	Коэффициент объемного расширения нагреваемой жидкости	$к^{-1}$	a	0,006		
12	Теплопроводность нагреваемой жидкости	Вт/(м · к)	λ_S	0,106		
13	Теплопроводность стенки труб	Вт/(м · к)	λ_ω	46,2		
14	Вязкость нагреваемой жидкости при $0\,^oC$	Па · с	μ_0	0,00022		
15	Коэффициент вязкости нагреваемой жидкости	1/К	α	0,022		
16	Высота (длина) труб	М	H	4		
17	Внутренний диаметр труб	М	d_b	0,025		
18	Толщина стенки труб	м	δ_S	0,0025		
19	Термическое сопротивление накипи, ржавчины	$м^2 \cdot К/Вт$	r_s	0,0004		
20	Число ходов в трубном пучке	–	Z	1		
Варьируемые параметры						
21	Число труб	–	N	55	532	68
Расчетные параметры				$Pe\to\infty$ $\lambda_t\to 0$	$Pe\to 0$ $\lambda_t\to\infty$	$Pe = 10$
22	Расход греющего пара	кг/ч	G_g	848,7	848,7	848,7
23	Средняя движущая сила	^oC	Δt_s	56,4	22,9	49,3
24	Средняя температура нагреваемой жидкости	^oC	t_s	76,5	110	83,6
25	Вязкость нагреваемой жидкости при средней температуре	Па · с	μ	$4{,}09\cdot10^{-5}$	$1{,}95\cdot10^{-5}$	$3{,}5\cdot10^{-5}$
26	Число Рейнольдса для охлаждаемой жидкости (газа)	–	Re	62935	13600	59494
27	Число Прандтля для охлаждаемой жидкости (газа)	–	Pr	0,829	0,397	0,702
28	Температура стенки со стороны конденсирующего пара	^oC	x	129,6	132,7	130,4
29	Коэффициент теплоотдачи от пара к стенке	^oC	α_d	8463,2	18058	9108,5
30	Удельная тепловая мощность конденсирующего пара	$Вт/м^2$	q_d	28441,1	2927,9	22814,6
31	Суммарная движущая сила процесса теплопроводности в ржавчине, стенке трубы, накипи	^oC	Δt_m	12,9	1,3	10,1
32	Температура стенки труб со стороны нагреваемой жидкости	^oC	t_x	116,6	131,4	120,3
33	Число Нуссельда для охлаждаемой жидкости (газа)	–	Nu	166,8	32,2	146,6
34	Число Грасгоффа для охлаждаемой жидкости	–	Gr	–	–	–
35	Коэффициент теплоотдачи от стенки труб к нагреваемой жидкости	$Вт/(м^2 \cdot к)$	α	707,4	136,4	619,7
36	Удельная тепловая мощность для нагреваемой жидкости	$Вт/м^2$	Q_l	28391,6	2920,9	22594,8
37	Средняя удельная тепловая мощность	$Вт/м^2$	Q_c	28416,3	2924,4	22704,7
38	Функция рассогласования удельных тепловых мощностей пара и нагреваемой жидкости	$Вт/м^2$	y	24,8	6,95	219,9
39	Расчетная поверхность теплопередачи	$м^2$	f_p	18,91	173,8	23,7
40	Заданная поверхность теплопередачи	$м^2$	f_3	19	183,8	23,5
41	Коэффициент теплопередачи	$Вт/(м^2 \cdot к)$	Kt	503,7	127,7	460,3
42	Средняя скорость жидкости в трубах	м/с	V_S	0,118	0,0122	0,0957

На рис. 3 приведены графики зависимостей числа трубок и входной температуры дизельного топлива от числа Пекле.

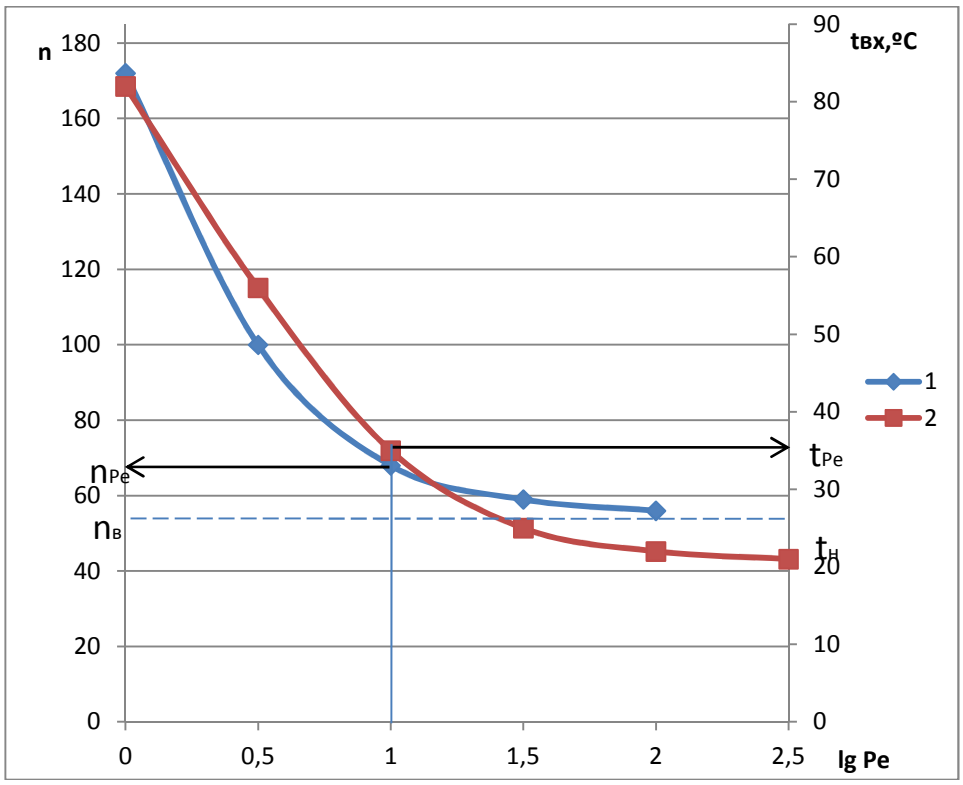


Рис. 3. Графики зависимостей числа трубок в трубном пучке (*1*) и температуры дизельного топлива (*2*) на входе от числа Пекле продольной теплопроводности (t_{Pe} и n_{Pe} – соответственно температура на входе и число трубок при Pe=10; $n_в$ – число трубок при $Pe\to\infty$ ($\lambda_t\to 0$) – идеальный вытеснитель по жидкой фазе, типовой алгоритм)

Как видно из этих графиков, при Pe>20 увеличение необходимого числа трубок в трубном пучке не превышает 10 % и расчеты можно вести по типовому алгоритму, соответствующему идеальному вытеснению жидкой фазы внутри трубок.

При числе Пекле Pe<20 число трубок существенно возрастает, тоже касается и скачка температуры дизельного топлива на входе.

Таким образом, продольное перемешивание и теплопроводность могут оказывать существенное влияние на технологические параметры и геометрические размеры кожухотрубного теплообменника и при числе Pe<20 расчеты таких теплообменников целесообразно проводить по предлагаемому в работе алгоритму.

Интересно сравнить влияние продольной теплопроводности при нагревании жидкостей и газов конденсирующимся водяным паром.

Проведя аналогичный расчет, были получены следующие результаты.

Расход нагреваемого дутьевого воздуха уменьшен в 10 раз до 1000 кг/час из-за большого объемного расхода по сравнению с дизельным топливом. И даже в этом случае необходимое число трубок в трубном пучке при типовом расчете (идеальное вытеснение по дизельному топливу и дутьевому воздуху) должно быть 220, а не 55 как при нагревании дизельного топлива. Соответственно возрастает и необходимое число трубок в трубном пучке при Pe=10: для дутьевого воздуха оно должно быть 388, а для дизельного топлива 68, то есть число трубок и, соответственно, поверхность увеличиваются в 1,76 раза, для дизельного топлива – в 1,24 раза (см. таблицу), то есть влияние обратной теплопроводности на технологические параметры при нагревании газов конденсирующим паром, существенно выше, чем при нагревании жидкостей. Это можно объяснить следующим образом. Если числа Пекле одинаковые для нагреваемой жидкости и газа

$$Pe_{ж} = Pe_{г},$$

то

$$\frac{V_{ж}\cdot d_{в}}{\alpha_{ж}} = \frac{V_{г}\cdot d_{в}}{\alpha_{г}} \quad \text{и} \quad \frac{V_{ж}}{V_{г}} = \frac{\alpha_{ж}}{\alpha_{г}}.$$

Отношение скоростей

$$\frac{V_{ж}}{V_{г}} = \frac{0,0957}{1,46} \approx 0,065,$$

то есть коэффициент продольной температуропроводности газов в 15 раз больше аналогичного коэффициента для жидкостей, а так как

то $\left(\frac{\lambda_t}{C_p \cdot \rho}\right)_г \Big/ \left(\frac{\lambda_t}{C_p \cdot \rho}\right)_{ж} = 15.$

Подставляем численные значения параметров, получаем

$$\left(\frac{\lambda_{tг}}{\lambda_{tж}}\right) = 15\frac{\left(C_p \cdot \rho\right)_г}{\left(C_p \cdot \rho\right)_{ж}} = 15\frac{(1040 \cdot 0,99)}{2150 \cdot 870} \approx 8 \cdot 10^{-3}$$

Сравним отношение продольных теплопроводностей газов и жидкостей, полученное выше и отношение их молекулярных теплопроводностей [10]

$$\left(\frac{\lambda_г}{\lambda_{ж}}\right) = \frac{0,106}{0,036} = 2,94.$$

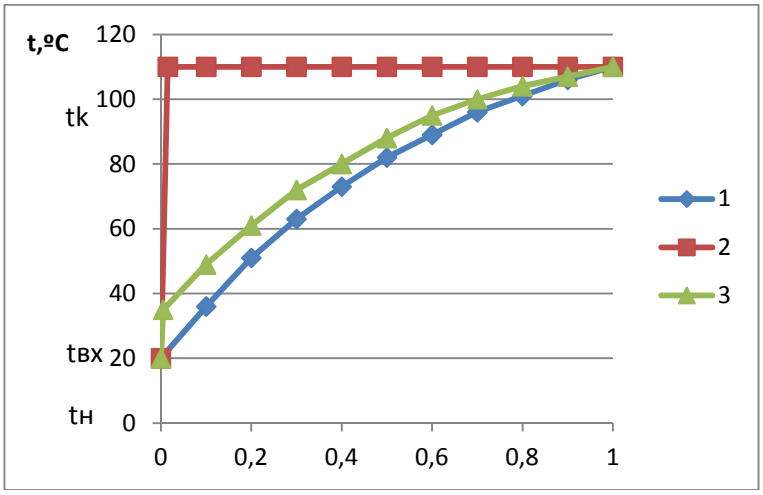


Рис. 4. Зависимости температуры дутьевого воздуха от относительной длины труб кожухотрубного теплообменника:
1 – типовой расчет (идеальное вытеснение); *2* – идеальное смешение; *3* – с учетом продольной теплопроводности при Pe=10

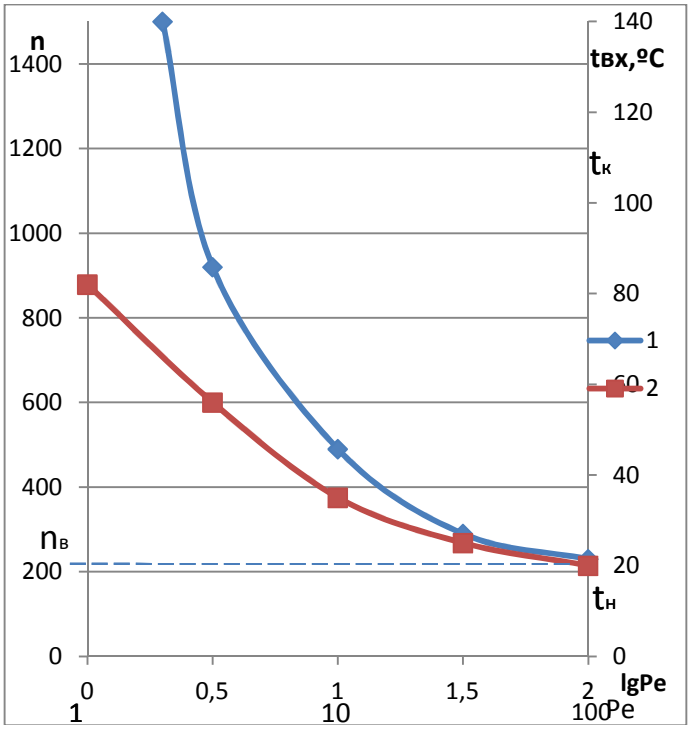


Рис. 5. Зависимости числа трубок (*1*) и температуры нагреваемого дутьевого воздуха (*2*) на входе от числа Пекле продольной теплопроводности
($n_в$ – число трубок при $Pe \to \infty$ – идеальное вытеснение при типовом расчете кожухотрубного теплообменника)

Таким образом, молекулярная теплопроводность газов выше, чем у жидкостей, но обратное перемешивание на жидкости оказывает большее влияние, чем на газы, и продольная теплопроводность газов становится значительно меньше продольной теплопроводности жидкостей. И наоборот, продольная температуропроводность газов на порядок больше продольной температуропроводности жидкостей. Поэтому при одинаковом числе Пекле продольной теплопроводности его влияние на нагревание газов выше, чем для жидкостей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Павлов, К. Ф., Романков, П. Г., Носков, А. А.* Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии. М.: Альянс. 2005. 576 с.

2. *Дытнерский, Ю. И.* Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: Химия, 1991. – 496 с.

3. *Тимонин, А. С.* Основы конструирования и расчета химикотехнологического и природоохранного оборудования. Справочник. Т. 2. – 2-е изд., перераб. и доп. – Калуга : Издательство Н. Бочкаревой, 2002. – 1030 с.

4. *Головачиков, А. Б., Симонов, Б. В.* Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. 4.1. Волгоград : ВолгГТУ. 1994. 114 с.

5. *Левеншпиль, О.* Инженерное оформление химических процессов. М.: Химия. 1969. 621 с.

6. *Кафаров, В. В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия. 1985. 448 с.

7. *Голованчиков, А. Б., Дулькина, Н. А., Аристова, Ю. В.* Моделирование гидромеханических и тепломассообменных процессов в аппаратах и реакторах. Волгоград : ВолгГТУ. 2013. 140 с.

8. *Голованчиков А. Б., Воротнева С. Б.* Моделирование работы двухтрубного теплообменника с учетом теплодиффузии газового теплоносителя. Ж. «Химия и химическая технология». – Т. 58, вып. 9. – 2015. – С. 58–62.

9. *Голованчиков, А. Б.* Моделирование тепловых процессов в двухтруб-ном теплообменнике с теплодиффузионной моделью структуры потоков / А. Б. Голованчиков, С. Б. Воротнева, Б. А. Дулькин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 13(177). С. 13–18.

10. *Выгодский, М. Я.* Справочник по высшей математике. М.: Наука, 2006. 991 с.

УДК 66.045.122

С. А. Анцыперов, А. Б. Голованчиков, С. Б. Воронцова

УТИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ В КОЖУХОТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Волгоградский государственный технический университет

pahp@vstu.ru

На основании элементарных теплового баланса и теплопередачи с учетом продольной теплопроводности получены уравнения и разработан алгоритм расчета кожухотрубного теплообменника. Проведены сравнительные расчеты по типовому (без учета продольной теплопроводности – режим идеального вытеснения) и предлагаемому алгоритму, показывающие, что при числе Пекле продольной теплопроводности Pe ≤ 12 поверхность теплопередачи необходимо существенно увеличивать.

Ключевые слова: продольная теплопроводность, число Пекле, кожухотрубный теплообменник, идеальное вытеснение, идеальное смешение.

S. A. Antsyperov, A. B. Golovanchikov, S. B. Vorontsova

HEAT RECOVERY OF FLUE GASES IN THE HEAT EXCHANGER KOZUHAROVA TAKING INTO ACCOUNT LONGITUDINAL HEAT CONDUCTION

Volgograd State Technical University

Based on a simple heat balance and heat transfer taking into account the longitudinal conductivity derived equations and the developed algorithm of calculation of shell and tube heat exchanger. Comparative calculations on the model (without longitudinal heat conduction – a mode of ideal displacement) and the proposed algorithm, showing that when the number of longitudinal Heat conduction Pe ≤ 12 the heat transfer surface must be increased.

Keywords: longitudinal conductivity, the number of the Thick, leather-hotruby heat exchanger, perfect displacement, perfect mixing.

Все существующие гидромеханические и тепловые модели структуры потоков опираются на два крайних случая: идеального вытеснения, когда продольная диффузия D_l или продольная теплопроводность λ_t стремится к нулю, и идеального перемешивания, когда вышена-

© Анцыперов С. А., Голованчиков А. Б., Воронцова С. Б., 2017

званные модельные параметры стремятся к бесконечности [1–3]. Из комбинированных моделей структуры потоков [4–6]: ячеечной с равным и неравным объемом ячеек, последовательного и параллельного соединения зон идеального смешения и вытеснения, зон смешения с рециклом или циркуляцией, реального вытеснения или смешения. Повышенное внимание в последнее время привлечено к однопараметрической модели с продольным перемешиванием и продольной теплопроводностью [7–9], которая наибольшей степени отражает физические аспекты моделируемого массообменного или теплового процесса.

Составим элементарный тепловой баланс для кожухотрубного теплообменника, в котором происходит нагревание воды в трубах за счет утилизации тепла дымовых газов, движущихся в межтрубном пространстве. Отличие от известного баланса связано с учетом продольной теплопроводности, для дымовых газов описываемой модифицированным уравнением Фурье-Кирхгофа

$$V_t = -\lambda_t \frac{dt}{dZ}, \qquad (1)$$

где λ_t – коэффициент продольной теплопроводности.

Полагаем, что нагреваемая вода движется в режиме идеального вытеснения без учета продольной теплопроводности.

Выделим между сечениями I–I и II–II элемент объема dV высотой dZ (рис. 1). Запишем в левой части тепловые потоки приходящие, а в правой части теплового баланса – уходящие тепловые потоки.

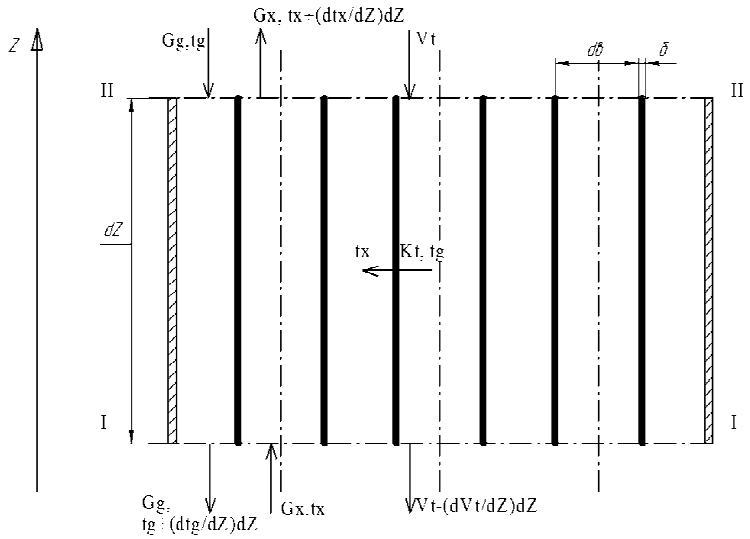


Рис. 1. Схема элементных материальных и тепловых потоков

$$G_x c_x t_x + G_г c_г t_г + V_t S = G_x c_x (t_x + \frac{dt_x}{dZ} dZ) +$$

$$+ G_г c_г (t_г - \frac{dt_г}{dZ} dZ) + S(V_t - \frac{dV_t}{dZ} dZ),$$

где S – площадь сечения межтрубного пространства.

После алгебраических преобразований с учетом формулы (1) получаем

$$G_x c_x \frac{dt_x}{dZ} dZ - G_г c_г \frac{dt_г}{dZ} dZ + S \cdot \lambda_t \frac{d^2 t_г}{dZ^2} dZ = 0$$

Обозначим безразмерную высоту $dh = dZ/H$ и безразмерный градиент температур газа $dg_г = dt_г/dh$, получаем уравнение элементарного теплового баланса, которое после интегрирования сверху вниз по параметрам принимает вид

$$G_x c_x \int_{t_{хк}}^{t_x} dt_x - G_г c_г \int_{t_{гв}}^{t_г} dt_г + S \cdot \lambda_t \int_{g_{гв}}^{g_г} dg_г = 0$$

или

$$G_x c_x (t_x - t_{хк}) - G_г c_г (t_г - t_{гв}) + S \cdot \lambda_t (g_г - g_{гв}) = 0.$$

Так как скорость горячего теплоносителя дымового газа

$$V_г = \frac{G_г}{\rho_г \cdot S},$$

коэффициент продольной температуропроводности для дымового газа

$$\alpha_t = \frac{\lambda_t}{C_г \cdot \rho_г},$$

а число Пекле продольной теплопроводности для дымового газа

$$Pe = \frac{V_г \cdot H}{\alpha_t},$$

то после алгебраических преобразований с учетом вышепринятых обозначений получаем интегральное уравнение теплового баланса

$$t_x = t_{хк} + \left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right) t_г - \frac{1}{Pe}\left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right) g_г - \left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right)\left(t_{гв} - \frac{1}{Pe} g_{гв}\right).$$

При h =0, t_x=$t_{хн}$, $t_г$=$t_{гк}$ и $g_г$=$g_{гк}$, а граничное условие на входе горячего теплоносителя при h=1 имеет вид [8],

$$t_{гн} = t_{гв} - \frac{1}{Pe} g_{гв}, \qquad (2)$$

характеризующее скачок температуры дымового газа на входе в межтрубное пространство за счет продольной теплопроводности.

Тогда последнее уравнение упрощается до вида

$$t_{хн} = t_{хк} + \left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right) t_{гк} - \frac{1}{Pe}\left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right) g_{гк} - \left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right) t_{гн},$$

из которого следует, что безразмерный градиент дымовых газов на входе при h=0

$$g_{гк}=0. \qquad (3)$$

Таким образом, интегральное уравнение теплового баланса, связывающее температуры горячего и холодного теплоносителя с учетом продольной теплопроводности для греющего теплоносителя – дымового газа имеет вид

$$t_x = t_{хк} + \left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right)\left(t_г - t_{гн}\right) - \frac{1}{Pe}\left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right) g_г. \qquad (4)$$

При $Pe\to\infty$ ($\alpha_t\to 0$), то есть для режима идеального вытеснения по дымовым газам, получаем известную зависимость связи температур горячего и холодного теплоносителя

$$t_x = t_{хк} - \left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right)\left(t_{гн} - t_г\right). \qquad (5)$$

Выведем уравнение теплопередачи горячего теплоносителя – дымового газа для выделенного элементарного объема dV высотой dh (рис. 1)

$$G_г c_г t_г + V_t S = G_г c_г (t_г - \frac{dt_г}{dZ} dZ) + S(V_t - \frac{dV_t}{dZ} dZ) - k_t \left[\pi\left(d_в + \delta\right) dZ\right] \cdot n(t_г - t_x).$$

После алгебраических преобразований, приведения высоты к безразмерному виду и обозначений скорости, коэффициента продольной температуропроводности и числа Пекле продольной теплопроводности, принятых выше, а также с учетом интегрального уравнения теплопередачи

$$G_г c_г \left(t_{гн} - t_{гк}\right) = k_t \cdot \pi\left(d_в + \delta\right) \cdot H \cdot n \frac{\left[\left(t_{гв} - t_{хк}\right) - \left(t_{гк} - t_{хн}\right)\right]}{\ln\left(\frac{t_{гв} - t_{хк}}{t_{гк} - t_{хн}}\right)}$$

получаем дифференциальное уравнение II порядка

$$\frac{1}{Pe} \cdot \frac{d^2 t_г}{dh^2} = \frac{dt_г}{dh} + \left\{\frac{\left(t_{гн} - t_{гк}\right) \cdot \ln\left(\frac{t_{гв} - t_{хк}}{t_{гк} - t_{хн}}\right)}{\left[\left(t_{гв} - t_{хк}\right) - \left(t_{гк} - t_{хн}\right)\right]}\right\}\left(t_г - t_x\right). \qquad (6)$$

При $Pe\to\infty$ ($\lambda_t\to 0$), то есть для режима идеального вытеснения по горячему теплоносителю – газу, когда $t_{гв}$=$t_{гн}$, с учетом уравнения (5) получаем дифференциальное уравнение первого порядка с разделяющимися переменными,

$$\frac{dt_г}{dh} = -A \cdot B(t_г - C), \qquad (7)$$

где $A = \left(t_{гн} - t_{гк}\right) / \Delta t_c$;

$$B = 1 - \frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x};$$

$$C = \frac{t_{хк} + \dfrac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x} t_{гн}}{B},$$

решение которого после дифференцирования по параметру $t_г$ приобретает вид

$$t_г = C + (t_{гк} - C) \cdot \exp(-A \cdot B \cdot h). \qquad (8)$$

Вернемся к рассмотрению дифференциального уравнения (6), описывающего зависимость температуры горячего теплоносителя – дымового газа с учетом продольной теплопроводности λ_t или в данном случае числа Пекле продольной теплопроводности *Pe*.

Обозначим коэффициент, стоящий в фигурных скобках уравнения (6)

$$A_в = (t_{гн} - t_{гк})/\Delta t,$$

где $\Delta t = \dfrac{\left[(t_{гв} - t_{хк}) - (t_{гк} - t_{хн})\right]}{\ln\left(\dfrac{t_{гв} - t_{хк}}{t_{гк} - t_{хн}}\right)}$ – средняя движущая сила процесса теплопередачи с учетом скачка температур на входе горячего теплоносителя – дымового газа.

Аналогично выше обозначенному коэффициенту A, где Δt_c – средняя движущая сила процесса теплопередачи для режима идеального вытеснения (типовой расчет средней движущей силы без скачка температуры горячего теплоносителя на входе).

Подставляем значение t_x из уравнения (4) в дифференциальное уравнение (6), которое после алгебраических преобразований приобретает вид дифференциального уравнения II порядка с постоянными коэффициентами

$$\frac{d^2 t_г}{dh^2} - P_в \frac{dt_г}{dh} - q(t_г - C_в), \qquad (9)$$

где $P_в = Pe + A_в \cdot \left(\dfrac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right)$;

$$q = Pe \cdot A_в \cdot \left[1 - \left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right)\right];$$

$$C_в = \left[t_{хк} - \left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right) t_{гн}\right] \Big/ \left[1 - \left(\frac{G_г \cdot C_г}{G_x \cdot C_x}\right)\right];$$

решение которого имеет аналитическое решение [10]

$$t_г = C_1 \exp(r_1 h) + C_2 \exp(r_2 h) + C_в, \qquad (10)$$

где $r_{1,2} = P_в/2 \pm \sqrt{(P_в/2)^2 + q}$ – корни характеристического уравнения $r^2 - P_в \cdot r - q = 0$; $C_1 = (t_{гк} - C_в) \cdot \exp(-r_1)/(1 - r_1/r_2)$ и $C_2 = -(r_1/r_2) \times \times C_1 \cdot \exp(r_1 - r_2)$ – постоянные интегрирования, которые находятся из граничных условий (2) и (3).

Алгоритм расчета профиля температур горячего (дымового газа) и холодного (нагреваемой воды) теплоносителей по формулам (10) и (4) может быть следующим:

I. Первый блок формул соответствует типовому алгоритму расчетов кожухотрубного теплообменника типа «нагреватель–холодильник» (то есть, когда оба теплоносителя движутся в режиме идеального вытеснения) [11].

II. Второй блок формул:

1. Уменьшаем температуру горячего теплоносителя на входе (при h=1) $t_{gв}$, например, на 0,5 градуса.

2. Рассчитываем движущую силу процесса теплопередачи при этом значении $t_{gв}$ определяем новую среднюю температуру горячего теплоносителя, его вязкость и плотность, число Рейнольдса $Re_г$ и далее по номограмме [7] для полученного числа Рейнольдса $Re_г$ и начальной температуре горячего теплоносителя $t_{gн}$ определяем число *Pe* продольной теплопроводности горячего теплоносителя.

3. Определяем значения параметров $A_в$, $P_в$, r_1 и r_2, q, $C_в$, C_1 и C_2 и, по формуле (10), для h=1 находим численное значение $t_{г0}$. Если

$$\frac{t_{г0} - t_{гв}}{t_{гв}} \le \delta, \qquad (11)$$

где δ – относительное отклонение заданной входной температуры горячего теплоносителя $t_{гв}$ и ее расчетного значения $t_{г0}$, например, δ=0,01 то расчеты заканчиваем.

Если это условие не выполняется, уменьшаем температуру горячего теплоносителя на входе $t_{гв}$ еще на полградуса и повторяем пункты II, 1–3 до выполнения условия.

В таблице приведены исходные и справочные данные и расчетные параметры кожухотрубного теплообменника, предназначенного для утилизации тепла дымовых газов, когда нагреваемая вода движется в режиме идеального вытеснения, а горячий теплоноситель – дымовой газ в режимах идеального вытеснения (типовой расчет), идеального смешения и с учетом продольной теплопроводности.

Исходные и справочные данные и результаты расчета кожухотрубного теплообменника при утилизации тепла дымовых газов нагреваемой водой в трубах трубного пучка

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина параметра		
Исходные данные [9-10]						
1	Производительность по дымовым газам	кг/ч	$G_г$	10000		
2	Начальная температура дымовых газов	^oC	$t_{гн}$	280		
3	Конечная температура дымовых газов	^oC	$t_{гк}$	180		
4	Начальная температура воды	^oC	$t_{ХН}$	10		
5	Конечная температура воды	^oC	$t_{ХК}$	80		
6	Давление рабочее	ат	pr	1,033		
7	Плотность воды при средней температуре	кг/м^3	$\rho_Х$	900		
8	Вязкость воды при средней температуре	Па · с	$\mu_Х$	$6{,}32\cdot10^{-4}$		
9	Температурный коэффициент вязкости дымовых газов	К$^{-1}$	$a_г$	0,009		
10	Температурный коэффициент вязкости воды	К$^{-1}$	$a_х$	0,0256		
11	Теплоемкость дымовых газов	кДж/кг	$C_г$	1,07		
12	Теплоемкость воды	кДж/кг	$C_х$	4,19		
13	Коэффициент объемного расширения дымовых газов	К$^{-1}$	$\beta_г$	0,0037		
14	Коэффициент объемного расширения воды	К$^{-1}$	$\beta_х$	$4{,}6\cdot10^{-5}$		
15	Теплопроводность дымовых газов	Вт/(м · к)	$\lambda_г$	0,028		
16	Теплопроводность воды	Вт/(м · к)	$\lambda_х$	0,675		
17	Теплопроводность стальных трубок трубного пучка	Вт/(м · к)	λ_w	46,2		
18	Термическое сопротивление отклонений	(Вт/(м^2 · к))$^{-1}$	r_s	0,0004		
19	Высота трубок в трубном пучке	м	H	4		
20	Внутренний диаметр трубок	м	d_b	0,035		
21	Толщина стенки трубок	м	δ	0,0025		
Расчетные параметры				И.в.	И.с.	Re =0,6
1	Число трубок в трубном пучке	–	n	183	183	183
2	Заданная поверхность теплопередачи	м^2	f_c	86,2	86,2	86,2
3	Расчетная поверхность теплопередачи	м^2	f	85,6	120,7	111,7
4	Расход нагреваемой воды	кг/ч	$G_х$	3648,1	3648,1	3648,1
5	Средняя температура нагреваемой воды	^oC	$t_х$	45	47,7	45
6	Средняя движущая сила теплопередачи	^oC	Δt	184,6	132,3	142,7
7	Средняя температура дымовых газов	^oC	$t_г$	229,6	180	187,1
8	Вязкость дымовых газов при средней температуре	Па · с	$\mu_г$	$3{,}25\cdot10^{-5}$	$3\cdot10^{-5}$	$3{,}1\cdot10^{-5}$
9	Число Рейнольдса для воды	–	$Re_х$	318,9	318,9	318,9
10	Число Рейнольдса для дымовых газов	–	$Re_г$	14125	15206	14925
11	Число Прандтля для воды	–	$Pr_х$	3,92	3,92	3,92
12	Число Прандтля для дымовых газов	–	$Pr_г$	1,24	0,88	0,80
13	Число Грасгофа для воды	–	Gr	84513	67471	74429
14	Число Нуссельта для воды	–	$Nu_х$	101,3	98,8	100,0
15	Число Нуссельта для дымовых гахов	–	$Nu_г$	132,7	145,6	149,7
16	Коэффициент теплоотдачи для воды	Вт/(м^2 · к)	$al_х$	1953,3	1905	1926
17	Коэффициент теплоотдачи для дымовых газов	Вт/(м^2 · к)	$al_г$	19,1	20,9	21,5

Окончание таблицы

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина параметра		
18	Удельная тепловая мощность для воды	Вт/м^2	g_x	3477,1	2707,9	26695
19	Удельная тепловая мощность для дымовых газов	Вт/м^2	$g_г$	3463,5	2720,4	2666,5
20	Средняя удельная тепловая мощность	Вт/м^2	g_c	3470,3	2714,2	2668,0
21	Коэффициент теплопередачи	Вт/(м^2 · к)	k_t	18,8	19,1	19,0
22	Температура стенки трубки со стороны дымовых газов	^oC	t	48,7	47,5	47,8
23	Температура стенки трубки со стороны воды	^oC	t_w	46,8	46,4	46,6
24	Диаметр кожуха	м	D_k	1,31	1,31	1,31
25	Площадь межтрубного пространства	м^2	S_m	1,18	1,18	1,18
26	Эквивалентный диаметр межтрубного пространства	м	$D_э$	0,194	0,194	0,194
27	Плотность дымовых газов при средней температуре	кг/м^3	$\rho_г$	0,717	0,8	0,782
28	Градиент температуры дымового газа на входе при h= 1 (противоток)	^oC	$g_{г1}$	-114	0	0
29	Коэффициент увеличения поверхности и длины трубок	–	$f_{от}$	1	1,41	1,296
30	Поверхность трубок трубного пучка	м^2	F_λ	86,2	122	111,7
31	Длина трубок трубного пучка	м	H_λ	4	5,67	5,18
32	Постоянные коэффициенты уравнения	–	A	–	–	0,702
		–	P	–	–	1,09
		–	q	–	–	0,126
		^oC	C	–	–	-386,7
		–	r_1	–	–	1,2
		–	r_2	–	–	-0,106
		^oC	C_1	–	–	13,87
		^oC	C_2	–	–	578,7
33	Температура газа на входе	^oC	t_{g1}	280	180	205,9

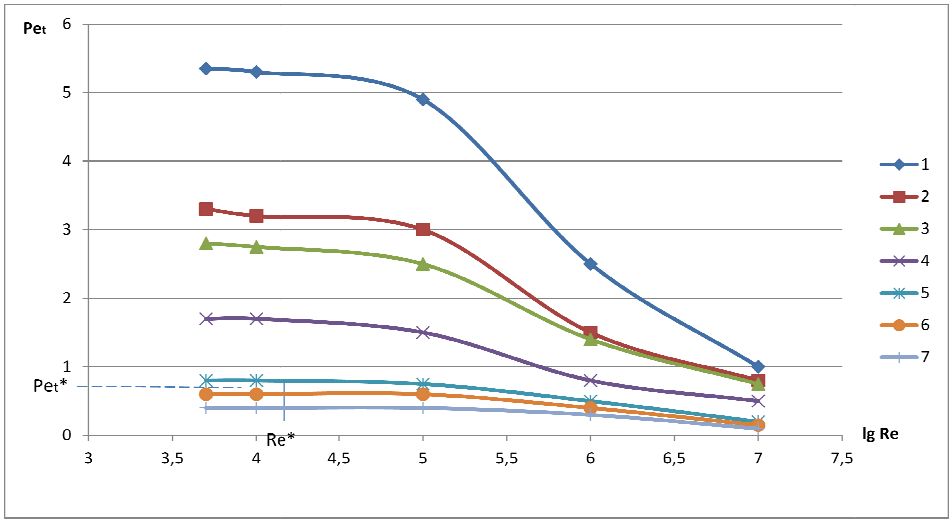


Рис. 2. Зависимость $Pe_t=Pe_t(Re,t_{gн})$ для модели нагревания дизельного топлива дымовыми газами в двухтрубном теплообменнике:
1 – $t_{gн}$=30 ºС; *2* – $t_{gн}$=50 ºС; *3* – $t_{gн}$=60 ºС; *4* – $t_{gн}$=100 ºС; *5* – $t_{gн}$=200 ºС; *6* – $t_{gн}$=300 ºС; *7* – $t_{gн}$=400 ºС;
*Re**, *Pe*$_t$*– результаты расчетов по таблице

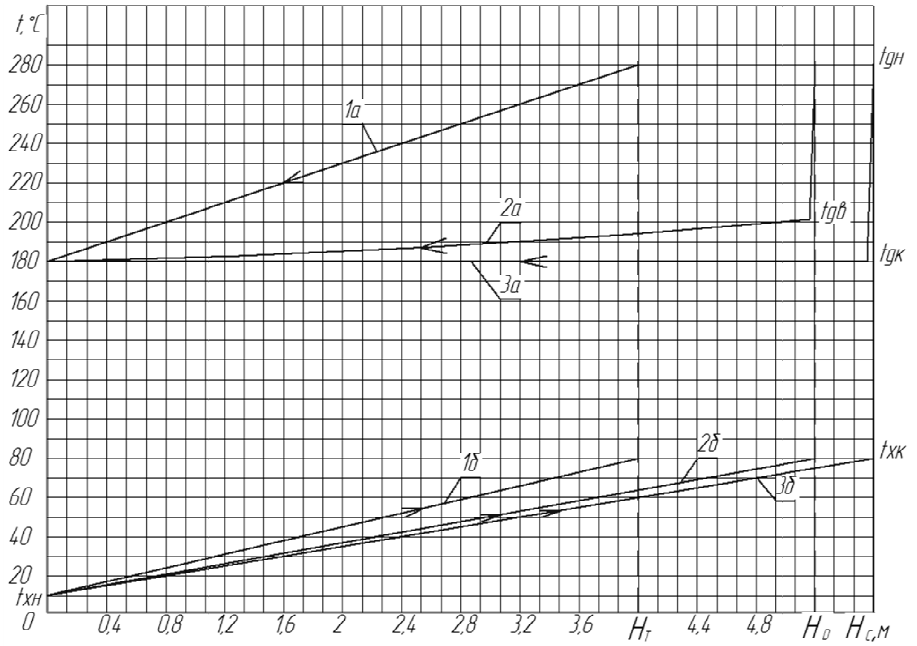


Рис. 3. Профили температур по высоте трубок, число трубок n=183:
1а и *1б* – соответственно для дымовых газов и воды при типовом расчете, $Pe\to\infty$; *2а* и *2б* – то же, с учетом продольной теплопроводности дымовых газов, Pe=0,6; 3а и 3б – при идеальном смешении по дымовым газам (H_T, H_D, H_C – соответственно высота трубок при идеальном вытеснении, с учетом продольной теплопроводности и идеальном смешении)

Как видно из результатов расчетов, приведенных в таблице, продольная теплопроводность существенно влияет на технологические (температуру горячего теплоносителя на входе, среднюю движущую силу, среднюю температуру горячего теплоносителя, его вязкость, числа Рейнольдса, Нуссельта и Прандтля, коэффициент теплоотдачи, удельную тепловую мощность, число Пекле продольной теплопроводности) и геометрические параметры (поверхность теплопередачи и длину трубок в трубном пучке). Так для рассматриваемого случая при $Re_г$=14925 и $t_{гн}$=280 °С по номограмме определяется Pe=0,6 (рис. 2) [8], при этом расчетная длина трубок трубного пучка и их поверхность по сравнению с типовым расчетом кожухотрубного теплообменника [4] увеличивается на 30%, то есть длина трубок должна быть не 4 *м*, а 5,18 *м*.

На рис. 3 показаны профили температур горячего и холодного теплоносителей для трех рассчитанных структур теплопроводностей горячего теплоносителя, а на рис. 4 – зависимости длины труб в трубном пучке и входной температуры горячего теплоносителя – дымового газа от числа Пекле продольной теплопроводности. Как видно из последнего рисунка, уже при Pe=8 геометрические параметры: длина и поверхность теплопередачи увеличиваются на 10 и более процентов по сравнению с типовым расчетом, когда структура потока дымовых газов соответствует идеальному вытеснению, то есть $Pe\to\infty$ ($\alpha_t\to 0$).

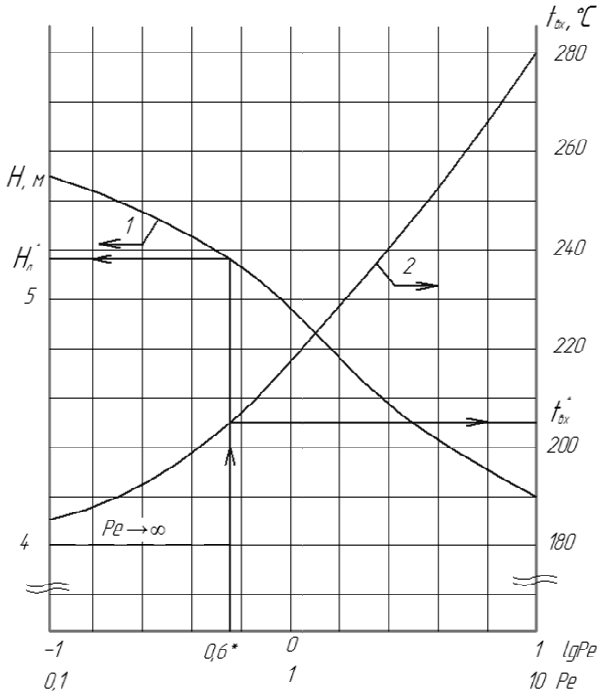


Рис. 4. Зависимость высоты трубок (*1*) в трубном пучке и температуры горячего теплоносителя (дымового газа) на входе (*2*) от числа Пекле продольной теплопроводности

Таким образом, при числе Пекле продольной теплопроводности $Pe>8$ расчет кожухотрубного теплообменника можно проводить по типовой методике, описанной в учебниках и учебных пособиях. При $Pe<8$ необходимо учитывать продольную теплопроводность и расчет технологических параметров и геометрических размеров кожухотрубного теплообменника рекомендуется проводить по вышеописанному алгоритму.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Левеншпиль, О.* Инженерное оформление химических процессов. М.: Химия. 1969. 621 с.

2. *Кафаров, В.В.* Методы кибернетики в химии и химической технологии. М.: Химия. 1985. 448 с.

3. *Закгейм, А.Ю.* Введение в моделирование химико-технологических процессов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1982. – (Серия «Химическая кибернетика»). – 288 с.

4. *Тябин, Н.В.* Методы кибернетики в реологии и химической технологии. Учебное пособие / Н.В. Тябин, А.Б. Голованчиков. – Волгоград : Волгоградская правда, 1983 – 103с.

5. *Голованчиков, А.Б.* Моделирование структуры потоков в химических реакторах : монография / Голованчиков А.Б., Дулькина Н.А. Волгоград : ВолгГТУ. 2009. 240 с.

6. *Голованчиков, А.Б., Дулькина, Н.А., Аристова, Ю.В.* Моделирование гидромеханических и тепломассообменных процессов в аппаратах и реакторах. Волгоград : ВолгГТУ. 2013. 140 с.

7. Моделирование ионообмена в аппарате непрерывного действия с диффузионной структурой потока по жидкости / А.Б. Голованчиков, О.А. Залипаева, Н.А. Меренцов, А.А. Коберник // Экологические системы и приборы. – 2015. – № 10. – С. 15–24.

8. *Голованчиков, А.Б., Воротнева, С.Б.* Моделирование работы двухтрубного теплообменника с учетом теплодиффузии газового теплоносителя // Химия, химическая технология. – Т. 58, вып. 9. – 2015. – С. 58–62.

9. *Голованчиков, А.Б.* Моделирование тепловых процессов в двухтрубном теплообменнике с теплодиффузионной моделью структуры потоков / А.Б. Голованчиков, С.Б. Воротнева, Б.А. Дулькин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 13(177). С. 13–18.

10. *Выгодский, М.Я.* Справочник по высшей математике. М. : Наука, 2006. 991 с.;

11. *Голованчиков, А. Б., Симонов, Б. В.* Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. 4.1. Волгоград : ВолгГТУ. 1994. 114 с.

12. *Дытнерский, Ю.И.* Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: Химия, 1991. – 496 с.

13. *Тимонин, А.С.* Основы конструирования и расчета химикотехнологического и природоохранного оборудования. Справочник. Том 2. – 2-е изд., перераб. и доп. – Калуга : Издательство Н. Бочкаревой, 2002. – 1030 с.

14. *Голованчиков, А.Б., Воротнева, С.Б.* Моделирование гидродинамических и тепловых процессов в двухтрубном теплообменнике : монография. Волгоград : ВолгГТУ. 2013. 140 с.

УДК 66.045.123

А. Б. Голованчиков, С. Б. Воронцова, С. А. Анцыперов

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ДВУХТРУБНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА С УЧЕТОМ ПРОДОЛЬНОЙ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПО ОБОИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМ

Волгоградский государственный технический университет
anciperovsergey@mail.ru

На основании уравнений теплового баланса выведены формулы для зависимостей температур холодного и горячего теплоносителей в двухтрубном теплообменнике с учетом продольной теплопроводности. Показано, что в отличие от аналогичных типовых формул, не учитывающих продольное перемешивание теплоносителей, существенную роль на теплопередачу оказывают числа Пекле продольной теплопроводности и скачки температур теплоносителей на входе. Приведен упрощенный алгоритм расчета и проведено сравнение технологических и геометрических параметров двухтрубного теплообменника, рассчитанного по предлагаемому и типовому алгоритмам, показывающим, что продольное перемешивание при $Pe<50$ приводит к уменьшению движущей силы и увеличению поверхности теплопередачи и длины двухтрубного теплообменника.

Ключевые слова: продольная диффузия, число Пекле продольной теплопроводности, двухтрубный теплообменник, коэффициент теплопередачи, поверхность теплопередачи.

A. B. Golovanchikov, S. B. Voroncova, S. A. Antsyperov

CALCULATION ALGORITHM OF DOUBLE-PIPE EN-CLOSED HEAT EXCHANGER WITH ALLOWANCE FOR LONGITUDINAL THERMAL CONDUCTION ON BOTH HEAT CARRIER

Volgograd State Technical University

Based on the heat balance equations were derived formulas for the dependence of the temperature of hot and cold heat carriers in the double-pipe en-closed heat exchanger with allowance for longitudinal thermal conduction. It is shown that unlike similar standard formulas do not take into account the longitudinal mixing heat carriers important role in providing heat transfer exerts Peclet number of longitudinal thermal conduction and temperature jumps of heat carriers at the input. An simplified calculation algorithm was powered and technological and geometrical parameters of the double-pipe en-closed heat exchanger, designed according to the proposed standard algorithms and showing that the longitudinal mixing at Pe <50 reduces the moving force and increases heat transfer surface and the length of the double-pipe en-closed heat exchanger were compared.

Keywords: longitudinal diffusion, Peclet number of longitudinal thermal conduction, double-pipe en-closed heat exchanger, heat-transfer coefficient, heat transfer surface.

© Голованчиков А. Б., Воронцова С. Б., Анцыперов С. А., 2017

Типовые алгоритмы расчетов теплообменников, в том числе двухтрубных, основаны на идеальном вытеснении обоих теплоносителей внутри труб и в межтрубном пространстве [1, 2]. В работах [3–5] нами выведены формулы для расчета технологических параметров и геометрических размеров теплообменников, в которых для одного из теплоносителей учитывается продольная теплопроводность. Показано, что при числе Пекле продольной теплопроводности $Pe<50$ скачок температуры на входе и градиент температуры по длине вызывает существенное уменьшение движущей силы теплопередачи, что приводит к увеличению поверхности и длины трубок на 10 и более процентов.

Однако влияние продольной теплопроводности обоих теплоносителей на технологические параметры и геометрические размеры теплообменников, в том числе двухтрубных, до сих пор не рассматривалось.

Целью работы является создание физической и математической моделей двухтрубного теплообменника с учетом продольной теплопроводности по обоим теплоносителям и разработка упрощенного алгоритма расчета такого теплообменника.

На приведенном ниже рисунке представлена схема материальных потоков и их температур в двухтрубном теплообменнике с учетом продольной теплопроводности горячего λ_g и холодного λ_x теплоносителей.

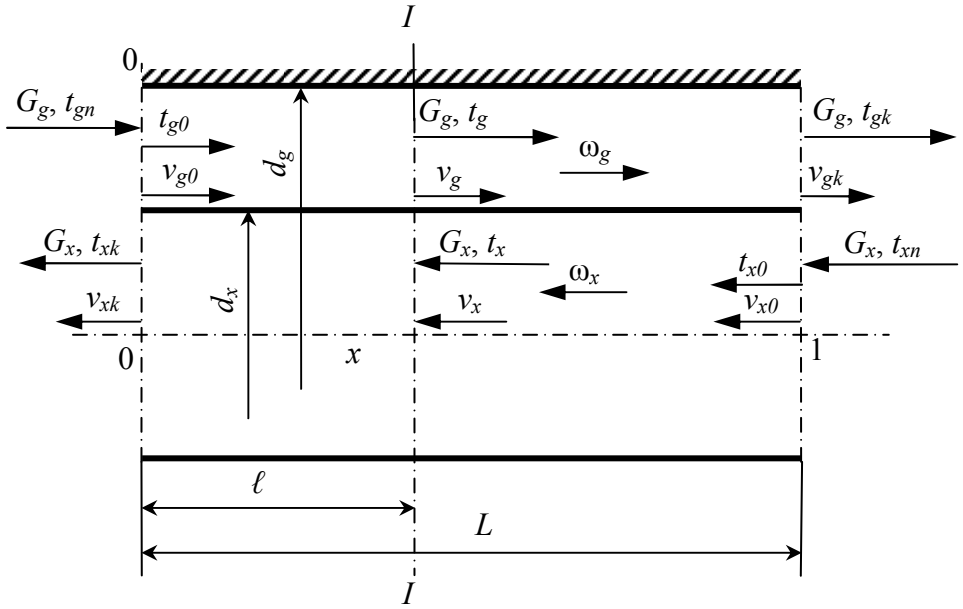


Схема материальных потоков и их температур в двухтрубном теплообменнике при противоточном движении теплоносителей и с учетом продольной теплопроводности

Составив тепловой баланс для сечения *0-0* на входе горячего теплоносителя в межтрубное пространство (холодного теплоносителя на выходе из внутренней трубы) и произвольного сечения *I-I*, расположенного на расстоянии ℓ от входа

$$G_g c_g t_{g0} + \upsilon_{g0} S_g + G_x c_x t_x + S_x \upsilon_x = $$
$$= G_g c_g t_g + \upsilon_g S_g + G_x c_x t_{xk} + S_x \upsilon_{xk}.$$

Полагаем, что скорость продольной теплопроводности определяется в виде модифицированного закона молекулярной теплопроводности

$$\upsilon = -\lambda \frac{dt}{d\ell}. \qquad (1)$$

Тогда предыдущее уравнение теплового баланса запишется в виде

$$G_g c_g t_{g0} - S_g \lambda_g \left(\frac{dt_g}{d\ell}\right)_0 + G_x c_x t_x - S_x \lambda_x \left(\frac{dt_x}{d\ell}\right) =$$
$$= G_g c_g t_g - S_g \lambda_g \left(\frac{dt_g}{d\ell}\right) + G_x c_x t_{xk} - S_x \lambda_x \left(\frac{dt_x}{d\ell}\right)_k.$$

Сгруппируем слагаемое последнего уравнения относительно горячего и холодного теплоносителя в разных его частях.

$$G_g c_g t_{g0} - S_g \lambda_g \left(\frac{dt_g}{d\ell}\right)_0 - G_g c_g t_g + S_g \lambda_g \left(\frac{dt_g}{d\ell}\right) =$$
$$= G_x c_x t_{xk} - S_x \lambda_x \left(\frac{dt_x}{d\ell}\right)_k - G_x c_x t_x + S_x \lambda_x \left(\frac{dt_x}{d\ell}\right).$$

В левой части все члены уравнения разделим на $G_g c_g$, а в правой – на $G_x c_x$. Тогда получаем

$$t_{g0} - \frac{S_g \lambda_g}{G_g c_g}\left(\frac{dt_g}{d\ell}\right)_0 - t_g + \frac{S_g \lambda_g}{G_g c_g}\left(\frac{dt_g}{d\ell}\right) =$$

$$= \left[t_{xk} - \frac{S_x \lambda_x}{G_x c_x}\left(\frac{dt_x}{d\ell}\right)_k - t_x + \frac{S_x \lambda_x}{G_x c_x}\left(\frac{dt_x}{d\ell}\right)\right]\left(\frac{G_x c_x}{G_g c_g}\right).$$

Переведем параметр длины ℓ в безразмерный вид $x = \ell/L$. Тогда $d\ell = Ldx$, а члены, содержащие продольную диффузию λ_g, умножим и разделим на ρ_g, а продольную диффузию λ_x – умножим и разделим на ρ_x, и, имея в виду, что безразмерные числа Пекле продольной теплопроводности имеют вид:

$$Pe_g = \frac{\upsilon_g L}{a_g}, \qquad Pe_x = \frac{\upsilon_x L}{a_x},$$

где $a_g = \dfrac{\lambda_g}{\rho_g c_g}$ и $a_x = \dfrac{\lambda_x}{\rho_x c_x}$ – соответственно продольные температуропроводности каждого теплоносителя, после алгебраических преобразований получаем

$$t_{g0} - \frac{1}{Pe_g}\left(\frac{dt_g}{dx}\right)_0 - t_g + \frac{1}{Pe_g}\left(\frac{dt_g}{dx}\right) =$$

$$= \left[t_{xk} - \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right)_k - t_x + \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right)\right]\left(\frac{G_x c_x}{G_g c_g}\right).$$

Для тепловых процессов с продольной теплопроводностью, как и для массообменных процессов с продольной диффузией, имеется дифференциальное граничное условие на входе, которое для горячего теплоносителя принимает вид

$$t_{gn} = t_{g0} - \frac{1}{Pe_g}\left(\frac{dt_g}{dx}\right)_0, \qquad (2)$$

то есть предыдущее уравнение можно записать в виде

$$t_{gn} - t_g + \frac{1}{Pe_g}\left(\frac{dt_g}{dx}\right) = \left[t_{xk} - \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right)_k - t_x + \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right)\right]\left(\frac{G_x c_x}{G_g c_g}\right). \qquad (3)$$

Запишем последнее уравнение для координаты x=1, что соответствует выходу горячего теплоносителя и входу холодного

$$t_{gn} - t_{gk} + \frac{1}{Pe_g}\left(\frac{dt_g}{dx}\right)_k = \left[t_{xk} - \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right)_k - t_{x0} + \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right)_0\right]\left(\frac{G_x c_x}{G_g c_g}\right).$$

Два последних члена в правой части соответствуют дифференциальному граничному условию для холодного теплоносителя на входе и имеют вид аналогичный условию (2)

$$t_{xn} = t_{x0} - \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right)_0. \qquad (4)$$

Тогда последнее уравнение теплового баланса с учетом продольной диффузии для обоих теплоносителей по всей длине от x=0 до x=1 будет иметь вид

$$t_{gn} - t_{gk} + \frac{1}{Pe_g}\left(\frac{dt_g}{dx}\right)_k =$$

$$= \left[\left(t_{xk} - t_{xn}\right) - \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right)_k\right]\left(\frac{G_x c_x}{G_g c_g}\right).$$

Сгруппируем члены последнего уравнения: слева запишем типовой тепловой баланс, когда оба теплоносителя движутся в режиме идеального вытеснения без продольной теплопроводности, справа – члены, учитывающие продольную теплопроводности в числах Пекле

$$\left(t_{gn} - t_{gk}\right) - \left(t_{xk} - t_{xn}\right)\left(\frac{G_x c_x}{G_g c_g}\right) =$$

$$= -\frac{1}{Pe_g}\left(\frac{dt_g}{dx}\right)_k - \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right)_k\left(\frac{G_x c_x}{G_g c_g}\right).$$

Левая часть последнего уравнения соответствует тепловому балансу и равна нулю. Тогда

$$\frac{1}{Pe_g}\left(\frac{dt_g}{dx}\right)_k = \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right)_k\left(\frac{G_x c_x}{G_g c_g}\right),$$

что возможно при выполнении пропорции

$$\frac{Pe_x}{Pe_g} = \left[\left(\frac{dt_x}{dx}\right)_k \Big/ \left(\frac{dt_g}{dx}\right)_k\right]\left(\frac{G_x c_x}{G_g c_g}\right)$$

или при условии

$$g_{xk}=g_{gk}=0, \qquad (5)$$

где g – соответствующие горячему или холодному теплоносителю градиенты температуры по безразмерной координате x на выходе теплоносителей из теплообменника.

Ранее в работах [3–5] было показано, что когда один из теплоносителей движется в режиме идеального вытеснения, а второй – в режиме с продольной теплопроводностью

$$g_{gk}=0 \text{ или } g_{xk}=0.$$

Поэтому принимаем за новое дополнительное граничное условие (5).

Окончательно уравнение связи температур (3) горячего и холодного теплоносителя с учетом граничных условий (2) и (4) принимает вид:

$$t_x = t_{xk} - \left(t_{gn} - t_g\right)\left(\frac{G_g c_g}{G_x c_x}\right) - \frac{1}{Pe_g}\left(\frac{dt_g}{dx}\right)\left(\frac{G_g c_g}{G_x c_x}\right) + \frac{1}{Pe_x}\left(\frac{dt_x}{dx}\right). \quad (6)$$

При (Pe_g и Pe_x) $\to\infty$ или (λ_g и λ_x)$\to 0$, что соответствует идеальному вытеснению по обоим теплоносителям, получаем уравнение прямой рабочей линии, связывающей линейно температуры обоих теплоносителей. Продольная теплопроводность даже по одному из теплоносителей приводит к нелинейности этой связи температур холодного и горячего теплоносителей.

Уравнение теплового баланса для каждого теплоносителя с учетом продольной теплопроводности и теплопередачи получены в работах [3–5] и имеют вид:

для межтрубного пространства

$$\frac{1}{Pe_g}\frac{d^2 t_g}{dx^2} = \frac{dt_g}{dx} + \frac{\pi\tau_g\left(d_x+\delta\right)}{S_g c_g \rho_g} K_t \left(t_g - t_x\right); \quad (7)$$

для трубы

$$\frac{1}{Pe_x}\frac{d^2 t_x}{dx^2} = \frac{dt_x}{dx} + \frac{\pi\tau_x\left(d_x+\delta\right)}{S_x c_x \rho_x} K_t \left(t_g - t_x\right). \quad (8)$$

Совместное решение уравнения рабочей линии (6), относящееся к дифференциальному уравнению I порядка по двум переменным t_x и t_g и последние два уравнения (7) и (8), являющиеся дифференциальными уравнениями II порядка по этим же переменным, довольно сложно. Поэтому ниже предлагается упрощенный алгоритм расчета.

I. Блок формул типового алгоритма, включающий промежуточные расчеты средних температур теплоносителей и средней движущей силы, плотностей и вязкостей теплоносителей при их средних температурах, чисел Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа, коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, удельной тепловой мощности, поверхности теплопередачи и длины труб.

II. Определение скачка температур на входе каждого теплоносителя за счет продольной теплопроводности по эмпирическим формулам [3–5].

В табл. 1 приведены исходные и справочные данные, по которым проводился расчет двухтрубного теплообменника, предназначенного для нагревания дутьевого воздуха за счет тепла дымовых газов, а также общие расчетные параметры, а в табл. 2 – результаты расчетов технологических и геометрических параметров этого теплообменника по четырем вышеописанным вариантам.

Таблица 1

Исходные и справочные данные для расчета двухтрубного теплообменника при нагревании дутьевого воздуха котельной за счет утилизации тепла дымовых газов (противоток, воздух внутри центральной трубы)

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4	5
Исходные данные				
1	Расход воздуха	*кг/час*	G_x	100
2	Начальная температура дымовых газов	*°C*	t_{gn}	230
3	Конечная температура дымовых газов	*°C*	t_{gk}	90
4	Начальная температура воздуха	*°C*	t_{xn}	20
5	Конечная температура воздуха	*°C*	t_{xk}	150
6	Внутренний диаметр наружной трубы	*м*	d_g	0,108
7	Внутренний диаметр внутренней трубы, в которой воздух	*м*	d_x	0,068
8	Толщина стенки внутренней трубы	*м*	δ	0,004

Окончание табл. 1

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4	5
Справочные данные				
9	Средний молекулярный вес дымовых газов	*кг/кмоль*	M_g	31,5
10	Плотность воздуха при 0°*C* и атмосферном давлении	*кг/м*^{3}	ρ_x	1,29
11	Вязкость дымовых газов при 0°*C*	*Па·с*	μ_{g0}	$1{,}88\cdot10^{-5}$
12	Вязкость воздуха при 0°*C*	*Па·с*	μ_0	$1{,}74\cdot10^{-5}$
13	Коэффициент температурной вязкости дымовых газов	*K*$^{-1}$	a_g	0,00172
14	Коэффициент температурной вязкости воздуха	*K*$^{-1}$	a_x	0,00183
15	Удельная теплоемкость дымовых газов	*Дж/(кг К)*	c_g	1040
16	Удельная теплоемкость воздуха	*Дж/(кг К)*	c_x	1010
17	Термическое сопротивление стенки трубы	*(Вт/(м*^{2}*·К))*$^{-1}$	r_s	0,0004
18	Теплопроводность дымовых газов	*Вт/(м·К)*	λ_g	0,038
19	Теплопроводность воздуха	*Вт/(м·К)*	λ_x	0,029
20	Теплопроводность материала трубы	*Вт/(м·К)*	λ_w	46,2
21	Давление обоих теплоносителей	*ат*	p_a	1,033
22	Длина секции теплообменника	*м*	ℓ_t	6
Общие расчетные параметры				
23	Наружный диаметр внутренней трубы	*м*	$d_{xн}$	0,076
24	Эквивалентный диаметр межтрубного пространства, в котором движется горячий теплоноситель	*м*	d_{eg}	0,032
25	Площадь сечения межтрубного пространства	*м*^{2}	S_g	$4{,}62\cdot10^{-3}$
26	Расход горячего теплоносителя – дымовых газов с учетом потерь тепла через теплоизоляцию	*кг/час*	G_g	92,9

Как видно из материалов табл. 2, большой скачок входной температуры горячего теплоносителя $\Delta t_g=(t_{gn}-t_{g0})=16{,}7$ градуса вызывает существенное уменьшение движущей силы Δt удельной тепловой мощности q, что приводит к возрастанию поверхности теплопередачи и длины теплообменника на 12,3% (сравнение I и II вариантов). При сравнении вариантов I и III незначительный скачок входной температуры холодного теплоносителя $\Delta t_x=(t_{x0}-t_{xn})=1{,}85$ градуса практически не влияет на технологические и геометрические параметры двухтрубного теплообменника. При сравнении вариантов I и IV и вариантов I и II видно, что учет скачков температур обоих теплоносителей увеличивает геометрические параметры на 13,9%, а только скачка температуры горячего теплоносителя на 12,3%, то есть разница геометрических параметров II и IV вариантов не превышает 1,5%.

Таблица 2

Расчетные параметры двухтрубного теплообменника при нагревании дутьевого воздуха котельной за счет утилизации тепла дымовых газов

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина			
				Идеальное вытеснение по обоим теплоносителям (I вариант)	Идеальное вытеснение по воздуху, продольная теплопроводность по дымовым газам (II вариант)	Продольная теплопроводность по воздуху, идеальное вытеснение по дымовым газам (III вариант)	Продольная теплопроводность по обоим теплоносителям (IV вариант)
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Температура на входе дутьевого воздуха	°*C*	t_{x0}	20	20	21,85	21,85
2	Температура на входе дымового газа	°*C*	t_{g0}	230	213,3	230	213,3
3	Средняя температура дутьевого воздуха	°*C*	t_s	85	85	85,9	85,92

Продолжение табл. 2

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина			
				Идеальное вытеснение по обоим теплоносителям (I вариант)	Идеальное вытеснение по воздуху, продольная теплопроводность по дымовым газам (II вариант)	Продольная теплопроводность по воздуху, идеальное вытеснение по дымовым газам (III вариант)	Продольная теплопроводность по обоим теплоносителям (IV вариант)
1	2	3	4	5	6	7	8
4	Средняя температура дымовых газов	*°C*	t_{gs}	159,9	151,6	159,8	151,63
5	Средняя движущая сила процесса теплопередачи	*K*	Δt	74,9	66,6	73,9	65,7
6	Средняя плотность дымовых газов	*кг/м³*	ρ_g	0,887	0,904	0,887	0,904
7	Средняя плотность дутьевого воздуха	*кг/м³*	ρ_x	0,984	0,984	0,981	0,981
8	Средняя вязкость дутьевого воздуха	*Па·с*	μ_x	$2{,}03\cdot10^{-5}$	$2{,}03\cdot10^{-5}$	$2{,}04\cdot10^{-5}$	$2{,}04\cdot10^{-5}$
9	Средняя вязкость дымовых газов	*Па·с*	μ_g	$2{,}32\cdot10^{-5}$	$2{,}3\cdot10^{-5}$	$2{,}15\cdot10^{-5}$	$2{,}3\cdot10^{-5}$
10	Число Рейнольдса для дутьевого воздуха	–	Re_x	25598	25598	25554	25555,2
11	Число Рейнольдса для дымовых газов	–	Re_g	7693,7	7778,3	8313,2	7778
12	Скачок температуры на входе дутьевого воздуха	*°C*	Δt_x	0	0	1,85	1,85
13	Скачок температуры на входе дымовых газов	*°C*	Δt_g	0	16,7	0	16,7
14	Средняя скорость в трубе дутьевого воздуха	*м/с*	υ_s	7,78	7,78	7,8	7,8
15	Средняя скорость в межтрубном пространстве дымовых газов	*м/с*	υ_{gs}	6,29	6,17	6,29	6,174
16	Число Прандтля для дутьевого воздуха	–	Pr_x	0,707	0,708	0,709	0,709
17	Число Прандтля для дымовых газов	–	Pr_g	0,635	0,628	0,588	0,628
18	Число Грасгофа для дутьевого воздуха	–	Gr_x	–	–		–
19	Температура отложений со стороны дымовых газов	*°C*	x	120,69	116,74	121,74	117,24
20	Число Нуссельта для дымовых газов	–	Nu_g	20,97	21,04	21,7	21,04
21	Число Грасгофа для дымовых газов	–	Gr_g	–	–		–
22	Коэффициент теплоотдачи для дымовых газов	*Вт/(м²·К)*	α_g	24,9	25	25,8	24,9
23	Удельная тепловая мощность для дымовых газов	*Вт/м²*	q_g	976,03	871,3	983,4	859,4
24	Температура отложений со стороны дутьевого воздуха в трубе	*°C*	t_x	120,21	116,31	121,26	116,82
25	Число Нуссельта для дутьевого воздуха в трубе	–	Nu	65	64,94	64,96	64,88
26	Коэффициент теплоотдачи для дутьевого воздуха	*Вт/(м²·К)*	α_x	27,72	27,7	27,7	27,67
27	Удельная тепловая мощность дутьевого воздуха	*Вт/м²*	q_s	976,18	867,3	978,2	854,9
28	Средняя удельная тепловая мощность	*Вт/м²*	q	976,1	869,3	980,8	857,14
29	Расчетная поверхность теплопередачи	*м²*	$\mathrm{F_r}$	3,74	4,2	3,72	4,26
30	Расчетная длина теплообменника	*м*	ℓ_r	16,53	18,56	16,44	18,83

Окончание табл. 2

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина			
				Идеальное вытеснение по обоим теплоносителям (I вариант)	Идеальное вытеснение по воздуху, продольная теплопроводность по дымовым газам (II вариант)	Продольная теплопроводность по воздуху, идеальное вытеснение по дымовым газам (III вариант)	Продольная теплопроводность по обоим теплоносителям (IV вариант)
1	2	3	4	5	6	7	8
31	Коэффициент теплопередачи	$Вт/(м^2 \cdot К)$	K_t	13,03	13,05	13,27	13,04
32	Среднее время пребывания дутьевого воздуха во внутренней трубе	*с*	τ_s	2,12	2,38	2,11	2,4
33	Среднее время пребывания дымовых газов в межтрубном пространстве	*с*	τ_g	2,62	3	2,61	3,04
34	Относительное увеличение поверхности теплопередачи и длины	*%*	K_y	0	+12,3	-0,54	+13,9

Таким образом, высокая начальная температура горячего теплоносителя t_{gn} по сравнению с низкой начальной температурой холодного теплоносителя t_{xn} вызывает значительный скачок температуры горячего теплоносителя на входе, что соответственно сильно влияет в сторону увеличения на расчетную поверхность теплопередачи и длину двухтрубного теплообменника.

Поэтому расчет двухтрубного теплообменника можно проводить по вышеописанному упрощенному алгоритму, учитывающему только скачок температуры на входе горячего теплоносителя (вариант II). Кроме того, в этом случае возможно точное аналитическое решение дифференциального уравнения II порядка (7) с учетом формулы (6), в которой $Pe_x=\infty$ [3-5].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *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. стер. – М.: Альянс, 2005.

2. Основные процессы и аппараты химической технологии : Пособие по проектированию / Г.С. Борисов [и др.] ; под ред. Ю. И. Дытнерского. 4-е изд. М.: Альянс, 2008. 272 с.

3. *Голованчиков, А.Б.* Моделирование работы двухтрубного теплообменника с учетом теплодиффузии газового теплоносителя / А.Б. Голованчиков, С.Б. Воротнева // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, вып. 9. – С. 58–62.

4. *Голованчиков, А.Б.* Моделирование тепловых процессов в двухтрубном теплообменнике с теплодиффузионной моделью структуры потоков / А.Б. Голованчиков, С.Б. Воротнева, Б.А. Дулькин // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 13(177). С. 13–18.

5. *Голованчиков, А.Б.* Моделирование гидродинамических и тепловых процессов в двухтрубном теплообменнике : монография / Голованчиков А.Б., Воротнева С.Б. ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – 160 с.

УДК 004.94

А. С. Горобцов, В. В. Гетманский, А. Е. Андреев

ЧИСЛЕННЫЙ МЕТОД РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ УПРУГОСТИ ТВЕРДОГО ДЕФОРМИРУЕМОГО ТЕЛА*

Волгоградский государственный технический университет

vm@vstu.ru, victor.getmanskiy@gmail.com, andan2005@yandex.ru

Рассмотрен метод моделирования напряженно-деформированного состояния тела с использованием подхода, основанного на динамике систем тел со связями. Реализована вычислительная программы расчета для пластины, приведены результаты сравнения с методом конечных элементов.

Ключевые слова: моделирование упругих тел, напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, декомпозиция, динамика систем тел.

© Горобцов А. С., Гетманский В. В., Андреев А. Е., 2017

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 16-07-00534, 15-01-04577, 15-07-06254, при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 16-47-340385.

A. S. Gorobtsov, V. V. Getmanskiy, A. E. Andreev

NUMERICAL METHOS FOR FLEXIBLE BODY SIMULATION PROBLEM SOLUTION

Volgograd State Technical University

A method of stress-strain simulation of single body based on multibody dynamic model is proposed. The computational software is implemented for plate simulation. Example of stress-strain results compared to finite element method is presented.

Keywords: flexible body simulation, stress-strain state, finite element method, domain decomposition, multibody dynamics.

Введение

Актуальной задачей, стоящей перед инженерными системами компьютерного моделирования является построение и решение комплексных математических моделей машин, которые включают в себя подмодели, описывающие процессы различной физической природы. Часто для обозначения таких моделей используется термин «мультифизическая модель» [1]. Базовой моделью при таком подходе, как правило, является модель машины или конструкции, разработанная методами динамики систем твердых тел, которая описывает общую динамику объекта. В качестве примера можно привести инженерные системы моделирования [2–4]. Одной из подзадач для такой модели является определение напряженно-деформированного состояния отдельных тел. В данной работе рассматриваются способы численного решения указанной подзадачи ориентированные на технологии параллельных вычислений.

Постановка задачи

Классическое уравнение динамики упругого тела имеет вид:

$$\rho \frac{du_i}{dt} + \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + F_i = 0 i=1,2,3, j=1,2,3, \qquad (1)$$

где σ_{ij} – компонент тензора напряжений (частная производная) записана в тензорном смысле, т. е. производится суммирование по одинаковым индексам; u_i – проекция скорости точки среды на ось i; ρ – плотность среды; x_j – j-я координата точки среды.

При решении (1), как правило, напряжения через закон Гука связываются с деформациями:

$$\sigma_{ii} = 2\mu\varepsilon_{ii} + \lambda(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}),$$

$$\sigma_{ij} = \mu\varepsilon_{ij},$$

$$\varepsilon_{ij} = 1/2\left(\frac{\partial \omega_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \omega_j}{\partial x_i}\right),$$

где μ, λ – постоянные Ламе; ω_i – компонента вектора перемещения точки.После этого уравнение (1) записывается через перемещения и может решаться как уравнение в частных производных от перемещений.

Наиболее распространенными методами численного решения уравнения (1) в настоящее время являются вариационные методы, в частности метод конечных элементов (МКЭ). МКЭ использует представление неизвестных функций из уравнения (1) полиномами от некоторых узловых переменных внутри ограниченных подобластей (конечных элементов). Общее уравнение динамической задачи МКЭ записывается:

$$M\ddot{u} + Ku = b, \qquad (2)$$

где u – вектор переменных; M – матрица инерции; K – матрица жесткости; b – вектор правых частей.

Уравнение (2) решается относительно узловых переменных, по которым затем могут рассчитываться деформации и напряжения.

Существует два способа использовании МКЭ для расчета динамических напряжений в моделях многотельной динамики – прямое интегрирование уравнения (2) и метод Крэйга–Бэмптона[5].

Прямое интегрирование системы (2) осложняется большой жесткостью уравнений и необходимостью использования неявных численных методов. Неявные методы ведут к необходимости решения систем линейных алгебраических уравнений, распараллеливание решения которых обладает уменьшающейся масштабируемостью.

Метод Крэйга – Бэмтона использует два набора собственных функций – функции (форм) от статических нагрузок и ограниченный набор упругих форм колебаний в заданном частотном диапазоне. Основные недостатки метода – зависимость статических форм от граничных условий и необходимость решения задачи на собственные значения высокой размерности. Метод Крэйга – Бэмптона встроен в большинство коммерческих пакетов инженерных расчетов.

В целом можно констатировать, что существующие способы расчета напряженно-деформируемого состояния обладают недостаточной масштабируемостью в смысле использования технологий параллельных вычислений. Следует также отметить, что кромевычислительных труд-

ностей, существенным является вопрос повышения адекватности моделей. Например, метод Крэйга-Бэмтона для определения усталостной долговечности дает сильно завышенные оценки времени до разрушения [4].

Таким образом, актуальной является задача поиска высокомасштабируемых методов и алгоритмов для расчета напряженно-деформированного состояния тел. Такие алгоритмы позволят значительно увеличить размерность решаемых задач и существенно повысить адекватность математических моделей. Алгоритмы должны быть применимы к основным существующим технологиям параллельных вычислений.

Метод моделирования напряженно-деформированного состояния

Предлагаемый подход использует в качестве основы уравнение (1). В [7] указывается, что компоненты тензора напряжений в (1) суть множители Лагранжа для связей вида

$$\varepsilon_{ij} = 0, i = 1,2,3, j = 1,2,3, \qquad (3)$$

где ε_{ij}– соответствующие деформации.

Уравнения (1) и (3) можно трактовать как дифференциально-алгебраические уравнения (задача на условный экстремум функционала энергии). Физический смысл уравнений связей (3) – рассматриваемое тело абсолютно твердое, в теле отсутствуют деформации. Такая интерпретация связей (3) позволяет построить дискретную модель в виде набора сегментов, жестко связанных между собой. Уравнения движения такой дискретной модели записываются в виде [2, 3]:

$$\begin{cases} M\ddot{u} + D^T p = f, \\ Du = 0 \end{cases} \qquad (4)$$

где D – матрица коэффициентов уравнений связей; f – вектор сил; p – вектор множителей Лагранжа.

Пример плоской расчетной схемы для квадратных дискретных элементов показан на рис. 1. На рисунке приведена схема квадратной пластинки из 16 элементов, закрепленной по нижнему ребру и нагруженной горизонтальной силой, приложенной к верхнему правому элементу. Каждый элемент имеет 2 поступательных и одну поворотную степень свободы с началом координат в центре элемента. Модель построена с помощью системы моделирования динамики систем твердых тел ФРУНД [2]. В качестве связей между телами использованы кинематические связи (шарниры в терминологии систем моделирования динамики), запрещающие перемещения в двух направлениях.

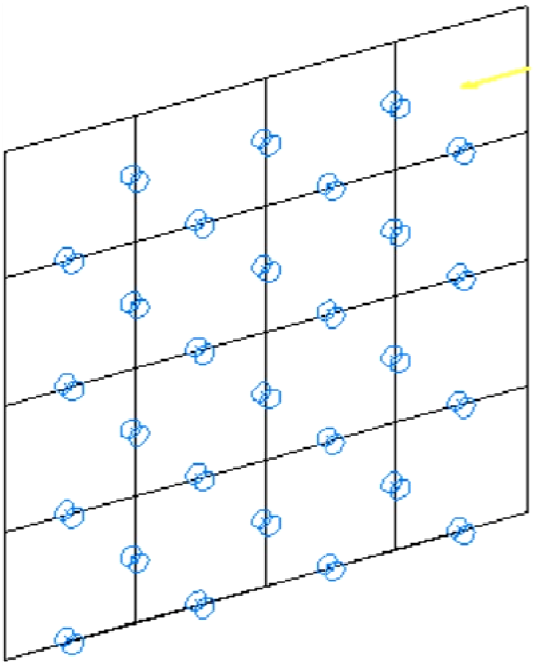


Рис. 1. Плоская расчетная схема из 16 элементов

Для определения напряжений из уравнений (4) нужно найти множители Лагранжа. Особенностью предлагаемого подхода является то, что система обладает избыточными связями и, следовательно, матрица коэффициентов имеет прямоугольный вид. Решение систем линейных уравнений с прямоугольной матрицей возможно с помощью псевдообратной матрицы, однако для больших размерностей уравнений это неэффективно с вычислительной точки зрения. Для определения множителей Лагранжа можно воспользоваться методом штрафных функций, минимизирующихневязки в уравнениях связей. Такой метод широко применяется в вычислительной многотельной динамике. Уравнения (4) в этом случае принимают вид

$$M\ddot{u} + D^T \mathrm{c} Du = f, \qquad (5)$$

где c – некоторая постоянная. Множители Лагранжа (реакции в связях) определяются из выражений

$$p = cDu \qquad (6)$$

где c – некоторая произвольная постоянная. В случае отсутствия динамических степеней свободы системы интегрирование (5) идентично решению системы линейных уравнений методом установления и в этом случае искомые реакции (6) не зависят от C, матрицы масс и демпфирования в связях. Напряжения находятся следующим образом:

$$\sigma_{ii} = \frac{p_i}{S}, \sigma_{ij} = \frac{M_{ij}^{+}}{2a}, \qquad (7)$$

где s – площадь элементарной ячейки (дискретного элемента); M_{ij}^{+} – момент касательных сил с положительным знаком; a – ширина дискретного элемента. Для проверки предлагаемого метода были проведены расчеты статических напряжений пластинки – рис. 1, которые сравнивались с результатами расчетов МКЭ (SolidWorks). Предполагалось, что коэффициент Пуассона равен 0.

Как следует из рис. 2, предлагаемый метод дает удовлетворительное совпадение при сетке в 484 элемента. Более мелкая сетка должна давать лучшее совпадение.

Отметим, что уравнения (5) не содержат никаких параметров материала (кроме нулевого коэффициента Пуассона), в отличие от МКЭ, где задаются модули упругости.

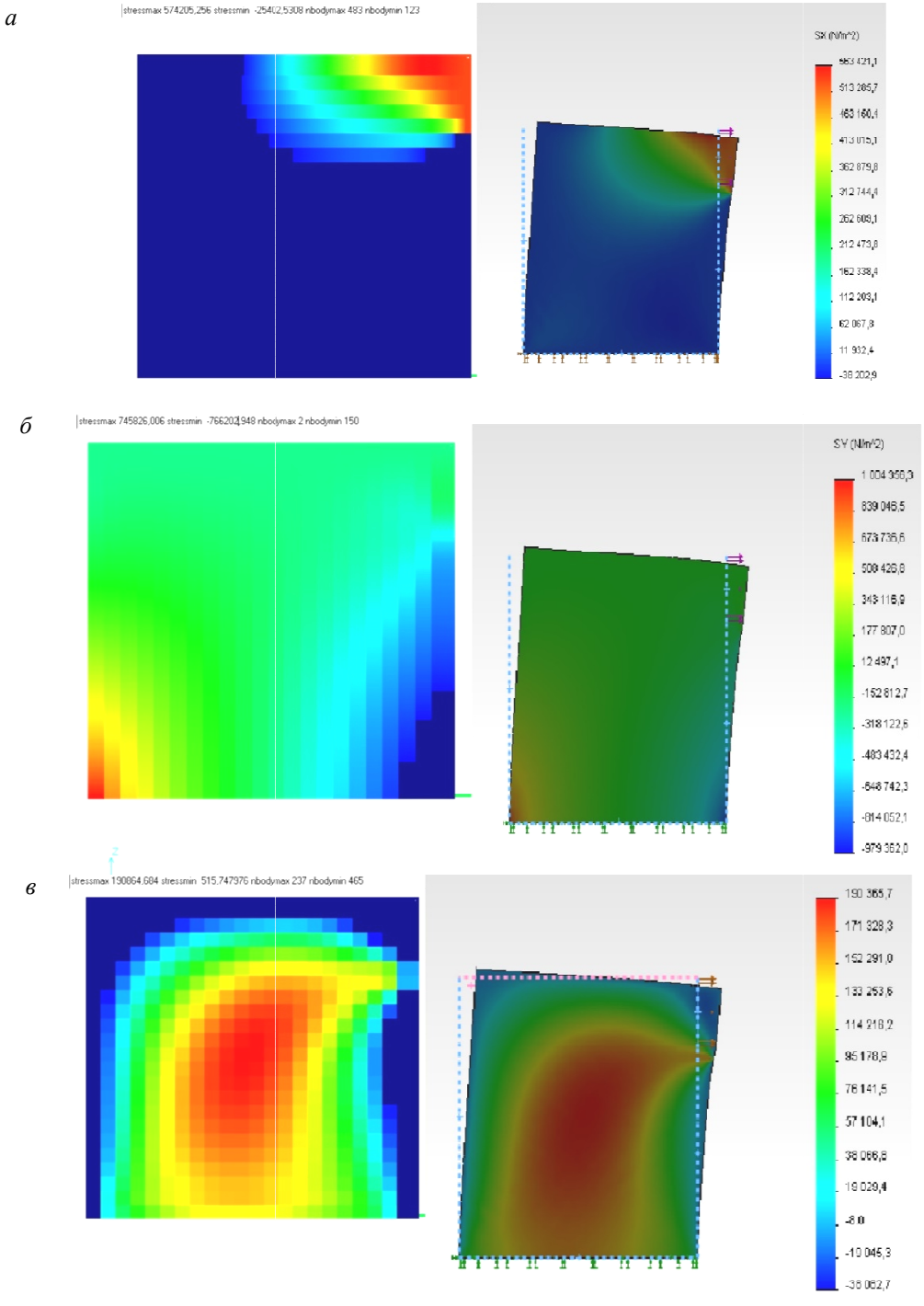


Рис. 2. Эпюры напряжений пластины, полученные авторским методом (слева) и МКЭ (справа):
а – нормальные напряжения по оси *x*; *б* – нормальные напряжения по оси *z*; *в* – касательные напряжения

Метод декомпозиции

Рассматриваемый метод допускает декомпозицию модели. Поскольку связи между элементами считаются абсолютно жесткими и вся модель считается твердым телом, то можно предположить, что отбрасывание группы связей в некоторой произвольной области и замена (конденсация) этой области твердым телом незначительно повлияет на оставшиеся. На рис. 3 показан пример такой декомпозиции тестовой пластинки на 4 части с конденсацией 3 областей.

Предложенный метод декомпозиции существенно упрощает модель и дает приближенное решение полной модели в неконденсированной области с некоторой точностью. Можно предположить, что существует такая декомпозиция которая позволяет достигнуть заданной точности в неконденсированной области.

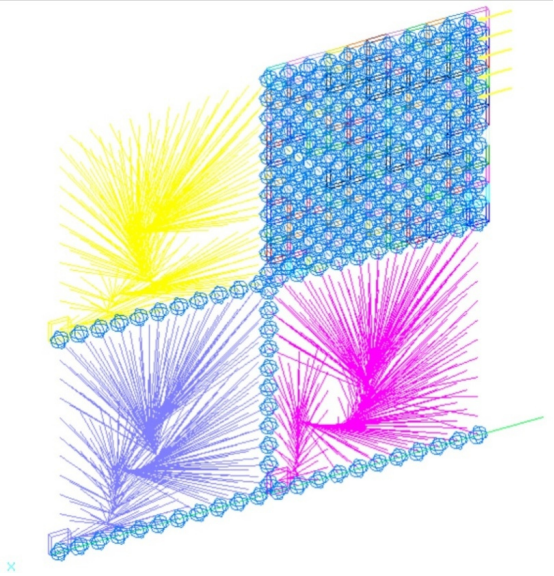
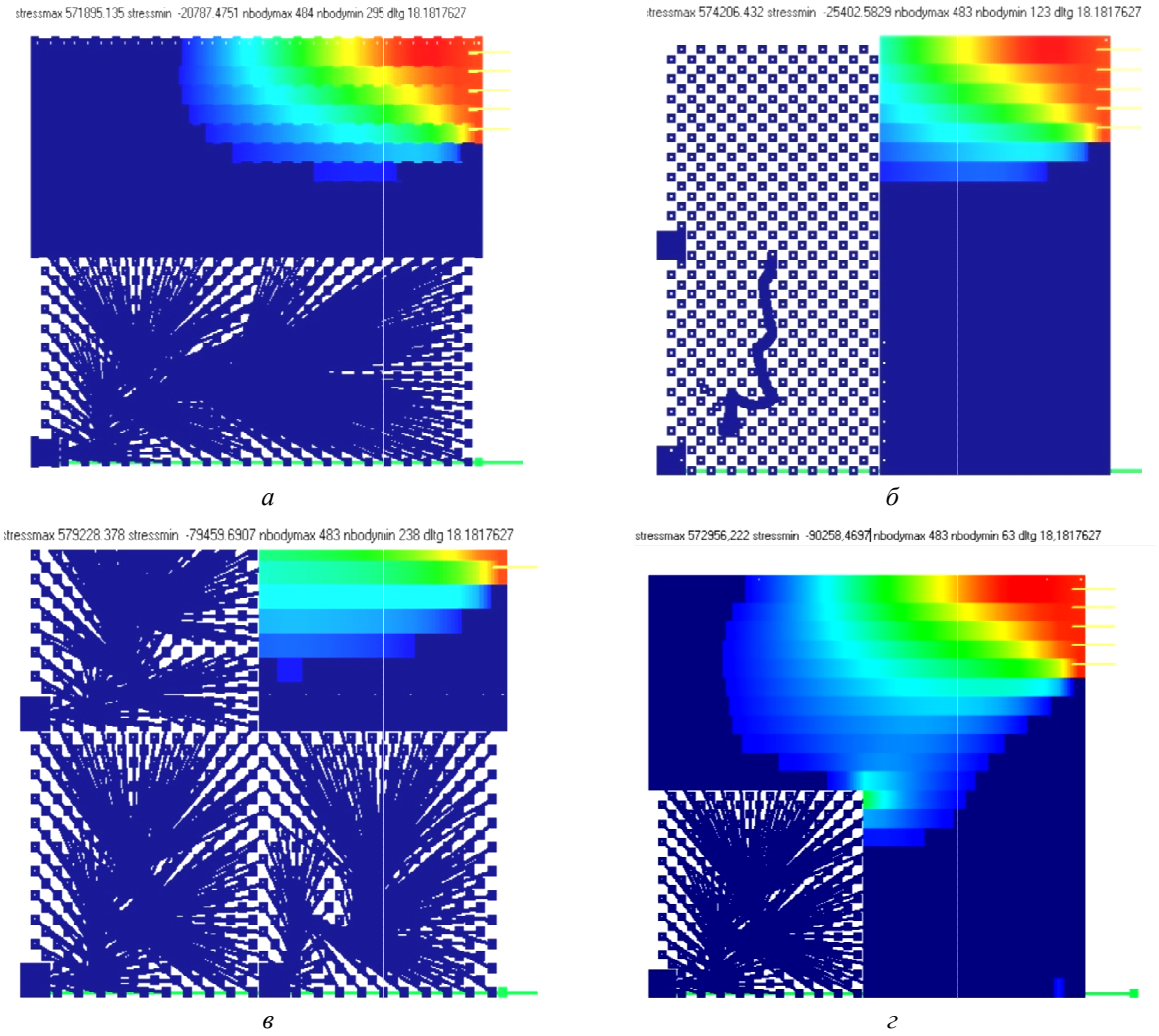


Рис. 3. Декомпозиция с конденсацией трех областей

На рис. 4 показаны напряжения в неконденсированной области при различной декомпозиции.



а *б*

в *г*

Рис. 4. Декомпозиция с конденсацией:
а – нижней части; *б* – левой части; *в* – 3/4 площади; *г* – 1/4 площади

Представленный метод характерен тем, что математическая модель содержит только геометрическую информацию и имеет форму обыкновенных дифференциальных уравнений. При этом жесткость этих уравнений определяется произвольным параметром, который может выбираться из соображений использования тех или иных методов численного интегрирования. К достоинствам метода можно отнести то, что формирование уравнений не требует значительных вычислительных ресурсов, и может проводится одновременно с процедурой интегрирования.

В случае эффективной вычислительной реализации метод может позволить существенно повысить размерность решаемых задач и за счет этого учитывать микроструктурные особенности материала, т. е. повысить адекватность моделей.

Выводы и перспективы

Таким образом, в работе показан один из методов моделирования упругих свойств тел, который можно использовать как альтернативу МКЭ. Показаны совпадения результатов с МУЭ и потенциальная возможность декомпозиции для понижения размерности задачи, что также позволяет эффективно использовать параллельные вычисления.

Можно выделить два возможных направления распараллеливания рассматриваемой задачи.

1. Непосредственное распараллеливание решения системы (5). Для решения квазистатической задачи методом установления может потребоваться несколько сот шагов интегрирования. При разбиении на отдельные подобласти будет требоваться пересылка данных между областями, для чего возможно использование технологии MPI.

2. Использование декомпозиции при распараллеливании – на каждом узле считается полная модель, в которой одна область с мелкой сеткой, остальные укрупненные – рис. 4. Это требует дополнительного исследования методов декомпозиции, но из рис. 4 следует, что мы можем получить достаточно точное решение в области с мелкой сеткой на одной конденсированной модели. Объединяя результаты нескольких таких подмоделей, мы можем получить решение на всей области. В этом случае мы в идеале можем управлять частотой обмена данными между узлами варьированием числом подсистем, вплоть до полностью независимого решения и объединения результатов только в конце расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Concurrent simulation of multibody systems coupled with stress-strain and heat transfer solvers / В.В. Гетманский, А.С. Горобцов, Е.С. Сергеев, Т.Д. Измайлов, О.В. Шаповалов // Journal of Computational Science. – 2012. – Vol. 3, Iss. 6. – С. 492–497. – Англ.

2. Компьютерные методы построения и исследования математических моделей динамики конструкций автомобилей : монография / А.С. Горобцов, С.К. Карцов, А.Е. Плетнев, Ю.А. Поляков. – М. : Машиностроение, 2011. – 462 с.

3. *Горобцов, А.С.* Представление подвески легкового транспортного средства в системе моделирования «ФРУНД» / А.С. Горобцов, Ан.В. Подзоров // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2008. Т. 4. № 2(40). С. 8–10.

4. *Погорелов, Д.Ю.* Современные алгоритмы компьютерного синтеза уравнений движений систем тел. / Д.Ю. Погорелов // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2005. – № 4. – С. 5–15.

5. Ryan R.R. ADAMS / R.R. Ryan // In Supplement to Vehicle System Dynamics. – 1993. – V. 22. – P. 144–152.

6. *Карцов, С.К.* Вибрации и динамическая нагруженность конструкций колесных машин : автореф. дис. … д-ра техн. наук / С.К. Карцов. М. 1995. – 43 с.

7. *Работнов, Ю.Н.* Механика деформируемого твердого тела / Ю.Н. Работнов. М. Наука. 1979. 744 с.

УДК 004.94, 531.396

А. С. Горобцов, А. Н. Савкин, В. В. Гетманский, А. Е. Андреев

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТОДОМ ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ*

Волгоградский государственный технический университет
vm@vstu.ru, victor.getmanskiy@gmail.com, andan2005@yandex.ru

Проведено исследование динамического напряженно-деформированного состояния детали в составе транспортного средства. Рассмотрена проблема неоднозначности задания граничных условий при использовании метода конечных элементов. Описан метод дискретных элементов, позволяющий, вместо задания граничных условий, использовать реакции из динамического расчета движения модели системы тел; проведено сравнение результатов, полученных обоими методами.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, метод конечных элементов, метод дискретных элементов, динамика систем тел.

© Горобцов А. С., Савкин А. Н., Гетманский В. В., Андреев А. Е., 2017

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 16-07-00534, 15-01-04577, 15-07-06254, при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 16-47-340385.

A. S. Gorobtsov, A. N. Savkin, V. V. Getmanskiy, A. E. Andreev

NUMERICAL METHOS FOR FLEXIBLE BODY SIMULATION PROBLEM SOLUTION

Volgograd State Technical University

The research of dynamic stress-strain state of part in complex mechanism is performed. Finite element disadvantage of boundary condition uncertainty is considered. Discrete element method is proposed and described.It allows to apply dynamic forces from multibody model of mechanism instead of boundary condition. Comparative study of both methods simulation results is provided.

Keywords: stress-strain state, finite element method, discrete element method, multibody dynamics.

Введение

При проектировании и анализе механизмов, агрегатов и деталей в настоящее время активно применяются CAE-системы, позволяющие оперативно и эффективно оптимизировать дизайн конструкции еще на стадии разработки, практически исключая необходимость проведения дорогостоящих и длительных натурных испытаний. Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) деталей конструкций в таких системах, как правило, используются статические расчеты методом конечных элементов (МКЭ). В настоящей работе для конечно-элементного расчета был выбран программный продукт SolidWorks [1], широко распространенный как в зарубежной, так и в отечественной машиностроительной практике. В качестве объекта исследования рассмотрен нижний рычаг подвески многоосного, большегрузного автомобиля, подверженный наибольшим нагрузкам при движении. Автомобильная подвеска работает при различных условиях эксплуатации и соответствующих режимах нагружения деталей. Задача моделирования состоит в определении напряженно-деформированного состояния и максимальных нагрузок, которые могут быть использованы для анализа долговечности, надежности и работоспособности ее элементов при проектировании. Широко используемый метод МКЭ, обладает недостатком неоднозначности выбора граничных условий. Для решения этой проблемы предлагается использовать метод дискретных элементов для определения динамического НДС.

Метод дискретных элементов для расчета динамического напряженно-деформированного состояния

Деформируемое тело можно условно представить в виде упруго связанных дискретных элементов, обладающих массой и геометрией и, следовательно, имеющих шесть степеней свободы. В предлагаемом методе дискретные элементы являются кубическими ячейками в узлах регулярной ортогональной сетки. Элементы связаны между собой по граням шестимерными нелинейными связями, соответствующими пространственному закону Гука. Описанная дискретная модель является системой тел со связями, поэтому определяется уравнением динамики в постановке Лагранжа первого рода. В настоящей работе рассмотрена расширенная постановка Лагранжа в физических координатах [2]. Обозначим вектор координат дискретных элементов за $\mathbf{y}$. При замене жестких связей, описываемых алгебраическими уравнениями, на податливые, компоненты вектора $\boldsymbol{\lambda}$ можно приближенно представить в форме $\lambda_i = w_i(d_i(\mathbf{y})), i = 1,\ldots,K$, где K – число связей на границах. В предлагаемом подходе уравнения связей $d_i(\mathbf{y})$ учитывают геометрическую нелинейность задачи, а функции w_i физическую. Тогда уравнение динамики имеет вид:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} + \mathbf{D}_{\mathbf{y}}^{\mathrm{T}}\mathbf{w}(\mathbf{D}) = \mathbf{g}, \qquad (1)$$

где $\mathbf{w}(\mathbf{D}) = \{w_1,\ldots,w_k\}^{\mathrm{T}}$.

Для описания сил на границах выбрано выражение, зависящее от погрешностей уравнений связей. В общем случае при учете всех 6 степеней свободы в связях функции d_i и w_i можно сгруппировать по связям и рассмотреть для каждой связи вектор-функцию $w_k(d_k)$, где w_k – шестимерный вектор сил и моментов, действующих на k-й границе, $\mathbf{d}_k = (\mathbf{d}_k^l, \mathbf{d}_k^a)$ – шестимерный вектор погрешностей связей на k-й границе, состоящий из двух трехмерных подвекторов, определяющих линейные и угловые степени свободы. Для вычисления линейных степеней свободы используется изменение расстояния $\mathbf{b}(t)$ между точками связи, а для угловых – относительного угла поворота $\varphi(t)$ связанных дискретных элементов в проекциях на декартову систему координат (рис. 1).

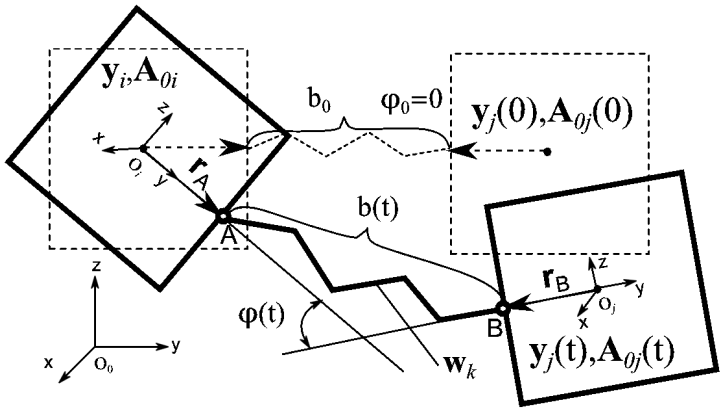


Рис. 1. Связь дискретных элементов

Для k-й связи, соединяющей i и j элементы, $\mathbf{d}_k$ определяется выражениями:

$$\begin{cases}\mathbf{d}_k^l = (\mathbf{y}_i^l + \mathbf{A}_{0i}\mathbf{r}_B^{(i)}) - (\mathbf{y}_j^l + \mathbf{A}_{0j}\mathbf{r}_A^{(j)}) - \mathbf{b}_0, \\ \mathbf{d}_k^a = \boldsymbol{\Theta}(\mathbf{A}_{0i}\mathbf{r}_A^{(i)}, -\mathbf{A}_{0j}\mathbf{r}_B^{(j)}) - \varphi_0\end{cases} \quad (2)$$

где b_0 – начальное расстояние между точками A и B, $\mathbf{y}_i^l$–подвектор координат поступательного движения дискретного элемента с индексом i, $\boldsymbol{\Theta}$ – оператор вычисления углов между проекциями векторов на координатные плоскости yz, xz, xy, φ_0 – начальные углы. Для используемых дискретных элементов $\varphi_0 = 0, b_0 = 0$.

Компоненты симметричного тензора деформаций определяются как шестимерный вектор $\boldsymbol{\xi} = (\boldsymbol{\xi}^n, \boldsymbol{\xi}^s)$ из трехмерных подвекторов нормальных и сдвиговых деформаций:

$$\begin{cases}\boldsymbol{\xi}^n = \mathbf{d}_k^l / h, \\ \boldsymbol{\xi}^s = \tan \mathbf{d}_k^a,\end{cases} \quad (3)$$

где h – шаг сетки, равный длине стороны кубического дискретного элемента. По шести компонентам тензора деформаций вычисляются шесть компонент $\boldsymbol{\sigma}$ тензора напряжений с использованием параметров Ламе[3]. Гипотеза прочности Мизеса позволяет определить значения приведенных напряжений на основании известных компонентов тензора.

Функции сил реакций в связях $\mathbf{w}$ можно представить как сумму упругих и демпфирующих сил: $\mathbf{w} = \mathbf{w}^f + \mathbf{w}^d$. Эти составляющие силы определяются из выражений

$$\begin{cases}\mathbf{w}^f = \boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{\xi})s, \\ \mathbf{w}^d = \mathbf{CL}(\mathbf{y}),\end{cases} \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – вектор из 6 компонент тензора напряжений; s – площадь, для кубических дискретных элементов $s = h^2$; $\mathbf{L}$ – функция нахождения разницы скоростей; $\mathbf{C}$ – диагональная матрица коэффициентов демпфирования.

Значит, деформации вычисляются из решения уравнения динамики системы тел без жестких связей. Движение дискретных элементов рассматривается в неинерциальной системе отсчета опорного тела, поэтому уравнение (1) дополняется силами инерции, зависящих от ускорения $\mathbf{a}$, силами стабилизации $\mathbf{s}$, связывающими положения дискретных элементов с положением опорного тела и реакциями от внешних связей $\mathbf{f}$, вызывающими деформации упругого тела:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}, t) + \mathbf{f}(t) - \mathbf{Ma}(t) + \mathbf{s}(\dot{\mathbf{y}}, \mathbf{y}), \quad (5)$$

где $\mathbf{g}$ – вектор правых частей, учитывающий слагаемое уравнения (1) с силами реакций в связях $\mathbf{w}$. При численном решении уравнения (5) на каждом временном шаге вычисляются смещения дискретных элементов, по которым определяются деформации и напряжения. Значения динамических нагрузок $\mathbf{f}$ вычисляются из уравнения динамики системы тел основной модели. Для нескольких деталей или наборов параметров эффективен метод распараллеливания вычислений [3, 4].

Статический анализ МКЭ

Статический анализ напряженно-деформированного состояния упругого тела в МКЭ основан на допущениях: 1) статическом допущении, по которому все нагрузки прилагаются медленно и постепенно, пока не достигнут своих полных величин, поэтому инерционными

силами и силами демпфирования пренебрегают вследствие пренебрежимо малых ускорений и скоростей; 2) допущении линейности, согласно которому взаимоотношения между нагрузками и вызванными реакциями предполагаются линейными, материалы подчиняются закону Гука, перемещения достаточно малы.

Внешний вид исследуемого рычага показан на рис. 2. Он представляет составную конструкцию с соединительным пальцем между двумя рычагами. Для большей наглядности каждому месту приложения силы или закрепления присвоен номер. Направления действия сил и ограничения степеней свободы соответствуют осям координат XYZ. Проушинами 3 и 4 рычаг крепится к раме автомобиля, проушинами 1 и 2 к промежуточной стойке между верхним и нижним рычагом, а на ось 5 устанавливается амортизатор.

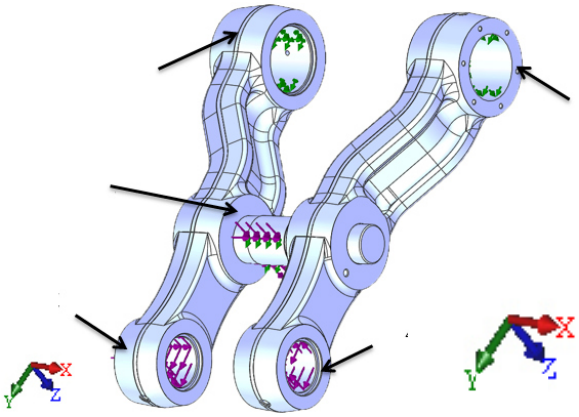


Рис. 2. 3D-модель рычага

В ходе работы были проведены четыре исследования при различных граничных условиях. Для проведения сравнительных результатов численных решений создана трехмерная конечно-элементная модель рычага, выбраны места и направления приложения сил и граничных условий. Силы во всех четырех исследованиях условно принимались равными 1кН. Для определения направлений нагрузок, воздействующих на рычаг, использовалась математическая модель грузового автомобиля, созданная в среде программного комплекса ФРУНД.

Так, в первом исследовании к левой верхней проушине было применено закрепление «Зафиксированный», ограничивающее перемещение в трех направлениях. К правой верхней проушине применено закрепление «Справочная геометрия», ограничивающая перемещения в двух направлениях по осям Y и Z. К соединительному пальцу применено «Справочная геометрия», ограничивающее перемещение по оси Y.

Далее для проведения статического расчета в первом случае к левой нижней проушине было приложено три силы в трех направлениях XYZ. К правой нижней проушине приложены две силы по направлениям осей Y и Z и по направлениям X и Z к соединительному пальцу.

Для выполнения статического расчета была разбита равномерная сетка из 103014 тетраэдральных элементов с гранями, аппроксимируемыми параболическими функциями координат, имеющих в общей сложности 157404 узлов, причем средний глобальный размер элемента равен 4 мм, а заданный допуск – 0,4 мм.

Обязательным шагом конечно-элементного анализа является назначение критериев прочности. SolidWorks позволяет оценивать прочность по четырем критериям прочности: 1) критерий максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу (IV теория прочности, теория потенциальной энергии формоизменения); 2) критерий максимальных касательных напряжений Треска (III теория прочности); 3) критерий Мора-Кулона (критерий внутреннего трения); 4) критерий максимальных нормальных напряжений (I теория прочности).

Для пластичных материалов рекомендуется критерий Мизеса, который и использовался в настоящей работе. Эквивалентное напряжение по Мизесу рассчитывается по формуле

$$\sigma_{экв\ IV} = \sqrt{\frac{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}{2}}, \qquad (6)$$

где σ_1,σ_2, σ_3 – главные напряжения.

В SolidWorks доступны два алгоритма решения системы линейных уравнений: 1) прямой метод для разреженных матриц (Directsparse); 2) итерационный компактный метод (FFEPlus). FFEPlus использовался в настоящей работе.

Для сравнительного анализа результатов расчетов, представленных в таблице, переменными были направления действия сил и условия закрепления, прочие параметры были неизменными.

После запуска решателя в SolidWorks Simulation получены эпюры распределения напряжений по поверхности рычага. Во всех четырех случаях максимум напряжений приходился на соединительный палец между рычагами, предназначенный для установки амортизатора (см. таблицу). В результате получена зависимость граничных условий и места скопления максимального напряжения. Анализ эпюр показал,

что значение максимума изменилось в два раза в третьем исследовании в отличие от остальных трех, а в четвертом случае сменилось место концентрации.

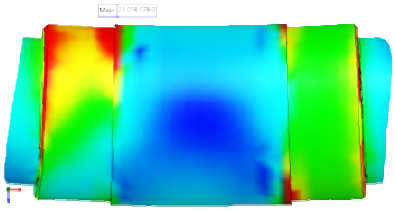
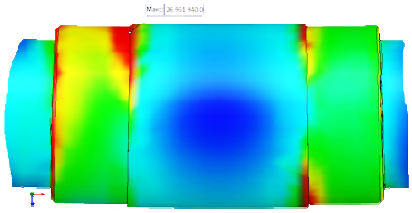
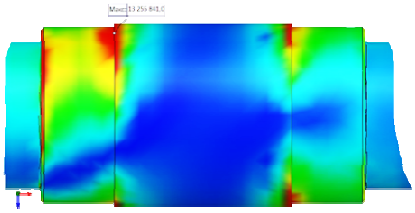
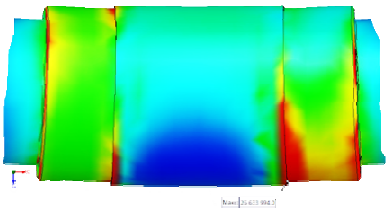
Из статического анализа МКЭ можно сделать следующие выводы:

В зависимости от условия закрепления место концентрации максимального напряжения изменяется в пределах от 13,255 МПа до 26,961 МПа.

Минимальное значение напряжений получено в результате закрепления в исследовании № 3, максимальное значение напряжений было получено в результате закрепления в исследовании № 2.

Место скопления находится в области центральной части соединительного пальца, и изменяется лишь по его площади, однако, при условии закрепления в исследовании № 3 были выявлены и дополнительные места локального скопления на рычагах. Сравнительный анализ показал зависимость результатов статических расчетов от условий закрепления, что говорит о том, что выбор граничных условий играет важную роль в расчете напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов. Выполнение расчетов требует знаний работы конструктивного элемента, возможных мест и видов разрушения.

Распределение максимальных напряжений по поверхности пальца

№ исслед.	Макс. напряжение, МПа	Эпюра напряжений
Первый вариант	23,058	
Второй вариант	26,961	
Третий вариант	13,255	
Четвертый вариант	26,633	

Динамический анализ МКЭ (квазистатика)

Одним из методов оценки динамического НДС является квазистатический расчет с помощью МКЭ и нагрузок, полученных из динамического расчета модели систем тел [5].

Для расчета динамических напряжений использовались временные реализации нагрузок на деталь, полученные при расчете полной пространственной модели системы тел транспортного средства со связями во всех узлах закрепления детали в конструкции. Рассмотрены 2

режима движения: движение по случайному профилю и движение при малой скорости по ровному профилю. Используемый метод моделирования раскладывает реакции в шарнирах по координатным направлениям. В модели транспортного средства рычаг закреплен 3 шарнирами, ограничивающими 3 поступательных перемещения и 2 шарнирами, ограничивающими 2 поступательных перемещения, которые составляют 13 реакций связи.

Для динамического анализа напряжения с помощью МКЭ использовался квазистатический расчет, состоящий из этапов:

1. Выбор закрепления детали для ограничения 6 степеней свободы для обеспечения статической определимости. При ограничении 6 степеней свободы из 13 нагрузок остаются 9 действующих($f_1(t) - f_9(t)$). Остальные соответствуют 6 вычисляемым силам реакций в узлах с ограниченными степенями свободы.

2. Статический расчет при усредненных нагрузках, полученных в динамической модели. Выбор точки *P*с максимальным напряжением. В каждый момент времени сумма временных реализаций сил, действующих на рычаг равна 0, следовательно, усредненные значения составляют уравновешенную систему сил, описывающую среднее нагружение рычага во время движения.

3. Статические расчеты напряжений в точке *P* при единичной силе, действующей по каждому из незакрепленных направлений в соответствующих узлах приложения нагрузок. В результате вычисляются 9 значений напряжений от единичных сил ($\sigma_1^1 - \sigma_2^1$).

4. С использованием свойства линейности МКЭ вычисляются квазистатические значения динамического напряжения в точке посредством перемножения полученных напряжений на временные реализации нагрузок:

$$\sigma(t) = \sum_{i=1}^{9} \sigma_i^1 f_i(t). \qquad (7)$$

Анализ четырех различных закреплений показал существенные различия в результатах (рис. 3). Максимальное напряжение отличается в 8 раз, среднеквадратичное отклонение отличается в 2,4 раза. Результаты подтверждают актуальную проблему неоднозначности выбора граничных условий при динамическом анализе МКЭ.

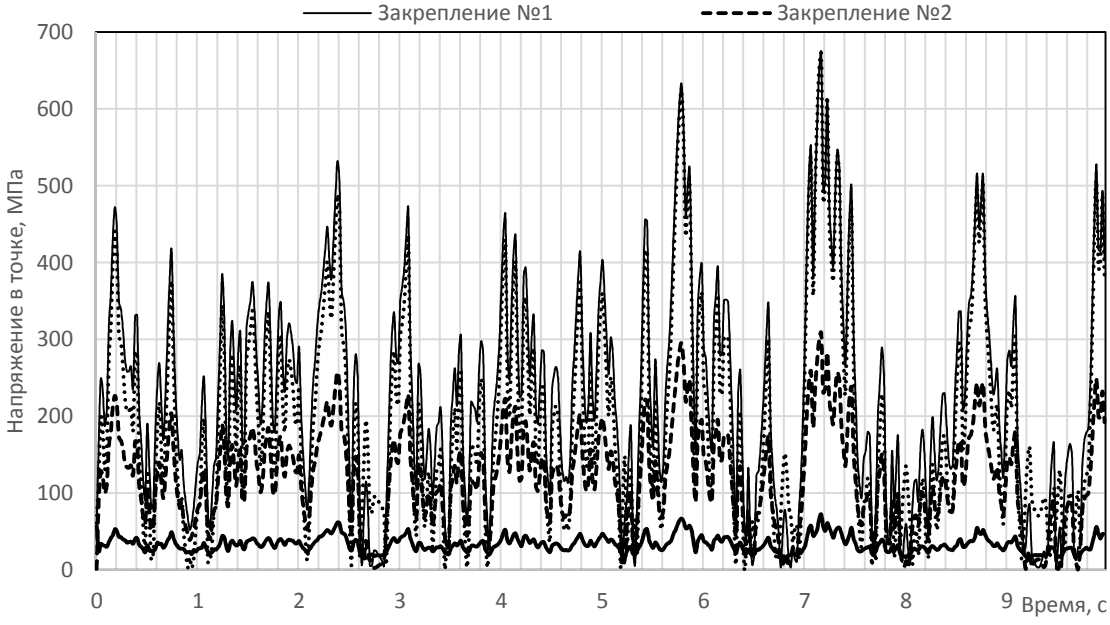


Рис. 3. Сравнение динамических напряжений в точке максимума, полученных МКЭ при различных вариантах закрепления детали

Динамический анализ методом дискретных элементов

Для расчета использовалась сетка из 150531 элементов. Сходимость решения была получена при масштабировании коэффициента жесткости в 10^7 раз при временном шаге численного интегрирования 10^{-5}.

Методика расчета динамических напряжений методом дискретных элементов. Методика состоит из двух этапов:

1. Расчет динамики транспортного средства в режиме малой скорости, приближенному к статике, для определения установившихся значений нагрузок, действующих на рычаг. Расчет проводится совместно с решением уравнения динамики дискретных элементов модели рычага (7) при нулевых начальных условиях.

2. Расчет динамики транспортного средства и динамических напряжений рычага при движении по случайному профилю. В качестве начальных условий для решения уравнения (7) используются значения $\mathbf{y}(t)$, полученные на этапе 1.

Каждый из этапов состоит из итеративной процедуры, состоящей из повторяемой последовательности шагов, рассмотренной в работе [3]:

1. Расчет временной итерации решения системы уравнений динамики транспортного средства.

2. Расчет временной итерации решения системы уравнений (7) метода дискретных элементов для динамического НДС рычага.

3. Определение компонент тензора деформаций из выражения (5).

4. Определение компонент тензора напряжений приведенных напряженийдля всех дискретных элементов по гипотезе Мизеса.

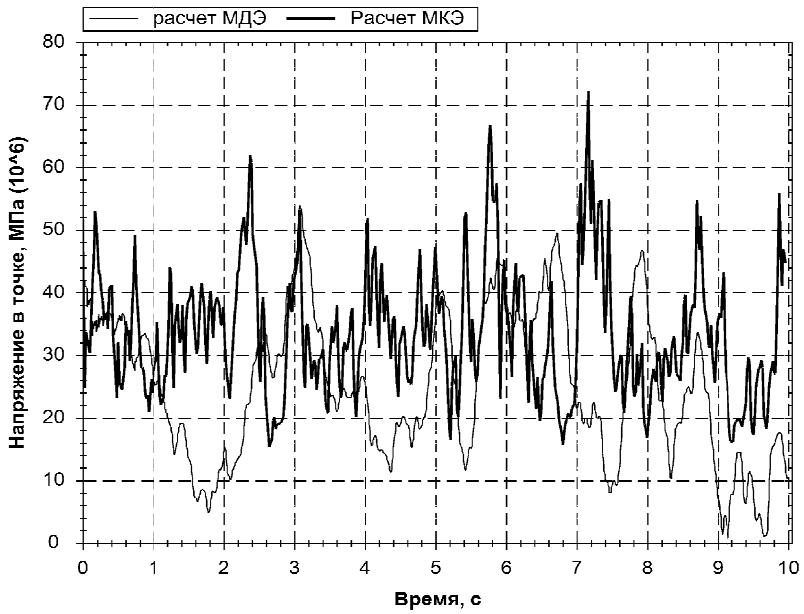


Рис. 4. Сравнение расчета динамических напряжений в точке максимума с помощью МКЭ и дискретных элементов

Результаты свидетельствуют о количественном соответствии по среднему значению одному из закреплений МКЭ (рис. 4).

Эпюры напряжений на одном из кадров установившегося режима при расчете в режиме малой скорости качественно и количественно соответствуют статическому расчету МКЭ (рис. 5).

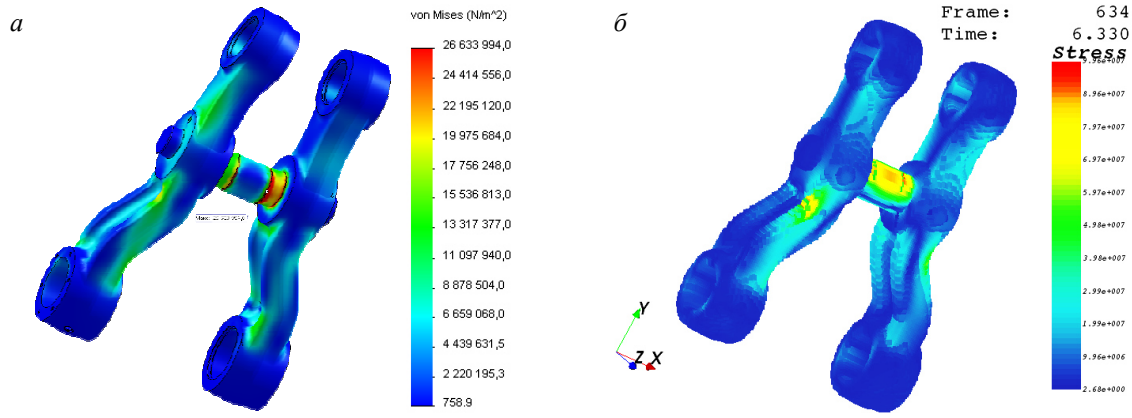


Рис. 5. Эпюра напряжений по Мизесу, рассчитанная с помощью метода конечных элементов (*а*) и с помощью метода дискретных элементов (*б*)

Выводы

Выбор закрепления степеней свободы тела в МКЭ существенно влияют на количественные результаты расчета напряженно-деформированного состояния. Различие при разных закреплениях в несколько раз свидетельствует о сложности корректного выбора закрепления и необходимости привлечения экспериментальных данных для верификации результатов.

Метод дискретных элементов позволяет получить решение динамической задачи определения НДС при свободных граничных условиях, что соответствует реальному поведению детали в модели, так как характер закрепления меняется при движении.

Сравнительный анализ свидетельствует о качественном соответствии эпюры напряжений, полученной МКЭ и методом дискретных элементов. Результаты, полученные при одном из закреплений МКЭ количественно соответствуют по среднему и максимальному значению полученным с помощью МДЭ.

Метод дискретных элементов вычислительно сложен, но за счет использования унифицированных дискретных элементов, эффективно распараллеливается и векторизуется, поэтому для его практического применения необходима реализация алгоритмов параллельного расчета.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Solidworks. Компьютерное моделирование в инженерной практике / А. А. Алямовский, А. А. Собачкин, Е. В. Одинцов, А. И. Харитонович, Н. Б. Пономарев. – СПб. : БХВ-Петербург, 2008. – 1040с.

2. *Bayo, E.* A modified Lagrangian formulation for the dynamic analysis of constrained mechanical systems / E. Bayo, J. Garcia de Jalon, M.A. Serna // Comput. Methods Appl. Mech. Eng. – 1988. – Vol. 71(2). – C. 183–195.

3. *Гетманский, В.В.* Распараллеливание расчета напряженно-деформированного состояния тела в многотельной модели методом декомпозиции расчетной области / В.В. Гетманский, Т.Д. Измайлов, А.С. Горобцов // Известия Волгоградского государственного технияческого универсистета. 2013. Т. 16. № 8(111). С. 5–10.

4. Concurrent simulation of multibody systems coupled with stress-strain and heat transfer solvers / V. V. Getmanski, A. S. Gorobtsov, E. S. Sergeev et al. // Journal of Computational Science. – 2012. – Vol. 3, no. 6. – P. 492–497.

5. *Turner, P.R.* Integrating Finite Element Analysis with Quasi-Static Loadings from a Large Displacement Dynamic Analysis / P.R.Turner // CAE Tools for the 1990's and Beyond, 1989.

УДК 62-523

П. Э. Подборский[1], Э. Н. Подборский[2]

ТОЧНОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ДВУХТОЧЕЧНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

[1] Саяно-Шушенский филиал Сибирского федерального университета
[2] Хакасский технический институт – филиал Сибирского федерального университета
panpodpe@mail.ru

Задача поиска оптимального управления непрямым методом сводится к двухточечной краевой задаче, решение которой возможно только численным способом. Причем из-за присутствия быстрорастущих решений, обусловленных положительными корнями в матрице сопряженной системы, даже численное решение получить бывает крайне трудно. В данной статье впервые выведена точная формула для расчета краевых условий сопряженного вектора, что фактически сводит краевую задачу к простейшему решению задачи Коши.

Ключевые слова: двухточечная краевая задача, ДТКЗ, оптимальное управление, критерий оптимальности, устойчивость системы, характеристическое уравнение, метод Ляпунова, электропривод постоянного тока, электромеханическая система.

P. E. Podborski[1], E. N. Podborski[2]

THE EXACT ANALYTICAL SOLUTION OF TWO POINTS BOUNDARY PROBLEM IN OPTIMAL CONTROL

[1] Sayano-Shushensky Branch of Siberian Federal University
[2] Khakass Technical Institute – Branch of Siberian Federal University

The optimal control problem is often reduced to two points boundary problem, its solution is possible only numerically. And because of presence of the fast-growing solutions caused by positive roots in a matrix of interfaced system, even the numerical solution is extremely difficultly to get. In this article the exact formula for calculation of all boundary conditions of the interfaced vector is for the first time deduced, that actually reduces the boundary problem to elementary solution for Cauchy problem.

Keywords: two-points boundary-value problem, TPBVP, optimal control, cost function, system stability, characteristic equation, Lyapunov method, DC-drive, electromechanical system.

© Подборский П. Э., Подборский Э. Н., 2017

Введение

Поиск оптимального управления является задачей вариационного исчисления на условный экстремум. Критерий оптимальности является минимизируемым функционалом, а математическая модель объекта управления, описываемая дифференциальными уравнениями, представляет собой те дополнительные условия, при которых необходимо найти минимум функционала. Решить данную задачу можно при помощи метода множителей Лагранжа, который приводит к составлению системы уравнений Эйлера для расширенного функционала, или при помощи принципа максимума Понтрягина, который приводит к составлению гамильтоновой системы для функции Гамильтона. И в том, и другом случае при отсутствии ограничений типа неравенств на координаты системы и управление в результате получаем совместную систему дифференциальных уравнений, описывающих объект управления и сопряженную систему. Причем если система линейная, то получаем систему линейных дифференциальных уравнений. Если система нелинейная, то ее математическую модель можно разложить в ряд и, отбросив члены ряда высоких порядков, в первом приближении линеаризованная таким образом система будет также описываться линейными дифференциальными уравнениями. Поскольку мы переводим объект управления оптимальным образом из одного положения в другое, то его краевые условия известны, а сопряженные координаты используются лишь как вспомогательные функции для поиска оптимального управления, они не имеют ясного физического смысла, и их начальные условия неизвестны. В результате приходится вместо простого решения задачи Коши поиска оптимальных траекторий и управления для соответствующих начальных условий решать двухточечную краевую задачу (ДТКЗ), т.е. численно подбирать такие сопряженные координаты, которые обеспечивают перевод объекта управления из исходного состояния в требуемое. Способы решения ДТКЗ можно разделить на две группы:

1) редукция задачи расчета оптимальных программ к задаче отыскания корней трансцендентной функции или методы пристрелки. Подбираются начальные значения сопряженного вектора и после интегрирования системы определяются конечные значения координат объекта управления, которые в общем случае, разумеется, не будут равны заданным. Затем определяется невязка – разница между желаемыми и получившимися конечными значениями координат, которая очевидно является функцией выбранных начальных значений сопряженного вектора. Далее различными оптимизационными методами решается задача сведения данной невязки к нулю;

2) перенос граничных условий или методы прогонки. По выведенной формуле все краевые условия (на двух концах) переносятся в одну точку, например, в начальную точку траектории, и, таким образом, ДТКЗ сводится к задаче Коши.

Все методы сталкиваются с трудностями, обусловленными наличием быстрорастущих решений, это делает их непригодными для решения реальных практических задач. Но при помощи разных способов, например продолжения по параметру, устойчивые решения получить удается. В любом случае недостающие граничные условия сопряженного вектора находятся численно. В программе MATLAB даже есть стандартные функции bvp4c и bvp5c для решения ДТКЗ [1]. Самые интересные и эффективные для применения на практике способы определения недостающих краевых условий хорошо описаны в [2]. В [3, стр. 209] сказано, что в настоящее время не существует точных методов определения начальных условий сопряженного вектора и, по мнению авторов принципа максимума, вряд ли они будут найдены.

В данной статье будет ликвидирован данный пробел.

Постановка задачи

Разработать метод, позволяющий определить точную аналитическую формулу для расчета всех краевых условий задачи оптимального управления без использования итерационных процедур, что сведет ДТКЗ к простому решению задачи Коши.

1. Об условиях устойчивости систем

Для решения поставленной задачи сначала нужно конкретизировать условия устойчивости систем с учетом некоторых нюансов.

В 1892 году Ляпуновым сформулированы теоремы об устойчивости, согласно которым все корни характеристического уравнения устойчивой системы должны быть с отрицательными действительными частями, а наличие хоть одно-

го корня с положительной вещественной частью делает систему неустойчивой [4].

Известно, что согласно методу Эйлера решениями системы линейных однородных дифференциальных уравнения с постоянными коэффициентами порядка n будут функции времени вида

$$x_i(t) = C_1 e_{i1} \mathbf{e}^{p_1 t} + \ldots + C_n e_{in} \mathbf{e}^{p_n t},\ i = 1..n,$$

где $e_{i1..n}$, p_n – собственные векторы и собственные значения матрицы системы; C_n – постоянные.

Очевидно, что согласно данным теоремам Ляпунова если все корни p_n будут отрицательными, то получим сумму исчезающих функций, дающих устойчивую систему, т.к. C_n и $e_{i1..n}$ – величины ограниченные. А если хоть один корень будет положительный, то получим минимум одну неограниченную функцию, которая в сумме с другими неограниченными или исчезающими функциями даст неустойчивую систему при ограниченных C_n и $e_{i1..n}$.

Однако заметим, что данные теоремы сформулированы для общего случая, когда начальные условия могут быть любыми, и, следовательно, постоянные C_n (которые и находятся из начальных условий) в общем случае будут отличны от нуля.

Для некоторых частных случаев Ляпуновым была доказана еще одна теорема [4, стр. 127], которая звучит следующим образом:

«*Когда определяющее уравнение имеет корни с отрицательными вещественными частями, то каковы бы ни были остальные корни, для невозмущенного движения будет существовать известная условная устойчивость. А именно, в случае существования k таких корней, движение это будет устойчивым для возмущений, подчиненных некоторым n–k уравнениям вида*

$$F_j(a, a_2, \ldots, a_n) = 0,\ (j = 1,2,\ldots, n-k),$$

в которых F_j суть голоморфные функции начальных значений a_s функций x_s, обращающиеся в нуль, когда все a_s делаются нулями, и которые позволяют выражать все эти значения как голоморфные функции k независимых величин».

То есть по данной теореме система при определенных начальных условиях может быть устойчивой даже с положительными корнями.

Обратим внимание также на то, что среди коэффициентов C_n в отдельных частных случаях (при определенных начальных условиях) могут встречаться и равные нулю [4, стр. 96].

Анализируя вышесказанное, можно придти к следующему заключению. Если при каждом положительном корне в решении системы приравнять соответствующий коэффициент нулю, то все неограниченные функции из решения дифференциальных уравнений будут исключены. То есть в формуле решения останутся только исчезающие функции, и система будет устойчивой (или условно устойчивой по Ляпунову).

Отсюда следует, что теорему об устойчивости можно формулировать иначе, более удобным для нашего случая образом.

Т е о р е м а 1.

Для асимптотической устойчивости невозмущенного движения линейной или линеаризованной системы необходимо и достаточно, чтобы среди корней ее характеристического уравнения был хотя бы один с отрицательной вещественной частью, а все постоянные в его решении при остальных (нулевых, мнимых, положительных) корнях были равны нулю.

Доказательство данной теоремы здесь не приводится. Оно по сути вытекает из доказательства вышеприведенной теоремы Ляпунова.

2. Точное решение краевой задачи

Рассмотрим линейный или линеаризованный объект управления, описываемый уравнениями $\dot{X} = AX + BU$, который необходимо перевести оптимальным в смысле критерия $J = \frac{1}{2}\int_0^\infty \left(X^T Q X + U^T R U\right) dt$ образом из начального положения $X(0) = X_0$ в начало координат $X(\infty) = 0$. Известно, что при отсутствии ограничений типа неравенств на координаты и входной сигнал оптимальное управление равно $U = -R^{-1} B^T \Lambda$, а оптимальные траектории $X(t)$ и сопряженные координаты $\Lambda(t)$ находятся из решения совместной системы дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} \dot{X} = AX - BR^{-1}B^T\Lambda, \\ \dot{\Lambda} = -A^T\Lambda - QX. \end{cases} \qquad (1)$$

Проанализируем движение системы (1) с точки зрения теории устойчивости. Допустим, что изначально имело место невозмущенное движение, характеризующееся тем, что система находилась в начале координат. Далее система была подвержена возмущениям, которые отклонили ее координаты от первоначального невозмущенного нулевого положения. В услов-

ный момент времени $t = 0$ возмущающие воздействия прекратились, координаты системы при этом находятся в положении $X(0) = X_0$ и $\Lambda(0) = \Lambda_0$. Из определения устойчивости понятно, что если после произошедшего прекращения действия возмущений система вернется в свое первоначальное положение, то движение такой системы устойчиво. Но синтезированная система (1) не только возвращается в начало координат за бесконечное время, но и делает это оптимальным в смысле критерия оптимальности образом, то есть она *устойчива по определению*. С другой стороны, матрицы A и $-A^T$ имеют равные по модулю и противоположные по знаку собственные значения. Это гарантирует, что половина корней характеристического уравнения (1) будет содержать положительные действительные части (случай нулевых или чисто мнимых корней рассматривать не будем). Таким образом, имеем пример устойчивой системы, которая имеет часть положительных корней характеристического уравнения.

Запишем формулы решений системы (1) в виде

$$\begin{cases} x_1(t) = C_1 e_{11}\mathbf{e}^{p_1 t} + ... + C_n e_{1n}\mathbf{e}^{p_n t} + C_{n+1} e_{1n+1}\mathbf{e}^{p_{n+1} t} + ... + C_{2n} e_{12n}\mathbf{e}^{p_{2n} t}, \\ ... \\ x_n(t) = C_1 e_{n1}\mathbf{e}^{p_1 t} + ... + C_n e_{nn}\mathbf{e}^{p_n t} + C_{n+1} e_{nn+1}\mathbf{e}^{p_{n+1} t} + ... + C_{2n} e_{n2n}\mathbf{e}^{p_{2n} t}, \\ \lambda_1(t) = C_1 e_{n+11}\mathbf{e}^{p_1 t} + ... + C_n e_{n+1n}\mathbf{e}^{p_n t} + C_{n+1} e_{n+1n+1}\mathbf{e}^{p_{n+1} t} + ... + C_{2n} e_{n+12n}\mathbf{e}^{p_{2n} t}, \\ ... \\ \lambda_n(t) = C_1 e_{2n1}\mathbf{e}^{p_1 t} + ... + C_n e_{2nn}\mathbf{e}^{p_n t} + C_{n+1} e_{2nn+1}\mathbf{e}^{p_{n+1} t} + ... + C_{2n} e_{2n2n}\mathbf{e}^{p_{2n} t}. \end{cases} \quad (2)$$

Для большей наглядности, предположим, что все собственные значения матрицы A отрицательные, тогда $p_1..p_n < 0$, $p_{n+1}..p_{2n} > 0$, то есть каждое решение из (2) будет иметь половину исчезающих и половину неограниченных функций. Поскольку оптимальные решения (2) должны быть устойчивыми по определению, то согласно теореме 1, все постоянные $C_{n+1}..C_{2n}$ при положительных корнях должны быть равны нулю. Пользуясь данным фактом, а также тем, что собственные векторы и собственные значения матрицы A известны, можно по (2) определить все остальные постоянные $C_1..C_n$, исходя из $t = 0$ и известных начальных условий X_0 объекта управления, т.е. из уравнений

$$\begin{cases} x_1(0) = C_1 e_{11}\mathbf{e}^{p_1 \cdot 0} + ... + C_n e_{1n}\mathbf{e}^{p_n \cdot 0}, \\ ... \\ x_n(0) = C_1 e_{n1}\mathbf{e}^{p_1 \cdot 0} + ... + C_n e_{nn}\mathbf{e}^{p_n \cdot 0}. \end{cases}$$

Заметим, что таким образом мы уже определили точные аналитические формулы для расчета оптимальных траекторий $x_i(t)$.

Имея в виду, что постоянные $C_1..C_n$ теперь найдены, запишем из (2) формулы решений для сопряженных координат при $t = 0$:

$$\begin{cases} \lambda_1(0) = C_1 e_{n+11}\mathbf{e}^{p_1 \cdot 0} + ... + C_n e_{n+1n}\mathbf{e}^{p_n \cdot 0} + C_{n+1} e_{n+1n+1}\mathbf{e}^{p_{n+1} \cdot 0} + ... + C_{2n} e_{n+12n}\mathbf{e}^{p_{2n} \cdot 0}, \\ ... \\ \lambda_n(0) = C_1 e_{2n1}\mathbf{e}^{p_1 \cdot 0} + ... + C_n e_{2nn}\mathbf{e}^{p_n \cdot 0} + C_{n+1} e_{2nn+1}\mathbf{e}^{p_{n+1} \cdot 0} + ... + C_{2n} e_{2n2n}\mathbf{e}^{p_{2n} \cdot 0}. \end{cases}$$

Из этих уравнений можно сделать однозначный вывод о том, что теорема 1 только тогда будет выполняться и, следовательно, коэффициенты $C_{n+1}..C_{2n}$ только тогда будут равны нулю, когда начальные условия сопряженного вектора будут равны:

$$\begin{cases} \lambda_1(0) = C_1 e_{n+11}\mathbf{e}^{p_1 \cdot 0} + ... + C_n e_{n+1n}\mathbf{e}^{p_n \cdot 0}, \\ ... \\ \lambda_n(0) = C_1 e_{2n1}\mathbf{e}^{p_1 \cdot 0} + ... + C_n e_{2nn}\mathbf{e}^{p_n \cdot 0}. \end{cases} \quad (3)$$

Таким образом, точные аналитические формулы для расчета сопряженных координат $\lambda_i(t)$, а значит и для расчета оптимального управления также определены.

Данная процедура нахождения неизвестных краевых условий сопряженного вектора легко распространяется на случай любого сочетания положительных, отрицательных, нулевых и комплексных корней системы (1), а также на то, левые или правые концы краевых условий

используются. Процедура распространяется на случаи не только задач с фиксированными, но и с подвижными границами (при использовании условий трансверсальности на соответствующем конце). Кроме того, решения будут аналогичными не только для задачи перевода системы в начало координат, но и перевода из любого начального в любое требуемое значение.

В результате все краевые условия системы (1) становятся известными, и ДТКЗ просто исчезает, превращаясь в обыкновенную задачу Коши.

3. Реализация систем оптимального управления

Несмотря на то, что трудности с ДТКЗ решены, интегрирование системы дифференциальных уравнений (1) может привести к другим трудностям из-за наличия положительных корней. Если данные уравнения при найденных краевых условиях решать как задачу Коши методом Эйлера (как, по сути, уже было сделано выше) или операторным методом, то решение удается легко получить, т.к. все быстрорастущие функции, обусловленные положительными корнями, легко исключаются. Если же эти уравнения решать при помощи матричной экспоненты (если объект управления с постоянными параметрами), при помощи приведения матрицы системы к Жордановой форме (если в модели объекта отсутствуют комплексные корни) или численно методами Эйлера, Рунге – Кутта, Дормана – Принса (и т. д.), то быстрорастущие функции не дадут получить сходящееся решение. Если применить к системе (1) преобразование Лапласа и промоделировать соответствующую структурную схему в программе Simulink MATLAB при точно найденных по выведенным выше формулам начальных условиях, то решение все равно будет расходящимся, т.к. оно реально получается не при помощи аналитических формул обратного преобразования Лапласа, а теми же численными методами. В последнем случае, отталкиваясь от точно найденных краевых условий, не удалось получить сходимость при моделировании такой структурной схемы, как при ручной подстройке начальных условий, так и при попытке их подстроить методом пристрелки с использованием различных оптимизационных алгоритмов.

Одним из способов реализации системы оптимального управления может быть построение разомкнутой системы программного управления, когда найденное оптимальное управление в функции времени подается на вход объекта управления. Такой способ подходит для линейного объекта управления без действия каких-либо возмущений в процессе управления, без ограничений типа неравенств на координаты и управление и с достаточно точным математическим описанием реальной системы линейными дифференциальными уравнениями.

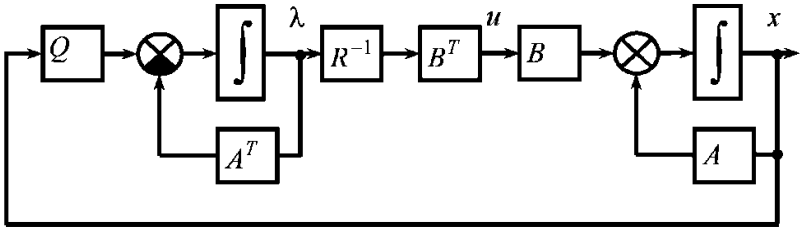
Такую же разомкнутую систему управления можно построить и для нелинейного объекта управления, если он не содержит существенно нелинейных звеньев. Тогда оптимальные координаты и управление можно разложить, например, в ряд Тейлора или по целым положительным степеням m, предложенный Ляпуновым [4] вида $K_k\alpha_k \mathbf{e}^{m_k\lambda_k t}$. Исключая из ряда быстрорастущие функции при положительных корнях, методом последовательных приближений можно проинтегрировать совместную систему нелинейных дифференциальных уравнений. Либо можно легко решить ДТКЗ для первого члена ряда (линейной системы) и уже далее использовать найденные краевые условия для интегрирования исходной нелинейной системы.

При наличии нелинейностей и/или ограничений типа неравенств, и/или возмущающих воздействий, можно построить систему оптимального управления с так называемой алгоритмической обратной связью. Когда на каждом шаге подачи очередного значения управляющего сигнала снимаются сигналы обратных связей с координат состояния системы, далее по ним идентифицируются параметры объекта управления (т. е., например, методом наименьших квадратов), реальный объект аппроксимируется линейной системой. Затем рассчитывается оптимальное управление, которое каждый раз будет корректироваться с учетом меняющихся матриц A и B математической модели объекта управления. Возможно и построение различных схем прогнозирующего управления, когда оптимальное управление находится на определенном горизонте прогноза, а применяется еще на более коротком отрезке времени. Затем этот горизонт сдвигается с параллельным расчетом нового шага управления и т. д. С данными современными методами можно ознакомиться в [5].

Следует отметить, что оптимальное управление для линейного (линеаризованного) объекта управления второго порядка находится аналитически, а для объектов управления порядка выше второго, оптимальное управление

определяется «почти» аналитически, т.е. численно рассчитывать нужно только собственные значения соответствующей матрицы, что не представляет особого труда.

Что касается построения замкнутой системы оптимального управления, то во многих источниках приводится структурная схема такой системы примерно следующего вида (см. рисунок):



То есть фактически регулятор представляет собой сопряженную систему. Схема регулятора содержит в простейшем случае звенья интеграторов и усилителей, соединенные между собой последовательно, параллельно или через обратную связь, которые, разумеется, можно преобразовать в более крупные апериодические или колебательные звенья. Реализация такого регулятора обычно предполагается как в аналоговом, так и цифровом виде. На самом деле реализовать на практике такие регуляторы нельзя (что очевидно, поскольку их даже промоделировать численно не удается). Можно пытаться сколь угодно точно подстроить краевые условия системы, быстрорастущие экспоненциальные функции все равно сделают систему неустойчивой, т.к. они не выключаются при такой реализации соответствующими нулевыми коэффициентами. Даже если начальные условия удалось бы успешно подстроить, любые параметрические и/или координатные возмущения могут сделать систему неработоспособной, что исключает такие регуляторы из возможного применения по причине ненадежности.

4. Исключение положительных корней

Сформулируем еще одну теорему, которую также примем без доказательства (доказывается элементарно методом математической индукции).

Т е о р е м а 2.

Система, устойчивая в смысле теоремы 1 и имеющая k корней характеристического уравнения с положительной вещественной частью может быть однозначно преобразована в эквивалентную ей систему без корней с положительной вещественной частью путем исключения k координат из ее математической модели.

Приведем один из примеров соответствующего преобразования для нашей системы оптимального управления. Поскольку согласно теоремы 1, все коэффициенты $C_{n+1}..C_{2n}$ должны быть равны нулю, то решения (2) будут иметь следующий вид:

$$\begin{cases} x_1(t) = C_1 e_{11}\mathbf{e}^{p_1 t} + ... + C_n e_{1n}\mathbf{e}^{p_n t} = k_1 e_{11} + ... + k_n e_{1n}, \\ ... \\ x_n(t) = C_1 e_{n1}\mathbf{e}^{p_1 t} + ... + C_n e_{nn}\mathbf{e}^{p_n t} = k_1 e_{n1} + ... + k_n e_{nn}, \\ \lambda_1(t) = C_1 e_{n+11}\mathbf{e}^{p_1 t} + ... + C_n e_{n+1n}\mathbf{e}^{p_n t} = k_1 e_{n+11} + ... + k_n e_{n+1n}, \\ ... \\ \lambda_n(t) = C_1 e_{2n1}\mathbf{e}^{p_1 t} + ... + C_n e_{2nn}\mathbf{e}^{p_n t} = k_1 e_{2n1} + ... + k_n e_{2nn}, \end{cases} \quad (4)$$

где k_i – зависящая от времени величина $C_i\mathbf{e}^{p_i t}$.

Проанализировав равенства (4) можно сделать вывод, что n координат $x_i(t)$ выражаются через n коэффициентов k_i, и n сопряженных координат $\lambda_i(t)$ выражаются через те же n коэффициентов k_i. Это означает, что координаты $x_i(t)$ и $\lambda_i(t)$ могут быть выражены друг через друга посредством соответствующих сочетаний коэффициентов e_{ij}.

Поскольку сопряженные координаты вводились только в качестве вспомогательных для

определения оптимального управления, а именно сопряженная система часто является источником положительных корней, то раз оптимальное управление найдено, эти координаты и удобнее всего исключить. Для этого из первого равенства (4) нужно выразить k_1 через x_1, подставить во второе равенство (4), оттуда выразить k_2 и т.д., после чего все коэффициенты k_i, выраженные через x_i подставить во вторую половину равенств. В результате получим:

$$\begin{cases} \lambda_1(t) = \nu_{11}x_1(t) + ... + \nu_{1n}x_n(t), \\ ... \\ \lambda_n(t) = \nu_{n1}x_1(t) + ... + \nu_{nn}x_n(t), \end{cases} \Rightarrow \Lambda = \mathrm{N}X, \quad (5)$$

где ν_{ij} – коэффициенты, которые находятся через собственные векторы e_{ij}.

Поскольку в (5) сопряженные координаты выражаются через координаты объекта управления, то второе уравнение совместной системы (1) становится ненужным. Подставив (5) в первое уравнение (1), получим

$$\dot{X} = AX - BR^{-1}B^T\mathrm{N}X = \left(A - BR^{-1}B^T\mathrm{N}\right)X = A^*X. \quad (6)$$

Аналогично по теореме 2 можно исключать любые координаты.

Оптимальная система (6) в отличие от (1) не будет содержать положительных корней, а значит, ее легко как промоделировать, в том числе численно решая дифференциальные уравнения, так и реализовать практически. Практическая реализация будет в виде замкнутой системы, когда оптимальное управление будет рассчитываться в функции координат объекта управления и подаваться на его вход. Можно предлагать также различные способы учета нелинейностей, возмущений и т.п.

Заметим, что оптимальное управление для линейного объекта управления и квадратичного функционала уже решалась многими, и известно, что оно является линейной функцией координат системы.

Например, в [6] получено, по сути, такое же решение, но в той работе постоянные $C_{n+1}..C_{2n}$ принудительно приравниваются нулю с целью сделать нулевыми значения всех координат на правом конце. Полученное же нами решение строго основано на теоремах 1,2 и одинаково распространяется на любые конечные значения координат.

Известно, что при небесконечном времени регулирования постоянные $C_{n+1}..C_{2n}$ не будут равны нулю, т.е. точные значения краевых условий сопряженного вектора уже не получить по формулам (3). Не получится и исключить сопряженные координаты по формулам (5) и (6). Решение сводится к матричному дифференциальному уравнению типа Риккати, которое интегрируется численно в обратном времени, а само это нелинейное уравнение является формулой для переноса краевых условий системы с правого на левый конец [7, стр. 181].

Однако если время регулирования бесконечное, то вместо дифференциального уравнения Риккати получается алгебраическое матричное уравнение, которое в настоящее время решается тоже численными методами типа Ньютона – Рафсона, диагонализации или Репина – Третьякова. Предлагаемый же в данной работе метод дает точное аналитическое решение или «почти» аналитическое, о чем упоминалось выше.

Заключение

Получена точная формула, позволяющая аналитически определить нужные краевые условия сопряженного вектора, что сводит сложную двухточечную задачу к обычной задаче Коши. В простейшем линейном случае без возмущений и ограничений типа неравенств с квадратичным функционалом задача оптимального управления становится особенно простой.

Различные сложные задачи могут требовать учета возмущений и многих нелинейностей. Во всех этих случаях, если оптимальное управление рассчитывается непрямым методом с использованием сопряженной системы (которая интегрируется численно), знание ее краевых условий становится особенно полезным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shampine, L.F., Gladwell, I., Thompson, S.,* Solving ODEs with MATLAB, Cambridge University Press, 2003.

2. *Kirk, D.* Optimal control theory: an introduction, Dover Publications, 2004.

3. *Чистов, В.П., Бондаренко, В.И., Святославский, В.А.* Оптимальное управление электрическими приводами постоянного тока. М.: Энергия, 1968.

4. *Ляпунов, Л.М.* Общая задача об устойчивости движения. М.-Л.: Гос. изд-во техн.-теор. лит., 1950.

5. *Kouvaritakis, B, Cannon, M.* Model Predictive Control: Classical, Robust and Stochastic, Springer, 2016.

6. *Летов, А.М.* Аналитическое конструирование регуляторов // АиТ. 1960. Т. 1. № 4. С. 436–441.

7. *Брайсон, А., Ю-Ши, Хо.* Прикладная теория оптимального управления. М.: Мир, 1969.

УДК 504.064.2.001.18

Б. Х. Санжапов, А. А. Синицын, Н. М. Рашевский

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОМПЛЕКСА ОТКРЫТЫХ ПРОГРАММ WRF И CALPUFF ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАССЕИВАНИЯ ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ВЕЩЕСТВ В АТМОСФЕРЕ ГОРОДА ВОЛГОГРАДА

Волгоградский государственный технический университет
sbkh@mail.ru, sinicin2008@gmail.com, rashevsky.n@gmail.com

В данной статье рассмотрены зарубежные программные комплексы моделирования метеорологических процессов WRF и моделирования распространения загрязняющих веществ в атмосфере Calpuff. Указаны информационные ресурсы, предоставляющие доступ к массивам данных, требуемых системами. Описана процедура запуска систем на примере моделирования распространения загрязняющих веществ в южной части города Волгограда.

Ключевые слова: моделирование распространения загрязняющих веществ, открытые данные, Calpuff, WRF, Calmet.

B. Kh. Sanzhapov, A. A. Sinitsyn, N. M. Rashevskiy

USAGE OF COMPLEX OF OPEN-SOURCE SOFTWARE WRF AND CALPUFF FOR DISPERSION MODELING OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS IN VOLGOGRAD

Volgograd State Technical University

Foreign program complex for meteorological modeling WRF and complex for air pollution dispersion modeling Calpuff are discussed in this article. Information resources that provide access to data sets required by systems are listed in the article. System run procedure is described on the example of modeling air pollution dispersion in the south part of Volgograd.

Keywords: air pollution dispersion modeling, open data, Calpuff, WRF, Calmet.

Введение

Информация о возможном загрязнении атмосферного воздуха требуется при решении множества задач: выбор участка под строительство определенного объекта (школы, жилого здания, стадиона или промышленной площадки); разработки планов эвакуации населения при залповых выбросах, а также множестве других [1,2].

Одной из ведущих отечественных методик моделирования рассеивания загрязняющих веществ является ОНД-86, однако, эта модель использует усредненные коэффициенты при учете рельефа и климатических показателей исследуемой местности [3].

Для моделирования более точного результата, необходимо учитывать множество факторов, таких как: скорость и направление ветра, давление и температура атмосферного воздуха, рельеф местности, землепользование и др.

Существует множество программных систем моделирования распространения загрязняющих веществ. Но при выборе системы для научных и образовательных целей, главным критерием выбора становится доступность системы и входных данных для ее работы. Авторы статьи выбрали для рассмотрения бесплатные системы WRF [4] и CALPUFF [5] с открытым исходным кодом.

В данной статье приведена схема запуска, а также ресурсы, на которых доступны необходимые данные для моделирования рассеивания загрязняющих веществ на территории России, в частности в городе Волгограде.

Описание области моделирования

Моделирование рассеивания загрязняющих веществ производится над территорией города Волгограда и частично Волгоградской области.

Характеристика моделируемой местности:

– широта нижнего левого угла моделируемой местности 48.42N;

– долгота нижнего левого угла моделируемой местности 44.37E;

– размер моделируемой местности 30x30 км;

– временной интервал моделирования 02.01.2013 - 06.01.2013.

Описание процедуры запуска программного комплекса WRF

The Weather Research and Forecasting Model (WRF) – мезомасштабная численная система предсказания погоды, используемая для моделирования атмосферных процессов в масштабах от нескольких десятков метров до сотен ки-

© Санжапов Б. Х., Синицын А. А., Рашевский Н. М., 2017

километров [4]. Она состоит из двух подсистем: WPS отвечает за сбор и подготовку данных, WRF – непосредственно проводит вычисления, реализует возможности параллельных вычислений и расширения системы. Диаграмма компонентов системы WRF отображена на рис. 1. Каждая из подсистем состоит из нескольких программ.

Составляющие WPS:

– geogrid.exe. Программа извлекает из полученных архивов статические данные о земной поверхности, создает области моделирования (domains) и интерполирует данные на решетку(grid) моделирования.

– ungrib.exe извлекает необходимые метеорологические данные из файлов в формате GRIB.

– metgrid.exe горизонтально интерполирует метеорологические поля, созданные программой ungrib.exe на решетку, созданную программой geogrid.exe.

Для запуска программ необходимо два архива данных:

– архив статических данных о земной поверхности. Архив можно скачать свободно на ресурсе [6]. Используется программой geogrid.exe.

– архив метеоданных в формате grib. Доступ можно получить бесплатно на ресурсе [7] после регистрации. используется программой ungrib.exe.

Составляющие WRF:

– real.exe инициализирует систему для работы с реальными данными.

– wrf.exe программа численного интегрирования.

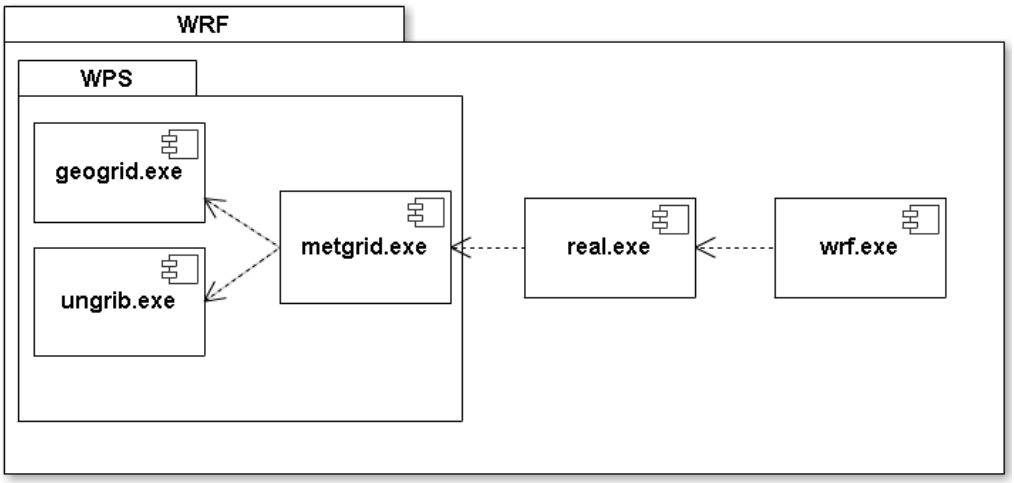


Рис. 1. Диаграмма компонентов системы WRF

Описание процедуры запуска программного комплекса Calmet

Calmet – это препроцессор, моделирующий метеорологические процессы, в том числе 3-мерные карты ветра и температуры, также рассчитываются 2-мерные карты микро метеорологических переменных необходимых для моделирования рассеивания загрязняющих веществ.

Моделирование осуществляется в два шага. На первом этапе моделируются ветра в зависимости от рельефа местности (различные кинематические эффекты, уклоны ветровых потоков, блокирующий эффект) [8]. На втором этапе, на полученный результат, накладываются данные наблюдений. На рис. 2 приведена UML диаграмма компонентов Calmet.

Для первого шага необходима информация о рельефе местности и землепользовании. Данную информацию можно получить на ресурсе EarthExplorer [9], предварительно, пройдя реги-

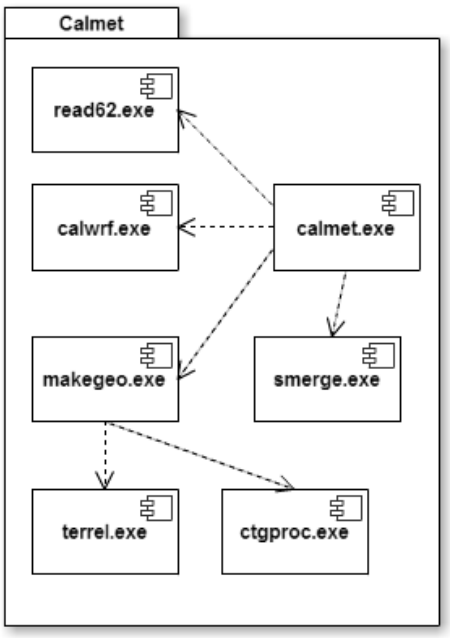
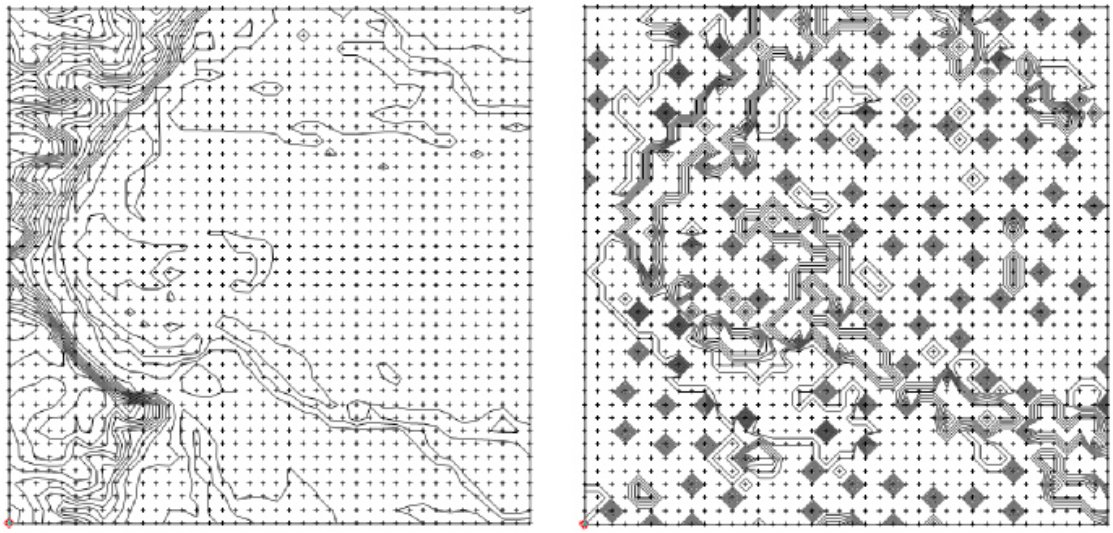


Рис. 2. UML диаграмма компонентов препроцессора Calmet

страцию на данном веб-сервисе. Для получения необходимых данных требуется указать координаты местности, а также размер интересующего участка местности. Информация о рельефе (глобальная цифровая модель рельефа с шагом сетки тридцать угловых узлов – около 1 км) размещена в разделе “Digital Elevation -> GTOPO30”. Полученная информация является входными данными для препроцессора “terrel.exe”.

В разделе “Land Cover -> GLCC” можно получить информацию о землепользовании. Данная информация необходима для запуска препроцессора “ctgproc.exe”.

В результате работы препроцессоров формируются файлы, которые необходимы для работы препроцессора “makegeo.dat”. Данное приложение объединяет информацию о рельефе и землепользовании. На рис. 3 приведены карта рельефа (А) и карта землепользования (Б), полученные в результате работы программы “makegeo.dat”.



а *б*

Рис. 3. Карты рельефа и землепользования моделируемой местности

Для второго шага работы препроцессора Calmet необходимы следующие метеорологические наблюдения получаемые с частотой в один час на поверхности: скорость ветра, направление ветра, температура, атмосферное давление, влажность воздуха, облачность и некоторые другие. Также необходимы данные с верхних слоев атмосферы (скорость и направление ветра, давление, температура и высота наблюдений).

Данные указанные выше можно получить на следующих ресурсах (регистрация на ресурсе не требуется, но необходимо знать идентификатор станции наблюдений):

NOAA/ESRL Radiosonde Database [10] – данные с радиозондов о состоянии верхних слоев атмосферы. Для обработки данных используется препроцессор “read62.exe”;

ncdc.noaa [11] – данные с наземных метеостанций, используются программой “smerge.exe”.

Также необходимо подготовить выходные данные полученные в модели WRF с помощью препроцессора “calwrf.exe”.

Для создания модели используется программа “calmet.exe”.

Описание процедуры запуска программного комплекса Calpuff

Calpuff – модель распространения загрязняющих веществ, учитывающая влияние различных во времени и пространстве метеорологических эффектов. Основными особенностями системы являются:

– работа с точечными и плоскими источниками загрязнения, параметры которых меняются во времени;

– применимость для территорий от десятков метров до сотен километров от источника загрязнения;

– применимость для территорий со сложным ландшафтом;

Система использует метеорологический препроцессор Calmet и постпроцессор Calpost.

Данные об источниках загрязнения задаются либо в общем входном файле, если они не

меняются во времени или меняются циклически, и в специальных файлах в остальных случаях. Система учитывает точечные, линейные, плоские и объемные источники для нескольких видов загрязнителей.

Получение и визуализация результатов работы системы Calpuff

В результате работы Calpuff сформируется множество выходных файлов. Для анализа распространения загрязняющих веществ необходим файл с расширением .CON. В этом файле содержатся данные по концентрации загрязнителей в заданный при моделировании интервал времени.

Для визуализации данных с помощью 2-мерной карты необходимо использовать постпроцессор “calpost.exe”. На рис. 4 показаны результаты визуализации для одиночного источника выбросов (А – первый час моделирования; Б – третий час моделирования; В – шестой час моделирования).

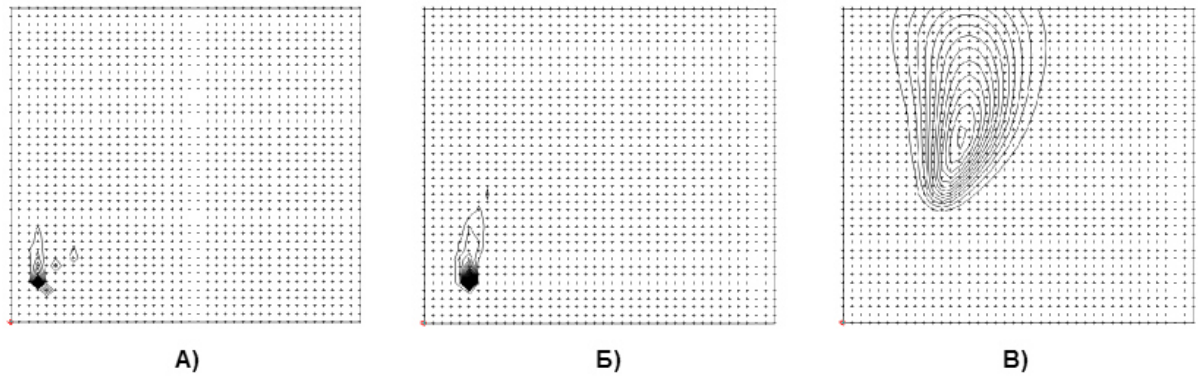


Рис. 4. Рассеивание загрязняющих веществ от одного стационарного источника

Заключение

В данной статье рассмотрена последовательность запуска программ из комплекса WRF и Calpuff. Указаны информационные ресурсы, которые содержат актуальную информацию, необходимую для моделирования рассеивания загрязняющих веществ на территории России, в частности в городе Волгограде. Полученный опыт может быть использован для исследований в области охраны окружающей среды.

Описанные авторами статьи программные комплексы и массивы данных являются бесплатными, что дает возможность сравнения отечественных и зарубежных систем, а также использования зарубежных систем в дополнение к отечественным.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Санжапов, Б.Х.* Представление результатов мониторинга атмосферного воздуха в системе поддержки принятия решений при обеспечении экологической безопасности города / Б.Х. Санжапов, А.А. Синицын, Н.М. Рашевский // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 6(185). С. 40–44.

2. *Sanzhapov, B.Kh.* Justification of the Choice of the Site for Construction Projects on the Basis of the Atmospheric Air Monitoring / B.Kh. Sanzhapov, A.A. Sinitsyn, N.M. Rashevskiy // Procedia Engineering. Vol. 150 : 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. – [Elsevier publishing], 2016. – P. 1948–1953.

3. ОНД-86. Методика расчета концентрации в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987.

4. *Skamarock, W. C., J. B. Klemp, J. Dudhia, D. O. Gill, D. M. Barker, M. G Duda, X.-Y. Huang, W. Wang, and J. G. Powers*, 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.

5. CALPUFF Modeling System [Электронный ресурс] / United States Environmental Protection Agency. – [2016]. – Режим доступа : http://www3.epa.gov/ttn/scram/dispersion_prefrec.htm#calpuff.

6. WPS geographical input data sets. [Электронный ресурс] / The Weather Research & Forecasting Model. – [2016]. – Режим доступа : http://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_sources_wps_geog.html.

7. NCAR’s Research data archive [Электронный ресурс] / National Center for Atmospheric Research. – [2016]. – Режим доступа : http://rda.ucar.edu/.

8. CALMET_UsersGuide [Электронный ресурс] / Exponent, Inc. – [2016]. – Режим доступа : http://www.src.com/calpuff/download/CALMET_UsersGuide.pdf.

9. EarthExplorer [Электронный ресурс] / U.S. Department of the Interior. – [2016]. – Режим доступа : http://earthexplorer.usgs.gov/.

10. NOAA/ESRL Radiosonde Database [Электронный ресурс] / NOAA. – [2016]. – Режим доступа : http://www.esrl.noaa.gov/raobs/.

11. NCDC/NOAA [Электронный ресурс] / NOAA. – [2016]. – Режим доступа : ftp://ftp.ncdc.noaa.gov/pub/data/noaa/2013/.

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК [025.4.036+004.775]:659.28

Ю. М. Брумштейн, Е. Ю. Васьковский, Т. Х. Куаншкалиев

ПОИСК ИНФОРМАЦИИ В ИНТЕРНЕТЕ: АНАЛИЗ ВЛИЯЮЩИХ ФАКТОРОВ И МОДЕЛЕЙ ПОВЕДЕНИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ

Астраханский государственный университет

brum2003@mail.ru, vaskovskiy_evgeniy@mail.ru, timurkyun@mail.ru

Показана роль интернет-ресурсов в отношении информационного обеспечения различных видов деятельности. Рассмотрены типичные цели поиска информации (ПИ) на интернет-ресурсах различными категориями пользователей с применением поисковых систем Интернета (ПСИ); последующего чтения/скачивания/анализа найденной информации. Основные категории интернет-ресурсов охарактеризованы с позиций их «видимости» в ПСИ. Проанализированы важнейшие факторы, влияющие на тактику поведения пользователей при ПИ с применением ПСИ: цели ПИ; уровень мотивации пользователей к получению адекватных результатов поиска; доступные ресурсы времени; объем информации, имеющийся к моменту начала ПИ; оценки полноты/качества результатов ПИ; уровень информационно-телекоммуникационной компетентности пользователей, в том числе в отношении использования ПСИ; скорость доступа к интернет-ресурсам; технические характеристики устройств, с которых осуществляется доступ к Интернету; уровень интеллектуальности ПСИ.

Исследованы субъективные и объективные критерии оперативной и итоговой оценок полноты/качества результатов ПИ. Проанализированы модели поведения пользователей при ПИ. Показано влияние «языкового барьера» на тактику ПИ, используемую русскоязычными пользователями.

Ключевые слова: интернет-ресурсы, поиск информации, тактика поиска, мотивация действий, оценки результатов поиска, модели поведения пользователей, факторы влияния, методы принятия решений.

Yu. M. Brumsteyn, E. Yu. Vaskovsky, T. Kh. Kuanshkaliyev

INFORMATION SEARCH IN THE INTERNET: THE ANALYSIS OF THE INFLUENCING FACTORS AND USERS BEHAVIOR MODELS

Astrakhan State University

In article is shown the role of Internet resources in information support of different types of activities. For various users categories authors are considered the typical purposes of information search (IS) in Internet resources with Internet search engines (ISE) usage; of subsequent viewing/downloading/analyzing of the founded information. The main categories of Internet resources are characterized from positions of their «visibility» in ISE . Authors are analyzed the major factors, influencing users behavior during IS with ISE usage: purposes of IS; users motivation levels to adequate search results receipt; available resources of time; amount of information which, is available to the time of IS beginning; estimates of IS results completeness/quality; levels of users information and telecommunication competence, including concerning with ISE usage; speed of access to Internet resources; technical characteristics of devices from which is provided access to Internet; intellectuality level of SEI.

In article are researched subjective and objective criteria for operational and final estimates of IS results completeness/quality. Authors are analyzed users behavior models in the course of IS. It is shown the influence of «linguistic barrier» to tactics of IS, used by Russian-speaking users.

Keywords: Internet resources, information search, search tactics, motivation of actions, search results assessment, users behavior models, influencing factors, decision making methods.

Введение

Повышение эффективности использования интернет-ресурсов во многом связано с анализом и оптимизацией тактики поиска информации (ТПИ), применяемой пользователями; улучшением средств интеллектуальной поддержки их работы в поисковых системах Интернета (ПСИ). Эти вопросы затрагиваются во многих учебниках, в материалах на интернет-сайтах, в научных работах, в т.ч. по вопросам поведения пользователей при поиске информации (ПИ) – например, в [11, 13], поиске научно-тех-

© Брумштейн Ю. М., Васьковский Е. Ю., Куаншкалиев Т. Х., 2017

нической информации (НТИ) – например, [1, 19, 20] и пр. Однако в целом тематика ТПИ пользователями в Интернете исследована недостаточно полно. Между тем вопросы оптимизации ТПИ с применением ПСИ важны не только для самих пользователей, но и для владельцев Интернет-ресурсов, их разработчиков, рекламодателей и пр. Поэтому целью настоящей статьи был комплексный анализ вопросов, связанных с ТПИ пользователей на интернет-ресурсах в условиях российских реалий.

Роль Интернета в информационном обеспечении различных видов деятельности физических лиц и организаций

Современное человеческое общество можно рассматривать как сложную социотехническую систему. Поддержка процессов ее функционирования и развития включает в себя адекватное информационное обеспечение различных видов деятельности: бытовой, производственной, научной [3], учебной, педагогической, рекреационной и др. Традиционные источники/средства получения необходимой информации (книги, брошюры, информационные материалы в печатной форме; средства массовой информации – в печатной и электронной формах и пр.) обладают рядом недостатков: малая доступность информации (особенно находящейся в архивном хранении); низкая скорость доступа к ней; ограничения по местам доступа; высокая трудоемкость поиска нужной информации и пр. Поэтому для большинства направлений деятельности уже преобладает ПИ на интернет-ресурсах. Основные причины: большие объемы доступной информации; удобные возможности селективного доступа к нужным сведениям с использованием ПСИ; удобство сортировки/накопления полученной информации в электронной форме и пр.

Сочетание категорий пользователей, применяющих ПСИ для ПИ в Интернете, и целей поиска ими информации представим в виде матрицы $\left[U_{i,j}\right]_{i=1...I;\,j=1...J}$. В ней I – общее количество категорий пользователей; J – количество целей пользователей, удовлетворяющее требованию «необходимости и достаточности»; $U_{i,j}$ – мера «интенсивности поиска/использова-ния» i-ой категорией пользователей j-ого вида информации (например, среднее время в течение суток, используемое i-ой категорией для ПИ j-ого вида.

Категорирование пользователей в отношении «направлений» ПИ обычно увязывается с их половозрастными характеристиками (например, http://mediarevolution.ru/File/tkacheva_cib_06.pdf), однако важное значение может иметь и «социальный статус», характер работы и пр.

Расширение использования мобильных устройств для ПИ способствует росту отдельных величин, а также увеличению росту сумм по строкам матрицы (однако лишь до определенных пределов, связанных с продолжительностью бодрствования, располагаемыми ресурсами времени и пр.

Типичные цели, при ПИ по интернет-ресурсам с использованием ПСИ. (1) Поиск конкретного материала (документа) на основе имеющейся о нем информации (авторы, название и пр.) – включая нормативные документы (кодексы, законы, распоряжения, постановления, инструкции и пр.). (2) Получение новостной ин-формации (оперативной и ретроспективной), фактографической, справочной. (3) Поиск графических объектов (статических и динамических) по сопровождающему их тексту [2], аудиофайлов, видеороликов. (5) Тематический поиск [15] по информационным материалам, рефератам, текстам учебников, монографиям, научным статям и пр. (5) Выделение «сюжетов и тем» из потоков информации определенной категории [21]. (6) Ознакомление с обзорно-аналитической информацией, комментариями. (7) «Извлечение знаний» (например, [7]) из совокупности информационных материалов. (8) Сравнение/сопоставление информации, имеющейся/поступающей из различных источников. (9) Систематический (регулярный) мониторинг информации о каком-то объекте/процессе, по определенной тематике и пр. (10) Конкурентная разведка [10]. (11) Тренинг навыуов ПИ в Интернете. (12) Соревнования по ПИ в Интернете [6] – с учебными или спортивными целями. (13) Подтверждение того, что нужной информации в Интернете найти не удается. (14) Проверка эффективности методических и программных разработок, связанных с ПИ в Интернете [8,17], в т.ч. в отношении методов клас-сификации информации [12].

Характеристика интернет-ресурсов с позиций их «видимости» в ПСИ

Наиболее широко используемые в России ПСИ это Yandex, Google, Mail.ru, Rambler (все они имеют русскоязычный интерфейс). Большинство пользователей при ПИ в этих ПСИ задают только «фразы для поиска».

Достоинства современных ПСИ: возможность выбора пользователем «категории» объ-

ектов, по которым должен осуществляться ПИ; «адаптация» области ПИ к языку, на котором пользователь сделал «поисковый запрос» (ПЗ); возможность задания дополнительных «фильтров отбора» при ПИ (по датам, объемам файлов и пр.); исправление орфографических ошибок в ПЗ; учет различных форм написания слов (морфология), используемых в ПЗ; выдачу пользователям «типовых вариантов» запросов уже при начале ввода ими ПЗ; наличие «языков ПЗ» – например, для Google эти возможности описаны на http://www.diacr.ru/zametki/20-kak-pravilno-iskat-v-google/kak-pravilno-iskat-v-google.htm и пр. Отметим, что ПСИ выдают ссылки как на легитимно, так и «не легитимно» размещенные материалы.

Анализ факторов, влияющих на тактику поиска информации

Перечисляемые ниже факторы, при разных условиях могут иметь разную приоритетность даже для одного и того же пользователя. (1) Ограничения по времени для ПИ: (а) непосредственно для продолжительности использования ПСИ; (б) по «астрономическому времени» или «календарным срокам» – они определяются предельными сроками принятия решений; (в) оставшиеся ресурсы аккумуляторов мобильных устройств (при невозможности их «дозарядки»). (2) Ограничения по объемам трафика важны для мобильных пользователей при тарифных планах с лимитированным трафиком; для пассажиров некоторых поездов/вагонов на железнодорожном транспорте, работающих по специальным «карточками для доступа» (в фирменных поездах стоимость доступа чаще всего уже включена в цену билета). (3) Уровень мотивации пользователей к достижению результатов ПИ. (4) Запаздывание «положительного стимула» для пользователя по отношению к моменту получения результатов ПИ (больш***а***я величина такого запаздывания обычно снижает мотивацию). Кроме того, за длительный период ранее найденная информация может устареть. (5) Уровень информационно-телекоммуникационной компетентности пользователей [4, 9], в том числе общей и непосредственно относящейся к использованию возможностей ПСИ. (6) Скорость доступа к Интернету – это особенно важно для мобильных пользователей. (7) Времена открытия сайтов по гиперссылкам в ПВ ПСИ. При медленном доступе и дефиците времени пользователи нередко прерывают «попытки открытия» сайтов [5]. (8) Надежность доступа к интернет-ресурсам. При малонадежном доступе пользователи зачастую ставят перед собой минимальные цели по ПИ. (9) Для «проводных» пользователей – ширина выделяемой полосы частот (зависит от уровня оплаты услуг доступа). (10) Размер экрана устройства, с которого осуществляется доступ в Интернет (это особенно важно для смартфонов, в меньшей степени – для планшетов). При малых размерах экранов информацию приходится читать и оценивать «по частям» путем скроллирования. При больш***и***х экранах (для настольных ПЭВМ) можно менять масштаб изображений; одновременно размещать на экране несколько документов (для сравнения) и пр. (11) Уровень интеллектуальности ПСИ, включая следующее: «подсказки» пользователю типичных вариантов ПЗ уже по началам вводимых фраз; автоматическое исправление орфографических ошибок в ПЗ; адаптацию содержания «контекстной рекламы» к ПЗ пользователей. (12) Анонимность пользователей, работающих через ПСИ (идентифицировать пользователей только по IP-адресам в общем случае нельзя). У некоторых интернет-браузеров (например, Google) есть даже возможность «анонимного» входа в Интернет (режим «инкогнито»). Мобильные устройства могут идентификациироваться на основе SIM-карт, «зарегистрированных» на их покупателей; по IMEI-кодам устройств (у современных моделей их два).

Оценки полноты/качества результатов поиска информации

Априорная (прогнозная) оценка результатов будущего сеанса ПИ может быть дана на основе практического опыта пользователя и/или его знакомых; предшествующих попыток ПИ и пр. Основные показатели прогнозной оценки результатов ПИ в сеансе: $K_1^{(before)}$ и $K_2^{(before)}$ – субъективные оценки вероятностей того, что в сеансе нужные сведения за запланированное время будут найдены «в полном объеме» или «частично»; $K_3^{(before)}$ и $K_4^{(before)}$ – оценки времени, необходимого для нахождения сведений «в полном объеме» и для заданной «минимальной части» этого объема; $K_5^{(before)}$ и $K_6^{(before)}$ – субъективные оценки того, что при запланированном расходе трафика нужные сведения будут найдены «полностью» или «частично».

В процессе ПИ пользователи осуществляют запросы с использованием ПСИ. Результаты выполнения ПЗ – это ПВ в виде совокупности

ссылок на Интернет-ресурсы, ранжированные по релевантности ПЗ. При этом могут применяться дополнительные средства увеличения наглядности представления информации в ПВ [18]. Факторы, влияющие на результаты отбора/ранжирования ссылок в ПВ: содержание информации на сайтах; состав слов в ПЗ; применение дополнительных фильтров при отборе; применяемые владельцами методы поискового продвижения сайтов и др.

Основные показатели для этапа ПИ. $K_1^{(in)}$ – оценка текущей степени (полноты) достижения поставленных целей ПИ в сеансе – с учетом материалов, найденных во всех использованных ПЗ. $K_{2-time}^{(in)}$ и $K_{2-traf}^{(in)}$ – оставшиеся для сеанса допустимые «время поиска» и «трафик». $K_3^{(in)}$ – предварительная оценка результативности ПВ (по совокупности ссылок) для ПВ по ПЗ. $K_4^{(in)}$ – оценка результативности ПВ по ПЗ с учетом выборочного просмотра (изучения) тех материалов, на которые указывают ссылки из ПВ.

При большом количестве ссылок пользователи обычно просматривают в ПВ ссылки и открывают материалы по ним в лучшем случае лишь для нескольких десятков первых ссылок. Поэтому оценки $K_3^{(in)}$ и $K_4^{(in)}$ носят «выборочный» характер. Однако это не «случайные выборки» из полных массивов ссылок, так как списки ссылок отсортированы по релевантности.

Оценки «результативности» для конкретного ПЗ примем по

$$K_3^{(in)} = U_3^{(pol)} / N_3 ; \quad K_4^{(in)} = U_4^{(pol)} / N_4 \qquad (1)$$

где $U_3^{(pol)}$ – количество ссылок, которые были сочтены полезными при анализе совокупности N_3 ссылок в ПСИ (чаще всего это первые ссылки в ПВ); $U_4^{(pol)}$ – количество ссылок, оцененных как «полезные» при анализе тех материалов, открывавшихся по гиперссылкам в ПВ; N_4 – количество ссылок, по которым материалы фактически просматривались. Обычно $N_4 \le N_3$.

Факторы, влияющие на оценки «полезности» ссылок, выданных ПСИ, конкретным пользователем: состав/объем сведений, приведенных в ПВ для конкретной ссылки; «авторитетность» (в глазах пользователя) того интернет-ресурса, на который указывает ссылка; «повторяемость» информации [16], соответствующей различным ссылкам в ПВ (например, одних и тех же текстовых документов, размещенных по разным адресам в Интернете) и пр. Для «апостериорной» оперативной оценки полезности ссылки в ПВ важны: наличие в материале, открываемом по ссылке новой информации (по отношению к той, которая уже есть у пользователя); «понятность» представления этой информации; язык представления информации и пр.

Варианты оценок результативности «сеанса» ПИ сразу после его окончания: (а) по общему количеству найденных «полезных материалов» по всем ПВ ($K_1^{(after)}$); (б) по отношению $K_1^{(after)}$ к числу всех ПЗ (N_{total})

$$K_2^{(after)} = K_1^{(after)} / N_{total} ; \qquad (2)$$

(в) с учетом объемов найденных «полезных материалов» $\{V_i\}_{i=1\ldots K_1^{(after)}}$ и степеней их соответствия целям ПИ в сеансе ($\{w_i\}_{i=1\ldots K_1^{(after)}}$)

$$K_3^{after} = \sum_{i=1}^{K_1^{(after)}} (V_i w_i). \qquad (3)$$

Может быть дана и «отложенная по времени» оценка результативности сеанса ПИ (K_4^{after}) – на основе результатов принятия/реализации решений основанных на найденной информации, а также с учетом ресурсов времени (и, возможно, трафика), которые были доступны при ПИ в сеансе.

Модели поведения (тактики) пользователей при поиске информации

Ниже описываются типовые модели поведения пользователей при «тематическом» ПИ с применением ПСИ. При этом мы не рассматриваем возможность «отвлечения пользователей» на просмотр материалов, показываемых как «контекстная реклама»; других «полезных материалов» не связанных с целями ПИ в сеансе. Итак, последовательность действий:

1. Определить (установить) «располагаемое время» для сеанса ПИ.
2. Поставить (определить) цели ПИ.
3. Выбрать ПСИ для выполнения ПИ.
4. При необходимости выбрать категорию объектов, в пределах которой будет осуществляться ПИ для выбранной ПСИ.
5. Сформулировать очередной ПЗ – возможно с использованием дополнительных фильтров для отбора информации.
6. Выполнить ПЗ через ПСИ, получить ПВ. Проверить, что ПСИ не «скорректировала» текст

ПЗ «нежелательным образом». Если скорректировала, то повторить п.6 с указанием на необходимость использования ПЗ в «точной формулировке». Иначе перейти к п. 7.

7. Выбрать вариант действий в зависимости от количества ссылок в ПВ. (а) При отсутствии ссылок переформулировать запрос и вернуться на п. 6. (б) При ненулевом количестве ссылок перейти к п. 8.

8. Оценить полезность очередной ПВ по критерию $K_3^{(in)}$ – только на основе информации, отображаемой в ПВ ПСИ. При предварительной оценке полезности ПВ как «хорошей», рассмотреть целесообразность сохранения списка ссылок из ПВ (или только начала этого списка) в отдельный фал и, возможно, выполнить это действие; затем перейти к п.9. Если же полезность оценена как «нулевая» или близкая к ней, то возможны разные варианты. (а) Прекратить сеанс поиска до истечения запланированного времени (если для всех ПСИ различные ПЗ не приносят новых полезных результатов). (б) Переформулировать запрос и вернуться на п. 6. с использованием той же ПСИ. (в) Если много ПЗ подряд дали неудовлетворительные результаты, то изменить ПСИ и вернуться на п. 4.

9. Провести содержательный анализ материалов, соответствующих гиперссылкам, которые предварительно оценены в ПВ как «полезные» в п. 8. Анализ выполняется путем открытия/изучения соответствующих материалов, возможно также их скачивания и/или копирования пользователем в собственные архивы; затем перейти к п. 10.

При решении вопроса целесообразности перехода по ссылкам может учитываться также следующее: объемы файлов (для мобильных пользователей они влияют на величину «оставшегося трафика» и времена открытия файлов); соображения информационной безопасности – особенно при получении предупреждающих сообщений от антивирусных программ.

«Накопленные» в текущей ПВ результаты анализа материалов, открываемых по гиперссылкам, могут приводить к корректировкам оценки того, сколько еще ссылок в этой ПВ стоит использовать для переходов по ним (как в сторону увеличения, так и уменьшения этой оценки).

10. Оценить полноту достижения запланированных целей ПИ в сеансе. Если цели достигнуты, то закончить сеанс ПИ с переходом к п. 11. Если цели ПИ не достигнуты, то выбор одного из таких вариантов – в указанной последовательности. (а) Если израсходовано все запланированное время сеанса, то (в зависимости от уровня мотивации и иных факторов) либо завершить сеанс ПИ, либо увеличить «лимит» на допустимое время сеанса и вернуться к п. 6. (б) Если мобильный пользователь работает по тарифу с «лимитированным трафиком», то аналогичные решения могут приниматься и в отношении «объемов трафика в сеансе». (в) Если уже использованное количество ПЗ для текущей ПСИ меньше и равно запланированного, то переформулировать запрос и вернуться к п. 6. (г) Если для ПИ «опробованы» еще не все возможные ПСИ, а общее количество выполненных ПЗ через все ПСИ не слишком большое, то изменить ПСИ и вернуться к п. 4. Отметим, что применение в сеансе различных ПСИ может улучшать результаты ПИ [19]. (д) Изменить цели ПИ и вернуться к п. 3.

11. Сразу же использовать результаты ПИ для принятия каких-то решений (выполнения действий) или сохранить эти результаты для последующего использования – возможно с последующей «аналитической обработкой» найденных материалов. Например – сопоставление литературных данных с результатами собственных экспериментальных/теоретических исследований лица, проводившего ПИ. Отметим, что на результаты поиска (в виде «подборок информации» или даже систематизированных списков «аннотированных ссылок» могут быть отдельные права [14] – в том числе авторские права на «составные произведения» (по терминологии 4-й части ГК РФ).

Для поиска НТИ (а иногда и иной информации) могут применяться ПЗ не только на русском языке, но и на иностранных [22]. Однако формирование ПЗ на «восточных языках» требует установки на ПЭВМ специальных шрифтов, драйверов клавиатуры. При иноязычных ПЗ меняются категории объектов, просматриваемых ПСИ, а, следовательно, и результаты ПВ. В случае использования «иноязычных ПЗ» описанный алгоритм может быть дополнен (например, путем вставки в п. 10 дополнительного подпункта между «в» и «г» в отношении «смены языка»). Однако слабое владение многими пользователями иностранными языками приводит к тому, что они ограничиваются ПЗ только на русском. Анализ ПВ на иностранных языках (а особенно материалов, открывающих-

ся по гиперссылкам) сложнее, чем на русском и требует больше времени. При этом автоматические переводчики (в том числе интернет-переводчики) для сложных фраз, характерных для НТИ, обычно дают неудовлетворительные результаты.

Выводы

1. Управление эффективностью ПИ в Интернете может достигаться разными способами, включая совершенствование ПСИ и повышение личной «поисковой квалификации» пользователей. 2. В статье выполнен системный анализ факторов, влияющих на тактику поиска информации пользователями в Интернете с использованием ПСИ; показано взаимовлияние этих факторов. 3. Предложена типовая модель поведения (тактики) пользователей при тематическом ПИ с использованием ПСИ. 4. Эта модель может быть использована в частности для таких целей: (а) разработки программ, предназначенных для автоматической обработки ПВ ПСИ – с целью уменьшения «информационной нагрузки» на пользователя; (б) повышения интеллектуальности ПСИ за счет обработки ими не только текущих ПЗ, но и «истории запросов» в текущем сеансе ПИ конкретным пользователем (с учетом промежутков времени между выполнением последовательных ПЗ; количеством ссылок, попавших в отдельные ПВ); анализа «профиля действий пользователя» при ПИ в Интернете – для решения задач, связанных с повышением его «поисковой квалификации».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бойченко, Е.Н.* Поиск полнотекстовых версий электронных периодических изданий по технике и сельскому хозяйству в Интернете // Библиосфера. 2013. № 4. С. 103–108.

2. *Брумштейн, Ю.М., Литвинова, М.А.* Анализ алгоритмов поиска изображений в Интернете / Инновационные технологии в управлении, образовании, промышленности «АСТИНТЕХ-2009» : Материалы Международной научной конференции (11–14 мая 2009 г.) / сост. И.Ю. Петрова. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2009. С. 63–64.

3. *Брумштейн, Ю.М.* Интеллектуальные ресурсы региона: системный анализ компонентной структуры, подходов к оценкам, моделей динамики // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2014. Т. 21. № 12(139). С. 52–57.

4. *Брумштейн, Ю.М., Кузьмина, А.Б.* ИКТ-компетентность стран, регионов, организаций и физических лиц: системный анализ целей, направлений и методов оценки // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – Астрахань, 2014. – № 2. – С. 47–63.

5. *Васьковский, Е.Ю., Брумштейн, Ю.М.* Системный анализ вопросов, связанных с востребованностью информации на web-сайтах // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – 2015. – № 1. – С. 59–74.

6. *Демьяненко, С.В., Малясова, С.В.* Чемпионат по поиску информации в сети Интернет // Информатика в школе. 2012. № 1 (75). С. 52–58.

7. *Ерофеев, А.А., Дворянкин, А.М., Кульцова, М.Б.* Извлечение и структурирование знаний по управлению водохозяйственной системой Волго-Ахтубинской поймы // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 6(163). С. 119–124.

8. *Карташев, Е.А., Царегородцев, А.Л.* Автоматизированная информационная система поиска и анализа информации в сети Интернет // Фундаментальные исследования. 2016. № 10–2. С. 296–300.

9. *Кузьмина, А.Б.* Анализ опыта управления ИТ-компетентностью физических и юридических лиц в некоторых зарубежных странах // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. – Астрахань, 2014. – № 2. – С. 63–76.

10. *Маслов, Д.Г., Тусков, А.А., Дивненко, З.А., Юдина, Е.С* Конкурентная разведка в Интернете: технологии и инструменты поиска информации // Фундаментальные исследования. 2015. № 5–3. С. 631–634.

11. *Минашкин, С.А.* Анализ модели пользователя и определение его потребностей при поиске в Интернете // Естественные и технические науки. 2013. № 5(67). С. 296–298.

12. *Мэн, Ц.* Анализ методов классификации информации в Интернете при решении задач информационного поиска // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. 2016. № 2(13). С. 19.

13. *Николенко, С.И., Фишков, А.А.* SCM: новая вероятностная модель поведения пользователей интернет-поиска // Труды СПИИРАН, 2012, вып. 20. – С. 72–100.

14. *Овченкова, Е.А.* Об эффективных методах поиска научной информации в Интернете и правах пользователей по распоряжению полученными данными // Научно-техническая информация. Серия 1: Организация и методика информационной работы. 2011. № 5. С. 23–31.

15. *Пименов, Е.Н., Ильин, А.Н.* Информационные поиски в Интернете: проведение тематических поисков // Научно-техническая информация. Серия 2: Информационные процессы и системы. 2010. № 10. С. 7–12.

16. *Платонов, А.А., Потапов, Р.Е.* Обнаружение дубликатов статей в системе автоматического сбора информации из открытых источников об экологической обстановке // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 6(163). С. 79–82.

17. *Петрухин, А.В. Колесников, А.С., Фролов, А.А.* Мультидисциплинарный подход к реализации инструментальных средств информационного поиска и поддержки принятия решений // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 6(163). С. 186–190.

18. *Романовская, Н.В., Сычёв, П.П.* Методы визуализации результатов поиска в Интернете // Системный анализ в науке и образовании. 2012. № 3 (17). С. 98–104.

19. *Смирнов, Ю.В.* Поисковые системы Интернета и методы повышения качества обработки запросов при поиске научной информации в сети // Научные и технические библиотеки. 2016. № 9. С. 79–87.

20. *Смирнов, Ю.В.* Научный поиск в Интернете // Культура: теория и практика. 2016. № 3 (12). С. 13.

21. *Солошенко, А.Н., Орлова, Ю.А., Розалиев, В.Л.* Автоматическое выделение сюжетов и тем из потока новостных сообщений // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 2(157). С. 83–90.

22. *Omar, L.* Seeking textual information in Multilingual Data of Web: How sintactic Factors Guide the Reformulation of Queries // Перспективы науки. 2014. № 1 (52). С. 117–121.

УДК 004.424

В. А. Егунов, С. И. Кирносенко, П. Д. Кравченя, О. О. Шумейко

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОГРАММНОЙ РЕАЛИЗАЦИИ QR-РАЗЛОЖЕНИЯ НА МНОГОЯДЕРНЫХ АРХИТЕКТУРАХ*

Волгоградский государственный технический университет

vegunov@mail.ru, kirnosenko@mail.ru, kpd_@mail.ru, shumeikoyoungfox@gmail.com

Рассматривается методика оценки эффективности параллельных программ для многоядерных архитектур на примере реализации QR-разложения.

Ключевые слова: QR-разложение, отражение Хаусхолдера, многоядерные процессоры, эффективность программ, ускорение программ, кэш-память, системы с общей памятью.

V. A. Egunov, S. I. Kirnosenko, P. D. Kravchenya, O. O. Shumeiko

EFFICIENCY EVALUATION OF THE SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE QR-DECOMPOSITION ON MULTI-CORE ARCHITECTURES

Volgograd State Technical University

Methodic of parallel programs efficiency estimation for multi-core architectures is considered through the example of the QR decomposition.

Keywords: QR-decomposition, Householder reflection, multi-core processors, efficiency of programs, acceleration of programs, cache memory, shared memory systems.

В настоящее время наблюдается неуклонный рост числа параллельных вычислительных систем, часть из которых доступна буквально каждому пользователю персональных компьютеров. Речь идет о компьютерах, построенных на базе многоядерных процессоров. Данные системы в настоящее время являются наиболее распространенным вариантом параллельных вычислительных систем, именно с этим связан выбор подобных систем в качестве объекта исследований.

В данной статье будет рассмотрен один из подходов к оценке эффективности параллельных программ для систем с общей памятью. Для выбранного алгоритма, который хорошо распараллеливается на параллельных вычислительных системах с общей памятью, будет произведена аналитическая оценка времени выполнения последовательной программы, реализующей данный алгоритм, а также время выполнения параллельной программы на многоядерном процессоре с различным числом вычислительных потоков.

За основу аналитической оценки времени выполнения программы была взята методика, предложенная в [1]. Время выполнения программы, согласно данной методике, можно оценить следующим образом (1).

$$T = nOp * t + nMem * g * (a + {}^{64}/_{b}). \quad (1)$$

Здесь nOp – число операций, необходимых для реализации алгоритма; t – среднее время выполнения одной операции; nMem – объем извлекаемых из памяти данных; g – частота кэш – промахов; a – латентность оперативной памяти; b – пропускная способность оперативной памяти.

Константа “64” определяет ширину строки кэш-памяти в байтах.

В качестве базового алгоритма было выбрано QR-разложение. Данное преобразование является одним из базовых преобразований линейной алгебры, широко используется в различных инженерных и научных расчетах [2, 3]. В качестве базового метода реализации QR-разложения в данной работе используется преобразование отражения Хаусхолдера (2). Подробное описание данного алгоритма можно найти в [4].

$$s_k - sign(a_{kk})\left(\sum_{i=k}^{n} a_{ik}^2\right)^{\frac{1}{2}},$$

$$\varphi_k = \left(s_k^2 - s_k a_{kk}\right)^{-1}$$

$$\boldsymbol{u}_k^T = \left(0, \dots, 0, a_{kk} - s_k, a_{k+1,k}, \dots, a_{nk}\right)$$

$$a_{kk} = s_k \quad (2)$$

Для j = k+1 до n

$$\lambda_j = \varphi_k \boldsymbol{u}_k^T \boldsymbol{a}_j$$

$$\boldsymbol{a}_j = \boldsymbol{a}_j - \lambda_j \boldsymbol{u}_k$$

© Егунов В. А., Кирносенко С. И., Кравченя П. Д., Шумейко О. О., 2017

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов №№ 16-07-00534, 15-01-04577, 15-07-06254, при финансовой поддержке РФФИ и Администрации Волгоградской области в рамках научного проекта № 16-47-340385.

Как было сказано выше, в качестве объекта исследований была выбрана параллельная вычислительная система с общей памятью. Точнее – вычислительная система, построенная на базе многоядерного процессора Intel Core i7 – 2600K, 3500 MHz. Данный процессор построен по технологии Sandy Bridge, содержит 4 ядра, поддерживается технология Hyper – Threading, поддерживается двухканальная память DDR3 – 1333.

Посчитаем число операций, необходимых для выполнения QR-разложения методом отражения. Для выполнения разложения необходимо выполнить (N – 1) шаг при использовании матрицы размерности N * N.

На каждом шаге необходимо выполнить две группы вычислений:

– вычисление элементов вектора отражения;

– вычисление элементов результирующей матрицы.

Для вычисления вектора отражения необходимо:

– определить модуль вектора (m умножений, (m- 1) сложений, одна операция извлечения корня);

– операция изменения знака;

– вычисление коэффициента φ_k (умножение, вычитание и деление).

Для простоты будем считать, что все операции выполняются за одно время. Тогда на i-ом шаге преобразования для вычисления элементов вектора отражения необходимо выполнить следующее число операций (3).

$$nOp_1 = 2m + 4 = 2(N - i) + 4. \quad (3)$$

Для вычисления элементов результирующей матрицы необходимо обработать ведущий столбец и (N – i – 1) «неведущих» столбцов.

Для обработки ведущего столбца необходимо:

– определить модуль вектора (2m);

– произвести заполнение (m – 1) элемента нулями.

Для остальных столбцов необходимо:

– вычислить скалярное произведение векторов размерности (N – i);

– выполнить операцию умножения;

– вычислить элементы столбца результирующей матрицы (для каждого элемента выполняются операции умножения и вычитания).

В результате получаем, что для вычисления элементов результирующей матрицы необходимо выполнить число операций (4).

$$nOp_2 = 2(N - i) + (N - i - 1) * 4(N - i. \quad (4)$$

Всего для выполнения преобразования, с учетом (3) (4), необходимо выполнить число операций (5).

$$nOP = \sum_{i=0}^{N-1}(4(N - i) + 4 + (N - i - 1) * 4\,(N - i)). \quad (5)$$

Для определения среднего времени выполнения одной операции использовалась следующая методика:

– данные предварительно подгружались в кэш-память процессора;

– выполнялись вычисления с заранее известным числом операций.

Для того, чтобы данные гарантировано были размещены в кэш-памяти, элементы матрицы перед началом вычислений инициализировались, что гарантировало их размещение в кэш-памяти. Конечно, необходимо учитывать размер матрицы и используемый тип данных для того, чтобы матрица целиком помещалась в кэш.

Были проведены несколько экспериментов и получены следующие значения времени выполнения операций:

– при вычислении одного (нулевого) шага преобразования – 0,63 нс;

– выполнение преобразования целиком – 0,7 нс.

В дальнейших вычислениях среднее время выполнения операции принимается за 0,67 нс. Необходимо понимать, что в это время входит не только выполнение собственно арифметических операций, но и работа с кэш-памятью различных уровней (загрузка / сохранение).

Для апробации предложенной методики была произведена теоретическая оценка времени выполнения QR-разложения, а также произведены соответствующие эксперименты.

Для теоретической оценки использовалось выражение (1). Для общего числа операций использовалось (5), среднее время выполнения операции принято за 0,67 нс.

Объем данных, извлекаемых из памяти, оценивалось следующим образом. Начиная с какого-то шага, все данные целиком помещаются в кэш-память. Используемый процессор имеет L3 – кэш объемом 8 Мб. При этом используется технология Smart Cache, что предполагает динамическое эффективное распределение кэш-памяти между ядрами процессора. Будем считать, что каждому ядру в каждый момент времени доступно в среднем по 2 Мб данной памяти, в которой можно разместить матрицу раз-

мерностью 500 * 500 с элементами типа double (программа разрабатывалась на языке С – элемент double занимает 8 байт). Отсюда, объем данных, извлекаемых из памяти, оценивается следующим образом (6):

$$nMem = \sum_{i=501}^{N}(i * i). \qquad (6)$$

Считаем, что данные для матриц размерностью до 500 извлекать из памяти не надо, так как они целиком помещаются в кэш-память.

Частоту кэш-промахов можно оценить следующим образом. Для матриц размерностью до 500 она равна нулю, так как данные из оперативной памяти не извлекаются (целиком находятся в кэше). Для матриц больших размерностей данные на начальных этапах (пока текущая размерность не станет менее 500) загружаются из оперативной памяти строками по 64 байта (8 элементов типа double). Это означает, что при загрузке одного столбца, загружаются следующие семь. Частоту кэш-промахов можно было бы принять за 1/8, однако в реальности она будет несколько больше. Экспериментально была определена частота кэш-промахов для данной задачи – 0,165.

В рассматриваемой системе использовалась DDR3-1333 память с таймингами 9-9-9-24. Такая память обладает латентностью 13,5 нс. Пропускная способность оперативной памяти была определена с использованием программы AIDA 64. Она составила 18630 Мб / с.

С учетом этих данных было рассчитано время выполнения QR-разложения для различных размерностей матрицы. Данные значения представлены в первой строке табл. 1. Во второй строке представлены экспериментальные данные, полученные путем замера времени выполнения программы. Видно, что полученная модель с достаточно высокой степенью точности позволяет оценить время выполнения программы реализации QR-разложения методом Хаусхолдера. Для оценки времени выполнения программы на другой системе, необходимо в выражение (1) вставить актуальные значения оценок частоты кэш-промахов, пропускной способности оперативной памяти и т. д.

Таблица 1

Время выполнения последовательной программы

	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
Рассчитанное, с	0,112	4.17	17.758	46.459	95.856	171.522	279.072	424.058
Полученное, с	0.117	4.221	17.263	46.722	88.858	168.886	291.947	453.165

Для оценки времени выполнения параллельной программы в формуле (1) необходимо учесть, что часть программы распараллеливается (выполняется на нескольких вычислительных узлах (ядрах)), а часть выполняется последовательно.

В случае QR-разложения последовательно осуществляется вычисление элементов вектора отражения, параллельно – вычисление результирующих элементов матрицы. Выражение (5) в данном случае примет следующий вид:

$$nOp = \sum_{i=0}^{N-1}(2(N-i) + 4 + {((N-i-1) * 4\,(N-i) + 2(N-i))}/{K}). \qquad (7)$$

Здесь K – число параллельных потоков, выполняющихся на физических ядрах процессора. В выражении (1) все значения остаются неизменными, кроме частоты кэш-промахов. При использовании двух ядер, она уменьшается в два раза, а при использовании четырех – в четыре. На размерности 500 по-прежнему считаем частоту кэш-промахов, равной нулю, так как матрица целиком помещается в кэш-память. Полученные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Время выполнения параллельной программы

	K	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000
Рассчитанное, с	2	0.057	2.085	8.88	23.23	47.93	85.769	139.54	212.034
	4	0.028	1.044	4.441	11.617	23.967	42.888	69.774	116.022
Полученное, с	2	0.062	2.161	8.83	24.184	46.12	88.342	151.259	239.024
	2	0.034	1.088	4.473	12.299	23.397	44.944	76.592	122.392

Из табл. 2 видно, что полученная модель также с достаточно высокой степенью точности позволяет оценить время выполнения программы реализации QR-разложения методом Хаусхолдера на многоядерных параллельных архитектурах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Гергель, В.П.* Высокопроизводительные вычисления для многопроцессорных многоядерных систем : Учебник. – М.: Изд-во Московского университета, 2010. – 544 с., ил. – (Серия «Суперкомпьютерное образование»).

2. *Андреев, А.Е., Егунов, В.А. Насонов, А.А., Новокщенов, 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. *Егунов, В.А., Артюх, С.В.* Об использовании линейных преобразований в управлении мобильным роботом // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 17. № 14(117). С. 82–84.

4. *Ортега, Дж.* Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем. – М.: Мир, 1991. – 367 с.

УДК 004.89

Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, С. В. Давыдова, А. В. Айвазян

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПАТЕНТНОГО МАССИВА ДЛЯ ЗАДАЧ ПОИСКА И ИЗВЛЕЧЕНИЯ СТРУКТУРИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИИ*

Волгоградский государственный технический университет

dkorobkin80@mail.ru

В работе рассмотрены различные варианты статистического анализа патентного массива и технологии для программной реализации этих вариаций, реализован модуль оценки эффективности методов статистического анализа на основе Латентного размещения Дирихле. Наиболее эффективным методом хранения векторов является хранение в файловой системе HDFS; наиболее эффективным методом сравнения векторов является метод косинуса; наиболее эффективным методом токенизации патентов является токенизация с заменой синонимов.

Ключевые слова: патент, LDA, кластеризация, MapReduce.

D. M. Korobkin, S. A. Fomenkov, S. V. Davydova, A. V. Ayvazyan

STATISTICAL PATENT ANALYSIS FOR SEARCH AND EXTRACTING STRUCTURED INFORMATION

Volgograd State Technical University

In paper we discussed the various options for the statistical patent analysis and technology for software implementation of these variations, the software for evaluate the effectiveness of the methods of statistical analysis based on Latent Dirichlet Allocation is implemented. The most effective method for storage vectors is stored in HDFS file system, the most effective method of comparison vectors is the cosine method, the most effective method of patents tokenization is the tokenization with synonyms replacement.

Keywords: patent, LDA, clustering, MapReduce.

Введение

С развитием промышленности и науки растет размер патентной базы, а так же растет и количество патентных заявок, поступающих в ведомства, регулирующие вопросы по выдаче патентов. Каждую патентную заявку необходимо проверить на уникальность патентируемой технологии, для этого эксперту патентного бюро необходимо провести поиск по патентной базе и найти патенты-аналоги.

Так как поиск патентов-аналогов в патентном массиве можно производить различными методами [1–4] (различные методы извлечения терм, методы хранения патентной базы, методы сравнения патентов), что может приводить к различной скорости и точности поиска, имеет место для реализации модуль для оценки эффективности этих методов статистического поиска патентов аналогов.

В связи с этим целью данной работы является реализация системы оценки эффективности методов статистического анализа патентного массива. На основе работы и тестирования системы необходимо сделать вывод о наиболее эффективной совокупности методов извлечения термов из текста, хранения и сравнения патентов.

© Коробкин Д. М., Фоменков С. А., Давыдова С. В., Айвазян А. В., 2017

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № № 16-07-00534 А, 15-07-09142 А) и Минобрнауки России в рамках базовой части (проект 2586 задания № 2014/16).

Методы статистического анализа патентного массива

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить структуру патента и патентного массива, методы и техники анализа, применимые к статистическому анализу больших данных: использование модели распределенных вычислений MapReduce [5], фреймворков для работы с большими данными: Apache Hadoop [6], Spark MLlib [7].

2. Разработать алгоритмы построения терм-документной матрицы для систем статистического анализа текста, алгоритм построения модели Латентного размещения Дирихле (LDA) [8], алгоритмы сравнения векторов принадлежностей неименованным топикам для патентной заявки и патентов.

3. Разработать алгоритм вычисления показателей эффективности: точности, полноты, времени – для реализуемых вариаций метода LDA.

4. Программно реализовать разработанные алгоритмы и сделать выводы о наиболее эффективной стратегии поиска патентов-аналогов на основе статистических методов кластеризации патентного массива.

Используемые алгоритмы

Для реализации модуля оценки эффективности методов статистического анализа патентов необходимо были реализовать следующие этапы анализа:

– токенизация текста тремя различными методами (токенизация с удалением стоп-слов, токенизация с заменой синонимов и токенизация на основе n-грамм);

– построение терм-документной матрицы;

– кластеризация на основе модели LDA и использование построенной модели для получения векторов распределения по кластерам (неименованным темам);

– хранение полученных векторов двумя различными методами (хранение в распределенной файловой системе HDFS [9], хранение в базе данных PostgreSQL [10]);

– сравнение полученных векторов четырьмя различными методами (на основе среднеквадратичного отклонения векторов, на основе поэлементного сравнения векторов, на основе метода косинусов и на основе сравнения длин векторов) для поиска патентов аналогов.

Токенизация

Первым этапом статистического анализа является токенизация текста патентного массива и патентной заявки. В данном случае токенами будут являться либо отдельные слова из текста патента либо n-граммы из текста патента. После токенизации необходимо произвести лемматизацию, т.е. приведение выделенных слов к начальной морфологической форме для наиболее точного построения терм-документной матрицы. Токенизацию необходимо реализовать тремя различными методами: токенизация с удалением стоп-слов, токенизация с заменой синонимов, токенизация на основе n-грамм.

Токенизация с удалением стоп-слов (TokenRem).

Токенизация с удалением стоп-слов – разбиение текста на составные части, токены. Каждый токен представляет собой отдельное слово текста патента. В процессе токенизации из текста удаляются стоп-слова (не несут смысловой нагрузки в данном документе - частицы, предлоги, междометия и тому подобные слова). Токенизация текста с удалением стоп-слов происходит посредством библиотеки Lucene. Apache Lucene токенизирует текст различными методами в зависимости от выбранного класса анализатора.

Токенизация с заменой синонимов (TokenSyn).

Токенизация с заменой синонимов включает в себя удаление стоп-слов из текста посредством Lucene. Алгоритм похож на токенизацию текста с удалением стоп-слов, только после лемматизации слова оно заменяется на его основной синоним из словаря синонимов. Словарь синонимов представляет собой набор строк, в каждой строке синонимичный ряд вида: основной синоним, синоним, синоним и так далее. Токенизатор с заменой синонимов для каждого слова из словаря извлекает основной синоним и присоединяет его к результату.

Токенизация на основе N-грамм (TokenN).

Токенизация на основе N-грамм разбивает текст на словосочетания любой заданной длины. Такой вид токенизации позволяет построить модель LDA исключительно на основе ключевых фраз документа, что в теории должно повысить эффективность патентного поиска, в частности точность и полноту поиска. Apache Lucene позволяет извлекать N-граммы любой размерности из текста. Такой вид токенизации так же подразумевает удаление стоп-слов из текста. Для токенизации текста на основе N-грамм необходимо отчистить текст от стоп-слов и извлечь посредством Lucene N-граммы из текста.

Построение терм-документной матрицы

Терм-документная матрица [11, 12] представляет собой математическую матрицу, в которой строки являются документами, а столбцы термами. Данная матрица описывает статистический набор документа, описывает частоту появления каждого слова в документе.

Существуют различные методы построения терм-документной матрицы. Для построения модели Латентного размещения Дирихле фреймворком Spark достаточно построить матрицу на основе TF/TF (term frequency) отображает важность конкретного слова в рамках данного документа. Классический вариант вычисления коэффициента TF – отношение числа вхождения некоторого слова к общему количеству слов документа. В данном случае необходимо построить модифицированную версию терм-документной матрицы на основе TF. Для начала необходимо получить словарь всех слов патентного массива $s = \{w_1,w_2,w_3,..,w_n\}$, где w_i – очередное уникальное слово патентного массива. Тогда каждая *i*-ая строка терм-документной матрицы будет представлять собой полученный словарь, а каждый столбец будет представлять собой количество вхождений слова в *i*-ый документ.

Получить словарь всех слов набора документов и построить терм-документную матрицу позволяет фреймворк распределенных вычислений Spark и его библиотека MLlib для машинного обучения. MLlib предоставляет полноценный класс для построения, сохранения и загрузки такой матрицы распределено на компьютерах кластера.

Латентное размещение Дирихле

Основная идея Латентнго размещения Дирихле (LDA) заключается в том, что документы представлены в виде случайных смесей скрытых тем, где каждая тема характеризуется распределением по словам массива документов.

На основе модели LDA можно получить распределение патентов по неименованным темам, в том числе и для патентной заявки. Это позволяет провести статистический анализ патентного массива и найти патенты-аналоги для заявки сравнивая распределение по темам патентной заявки и патентов в массиве документов.

Сравнение векторов распределения

На основе полученных векторов распределения патентов по кластерам (неименованным темам) на основе модели LDA можно произвести процесс отбора соответствующих запросу документов. В процессе патентного поиска каждый документ патентного массива и патентная заявка приводится к вектору распределения документа по кластерам модели LDA. Отбор релевантных патентов производится сравнением вектора распределения патентной заявки с вектором распределения каждого документа патентного массива. Патентами-аналогами для патентной заявки будут считаться те документы, вектора которых наиболее равны с вектором патентной заявки в той или иной мере.

Поскольку сравнение многомерных векторов можно производить на основе различных метрик этих векторов, и заранее неизвестен наиболее эффективный метод, необходимо произвести оценку эффективности каждого из выделенных методов: поэлементное сравнение векторов, среднеквадратичное отклонение, сравнение длин векторов, метод косинусов.

Поэлементное сравнение векторов (*EE*). Два вектора сравниваются на основе каждого элемента векторов отдельно, и если хотя бы один из элементов первого вектора отличен от элемента второго вектора более чем на заданную ошибку точности, то эти вектора считаются отличными друг от друга.

Среднеквадратичное отклонение (SD). Среднеквадратичное отклонение характеризует рассеивание случайной величины относительно ее математического ожидания или среднеарифметического [13]. Если заменить случайную величину вектором распределения патентной заявки по кластерам, а ее математическое ожидание заменить вектором распределения очередного патента из массива по кластерам, то можно посчитать рассеивание патентной заявки относительно очередного патента из массива документа.

Сравнение длин векторов (VL). Одной из характеристик многомерного вектора является его длина. Сравнивая длины [14] двух векторов с заданной ошибкой точности можно произвести патентный поиск.

Метод косинусов (*Cos*). В основе метода косинусов лежит сравнение направлений двух векторов посредством угла между ними. Чем меньше угол между двумя векторами, тем меньше разница направлений векторов. Чем ближе косинус к 1, тем ближе вектора друг к другу.

Хранение векторов распределения патентов по кластерам

После построения модели Латентного размещения Дирихле и получения векторов рас-

пределения патентов из массива по неименованным темам эти вектора необходимо хранить в хранилище данных для их последующего извлечения и обработки.

В данном случае в качестве хранилища данных для векторов может выступать либо файловая система, либо СУБД.

БД PostgreSQL позволяет хранить массивы данных (встроенный тип данных в СУБД PostgreSQL) и обрабатывать их в хранимых функциях. Поскольку каждый вектор представляет собой массив вещественных чисел в пределе единицы, а идентифицируется по ID документа, которому принадлежит этот вектор, то для хранения векторов распределения патентного массива по неименованным темам достаточно одной таблицы базы данных с двумя полями: ID (целочисленный тип) и Vector (массив вещественных чисел). В таком случае патентный поиск выполняется хранимой функцией, которая на основе того или иного метода сравнения векторов находит патенты-аналоги для входящей патентной заявки. Хранимая функция патентного поиска в свою очередь вызывается из основной программы, написанной на языке Java, посредством драйвера PostgreSQL и SQL запросов к базе данных. Загрузка самих векторов происходит аналогичным методом.

Файловая система HDFS.

Патентный массив может достигать десятков миллионов документов. Такой внушительный объем данных породит внушительный объем векторов для хранения. Наиболее эффективно с таким объемом данных справится распределенная файловая система HDFS. HDFS так же позволит производить распределенные вычисления на хранимых данных. Фреймворк Apache Spark позволяет сохранять и загружать данные в HDFS различными методами, в том числе и текстовым, что позволит хранить ID документа и его вектор. Spark включает в себя распределенные контейнеры, к которым применимы методы сохранения и выгрузки данных. Патентный поиск при таком варианте хранения производится в основной программе распределенными вычислениями, которые предоставляет Apache Spark. Поиск патентов-аналогов производится путем фильтрации патентной заявкой распределенного контейнера, который хранит в себе вектора распределения документов по неименованным темам патентного массива.

Проектирование системы

Для полноценного функционирования необходимо реализовать две подсистемы: подсистема кластеризации патентного массива и подсистема оценки эффективности методов статистического анализа.

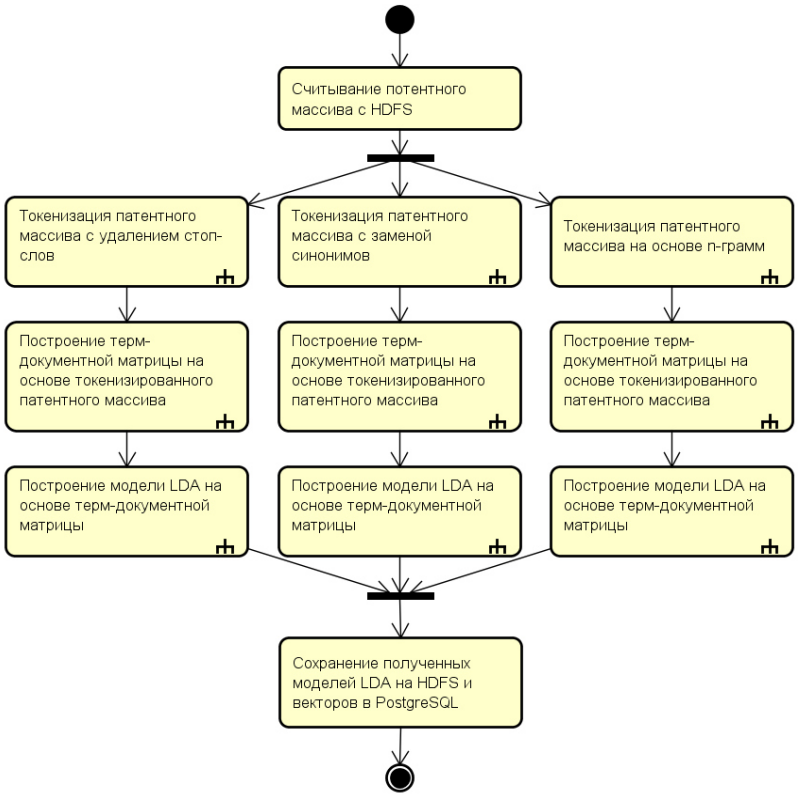


Рис. 1. Алгоритм кластеризации

Подсистема кластеризация необходима для построения модели LDA, получения словаря всех слов патентного массива, получения и сохранения векторов распределения патентного массива по неименованным темам для последующего патентного поиска и оценки эффективности методов поиска. Необходимо в процессе работы этого модуля построить три различные модели LDA, по одной на каждый метод токенизации текста и сохранить двумя различными методами (в HDFS и базу данных PostgreSQL.) полученные вектора распределения патентов массива документов.

В свою очередь подсистема анализа выполняет основную функцию проектируемой системы. На основе построенных моделей LDA и сохраненных векторов распределения патентов массива документов подсистема анализа производит патентный поиск различными методами и вычисляет показатели эффективности патентного поиска.

Каждая подсистема функционирует посредством отдельного сервлета из контейнера Apache TomCat.

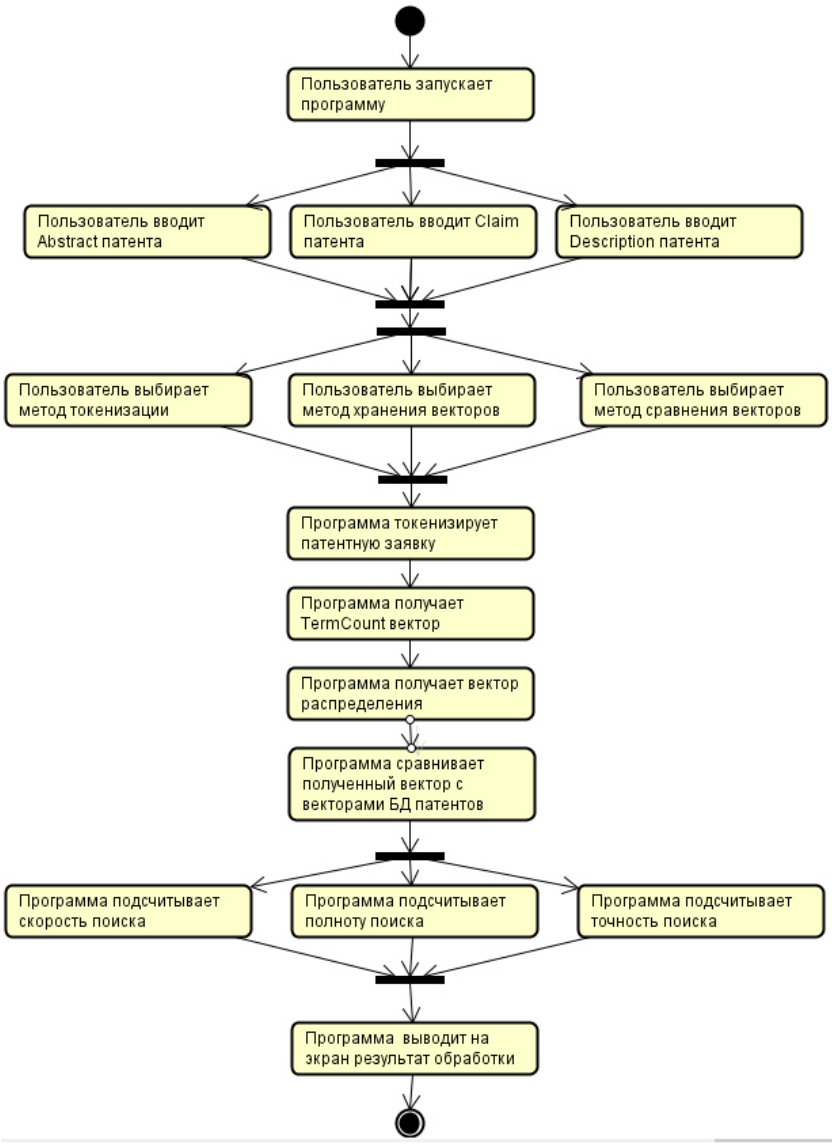


Рис. 2. Алгоритм анализа эффективности методов

Тестовый массив для сравнения методов статистического анализа

Основными показателями эффективности поиска являются точность *(precision)* и полнота *(recall)*. Поскольку в результате важна скорость работы модуля, то время работы *(T)* тоже считается показателем эффективности работы модуля.

Тестовый массив патентных данных формируется на основе патентной базы Роспатента и патентных заявок Роспатента. Для каждой па-

тентной заявки указаны идентификаторы патентов-аналогов для данной патентной заявки. В тестовый массив обязательно включаются патенты-аналоги тестовых патентных заявок и дополнительные шумовые патенты из базы Роспатента.

$$T = t_{end} - t_{start} \quad (1)$$

$$precision = \frac{\left|D_{rel} \cap D_{retr}\right|}{\left|D_{retr}\right|} \quad (2)$$

$$recall = \frac{\left|D_{rel} \cap D_{retr}\right|}{\left|D_{rel}\right|}, \quad (3)$$

где t_{end} – время окончания поиска; t_{start} – время начала поиска; D_{rel} – множество релевантных документов в базе; D_{retr} – множество документов, найденных системой.

Результаты проверки эффективности методов

№	Токенизация	Хранение векторов	Сравнение векторов	T, с	precision	recall
1	TokenRem	HDFS	Cos	2	1	0,6
2	TokenRem	HDFS	VL	2	0,2	0,2
3	TokenRem	HDFS	SD	2	1	0,55
4	TokenRem	HDFS	EE	1	1	0,65
5	TokenRem	PostgreSQL	Cos	2	1	0,6
6	TokenRem	PostgreSQL	VL	3	0,2	0,2
7	TokenRem	PostgreSQL	SD	1	0,65	0,65
8	TokenRem	PostgreSQL	EE	1	1	0,65
9	TokenSyn	HDFS	Cos	7	0,94	0,75
10	TokenSyn	HDFS	VL	3	0	0
11	TokenSyn	HDFS	SD	4	1	0,6
12	TokenSyn	HDFS	EE	4	0,43	0,9
13	TokenSyn	PostgreSQL	Cos	7	0,94	0,75
14	TokenSyn	PostgreSQL	VL	4	0	0
15	TokenSyn	PostgreSQL	SD	5	0,4	1
16	TokenSyn	PostgreSQL	EE	5	0,43	0,9
17	TokenN	HDFS	Cos	3	1	0,4
18	TokenN	HDFS	VL	3	0,43	0,5
19	TokenN	HDFS	SD	4	1	0,4
20	TokenN	HDFS	EE	3	1	0,4
21	TokenN	PostgreSQL	Cos	4	1	0,4
22	TokenN	PostgreSQL	VL	4	0,43	0,35
23	TokenN	PostgreSQL	SD	3	0,25	1
24	TokenN	PostgreSQL	EE	3	1	0,4

Заключение

На основе реализованного модуля можно сделать вывод о наиболее эффективной совокупности методов статистического анализа, которые впоследствии можно использовать в автоматизированной системе поиска патентов-аналогов. Данная система должна упростить работу патентного эксперта, исключив из его работы ручной поиск патентов-аналогов в многомиллионной базе патентов.

Из тестирования модуля можно сделать вывод: наиболее эффективным методом хранения векторов является хранение в файловой системе HDFS, наиболее эффективным методом сравнения векторов является метод косинуса, наиболее эффективным методом токенизации патентов является токенизация с заменой синонимов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Dmitriy M. Korobkin, Sergey A. Fomenkov, Sergey G. Kolesnikov and Alexander B. Golovanchikov.* Technical Function Discovery in Patent Databases for Generating Innovative Solutions // Multi Conference on Computer Science and Information Systems 2016 / ed. by Piet Kommers [etc.] ; IADIS International Association for Development of the Information Society. – [Madeira, Portugal], 2016. – P. 241–245.

2. *Коробкин, Д.М., Фоменков, С.А., Мармура, А.С., Болдырев, В.А.* Методика предварительной обработки патентного массива для задач извлечения структурированных физических знаний // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 3(182). С. 40–47.

3. *Коробкин, Д.М., Фоменков, С.А., Давыдова, С.В.* Поиск описаний физических эффектов в патентном массиве. Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 5 (143). С. 3–11.

4. *Коробкин, Д.М., Колесников, С.Г., Фоменков, С.А.* Методика извлечения практического применения физических эффектов из патентных документов // Информационные технологии в науке, образовании и управлении : мат. XLIV Международной конференции и XIV Международной конференции молодых ученых IT + S&E`16 / под ред. Е.Л. Глориозова. 2016. С. 92–100.

5. Google Research Publication: MapReduce. [Electronic resource]. – Access mode : http://research.google.com/ archive/mapreduce.html (date of access 11.05.16)

6. Apache Hadoop [Electronic resource]. – Access mode : http://hadoop.apache.org/ (date of access 12.05.16)

7. Apache Spark [Electronic resource]. – Access mode : http://spark.apache.org/docs/latest/ (date of access 14.05.16)

8. *David M. Blei.* Latent Dirichlet allocation / David M. Blei // Journal of Machine Learning Research 3 (4–5). – P. 993–1022.

9. HDFS Architecture Guide. [Electronic resource]. – Access mode : http://hadoop.apache.org/docs/r1.2.1/hdfs_design (date of access 14.05.16)

10. Документация PostgreSQL [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://postgresql.ru.net/manual/index.html (дата обращения 15.05.16)

11. *Фоменкова, М.А., Коробкин, Д.М., Фоменков, С.А., Копасов, А.Н.* Семантический анализ текста для выявления описаний физических эффектов. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 3(182). С. 91–95.

12. *Korobkin, D., Fomenkov, S., Kamaev, V., Fomenkova, M.* Multi-agent model of ontology-based extraction of physical effects descriptions from natural language text // Information Technologies in Science, Management, Social Sphere and Medicine' (ITSMSSM 2016) : proceedings of III International Scientific Conference (Tomsk, Russian Federation, 23-26 May 2016) / Tomsk Polytechnic University. – [Published by Atlantis Press], 2016. – P. 498–501.

13. *Гмурман, В. Е.* Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике : Учебное пособие для студентов вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. Шк., 2004. – 404 с.

14. *Бугров, Я.С.* Высшая математика : Учеб. для вузов. В 3 т. / Я. С. Бугров, С. М. Никольский ; под ред. В. А. Садовничего. – 6-е изд., стер. – М.: Дрофа, 2004. – 1 т. – 288 с.

УДК 004.89

Д. М. Коробкин, С. А. Фоменков, И. А. Кобликов, Г. А. Карачунова

МЕТОДИКА СЕМАНТИЧЕСКОГО ПАТЕНТНОГО ПОИСКА*

Волгоградский государственный технический университет

dkorobkin80@mail.ru

Целью работы являлось повышение эффективности экспертизы заявочных материалов на этапе патентного поиска посредством использования семантического анализа текстов патентной заявки и патентного массива. Для этого была разработана методика сравнения семантических деревьев, построенных на основе патентных текстов; эффективность программной реализации данной методики проверена на тестовом массиве документов.

Ключевые слова: семантический анализ, патент, сравнение семантических деревьев, расстояние Левенштейна.

D. M. Korobkin, S. A. Fomenkov, I. A. Koblikov, G. A. Karachunova

THE METHODOLOGY OF THE SEMANTIC PATENT SEARCH

Volgograd State Technical University

The aim of this work was to increase the efficiency of patent applications examination with use of semantic analysis of patent texts at the stage of patent search. Technique of comparing the semantic trees on the basis of patent texts was built, the efficiency of the software implementation of this methodology was tested on a test documents set.

Keywords: semantic analysis, patent, comparison of semantic trees, Levenshtein distance.

Введение

С увеличением количества патентов растет время рассмотрения заявки на регистрацию патента. Эксперту патентного бюро необходимо установить уникальность патентируемой технологии. Для этого он должен провести сравнение со схожими патентами и удостовериться в отсутствии аналогов изобретения. В ходе такой работы эксперт может проверить более тысячи патентов.

Существующие автоматизированные системы помощи эксперту при патентной экспертизе (табл. 1) не обеспечивают полной автоматизации процесса. Эксперт изучает заявку и с по-

© Коробкин Д. М., Фоменков С. А., Кобликов И. А., Карачунова Г. А., 2017

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № № 15-47-02383 р_поволжье_а, 15-07-09142 А) и Минобрнауки России в рамках базовой части (проект 2586 задания № 2014/16).

мощью автоматизированной системы производит патентный поиск на основе ключевых слов, выделенных им вручную из патента-заявки. Далее эксперту необходимо проанализировать все релевантные запросу патенты и сделать заключение о патентоспособности изобретения.

Таким образом, актуальным является повышение эффективности экспертизы заявочных материалов посредством использования полнотекстового поиска на основе семантического анализа текстов патентной заявки и патентного массива.

Таблица 1

Сравнительная характеристика поисковых систем

Система	Поиск по ключевым словам	Поиск по метаданным	Подсветка ключевых слов	Машинный перевод	Полнотекстовый поиск
ESPACENET	+	+	+	-	-
PATENTSCOPE	+	+	+	-	-
USPTO	+	+	-	-	-
Google Patent Search	+	-	+	+	-
PatSearch	+	+	-	-	-
Free Patents Online	+	+	+	-	-
SIPO	+	+	-	+	-

Методика семантического патентного поиска

Поиск патентной информации по полнотекстовому запросу заключается в выполнении двух этапов:

1) построение семантических деревьев для англо- и русскоязычных текстов патента и патентной заявки;

2) сравнение семантических деревьев, построенных на основе текстов патентов и патентной заявки.

Построение семантических деревьев текстов патентов

Методике построения семантических деревьев для англо- и русскоязычных текстов патента и патентной заявки посвящены работы [1–4]. Для построения семантического дерева используется следующая последовательность действий: сегментация текста, морфологический анализ, семантический анализ, сокращение семантического дерева, построение глубинно-синтаксических структур.

В результате получаем семантическое дерево, имеющее четыре уровня (пример приведен на рис. 1).

На нулевом уровне находится корень дерева (ROOT-вершина). На первом уровне находятся субъект и объект (актантные отношения I, II согласно теории «Смысл-Текст» [5]). На третьем уровне атрибутивные (ATTR), сочинительные (COORD) и служебные (APPEND) отношения. На последнем, четвертом уровне помещается расширенное описание отношений 3-го уровня.

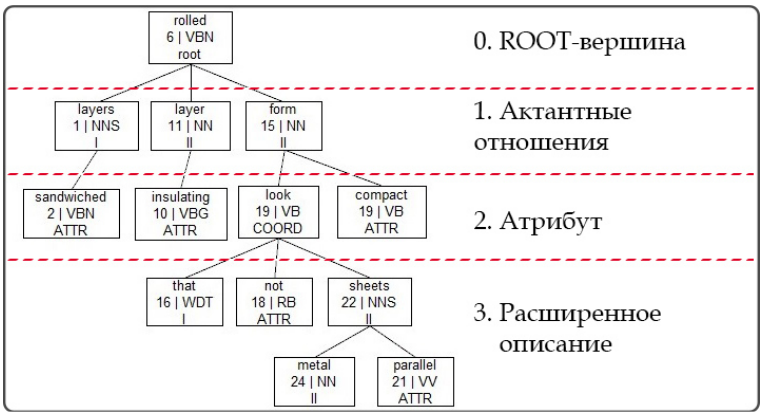


Рис. 1. Семантическое дерево для предложения «The sandwiched layers can be rolled up with another insulating layer into a compact form that does not look like parallel sheets of metal»

Сравнение семантических деревьев

После этапа построения семантических деревьев патент-заявка (ПОЗ) сравнивается с каждым патентом в базе. Алгоритм поиска патентов представлен на рис. 2; здесь *i* – номер сравниваемого патента; *N* – количество всех патентов в базе. Сравнение заявки с *i*-м патентом происходит через сравнение каждого *j*-го семантического дерева сегментированного текста заявки с каждым *k*-м деревом *i*-го патента. Алгоритм сравнения представлен на рис. 3.

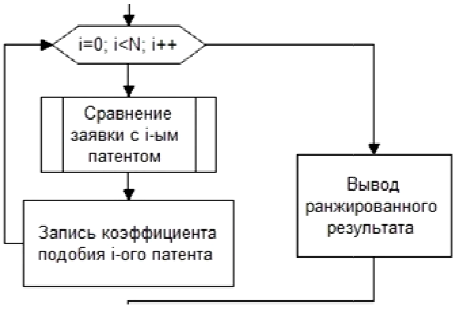


Рис. 2. Алгоритм поиска патентов

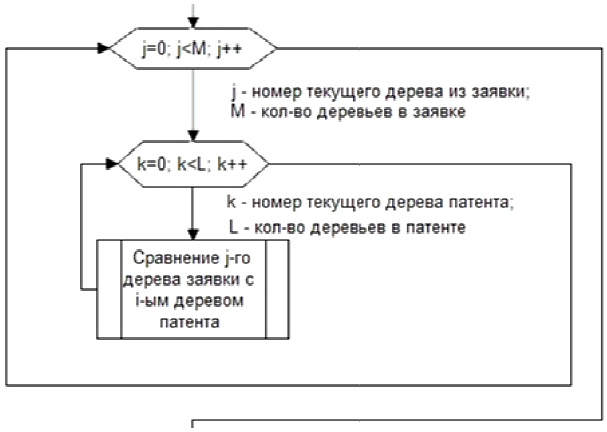


Рис. 3. Сравнение заявки с *i*-м патентом

Приведем пример сравнения 2 деревьев. Патент-заявка: «The sandwiched layers can be rolled up with another insulating layer into a compact form that does not look like parallel sheets of metal». Патент: «The sandwiched layers can be rolled up with dielectric into a compact form that does look like rod of metal».

Первый этап сравнения семантических деревьев

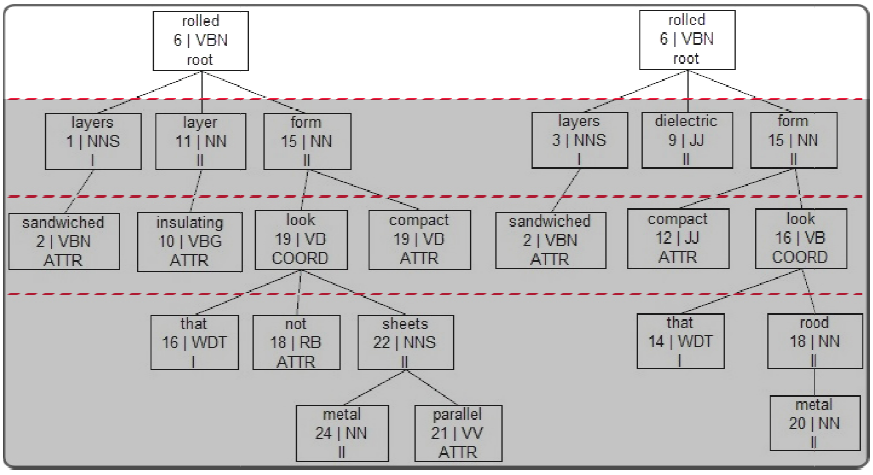


Рис. 4. Первый этап сравнения (по нулевому уровню)

Структура семантического дерева такова, что корнем дерева (ROOT-вершиной) является глагол (предикат). Однако в одном дереве могут находиться несколько глаголов, не являющихся ROOT-вершинами.

Существует два варианта первого этапа сравнения деревьев (рис. 5):

1) сравнение по ROOT-вершине. Если вершины заявки и патента не совпадают, то дальнейшее сравнение деревьев не производится, идет сравнение по следующему семантическому дереву патента;

2) сравнение по предикату (глаголу). С каждым глаголом, не зависимо является ли он ROOT-вершиной, связаны субъект и объект на первом уровне, атрибутивные отношения на втором, т. е. наблюдается структура, приведенная на рис. 1, поэтому роль ROOT-вершины можно перенести на любой предикат (глагол). Если предикаты заявки и патента не совпадают, то дальнейшее сравнение деревьев не производится, идет сравнение по следующему дереву патента.

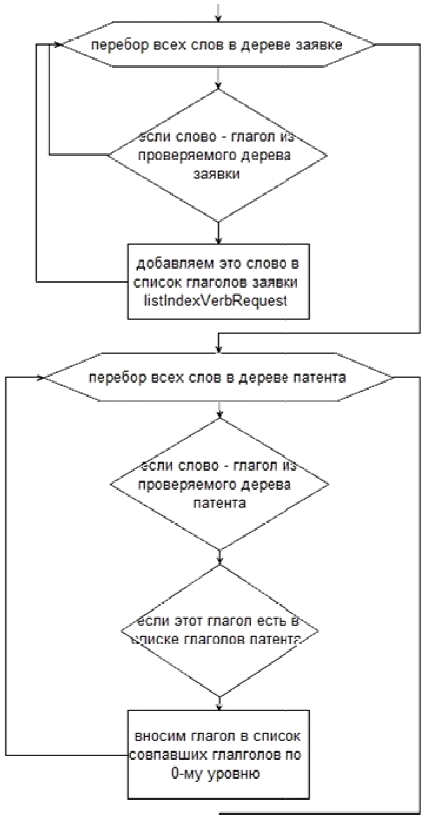


Рис. 5. Алгоритм сравнения на 0-м уровне

Введем понятие коэффициента подобия двух семантических деревьев на первых 3-х этапах:

$$K^{j}{}_{\text{подоб}}(St_k, St_l) = \frac{\sum_{i=1}^{N_i} F_{\text{общ}}(T_1, T_2)}{N_i}, \qquad (1)$$

где St_k, St_l – семантические деревья, связанные соответственно с k-м и l-м предложениями в ПОЗ и патенте соответственно; j – номер этапа; $F_{общ}(T_1,T_2)$ – функция, которая определяет, совпадают ли термы T_1 и T_2 для сравниваемых деревьев при одинаковых родительских термах; N_i – число термов для семантического дерева St_k ПОЗ.

Второй этап сравнения семантических деревьев

На следующем этапе, если ROOT-вершины (или предикаты) деревьев одинаковые, производится сравнение по первому уровню (актантные отношения) (рис. 1). Каждое слово (терм) патента-заявки на данном уровне сравнивается с каждым словом сравниваемого патента для этого уровня (рис. 6). Считается коэффициент подобия деревьев из расчета отношения количества совпавших слов на первом уровне к общему количеству слов на первом уровне патента-заявки. В нашем примере у семантического

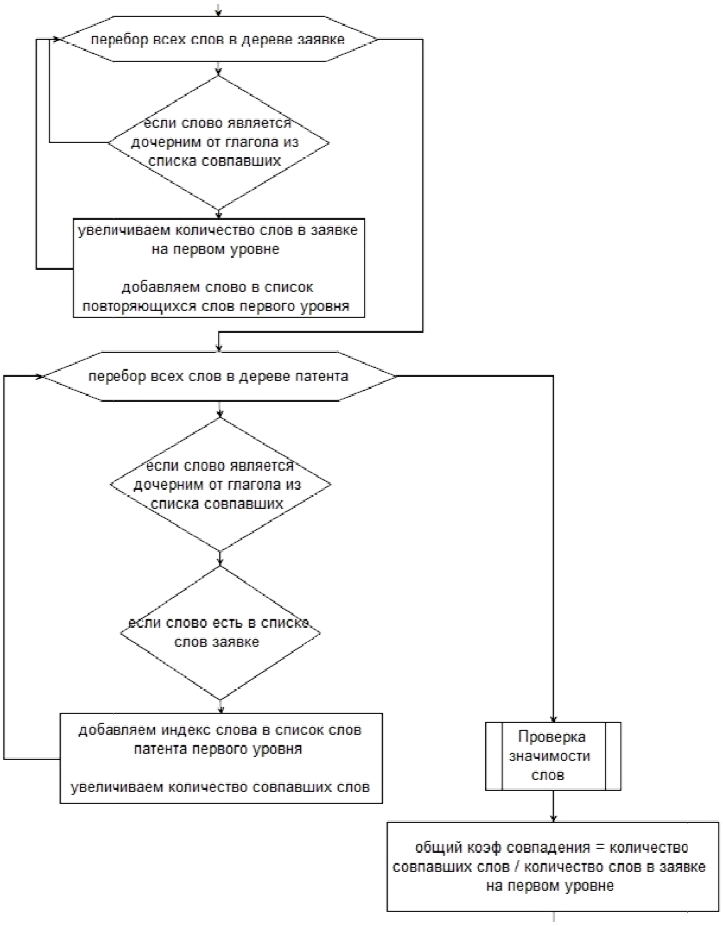


Рис. 6. Алгоритм сравнения по 1-му уровню

дерева заявки три терма на первом уровне, значит максимальное совпадение 3/3. Если коэффициент подобия меньше 1/2, то дальнейшее сравнение не производится.



Рис. 7. Расчет IDF

При сравнении на каждом уровне, если какой-либо терм (слово) не совпал, то он проверяется на значимость. Проверка производится по таблице [6], в которой определены коэффициенты IDF (inverse document frequency) – инверсная частота, с которой термы встречается в документах патентной базы. Если IDF терма выше порогового значения, то слово значимым не является и не учитывается в расчете коэффициента подобия (рис. 7).

Производим сравнение: ищем совпадающие термы, обозначенные актантным отношением «I». В патенте-заявке и патенте совпадает терм «layers»: +1/3. Ищем совпадающие термы, обозначенные актантным отношением «II» - таких в патенте-заявке два: «layer» и «form». В патенте совпадает только один терм «form», коэффициент подобия увеличивается на 1/3. Терм «layer» из патента-заявки не совпал, проверяем его на значимость. IDF коэффициент ниже порогового значения, значит учитывать его в расчете коэффициента подобия нужно. Совпало 2 слова из 3, коэффициент подобия по первому уровню равен 2/3 (рис. 8).

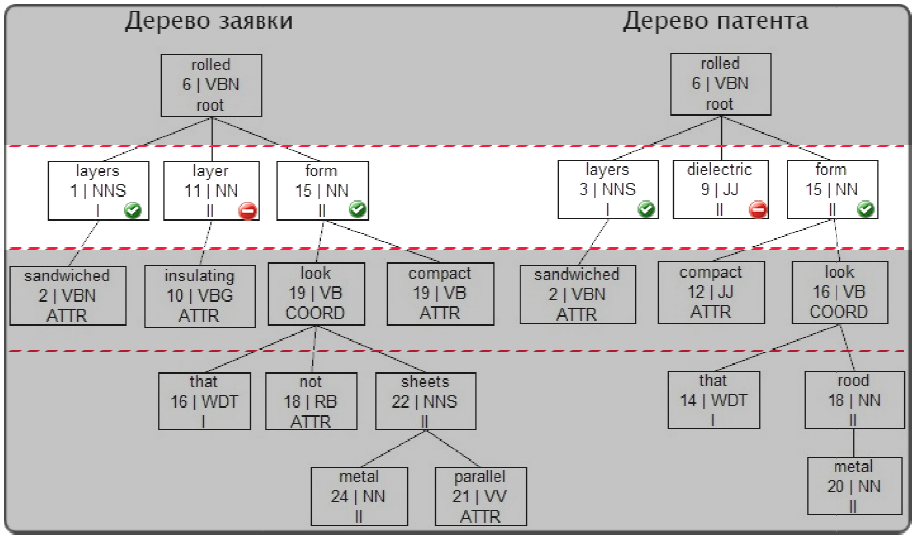


Рис. 8. Сравнение по первому уровню

Третий этап сравнения семантических деревьев

На третьем этапе (рис. 9) производится сравнение по 2-му уровню – уровню атрибутов (атрибутивные (ATTR), сочинительные (COORD) и служебные (APPEND) отношения), при этом необходимо, чтобы не только терм-атрибут патента заявки совпал с термом из патента, но и родительский терм атрибута (рис. 10).

В примере (рис. 9) у патента-заявки 4 атрибута, при совпадении терма в патенте-заявке и патенте коэффициент подобия увеличивается на 1/4. Если коэффициент подобия меньше 1/3, то дальнейшее сравнение не производится. В патенте-заявке 3 терма из 4-х на данном уровне совпадают с термами атрибутов в патенте при одинаковых родительских термах.

Проверяем несовпадающий терм на значимость, коэффициент IDF терма «insulating» меньше порогового значения, слово имеет высокую значимость, его необходимо учитывать при определении коэффициента подобия. Таким образом, коэффициент подобия по 2-му уровню равен 3/4.

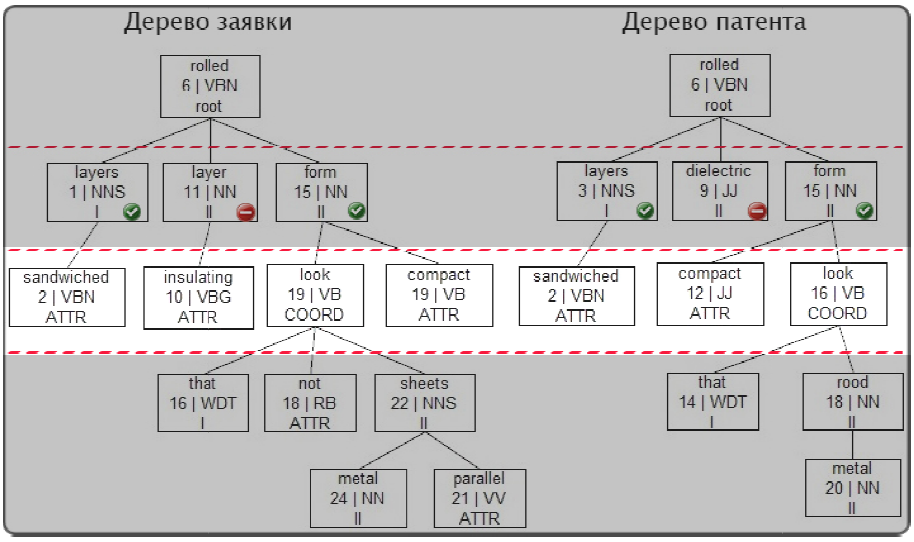


Рис. 9. Сравнение по атрибутам (второму уровню)

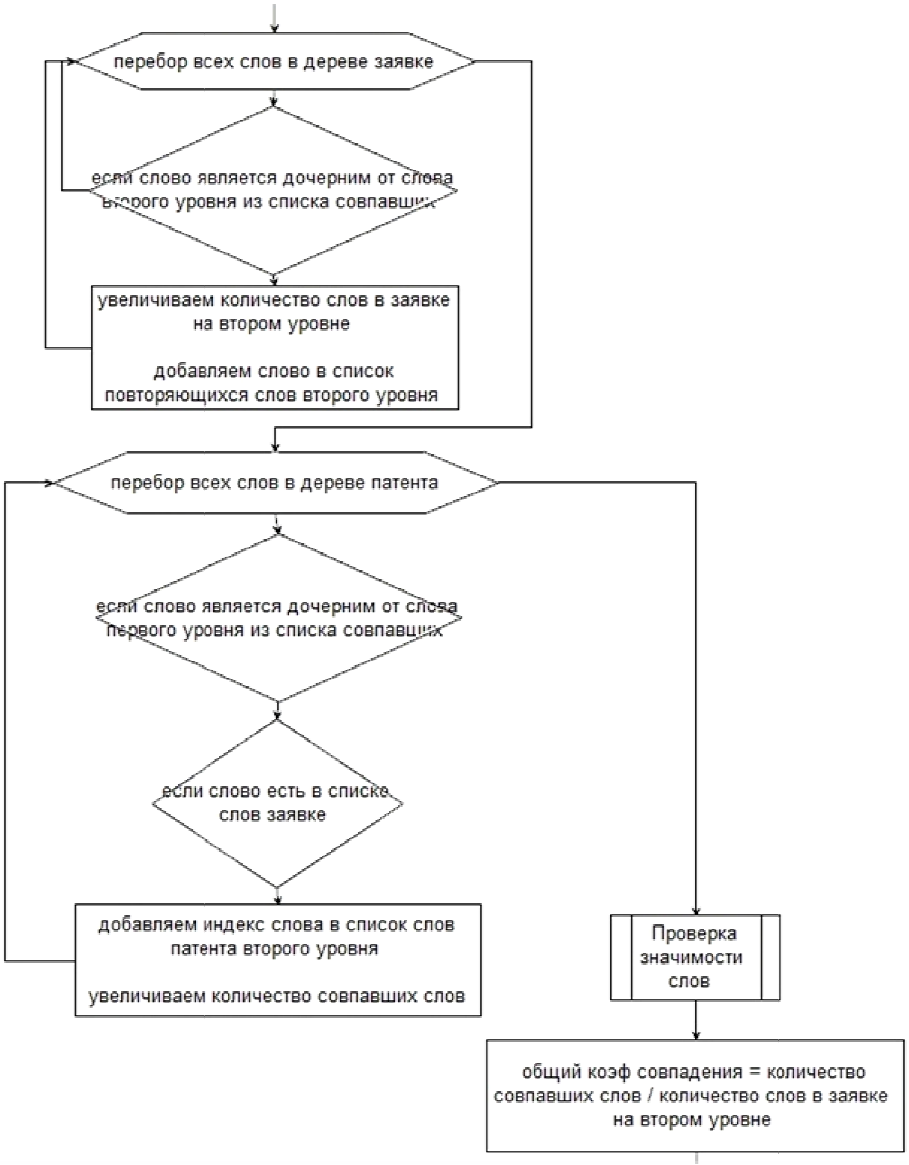


Рис. 10. Алгоритм сравнения по 2-му уровню

Четвертый этап сравнения семантических деревьев

Последний третий уровень содержит сравнение дополнительной уточняющей информации (рис. 11).

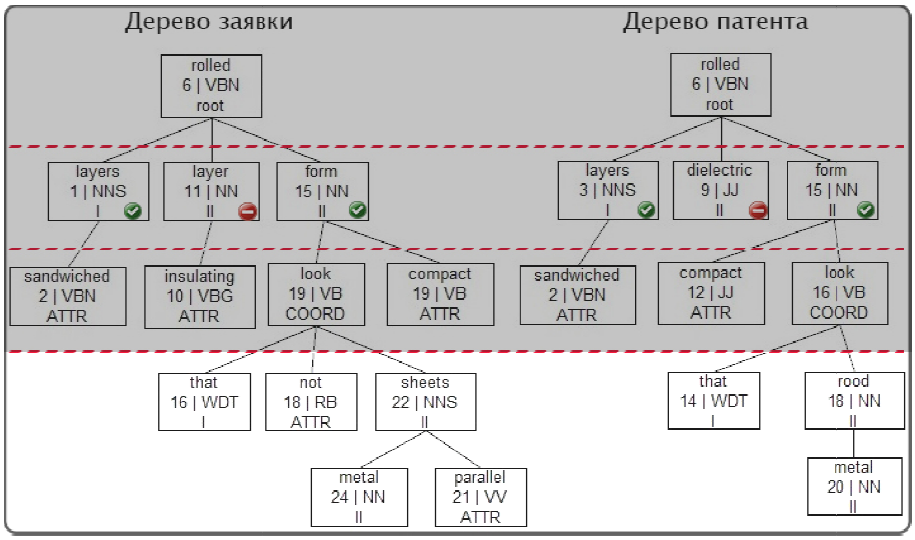


Рис. 11. Сравнение по третьему уровню дерева

Сравнение производится на основе расстояния Левенштейна [7]. Этот коэффициент определяет минимальную последовательность действий, которые необходимо проделать для получения из одной последовательности объектов другую. Действиями являются: вставка (I), удаление (D), замена (R), совпадение (M). Если у одинаковых атрибутов есть дочерние ветви, то эти ветви раскладываются в линейную цепочку и определяется расстояние Левенштейна (рис. 12).

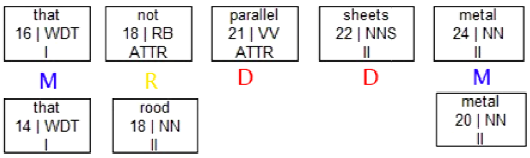


Рис. 12. Расстояние Левенштейна

Введем понятие коэффициента подобия двух семантических деревьев на 4-м этапе:

$$K^{4}{}_{\text{подоб}}(St_k, St_l) = \frac{LevLen}{N_i}, \qquad (2)$$

где St_k, St_l – семантические деревья, связанные соответственно с k-м и l-м предложениями в ПОЗ и патенте соответственно; $LevLen$ – расстояние Левенштейна для сравниваемых деревьев; N_i – число термов для семантического дерева St_k ПОЗ.

В заявке 5 слов дополнений, при совпадении слов коэффициент подобия увеличивается на 1/5. При любом коэффициенте подобия на 3-м уровне патент будет участвовать в ранжировании, значение этого коэффициента влияет только на место в итоговом списке. В примере расстояние Левенштейна равно 2 (MRDDM), коэффициент подобия равен 2/5.

Коэффициент подобия двух семантических деревьев ПОЗ и патента:

$$K_{\text{подоб}} = \sum_{z=1}^{4}\left(K^{z}{}_{\text{подоб}} \times 10^{4-z}\right). \qquad (3)$$

Коэффициент подобия ПОЗ и патента:

$$K_{\text{п}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{st}}\left(\max_{j}\left(K_{\text{подоб}}(St_i, St_j)\right)\right)}{\max_{i}\left(K_{\text{п}}\right)}, \qquad (4)$$

где i, j – индексы перебора семантических деревьев соответственно в описании ФЭ (ПОЗ) и формуле изобретения патента; N_{st} – число семантических деревьев ПОЗ.

Проверка эффективности системы

В качестве программной реализации системы выбрано Web-приложение, серверная часть которого реализована на Java. Для обеспечения динамической работы страницы, работающей с Java-кодом, выбрана технология JavaServer Pages (JSP). В качестве Web-сервера используется Apache Tomcat (версия 8.0.27), поддерживающий технологию JSP.

В качестве показателя эффективности системы предложен критерий Recall (полнота) по-

иска для выборок из топ 5, 10, 20, 50, 100, 500 наиболее релевантных найденных патентов.

Полнота (recall) вычисляется как отношение найденных релевантных документов к общему количеству релевантных документов (5):

$$\text{Recall} = \frac{a}{a+c} \times 100\ \%, \qquad (5)$$

где a – количество релевантных найденных документов; c – количество релевантных ненайденных документов.

Полнота характеризует способность системы находить нужные пользователю документы, но не учитывает количество нерелевантных документов, выдаваемых пользователю. В тестах показатель Recall будет равен 100% при вхождении искомого патента в выборку и 0% – при отсутствии в выборке. В таблицах указано среднее значение Recall на 20 тестах.

Для определения максимальной эффективности, необходимо провести тесты различных вариаций алгоритма. Это сравнение по 0-му уровню только ROOT-вершин или любых предикатов (табл. 2) и с применением проверки значимости слов и без проверки (табл. 3).

Таблица 2

Сравнение по 0-му уровню

Recall (%)	Recall500	Recall100	Recall50	Recall20	Recall10	Recall5
Сравнение ROOT-вершин	75	70	65	60	60	40
Сравнение предикатов	95	95	80	75	70	65

В результате тестирования, наибольшую полноту показал алгоритм сравнения 0-го уровня по предикатам.

Таблица 3

Результат применения проверки значимости слов

Recall (%)	Recall500	Recall100	Recall50	Recall20	Recall10	Recall5
С применением проверки значимости	95	95	90	85	75	70
Без применения проверки значимости	95	95	85	80	70	65

Проверка значимости слова повышает полноту поиска. Происходит это из-за более точной оценки подобия деревьев, так как незначимые, общеупотребимые слова не влияют на ранжирование патентов.

Для тестирования языковых версий был выбран алгоритм со сравнением предикатов по 0-му уровню и проверкой значимости слов (табл. 4).

Таблица 4

Результаты работы русско- и англоязычной версии

Recall (%)	Recall500	Recall100	Recall50	Recall20	Recall10	Recall5
Английский язык	95	95	80	80	75	70
Русский язык	95	95	80	80	70	65

Результаты проверки для русскоязычной и англоязычной версии показали незначительно меньший показатель полноты поиска в русскоязычной версии, что объясняется сложностью русской грамматики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коробкин, Д.М., Фоменков, С.А., Давыдова, С.В.* Поиск описаний физических эффектов в патентном массиве. Вестник компьютерных и информационных технологий. 2016. № 5(143). С. 3–11.

2. *Фоменкова, М.А., Коробкин, Д.М., Фоменков, С.А., Копасов, А.Н.* Семантический анализ текста для выявления описаний физических эффектов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 3(182). С. 91–95.

3. *Коробкин, Д.М., Фоменков, С.А., Мармура, А.С., Болдырев, В.А.* Методика предварительной обработки патентного массива для задач извлечения структурированных физических знаний // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 3(182). С. 40–47.

4. *Коробкин, Д.М., Колесников, С.Г., Фоменков, С.А.* Методика извлечения практического применения физических эффектов из патентных документов // Информационные технологии в науке, образовании и управлении : матлы XLIV Международной конференции и XIV Международной конференции молодых ученых IT + S&E`16 / под ред. Е.Л. Глориозова. 2016. С. 92–100.

5. *Mel'čuk, I.* Aspects of the Theory of Morphology. Berlin; New York : Mouton de Gruyter, 2006. 616 p.

6. *Коробкин, Д.М., Фоменков, С.А.* Автоматизированная методика извлечения структурированных физических знаний в виде физических эффектов из текстов на естественном английском языке. Известия Волгоградского государственного технического университета. 2011. Т. 10. № 3(76). С. 116–120.

7. *Левенштейн, В.И.* Двоичные коды с исправлением выпадений, вставок и замещений символов. Доклады Академий Наук СССР, 1965. 163.4:845–848.

УДК 004.62

Т. М. Ч. Нгуен, М. В. Щербаков

МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЕЙ FACEBOOK НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РЕАКЦИЙ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ТЕКСТА*

Волгоградский государственный технический университет

m.trang91@gmail.com, maximshcherbakov@gmail.com

В данной работе рассматривается метод формирования профиля пользователей социальной сети Facebook на основе анализа чувствительности текста и реакций пользователей. Метод основан на формировании списка ключевых слов и определения их эмоциональной оценки: позитивной или негативной. Кроме этого определяется время активности пользователя в разрезе дня недели и времени. Разработано программное решение, реализующее метод. Проведены исследования на выборке из 200 пользователей, для которых построены соответствующие профили.

Ключевые слова: профиль пользователя, Facebook, анализ чувствительности текста, эмоциональная реакция, время активности.

T. M. T. Nguyen, M. V. Shcherbakov

A METHOD FOR FACEBOOK USERS PROFILE CREATING BASED ON EMOTIONAL FEEDBACK AND TEXT SENTIMENT ANALYSIS

Volgograd State Technical University

The paper describes a proposed method for Facebook user profile creating based on the text sentiment analysis and analysis of emotional user reactions. The method contains on a keywords list creating and identifying positive or negative emotional attitude. In addition, the method determines the time of user activity in the context of the day of week and time. The software solution implements the method is also described here. The case study is shown where 200 users profiles were built.

Keywords: user profile, Facebook, user interests, text sentiment analysis emotional feedback, user activity.

Введение

Для повышения эффективности продаж и сокращения затрат на рекламу продукции многие компании заинтересованы в выявлении и анализе предпочтений покупателей. Как правило, такая информация может собираться различными способами, в том числе и с применением методик явного сбора при использовании которых, осуществляется непосредственное взаимодействие с пользователями. Зачастую такие подходы являются неэффективными по ряду причин: в частности, по причине различного отношения людей к шкалам оценки. Следовательно, необходимо искать новые подходы к сбору данных о предпочтениях пользователей.

В настоящее время социальные сети, такие как Facebook, Twitter, Google+, Вконтакте стали основными платформами для самовыражения. Facebook – самая популярная социальная сеть, у которой 1.6 миллиарда пользователей [1]. Например, структурированные данные из Facebook могут использоваться для классификации поль-

© Нгуен Т. М. Ч., Щербаков М. В., 2017

* Работа частично поддержана РФФИ (проект № 16-37- 60066_мол_дк) и грантом Президента РФ (проект № МД-6964.2016.9).

зователей по областям интересов. В отличие от Твиттера, в котором публикация ограничена с 140 символов, Facebook поддерживает создание сообщений до 63.206 символов [2]. В основе классификации лежит понятие профиля пользователя. Профиль содержит информацию о пользователе: уникальный идентификатор, имя, интересы, некоторые особенности поведения и т.д. Самой важной информацией с точки зрения компаний являются интересы пользователей и их свойства поведения, которые могут быть выражены в виде ключевых слов, информации о времени активности пользователя. Понимание такой информации с точки зрения маркетинга позволяет формировать целевую рекламу более эффективной.

Эта работа посвящена проблеме формирования профилей пользователей Facebook на основе анализа текста публикаций, комментариев, «лайков» пользователя. В ходе работы были проанализированы существующие исследования сентиментного анализа текстовых сообщений на основе данных пользователя социальных сетей Twitter, Facebook [3]; подбора ключевых слов пользователей с использованием инструмента Linguistic Inquiry and Word Count и модели поведения пользователей социальных сетей [4–12].

Сбор данных

Для автоматизации сбора данных была создана программа на языке высокого уровня C#. Сбор данных о публикациях, лайках и комментариев осуществляется посредством запроса с использованием API Facebook GraphAPI [15]. Результаты поступают в файле в формате JSON [16].Отметим, что в работе рассматриваются тексты на английском языке.

Далее полученные данные заносятся в базу данных. В работе использовалась СУБД MSSQL Server.

Подбор ключевых слов пользователей

Из текста сообщения публикаций/комментариев выбираются ключевые слова с использованием лексико-грамматического анализа. В данной работе использовалась библиотека StanfordPOSTagger для разбора текстовых сообщений. Для каждого слова определялась часть речи и осуществлялась маркировка соответствующим POS тегом: глагол, существительное, прилагательное и так далее.

StanfordPOSTagger позволяет оперировать 36 тегами [17], но в работе использовались 12 тегов для подбора ключевых слов. Выбранные теги представлены в табл. 1.

Таблица 1

Теги, используемые в работе

Группа тегов	Теги (часть речи)
Имя существительное	NNS – существительное, мн. ч., NNPS – существительное, собств., мн. ч., NN – существительное., ед. ч., NNP – существительное собств., ед. ч.
Глагол	VB – глагол, инфинитив, VBD – глагол, прошлое время, VBG – глагол, герундий, VBN – глагол, причастие прошедшего времени, VBP – Verb, non-3rdperson singular present, VBZ – Verb, 3rdperson singular present
Имя прилагательное	JJ – прилагательное
Символ	SYM – символ

Рассмотрим следующий пример анализа текстового комментария и формирования ключевых слов. Пусть имеется фраза.

When you pay more attention to POKEMON GO than to your GIRLFRIEND😂😂

После лексико-грамматического анализа этого текста получен следующий результат.

When/WRB you/PRP pay/VBP more/JJR attention/NN to/TO POKEMON/NNP GO/NNP than/IN to/TO your/PRP$ GIRLFRIEND/NN

Отметим, что результатом являются ключевые слова из этого предложения, такие как: attention//NN, POKEMON//NNP, GO//NNP, GIRLFRIEND//NN

Алгоритм определения сентиментальности публикаций и комментариев пользователей

Данные, полученные в результате запроса включают в себя множество служебной информации, поэтому служебную информацию отделяют от нужной. Таким образом, после выделения основной информации для слов из текстов на английском языке определяются части речи. Обозначим выделенное слово как w_i.

Публикация (post) состоит из следующих полей: идентификатор (ID), имя пользователя, текст сообщения, реакции, комментарии [14]. Для анализа используются все перечисленные поля. Реакции разделяются на 6 видов: LIKE (нравится), LOVE (люблю), WOW («ух-ты»), HAHA (смешно), SAD (грустно), ANGRY (зол). Реакции можно разделить на позитивные и негативные реакции. К позитивным отнесем: LIKE, LOVE, WOW, HAHA. К негативным: SAD, ANGRY

Далее определяется эмоциональная окраска выделенных слов, для которых определена часть речи $S_i(w_i,D)$, где D – словарь.

$$S_i(w_i, D) = \begin{cases} NEG, & \text{если слово } w_i \text{ отмечен в } D \text{ как негативное} \\ POS, & \text{если слово } w_i \text{ отмечен в } D \text{ как позитивное} \end{cases}$$

Для определения эмоциональной окраски текста (сентиментальности) текста публикаций или комментариев предлагается следующий алгоритм:

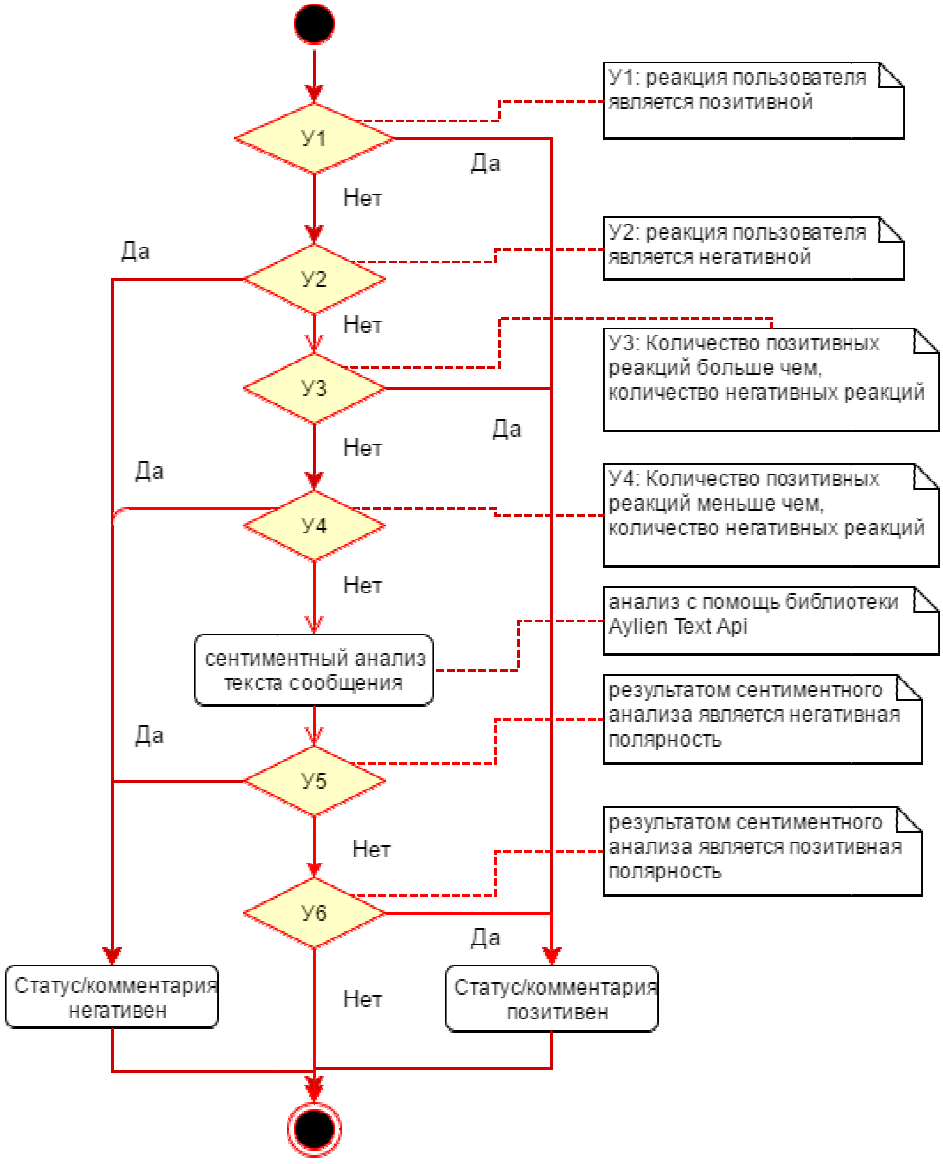


Рис. 1. Алгоритм определения чувствительности текста публикации или комментариев пользователей

Далее формируется список ключевых слов **w** для каждого из слова со следующим набором атрибутов: часть речи, эмоциональная окраска (NEG/POS), число употреблений ключевого слова и ID пользователя, использующего ключевое слово (w).

Извлечение информации о времени активности пользователя из Facebook

Информация об активности пользователя во времени получается в результате запроса с использованием API Facebook. На рис. 2 представлен ответ на запрос в формате JSON [15].


```
"data": [
  {
    "created_time": "2016-12-04T12:57:49+0000",
    "id": "649983088382232_1172399352807267"
  },
```


Рис. 2. JSON ответ на запрос о времени составления сообщения:
created_time – временная отметка действия пользователя в Facebook-е; id – идентификатор действия

Анализ чувствительности текста с использованием AylienText

В соответствии с алгоритмом оценки текста публикация или комментария (рис. 1), если пользователь нажимает кнопку положительной реакции и в публикации присутствует текст, то слова текста будут отнесены к списку позитивных ключевых слов. Рассмотрим случай, если имеется текст публикации, но пользователь не нажал кнопку реакции. Для оценки текста сообщения требуется провести анализ чувствительности текста. Данный анализ осуществляется с использованием библиотеки AylienText. В табл. 2 представлены примеры анализа чувствительности текста.

Таблица 2

Примеры результата анализа чувствительности текста

Сообщение	Позитивный / Негативный	Уверенность
It's very hot today ☺	Положительный (POS)	0.669
It's very hot today!	Положительный (POS)	0.889
It's very hot today :(	Негативный (NEG)	0.468
It's very hot today :(:'(	Негативный (NEG)	0.838

Таким образом, отнесение текста сообщения к позитивному или негативному определяется знаками и символами, которые используются пользователем.

Программная система формирования профиля пользователей социальной сети Facebook

Для реализации предлагаемых подходов и их интеграции было разработано программное решение. На рис. 3 представлена архитектура программного решения.

С помощью программного решения была собрана информация по ряду пользователей. Самыми популярными позитивными ключевыми словами оказались: «happy», «love», «life», «world», «good», «thank». Самыми популярными негативными ключевыми словами оказались:«hate», «cry», «sad». После обработки данных о времени активности пользователей было определено распределение употребления того или иного ключевого слова в Facebook с дискретизацией по часу от 00.00 до 24.00 и по каждому дню недели. На рис. 4 представлена «тепловая карта» активности пользователя по дням неделям и часам.

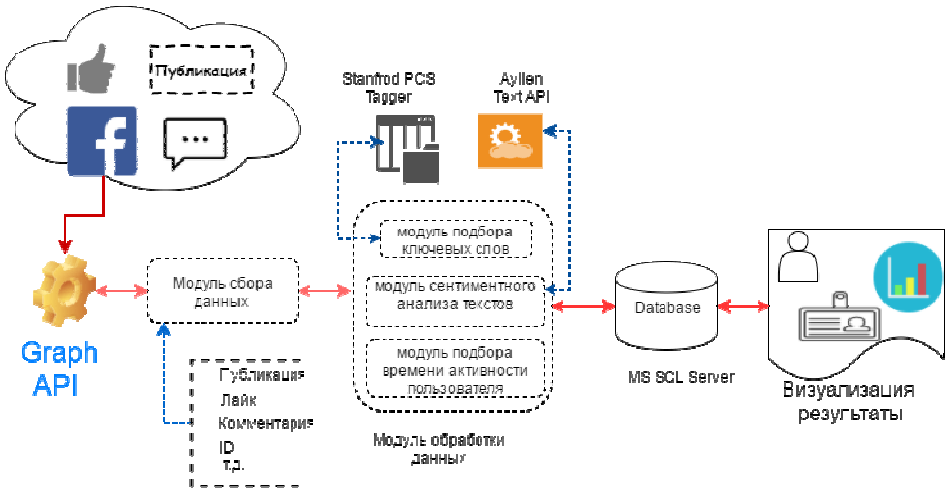


Рис. 3. Архитектура программного решения формирования профиля пользователей Facebook

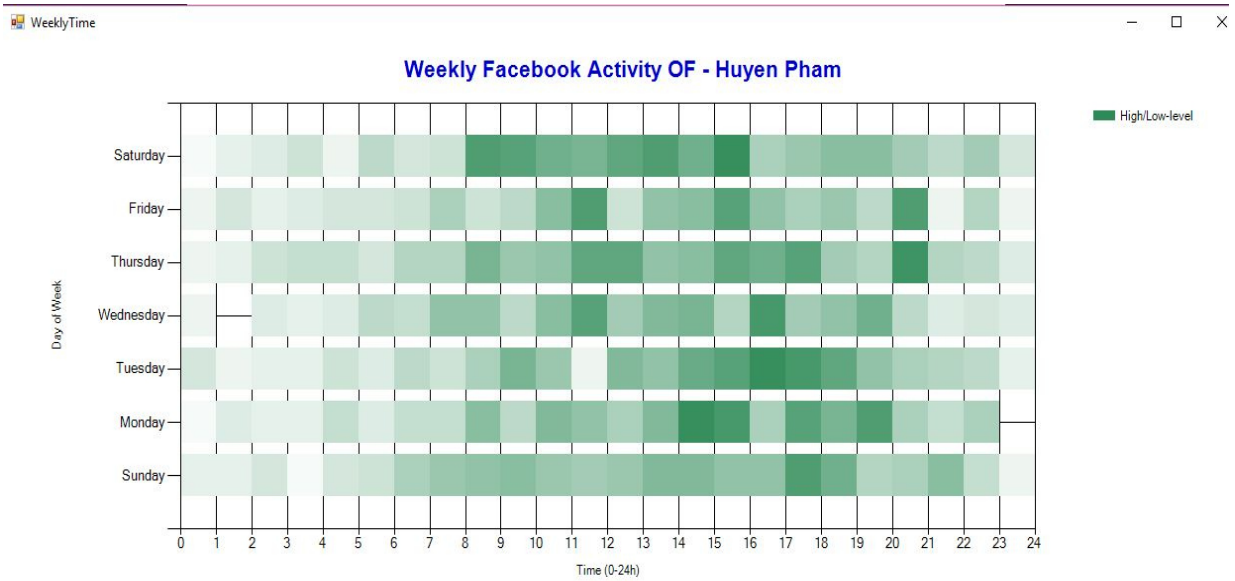


Рис. 4. Время активности пользователя «HuyenPham» в социальной сети Facebook

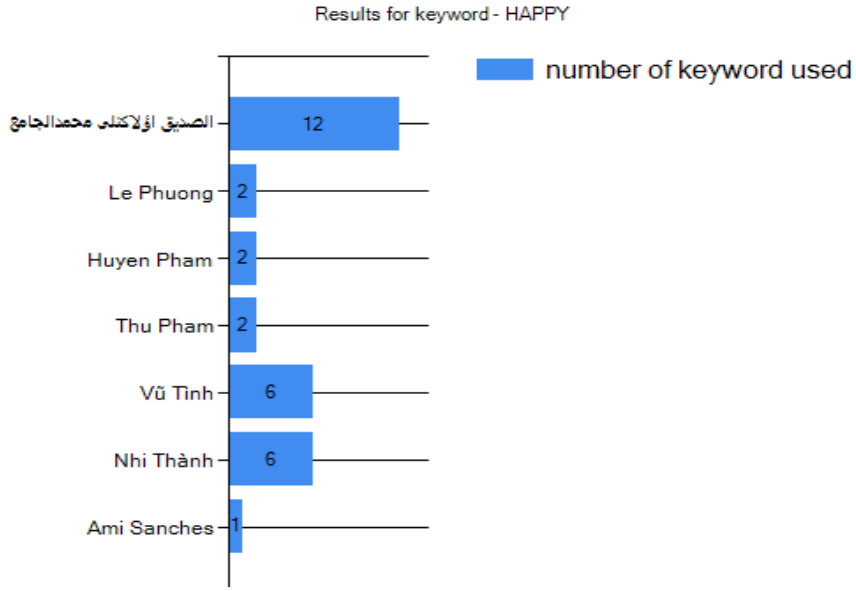


Рис. 5. Диаграмма частоты использования ключевого слова «Happy»

Далее был произведен поиск пользователей, ключевые слова которых частично совпадают. После получения записей, формируется список пользователей, число их ключевых слов. На рис. 5 представлена частотная диаграмма использования определенного ключевого слово (здесь – «Happy»).

В данной работе испытание предлагаемого метода выполнялось на выборке из 200 пользователей (125 мужчин и 75 женщин). Всего анализировалось 141148 сообщений об обновлении статусов. В табл. 3 отражена статистика популярных ключевых слов пользователей по долям использования (отношение числа используемого ключевого слова к общему числу ключевых слов).

Таблица 3

Статистика употребления популярных ключевых слов

Ключевое слово	Процент использования	Мужчина (%)	Женщина (%)
Thank	3%	25%	75%
Believe	1.5%	37%	63%
Love	9.5%	46%	54%
Happy	5.4%	40%	60%
Good	6.18%	37.5%	62.5
World	3.2%	38.5%	61.5%
Life	6%	20%	80%
Everyone	5.2%	50%	50%

Хотя в экспериментах число мужчин было больше чем женщин, тем не менее, женщины в выборке чаще используют слова.

Заключение

В данной работе рассмотрен метод формирования профиля пользователей социальной сети Facebook. Метод основан на формировании списка ключевых слов и определения их эмоциональной оценки: позитивной или негативной. Кроме этого определяется время активности пользователя в разрезе дня недели и времени. Разработано программное решение, реализующее метод. Проведены исследования на выборке из 200 пользователей, для которых построены соответствующие профили.

В настоящее время разработка выполнена для анализа текстов на английском языке. В дальнейшем предполагается доработать программу для анализа текстов на русском и вьетнамских языках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Number of monthly active Facebook users worldwide as of 3rd quarter 2016 (in millions) [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : https://www.statista.com/statistics/264810/number-of-monthly-active-facebook-users-worldwide/

2. 10 Things You Can Fit Into Your 63,206-Character Facebook Status [Электронный ресурс]. – 2012. – Режим доступа : http://mashable.com/2012/01/04/facebook-character-limit/

3. Francisco J. Gutierrez, Barbara Poblete. Sentiment-based User Profiles in Microblogging Platforms [Электронный ресурс] – Режим доступа : http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2791027

4. *Michele Settanni1, Davide Marengo*, Sharing feelings online: studying emotional well-being via automated text analysis of Facebook posts [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа : http://journal.frontiersin.org/article/10.3389/fpsyg.2015.01045/full#h3

5. *Pennebaker, J. W., Booth, R. J., and Francis*, M. E. 2007. Linguistic Inquiry and Word Count: LIWC [Computer software]. Austin, TX: liwc.net.

6. Stanford Log-linear Part-Of-Speech Tagger for .NET [Электронный ресурс]. – Режим доступа : https://sergey-tihon.github.io/Stanford.NLP.NET/StanfordPOSTagger.html

7. *Dejan Markoviki, Sonja Gievska, Michal Kosinski, and David Stillwell*, Mining Facebook Data for Predictive Personality Modeling. //In Computational Personality Recognition, AAAI Technical Report. 2013. WS-13-01.

8. You Are Who You Know: Inferring User Profiles in Online Social Networks [Электронный ресурс]. – 2010. – Режим доступа : http://www.ccs.neu.edu/home/amislove/publications/Inferring-WSDM.pdf

9. Profiling: predicting social anxiety from facebook profiles / K.C. Fernandez, C.A. Levinson, T.L. Rodebaugh // Social Psychological and Personality Science 3 (2012). P. 706–713. doi: 10.1177/1948550611434967

10. Activities on Facebook reveal the depressive state of users / S. Park, S.W. Lee, J. Kwak, M. Cha, B. Jeong // J Med Internet Res (2013). 15:e217. doi: 10.2196/jmir.2718

11. Emotional disclosure on social networking sites: the role of network structure and psychological needs / H. Lin, W. Tov, L. Qiu // Computers in Human Behavior 41 (2014). P. 342–350. doi: 10.1016/j.chb.2014.09.045

12. Towards assessing changes in degree of depression through Facebook / H.A. Schwartz, G. Park, M. Sap, E. Weingarten, J. Eichstaedt, M.L. Kern // Poster Workshop on Computational Linguistics and Clinical Psychology: From Linguistic Signal to Clinical Reality (2104). P. 118- 127. doi: 10.3115/v1/w14-3214

13. AylienTextAPI[Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : https://developer.aylien.com/

14. FacebookPost [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : https://developers.facebook.com/docs/graph-api/reference/v2.7/post

15. Graph API [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : https://developers.facebook.com/docs/graph-api/using-graph-api/#fieldexpansion

16. Introducing Json [Электронный ресурс]. – 2016. – Режим доступа : http://www.json.org/

17. PennTreeBankIIwordtags [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://web.mit.edu/6.863/www/PennTreebankTags.html

УДК 623.618623.4.11

А. В. Старусев, В. И. Лобейко, С. А. Горемыкин

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ПОЛУНАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Астраханский государственный университет

starusev-av@yandex.ru

В статье предлагается системный подход к организационным и техническим вопросам эксплуатации средств моделирования при испытаниях автоматизированных систем управления. Данный подход позволяет оптимизировать подготовку средств моделирования к проведению имитационных экспериментов.

Ключевые слова: имитационный эксперимент, автоматизированная система управления, моделирование, испытания, надежность.

© Старусев А. В., Лобейко В. И., Горемыкин С. А., 2017

A. V. Starusev, V. I. Lobeyko, S. A. Goremykin

THE SYSTEM APPROACH TO SUPPORT OF RELIABILITY AND SAFE MAINTENANCE OF SIMULARS AT SEMIFULL-SCALE IMITATIVE TESTS THE AUTOMATED MANAGEMENT SYSTEMS

The Astrakhan State University

In article the system approach to organizational and technical questions of maintenance of semulars is offered at tests of the automated management systems. The given approach allows to optimize preparation of simulars for carrying out of imitative experiments.

Keywords: the imitative experiment, the automated management system, modeling, tests, reliability.

Введение

При разработке автоматизированных систем управления (АСУ) важное значение имеют испытания на различных стадиях разработки. Целью испытаний на любой стадии является оценка выполнения системами требований, предъявляемых к ним.

Постановка задачи

В литературе [1, 2] проблема испытаний рассматривается с позиций теории надежности, разрабатывающей общие методы расчета надежности сложных систем. Основанная на методах теории вероятностей и математической статистики [3, 4, 5], теория надежности устанавливает закономерности возникновения отказов в системах и методы их прогнозирования, определяет способы повышения качества систем на различных этапах их создания. Однако теория надежности решает только частные задачи, возникающие при создании систем, так как исследование системы и выбранные методы проведения испытаний направлены на получение оценки $\overline{F}(t) = 1 - F(t) = P_H\{\varphi \geq t\}$, представляющей собой надежность системы. Здесь $\overline{F}(t)$ – надежность системы, то есть вероятность того, что система безотказно проработает время, большее или равное t, $F(t)$ – функция распределения времени наступления отказа в системе, то есть $F(t) = P_H\{\varphi < t\}$.

Моделирование является важнейшим процессом сопровождения разработки и испытания АСУ. В результате моделирования расширяются значения о системе и условиях ее функционирования. При полунатурном моделировании вычислительные машины, на которых реализована математическая модель АСУ, взаимодействуют с отдельными реальными ее элементами, точное математическое описание которых весьма сложно (рис. 1).

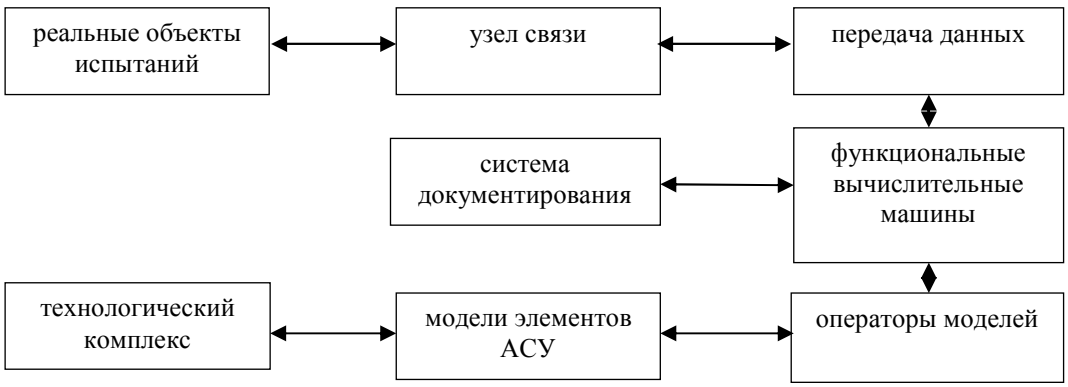


Рис. 1. Схема взаимодействия средств моделирования с реальными объектами АСУ при полунатурных испытаниях

В данной статье полунатурные испытания АСУ рассматриваются как процесс совершенствования системы путем решения в ходе подготовки к испытаниям и при их проведении всех возникающих проблем.

При организации испытаний важно учитывать все составляющие, участвующие в процессе испытаний (рис. 2).

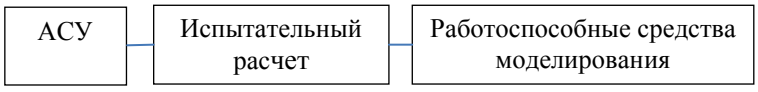


Рис. 2. Составляющие, учитывающие в процессе испытаний

Поэтому возникла необходимость рассмотреть процесс испытаний с позиции так называемого системного подхода. Полунатурные испытания АСУ включают большое число взаимосвязанных и взаимодействующих составляющих, поэтому к ним вполне применимое понятия сложной системы «человек-машина».

Более того, по мере совершенствования технических характеристик и возможностей современной техники усложняется как содержание эксплуатации, так и ее организация.

Так, обслуживание и использование средств моделирования в настоящее время носит преимущественно групповой, комплексный характер.

Системы и техническое оборудование, объединенные в единый комплекс, обусловливают применение для проверки функционирования, оценки технического состояния и обеспечения требуемой эксплуатационной надежности не только традиционных методов осмотра аппаратуры, но и более глубокого исследовательского подхода с применением различных средств инструментальной проверки. Другими словами, эксплуатацию средств моделирования в ходе полунатурных испытаний АСУ, в целом можно рассматривать как сложную организационно-техническую систему, поскольку в основе ее лежит тесно взаимосвязанные организационные и технические вопросы. При рассмотрении этой взаимосвязи наиболее целесообразно применить системный подход.

Метод решения

С точки зрения системного подхода одним из важных вопросов эксплуатации средств моделирования в ходе полунатурных испытаний АСУ является обеспечение надежности аппаратуры и безопасности ее эксплуатации.

Для того чтобы выработать конкретные меры по обеспечению надежности эксплуатируемых средств моделирования и безопасности их обслуживания, производится отбор отказов (фактов, событий) из имеющейся статистики либо вероятных отказов.

После отбора, группирования по важности начинают использовать отбор отказов для отработки соответствующих предупредительных мер. Системный подход к отбору вероятных отказов предполагает последовательность, которая может быть представлена схемой (рис. 3).

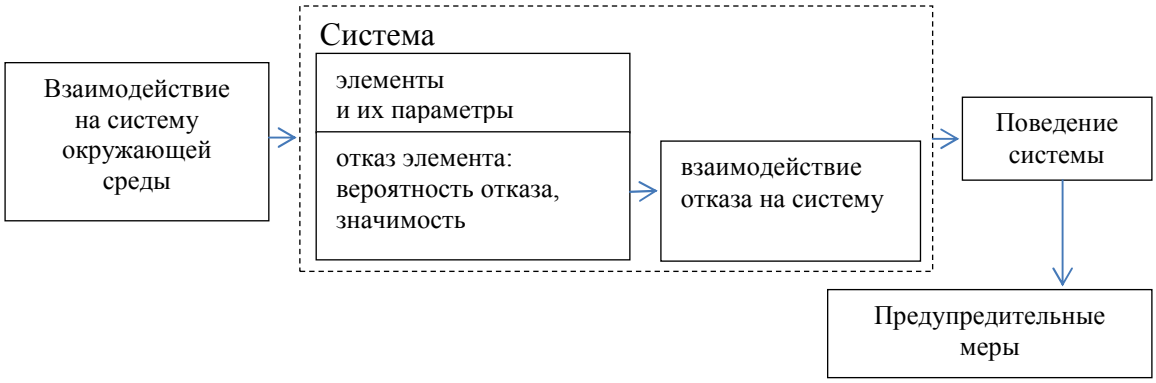


Рис. 3. Системный подход к отбору вероятных отказов системы

В этом случае мы изучаем не сам отказ, а его место в соответствующей системе и воздействие на нее. Условно убирая из системы элемент, следим за теми последствиями, которые может вызвать такое изъятие, исходя из расчетной взаимосвязи элементов в рассматриваемой организационно-технической системе. Таким образом, системный подход позволяет видеть существенное в самом малом, то есть выявлять жизненно важные элементы, порой внешне скрытые и потому недостаточно контролируемые. Значение этого малого зависит от того, что именно выделяется в систему, подсистему или ее часть.

Если рассматривать систему испытатель (оператор) – моделирующая установка, то в этой системе исключительно ответственное место отводится надежности управления установкой. Поэтому перечень мер, которые бы во всех случаях гарантировали высокое качество работы, тоже должен представлять собой устойчивую систему. С этой целью для выполнения технического обслуживания средств моделирования назначаются, как правило, подготовленные специалисты. После каждого технического обслуживания аппаратуры проводится контроль готовности средств моделирования (моделирующей установки) к полунатурным испытаниям.

Системный подход и в этом случае дает возможность детально разобраться, найти и выделить все важные элементы, их взаимосвязи и принять эффективные меры по усилению рассматриваемой системы до начала полунатурных испытаний АСУ. Более полно системный подход можно представить схематично (рис. 4).

Системный подход требует, чтобы при решении всех вопросов в поле зрения постоянно находилась структурно-содержательная сторона, выявлялись элементы системы и их взаимодействие. Четкое представление о структурно-содержательной стороне области работы по подготовке средств моделирования к полунатурным испытаниям, а также о ее границах всегда способствует выработке оптимальной схемы последовательности действий, помогает более отчетливо представлять сущность процесса. Граница системы – это то, с чем сталкивается в работе каждый испытатель.

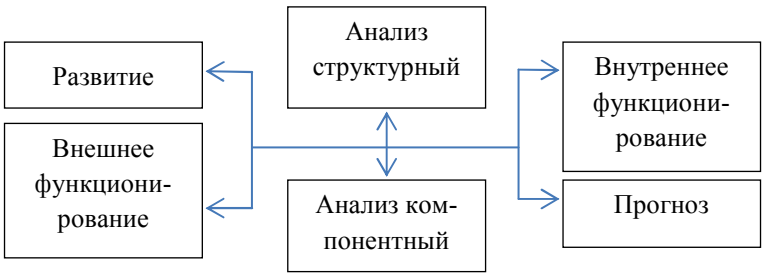


Рис. 4. Схематичное представление подхода

Так, если системы 1 и 2, состоящие из элементов (а, б, в, …, n), как-то отделены одна от другой, то они, естественно, имеют свои границы, а находясь рядом, соприкасаются между собой в каких-то точках (1, рис. 5). Очевидно, если к системе или ее части отнести совокупность каких-либо функций, то и здесь всегда находится установленная испытателем или вытекающая из самого характера системы граница.

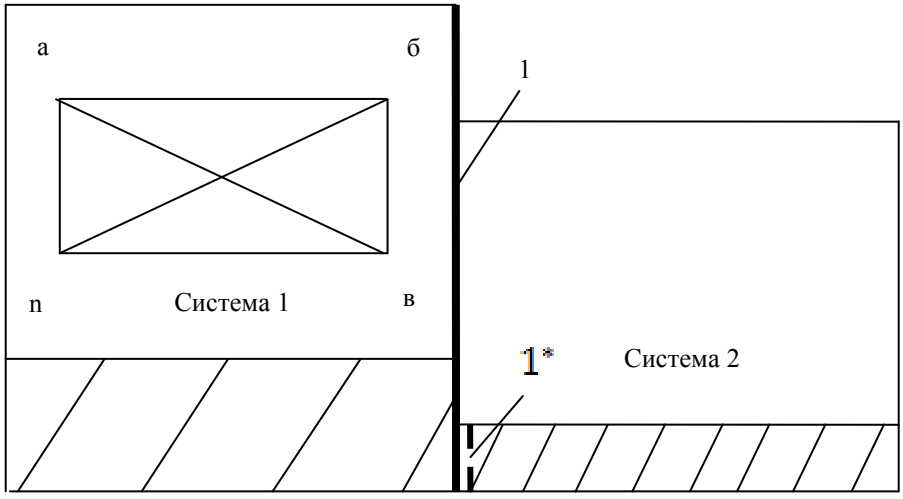


Рис. 5. Схема взаимодействия систем при полунатурных испытаниях

На практике нередко из-за нечетко выявленных границ результат снижается. А если и выявляются, то не отлаживаются их «стыки», то есть переходные места на границе системы, где функции одной системы прекращаются, а другой начинаются или взаимно передаются.

Вопросы о границах системы, даже если рассмотреть его в очень узком плане, скажем относительно исполняемых обязанностей, имеет повседневное практическое значение. Примерами таких переходов в эксплуатации могут быть границы между смежными службами, обслуживающими одни и те же технические системы [6], или смежными исполнителями, где нередко выявляется нечеткая передача функций, несогласованные действия, разного уровня требования (1^*, рис. 5).

Если это касается исполнителей, то одним из методов устранения данного недостатка является проведение тренажей, тренировок по отработке заданий, которые бы полностью учитывали всесторонние требования. Непосредственно на средствах моделирования граница прослеживается, например, при контакте вычислительных систем и систем связи [7]. Отказ одной из них может привести к нарушению условий проведения полунатурных экспериментов. Чтобы обнаружить несовместимость этих двух систем, необходимо условно объединить в одну общую. Если же их состояние расценивать раздельно, то каждая из них, сама по себе, может считаться исправной. Чтобы обеспечить «стык» этих систем в эксплуатации, требуется предварительно проконтролировать средства обслуживания перед их допуском к проведению полунатурных экспериментов.

С позиции системного подхода, к примеру, четко выявляется влияние на надежность и безопасную эксплуатацию средств моделирования отказ одного из элементов или его сбой в работе [8]. В таких случаях системный подход дает возможность разобраться в причине и принять эффективные меры для восстановления взаимодействия всех средств моделирования, задействованных при полунатурных испытаниях АСУ.

Выводы

Предлагаемый подход позволяет оптимизировать подготовку средств моделирования к качественному проведению полунатурных экспериментов. Он способствует своевременному выявлению нарушившихся связей между задействованными в полунатурных имитационных экспериментах средствами моделирования и до проведения экспериментов их восстановить. Данный подход применим для обеспечения надежности и безопасной эксплуатации в разных взаимодействующих технических системах, что позволяет говорить об его универсальности в данной предметной области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бессонов, А.А.* Прогнозирование характеристик надежности автоматизированных систем / А.А. Бессонов. – М.: Энергия, 1971. – 152 с.

2. *Ушакова, И.А.* Оптимальные задачи надежности / И.А. Ушакова. – М.: Знание, 1971. – 48 с.

3. *Александровская, Л.Н.* Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем / Л.Н. Александровская, А.П. Афанасьев, А.А. Лисов. – М.: Логос, 2001. – 206 с.

4. *Барлоу, Р.* Математическая теория надежности / Р. Барлоу, Ф. Прошан ; пер. с англ. // под ред. Б.В. Гнеденко. – М.: Советское радио, 1969. – 487 с.

5. *Липаев, В.В.* Методы обеспечения качества крупномасштабных программных средств. / В.В. Липаев. – М.: СИНТЕГ, 2003. – 520 с.

6. *Лобейко, В.И.* Современные подходы к организации испытаний сложных систем / В.И. Лобейко. – Астрахань : Издательский дом «Астраханский университет», 2006. – 332 с.

7. *Баштанник, Н.А.* Оптимизация путей обмена информацией между элементами АСУ сетевым методом / Н.А. Баштанник, В.И. Лобейко // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. Т. 8. № 6(66). С. 48–51.

8. *Михолап, Л.А.* Метод оценки степени соответствия имитационной модели ее целевому назначению с помощью функциональных критериев / Л.А. Михолап, А.В. Старусев, В.И. Лобейко // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 3(182). С. 17–21.

УПРАВЛЕНИЕ В СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 004.896

А. В. Матохина, Н. В. Харламова, О. А. Шабалина,
Е. В. Тюменцева, Е. К. Угновенок

ПРИМЕНЕНИЕ ИГРОВЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ПРЕПОДАВАНИЯ РУССКОГО ЯЗЫКА КАК ИНОСТРАННОГО В ВУЗЕ*

Волгоградский государственный технический университет
matokhina.a.v@gmail.com, gorkovskaya@mail.ru

В статье рассмотрены особенности преподавания русского языка как иностранного (РКИ). Описана методика преподавания русского языка иностранным студентам, разработанная на подготовительном факультете Волгоградского государственного технического университета. Приводится описание игры, реализующей разработанную методику.

Ключевые слова: игровые технологии, русский язык как иностранный, методика преподавания, обучающая игра.

A. V. Matokhina, N. V. Kharlamova, O. A. Shabalina,
E. V. Tyumentseva, E. K. Ugnovenok

GAME TECHNOLOGIES IN TEACHING RUSSIAN LANGUAGE A SFOREIGN AT HIGH SCHOOL

Volgograd State Technical University

In the paper the peculiarities of teaching Russian as a Foreign language are considered. The teaching technique, developed at Volgograd State Technical University for preparing international students for university study in Russia, is described. Implementation of the technique in an educational game is presented.

Keywords: game-based technologies, Russian as a Foreign language, teaching, technique, educational game.

Введение

Одной из наиболее эффективных подходов к организации современного образовательного процесса является применение игровых образовательных технологий. Обучающие игры применяются в таких различных областях, как экономика, маркетинг, иностранные языки, разработка программного обеспечения для обучения студентов, повышения квалификации сотрудников компаний, самообразования. Особенно эффективно применение обучающих игр в областях, где требуется приобретение и развитие навыков [1, 2].

Компьютерные обучающие игры составляют самостоятельную категорию обучающих игр. Разработка обучающих компьютерных игр является нетривиальной задачей, и не существует общих подходов к ее решению. Компьютерная обучающая игра представляет собой игру, имеющую обучающие цели. С другой стороны, компьютерная обучающая игра может рассматриваться как обучающая система, в которой процесс обучения интегрирован в игровой контент. Основной проблемой при этом является сохранение баланса между игровой и обучающей компонентой [3].

Разработка компьютерных обучающих требует участия не только квалифицированных разработчиков программного обеспечения, но также экспертов в изучаемой предметной области, т.к. эффективность применения обучающих игр в учебном процессе в большой степени зависит от качества обучающих материалов и их соответствия целям обучения.

© Матохина А. В., Харламова Н. В., Шабалина О. А., Тюменцева Е. В., Угновенок Е. К., 2017

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-07-00611\16–а).

В статье представлены результаты работы коллектива авторов по разработке компьютерной игры для обучения русскому языку как иностранному (РКИ), в которой использованы и интерпретированы в игровом контексте учебные материалы, разработанные и в течение ряда лет применяемые на подготовительном факультете Волгоградского государственного технического университета (ВолгГТУ) для подготовки и обучения иностранных студентов.

Особенности преподавания РКИ в вузе

Особенностью преподавания РКИ в вузе является необходимость обучения «с нуля» и отбора лексического и грамматического минимума и последовательности изложения материала с учетом необходимости пребывания в новой культурной и языковой среде. Поэтому основными целями преподавания РКИ являются приобретение коммуникативных навыков, навыков самостоятельной работы в изучение РКИ, формирование мотивации к обучению (поиску информации), создание условий для появления личностной психологической установки, подготовка к обучению и работе в России, сдача сертификационных и квалификационных экзаменов, адаптация к проживанию в России, и т.д.

Для достижения этих целей на подготовительном факультете Волгоградского государственного технического университета разработан комплект учебных материалов (информационно-тематических блоков), обеспечивающий языковую, социальную и культурную адаптацию иностранного студента.

Разработана методика обучения РКИ, основанная на трехуровневой модели обучения (приобретение – демонстрация – применение), которая используется в каждом информационно-тематическом блоке.

Первый этап (приобретение) предполагает традиционные методы обучения, когда преподаватель доносит до учащегося и студента новый лексико-грамматический материал.

На дальнейших этапах (демонстрация и применение) реализация этих программ происходит с помощью интерактивного обучения, при котором обучаемые побуждаются к такой деятельности, которая требует самостоятельного поиска информации.

Разработанная методика в течение ряда лет успешно применяется для обучения иностранных студентов. Однако для обучения новых поколений студентов, ориентированных на IT технологии и использование компьютеров во всех сферах их жизни, актуальным является внедрение в преподавание РКИ компьютерных средств поддержки, и, в особенности, обучающих компьютерных игр.

На сегодняшний день разработано большое количество игр для изучения иностранных языков. Однако игры для изучения РКИ реализованы в большинстве своем в виде аудиторных игр для работы с группой студентов. Для эффективной поддержки процесса обучения РКИ необходима разработка компьютерных игр, учитывающих специфику и цели преподавания РКИ в вузе.

Разработка игры для преподавания РКИ в вузе

Описание структуры обучающего курса

В основу игры положена структура, отработанная в процессе преподавания РКИ на подготовительном факультете ВолгГТУ. Для разработки структуры игры использованы материалы [4–8], эффективность которых апробирована на студентах подготовительного факультета, проходящих обучение по различным направлениям: гуманитарное, экономическое, медицинское и техническое.

Опыт преподавания РКИ показал, что для адаптации студента к проживанию на территории России в первую очередь следует изучать специфику проживания в городе пребывания. В текущей версии игры «Мой город», присутствует раздел «Экскурсия», в котором демонстрируются основные достопримечательности и история Волгограда, в адаптированном варианте. Раздел «Экскурсия» предназначен для ознакомления с важными объектами города и ключевыми историческими событиями. Это сделано с целью культурной ассимиляции в новой для студента среде.

В игре «Мой город»предлагаются задания, наиболее актуальные с точки зрения адаптации на новом месте. В состав игры входят следующие разделы: «Супермаркет», «Поликлиника», «Университет», «Банк», «Общежитие», «Столовая». По каждой теме создан набор заданий. Каждый раздел, в некотором роде, является моделью ситуации, с которой иностранный гражданин может столкнуться в жизни. Проходить раздел игрок может в любом порядке. Это реализовано для того, чтобы предоставить пользователю возможность отработать языковые навыки в ситуациях, с которыми он чаще всего сталкивается в повседневной жизни на новом месте.

Концепция обучающей игры

Функционал игры в виде USECASE-диаграммы представлен на рис. 1. Игра предоставляет пользователю возможность выбрать персонажа, получить и пройти задания по всем уровням и увидеть результаты выполнения заданий. По каждой теме в игре предусмотрена справочная информация.

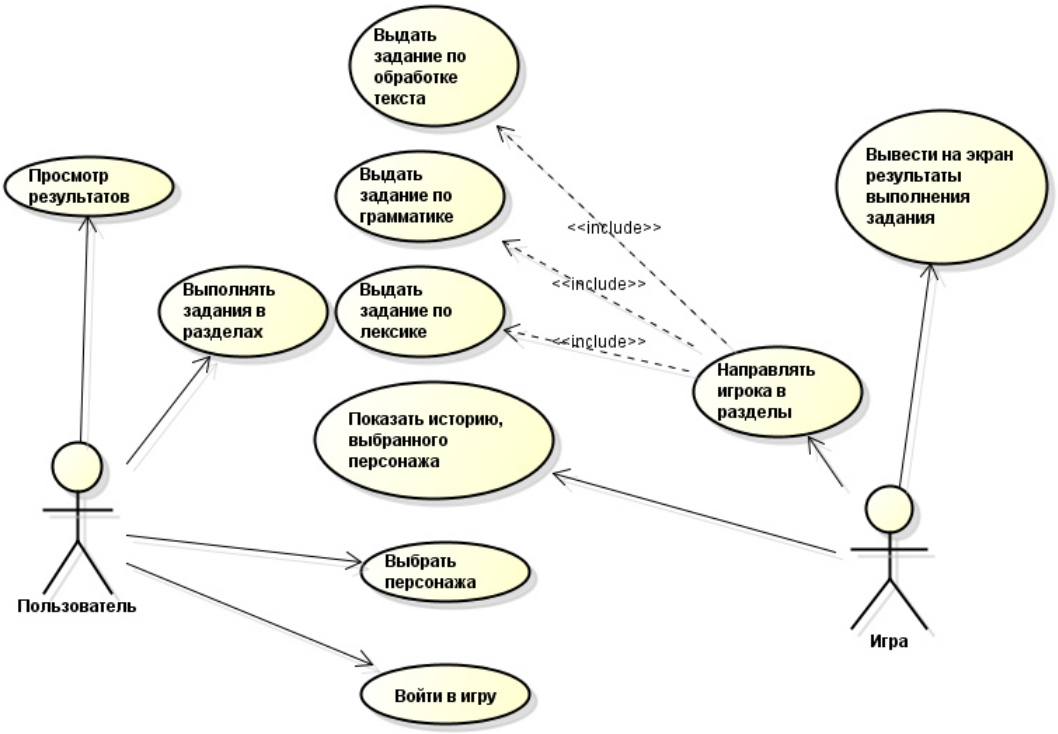


Рис. 1. UseCase-диаграмма

Входными данными для игры являются файлы изображений и текстовые файлы:

– изображения фонов;

– изображения кнопок и персонажей;

– текстовые файлы,содержащие слова/фразы, для присвоения на динамические объекты, такие как кнопки и справочная информация.

Структуратекстового файла, содержащего названия кнопок задания на лексику,имеет следующий вид:

«Кнопка 1, Кнопка 2, … , Кнопка N;Тип кнопки 1, Тип кнопки 2… Тип кнопки N»

Структура текстового файла с подсказкой-переводом имеет следующий вид:

«Слово на русском языке 1 – слово на английском языке 1, слово на русском языке 2 – слово на английском языке 2,…, слово на русском языке N – слово на английском языке N».

Текстовые файлы с заданием хранятся в папке с игрой (рис. 2). Для защиты от несанкционированного доступа (в том числе для защиты от просмотра правильных ответов до прохождения игры) разработан алгоритм шифрации.

Например, входными данными задания по лексике в разделе «Супермаркет» является зашифрованный файл, представленный на рис. 3.

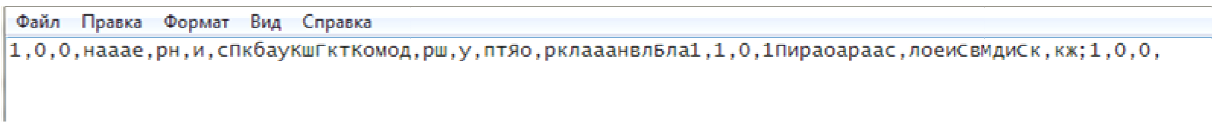


Рис. 2. Зашифрованный файл задания раздела «Супермаркет»

Содержание незашифрованного файла показано на рис. 4.

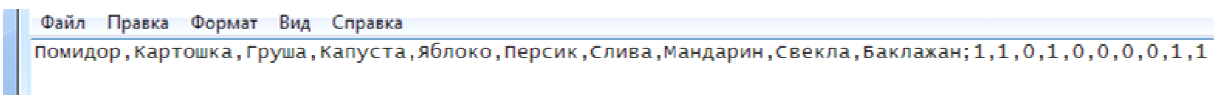


Рис. 3. Файл задания раздела «Супермаркет»

Реализация игры

В начале игры пользователю предоставляется возможность выбрать персонаж и ознакомиться с историей выбранного персонажа. Экранные формы начала игры показаны на рис. 4–7.

Выбрав персонажа, пользователь приступает к выполнению заданий выбранного раздела.

В игре «Мой город» каждый раздел включает три блока заданий: лексика по заданной теме, грамматика отрабатываемого падежа и текст или упражнения, в которых присутствуют глаголы, используемые с этим падежом.



Рис. 4. Стартовая страница игры

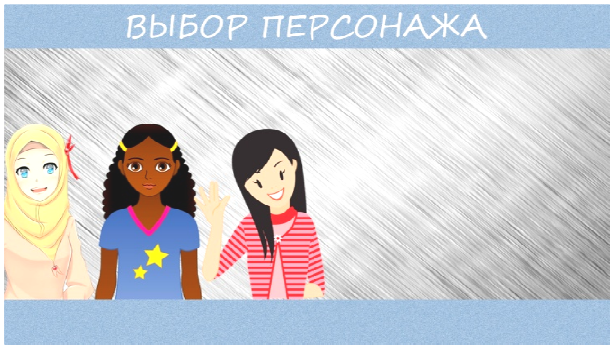


Рис. 5. Страница выбора персонажа игры



Рис. 6. Страница истории персонажа



Рис. 7. Заставка раздела «Мой город»

Например, предлагаются следующие типы заданий:

– сортировать продукты по типам (например, фрукты: яблоки, апельсины и др.; овощи: огурцы, помидоры и др.),

– поместить предмет в соответствии со значением предлогов (например, *в столе*, *на столе* и др.),

– выбрать правильный вариант окончания (например, формы падежа, личные окончания глаголов и др.).

К каждому блоку прикрепляется система подсказок, которая состоит из таблиц. В таблицах представлены: предложно-падежная система, связанная с образованием в речи падежных форм, а так же таблицы, демонстрирующие глаголы к конкретному падежу и др.

Для реализации выбрана среда AdobeFlash-Professional и язык ActionScript 3.0. Программа работает на операционных системахWindows XP, 7,8.

Примеры выполнения заданий

Раздел «Супермаркет». Задание на изучение грамматики

Приведем пример выполнения задания на грамматику из раздела «Супермаркет». В этом задании студенту предлагается выбрать правильный падеж для формирования словосочетания (рис. 8).

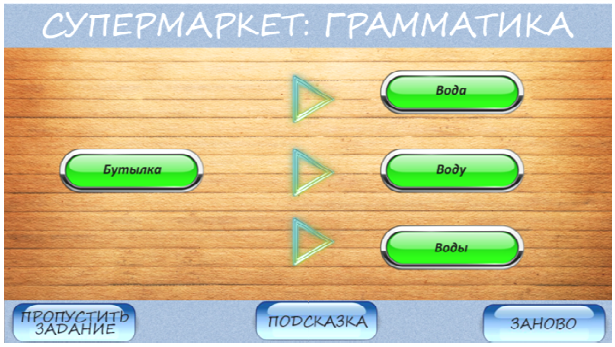


Рис. 8. Отработка грамматики в разделе «Супермаркет»

Завершив уровень, игрок попадает на экран, на котором показан его результат (рис. 9).



Рис. 9. Результат прохождения задания

Задание считывается из файла, который имеет следующую структуру: три слова через запятую, разделитель (точка с запятой), три цифры, обозначающие правильный (1) и неправильные (0) ответы.

Пример: *Бутылка, Вода,Воду,Воды;0,0,*1

Файл зашифрован и его содержание выглядитследующим образом: *,0д,оаВктул,дВуощ; 0Быао,дВы,1.*

Нажав на кнопку «Подсказка», игрок переходит на экран с таблицей с правилами. Экран подсказки показан на рис. 10.



№	паде́ж	вопро́сы	он		она́		оно́
			кто?	что?	кто?	что?	что?
1	Имени́тельный паде́ж	кто? что?	друг	стол	подру́га	вода́	я́блоко
2	Роди́тельный паде́ж	кого́? чего́?	дру́га	стола́	подру́ги	воды́	я́блока

Рис. 10. Подсказка по грамматике раздела «Супермаркет»

Раздел «Супермаркет». Задание на изучение лексики

В задании на лексику раздела «Супермаркет» необходимо распределить продукты по корзинкам: «Овощи» и «Фрукты». Овощи и фрукты, список которых показан в центре экрана, должны быть по очереди уложены в одну из корзин, находящихся слева и справа от списка. Для выбора направления сортировки продукта, подсвеченного зеленым цветом, необходимо нажать стрелку, указывающую на соответствующую корзину (рис. 11).

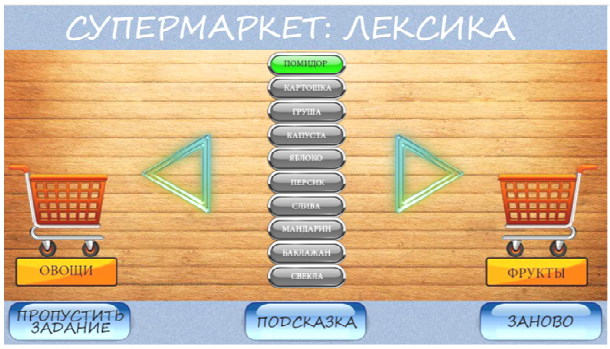


Рис. 11. Задание по лексике «Распределение овощей и фруктов»



Рис. 12. Пример страницы результата прохождения раздела

После выполнения игроком задания на экран выводятся его результаты, (рис. 12). Текстовый комментарий, выводимый на экран вместе с числовым результатом, привязан к количеству правильных ответов. Это позволяет мотивировать игрока добиваться улучшения результатов, и, при необходимости, повторно выполнять задания. При реализации страницы результатов использовался динамический текст, подгружаемый из массива, в зависимости от итогов прохождения задания.

При выполнении задания игрок может воспользоваться подсказкой (кнопка «Подсказка), содержащей перевод названий всех заданных продуктов на язык-посредник (английский язык) (рис. 13).



Рис. 13. Пример подсказки игры

Целью игры является выполнение заданий всех разделов с максимально возможным количеством баллов. При желании игрок может повторно выполнить любое задание и улучить новые результаты. Однако при этом набор заданий по каждому разделу случайным образом меняется. Например, для рассмотренного примера каждый раз изменяется список и порядок овощей и фруктов.

Заключение

Игра «Мой город» входит в систему игр, имеющих следующие тематические блоки: «Мой город», «Русская культура», «Великие русские ученые», «Великие русские писатели», «Великие русские деятели искусств», «Великие русские полководцы», «История России», «Города герои России» и др. Тематические блоки подобраны таким образом, чтобы сформировать навыки свободной коммуникации, что в итоге приводит к формированию новых черт языковой личности. Это позволяет не только развивать “языковую компетентность” (термин предложен в [7]) и способность строить речевое высказывание с применением грамматических конструкций, но и способность к свободной коммуникации, основанной на умении улавливать и осмыслять ключевые моменты беседы, диалога, а так же способность выражать свою мысль в доступной для понимания собеседника форме.

В настоящее время разработан прототип игры «Мой город», включающей шесть разделов: «Супермаркет», «Поликлиника», «Университет», «Банк», «Общежитие», «Столовая». Каждый раздел содержит задания по грамматике, лексике и обработке текста. В настоящее время игра находится на стадии тестирования на целевой группе студентов подготовительного факультета, начинающих изучать РКИ в ВолгГТУ. Предполагается применять игру после прохождения студентами учебника [8], который обеспечивает подготовку в объеме Государственного стандарта элементарного уровня обучения, для контроля полученных знаний.

По результатам тестирования концепция игры будет доработана и начнется реализация ее полнофункциональной версии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Шабалина, О.А.* Применение компьютерных игр для обучения разработке программного обеспечения / О.А. Шабалина // Открытое образование. 2010. № 6. С. 19–26.

2. *Шабалина, О.А.* Обучение разработчиков программного обеспечения: применение компьютерных игр и про-

цесса их разработки / О.А. Шабалина, А.В. Катаев, П.Н. Воробкалов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. Т. 9. № 11(71). С. 117–124.

3. *Шабалина, О.А.* Разработка обучающих компьютерных игр: как сохранить баланс между обучающей и игровой компонентой? / О.А Шабалина // Образовательные технологии и общество. – 2013. – № 16(3). – С. 586–602.

4. Государственный образовательный стандарт по русскому языку. Элементарный уровень. Базовый уровень. 1, 2, 3, 4 сертификационные уровни. М.: СПб., 1999–2000.

5. Лингводидактическая программа по русскому языку как иностранному : Элементарный уровень. Базовый уровень. Первый сертификационный уровень : учеб. пособие. М.: РУДН, 2010.

6. Сборник методических задач для изучающих русский язык / Е. И. Василенко, В. В. Добровольская. М., 2002.

7. *Ионкина, Е.С.* Экспериментальное исследование факторов и условий формирования профессионально-языковой компетентности // Изв. Волгогр. гос. пед. ун-та. Сер. Педагогические науки. 2012. № 1(65). С. 50–53.

8. Дорога в Россию. Учебник русского языка (элементарный уровень). – 2-е изд., испр. – М.: ЦМО МГУ им. М.В. Ломоносова. – СПб.: Златоуст, 2003. – 344 с.

9. Описание курсов робототехники для детей младших и старших классов школы на базе Arduino UNO / А.В. Матохина, А.В. Катаев, М.А. Чернецкий, С.Е. Ползунов // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 14(178). С. 93–97.

10. Изучаем ActionScript 3.0. От простого к сложному. Рич Шуп, ЗеванРоссер. Изд-во «Символ-Плюс», 2009. 289 с.

11. Комплекс тренажеров «Технологические основы устранения дефектов отливок» / Ю.Ф. Воронин, В.А. Камаев, А.В. Матохина // Открытое образование. 2011. № 6. С. 21–26.

УДК 004.5

А. С. Поцелуйко, Р. Р. Романенко, М. Б. Кульцова

МЕТОД АДАПТАЦИИ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ НА ОСНОВЕ ОНТОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ И ПАТТЕРНОВ ИНТЕРФЕЙСА

Волгоградский государственный технический университет

poas@vstu.ru

В данной работе представлен двухэтапный метод адаптации графического интерфейса для людей с ограниченными возможностями на основе онтологической модели пользователя и паттернов интерфейса. Описана онтологическая модель предметной области и механизм рассуждений по правилам на онтологии. Также представлена структура паттерна интерфейса и приведены примеры паттернов для адаптации интерфейса в режиме реального времени.

Ключевые слова: вспомогательные технологии для людей с ограниченными возможностями, адаптивный графический интерфейс, онтологическая модель пользователя, механизм рассуждений на онтологии, паттерны интерфейса, метод адаптации интерфейса.

A. S. Potseluico, R. R. Romanenko, M. B. Kultsova

AN ONTOLOGY-AND PATTERN-BASED METHOD OF USER INTERFACE ADAPTATION FOR PEOPLE WITH SPECIAL NEEDS

Volgograd State Technical University

In this paper we present a two-phase method of the interface adaptation on the base of ontological user model and interface patterns. The ontological user model and rule-based mechanism of reasoning over the ontology are described in the paper as well as the interface pattern structure and pattern examples for the real-time interface adaptation.

Keywords: assistive technologies for people with special needs, adaptive user interface, ontological user model, ontological reasoning, interface patterns, adaptation method.

Введение

Всемирная Организация Здравоохранения (ВОЗ) в 2015 году опубликовала результаты исследования, согласно которым около 15% людей в мире имеют ту или иную форму инвалидности [1], при этом около 4% составляют люди с различными когнитивными нарушениями. Когнитивные нарушения – это нарушения познавательных функций мозга, к ним относят нарушения таких процессов, как память, речь, мышление, восприятие и осуществление целенаправленных движений.

Одним из эффективных способов улучшить качество жизни таких людей и облегчить им выполнение повседневных задач является использование вспомогательных компьютерных технологий и, в частности, специализированных мобильных приложений. Однако очень часто у людей с когнитивными нарушениями возникают проблемы при работе с интерфейсами

© Поцелуйко А. С., Романенко Р. Р., Кульцова М. Б., 2017

таких мобильных приложений, так как они не приспособлены к индивидуальным особенностям пользователя. Один из путей решения этой проблемы – разработка адаптивных интерфейсов для пользователей с ограниченными возможностями и методов адаптации интерфейса в процессе работы с ним.

В настоящее время существует ряд подходов к созданию адаптивных интерфейсов пользователя, и в частности, персонализированных интерфейсов для людей с ограниченными возможностями. В контексте автоматизации процесса проектирования и реализации таких интерфейсов могут быть упомянуты следующие подходы: модельный подход к проектированию интерфейса [2], онтологический подход [3] и проектирование самоадаптирующихся интерфейсов на основе паттернов интерфейсов [4].

Многочисленные исследования посвящены разработке моделей пользователей, включая онтологическую модель пользователя, с целью обеспечить адаптивность и персонализации пользовательского интерфейса. В работе [2] представлена одна из реализаций модельного подхода, где на основе моделирования поведения пользователя с помощью сценариев, собранных в процессе взаимодействия с интерфейсом данных и экспертных знаний строится персональный интерфейс, соответствующий построенной модели пользователя.

Подход на основе онтологической модели пользователя подробно представлен в работе [5]. Онтологическая модель пользователя представляет знания об особенностях пользователя, вызванных проблемами со здоровьем, его предпочтениях и ситуации взаимодействия с интерфейсом. На основе онтологической модели пользователя реализован сервис адаптации, который подбирает или изменяет необходимые элементы интерфейса в зависимости от особенностей пользователя.

Проектирование самоадаптирующегося интерфейса на основе паттернов интерфейса описано в работе [5]. В данном подходе используется набор паттернов интерфейса, которые могут применяться в зависимости от интерпретации информации, собираемой и анализируемой в процессе взаимодействия пользователя с приложением.

Существует ряд программных средств с адаптивными интерфейсами для людей с ограниченными возможностями [2-7]. Адаптация интерфейсов в приложениях EAGER, Avanti и Guide-TV осуществляется с помощью алгоритмов на основе правил, в Imhotep - на основе нечеткой логики, а в приложении MyUI - на основе паттернов. Все рассмотренные программные средства предназначены для пользователей с нарушениями зрения, слуха и моторики. Характеристики устройств пользователя учитываются только в приложениях Imhotep, MyUI и Guide-TV, кроме того, система Imhotep не поддерживает адаптацию интерфейса в режиме реального времени.

Таким образом, все представленные реализации онтологического подхода не обеспечивают адаптацию интерфейса в режиме реального времени, в то время как подход на основе паттернов проектирования позволяет адаптировать интерфейс в процессе взаимодействия с пользователем. Онтологический подход может быть расширен за счет использования паттернов интерфейса и адаптации интерфейса в режиме реального времени. Основная проблема заключается в интеграции онтологической модели пользователя и паттернов интерфейса в инструментальном средстве создания адаптивных интерфейсов. В данной работе предложен механизм такой интеграции и метод двухэтапной адаптации на основе онтологической модели пользователя и паттернов интерфейса, который позволяет адаптировать первоначально сгенерированный интерфейс на основе анализа поведения пользователя.

1. Процесс разработки адаптивных интерфейсов

В настоящее время пользовательские интерфейсы обычно разрабатываются в предположении, что они будут использоваться трудоспособным пользователем, который имеет типичные перцептивные и когнитивные способности, который работает в стабильной среде и использует типичный набор устройств ввода и вывода. Любое отклонение от этих предположений (например, тремор рук из-за старения, плохое зрение, и так далее), может существенно затруднить эффективность взаимодействия пользователя с интерфейсом из-за несоответствия между особенностями пользователями и ситуации взаимодействия и допущениями, лежащими в основе дизайна пользовательского интерфейса. Пользовательские интерфейсы для людей с ограниченными возможностями должны быть персонифицированными, чтобы лучше соответствовать особенностям и ситуациям

взаимодействия с интерфейсом отдельных пользователей. В связи с этим необходимо создать множество персонализированных интерфейсов из-за существования огромного множества различных индивидов со своими собственными способностями, предпочтениями, используемыми устройствами и потребностями. Традиционный ручной процесс проектирования и разработки интерфейса (рис. 1) не может быть масштабирован на такой широкий круг потенциальных ситуаций взаимодействия и пользователей.

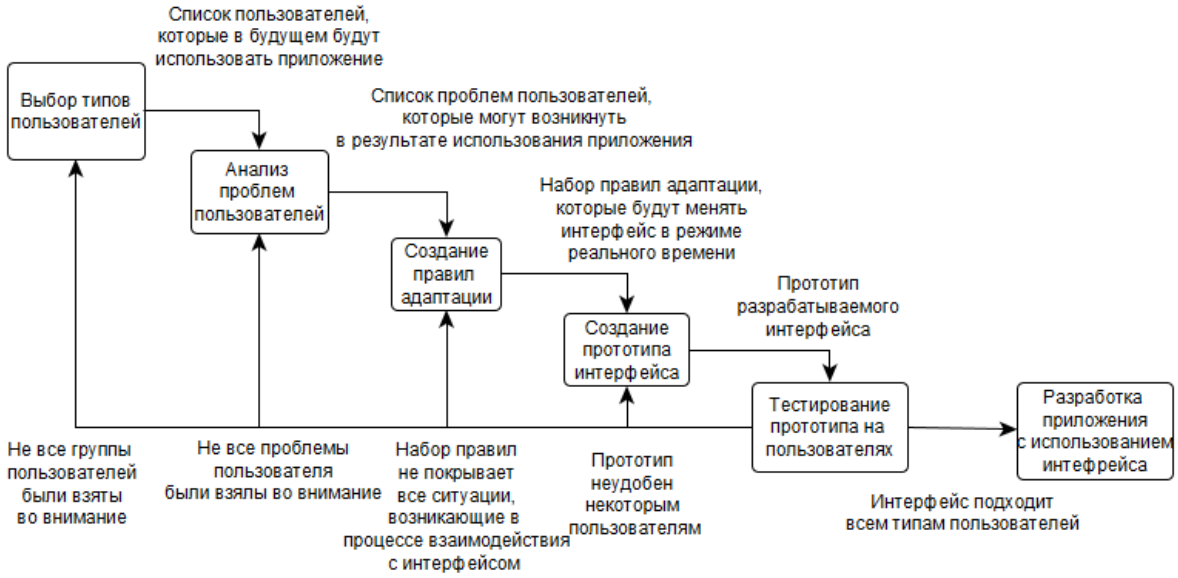


Рис. 1. Традиционный процесс разработки интерфейса

Процесс является цикличным, так как на любом этапе создания адаптивного интерфейса могут возникнуть проблемы, ведущие к пересмотру первоначальной концепции интерфейса. Проектирование такого интерфейса занимает много времени, предполагает вовлечение сторонних экспертов, знающих проблемы пользователя с тем или иным заболеванием и пути решения данных проблем, реализация такого интерфейса – это очень трудоемкий процесс, так как интерфейс должен меняться в соответствии с действиями пользователя во время его работы с приложением. Автоматизация создания пользовательских интерфейсов, которые адаптированы к используемым человеком устройствам, решаемым задачам, предпочтениям, а также физическим и когнитивным особенностям пользователя, позволит сократить время и трудоемкость этого процесса и повысить качество создаваемых интерфейсов. С другой стороны, это позволит повысить удовлетворенность пользователей и производительность их взаимодействия с приложениями по сравнению с традиционными вручную спроектированными по принципу «один для всех» интерфейсами.

В представленной работе предлагается автоматизировать процесс создания адаптивных интерфейсов для людей с ограниченными возможностями на основе метода двухэтапной адаптации с использованием онтологической модели пользователя и паттернов интерфейса. Данный метод должен быть реализован в плагине для разработчиков интерфейса, который содержит базу элементов интерфейса (виджетов), онтологическую базу знаний и базу паттернов интерфейса. Автоматизированный процесс создания адаптивного интерфейса представлен на рис. 2.

В соответствии с новым автоматизированным процессом разработчик создает первоначальный интерфейс, определяет проблемы целевой аудитории на онтологической модели пользователя и получает рекомендации по улучшению интерфейса или замене его компонентов. Далее, после включения интерфейса в приложение, происходит сбор и анализ данных о поведении пользователя при его взаимодействии с интерфейсом, что запускает механизм применения паттернов для персонализации интерфейса.

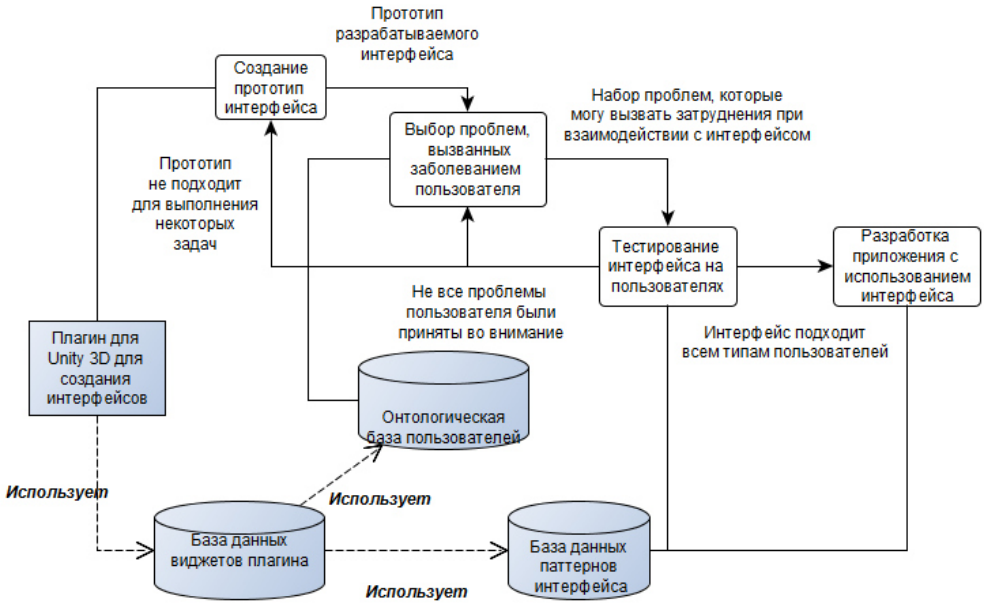


Рис. 2. Автоматизированный процесс создания адаптивного интерфейса

2. Онтологическая модель пользователя и механизм рассуждений

Для представления знаний в области адаптивных пользовательских интерфейсов для людей с ограниченными возможностями была разработана мета-онтология [8], которая содержит семантические правила для генерации профиля интерфейса и рекомендаций по использованию компонентов интерфейса для пользователей с особыми потребностями. Мета-онтология включает в себя следующие предметные онтологии: онтология пользователя (содержит знания о проблемах, вызванных заболеваниями пользователя); онтология интерфейса (содержит знания о допустимых для конкретного пользователя компонентах интерфейса и их параметрах); онтология устройства пользователя (содержит основные характеристики устройства, с помощью которого пользователь взаимодействует с приложением).

Первая версия мета-онтологии включала в себя онтологию заболеваний пользователя в виде классификации МКБ-10, однако в ходе экспертной разработанной оценки такого подхода, так как у двух людей с одинаковым диагнозом могут быть различные последствия этого заболевания в контексте взаимодействия с интерфейсом. Поэтому было принято решение включить в онтологию пользователя знания о проблемах, которые могут возникать у пользователя в процессе взаимодействия с интерфейсом вследствие его заболеваний и ограничений.

В данном исследовании используется механизм рассуждений на онтологии, основанный на семантических правилах, описанный в [8, 9]. В ходе исследования было принято решение разбить все правила на пять категорий, примеры правил по каждой категории представлены в табл. 1.

Таблица 1

Примеры SWRL-правил

Категория	SWRL-правило	Описание правила
Определение нарушений пользователя	User : hasDiseaseProblem (?user, SevereVisualImpairment) ∧ ∧ User: hasDiseaseProblem (?user, MildMentalRetardation)	Пользователь имеет два нарушения, вызванных заболеванием: сильное нарушение зрения и среднюю степень умственной отсталости
Определение состава интерфейса	TaskOnInterface: hasCommandsForUser (Task1,InputCommand) ∧ ∧ TaskOnInterface:hasUserAction (Task1,InputTextField) ∧ ∧ TaskOnInterface:hasUserAction (Task1,ButtonPressed)	Задание на интерфейсе содержит одну команду: ввести текст в текстовое поле, и два действия пользователя: ввод текста и нажатие кнопки подтверждения

Окончание табл. 1

Категория	SWRL-правило	Описание правила
Определение допустимых элементов интерфейса для пользователя	User:performsTask(?user, ?task) ^ TaskOnInterface:hasDefaultInterface(?task, ?interface) ^TaskOnInterface:hasCommandsForUser(?task, ?command)^TaskOnInterface:TextInstructions(?command) → InputInterface:hasComponents(?interface, InputLineEditWidget) ^ InputInterface:hasComponents(?interface, InputListWidget) ^ InputInterface:hasComponents(?interface, InputLabelWidget)	Пользователь выполняет задание на интерфейсе, данное задание содержит в себе текстовые команды для пользователя. Такие команды могут быть отображены в следующих виджетах: список, строка вывода или лейбл
Определение проблемных элементов для пользователя на текущем интерфейсе	User:hasPhysicalProblem(?user, ComplexityOfArmControl) ^ User:performsTask(?user, ?task) ^ Task:hasDefaultInterface(?task, ?interface) ^ Interface:hasComponent(?interface, ?comp) ^InputWidgetsForTextInsert(?comp) → User:hasProblemsWithInterfaceTask(?user, CanInputTextWithDifficulties) User:hasProblemsWithInterfaceTask(?user, CanPushButtonWithDifficulties)	Пользователь с проблемами моторики взаимодействует с интерфейсом, который содержит в себе список, поле ввода или надпись как способ ввода текста. Пользователь имеет проблемы с вводом текста и нажатием на кнопки
Определение путей решения проблем на интерфейсе	User:hasProblemsWithInterfaceTask(?user, CanInputTextWithDifficultiies) ^ User:performsTask(?user, ?task) Task:hasDefaultInterface(?task, ?interface) ^ Interface:hasOutputInstance(?interface, ?outputinterface) ^ Input_Non_Visual_Requirement(?req) → Interface:hasRequirements(?outputinterface, ?req)	У пользователя возникли проблемы с вводом текста на текущем интерфейсе. Рекомендация - использовать голосовой ввод текста

Таким образом, процесс генерации профиля интерфейса в соответствии с профилем пользователя на основе предложенной онтологичес-кой модели состоит из следующих этапов: 1) оп-ределение проблем пользователя, вызванных его заболеваниями; 2) определение заданий на интерфейсе, которые выполняет пользователь в приложении; 3) определение первоначального состава интерфейса; 4) поиск проблемных элементов интерфейса для текущего пользователя; 5) поиск путей решения проблем при взаимодействии пользователя с интерфейсом. Второй шаг может быть пропущен, если уже имеется макет интерфейса с конкретными элементами.

3. Модель паттерна интерфейса

Для дальнейшей адаптации интерфейса, сгенерированного в соответствии с профилем пользователя, в реальном времени в процессе взаимодействия с приложением предлагается использовать подход на основе паттернов интерфейса. Паттерн интерфейса представляет собой наилучшее интерфейсное решение для определенной проблемы пользователя, в данном исследовании проблема – это невозможность или неудобство использования компонентов интерфейса пользователем с определенными особенностями. Решение – это набор компонентов интерфейса, или набор свойств компонентов, которые полностью снимают проблему при взаимодействии с интерфейсом для данного пользователя или упрощают пользователю работу с ним.

Модель паттерна интерфейса на верхнем уровне может быть представлена следующим образом:

$$P = \{N, Pr, C, S\},$$

где N – имя паттерна интерфейса; Pr – проблема взаимодействия пользователя с интерфейсом, которая решается данным паттерном; C – условие применения паттерна интерфейса; S – решение, применяемое к интерфейсу.

В соответствии с предложенной моделью был разработан набор паттернов интерфейса, предназначенных для адаптации интерфейса в процессе работы пользователя с приложением. Примеры описания паттернов приведены в табл. 2 и 3.

Данный паттерн решает проблему множественного нажатия одной и той же кнопки человеком с тремором. Если человек нажал кнопку не один раз подряд, то нужно сделать ее неактивной на 5 секунд, затем вернуть кнопке свойство нажимания.

Таблица 2

Пример описания паттерна «Неактивная кнопка»

Название паттерна	Неактивная кнопка
Проблема	Люди с тремором могут несознательно нажать одну и ту же кнопку несколько раз подряд. Например, кнопку посещения предыдущей страницы
Условие применения	**IF** user. hasProblem(Moderate Tremor) **OR** user. hasProblem(Severe Tremor)
Решение	Сделать кнопку неактивной на 5 секунд, затем вернуть кнопке свойство нажимания. Button.onClick() { SetEnabled (**FALSE**); Button.setEnabledTimer(5)}

Таблица 3

Пример описания паттерна «Увеличить размер виджета»

Название паттерна	Увеличить размер виджета
Проблема	Люди с умеренным и сильным нарушением зрения могут нажимать область вокруг виджета, не попадая на него
Условие применения	**IF** user. hasProblem(Moderate Visual Impairment) **OR** user. hasProblem(Severe hasProblem(Moderate Visual Impairment) **AND** ClickCount > 3
Решение	Увеличить размер виджета, а также все текстовые компоненты, находящиеся внутри виджета, на 25%. Widget.Increase Size(25%) **IF** Widget.hasTextComponent() {Widget.IncreaseTextComponent(25%)}

Данный паттерн решает проблему нажатия на область, находящуюся рядом с виджетом, для людей с плохим зрением. Если у пользователя плохое зрение, и количество кликов на область, близкую к области виджета, больше трех, то нужно увеличить размер виджета а также все текстовые компоненты, находящиеся внутри виджета, на 25%.

4. Двухэтапный метод адаптации интерфейса пользователя

Для адаптации интерфейса пользователя на основе предложенных моделей был разработан двухэтапный метод (рис. 3). На первом этапе на основе рассуждений по правилам на онтологии генерируется профиль интерфейса, включающий в себя разрешенные для данного пользователя

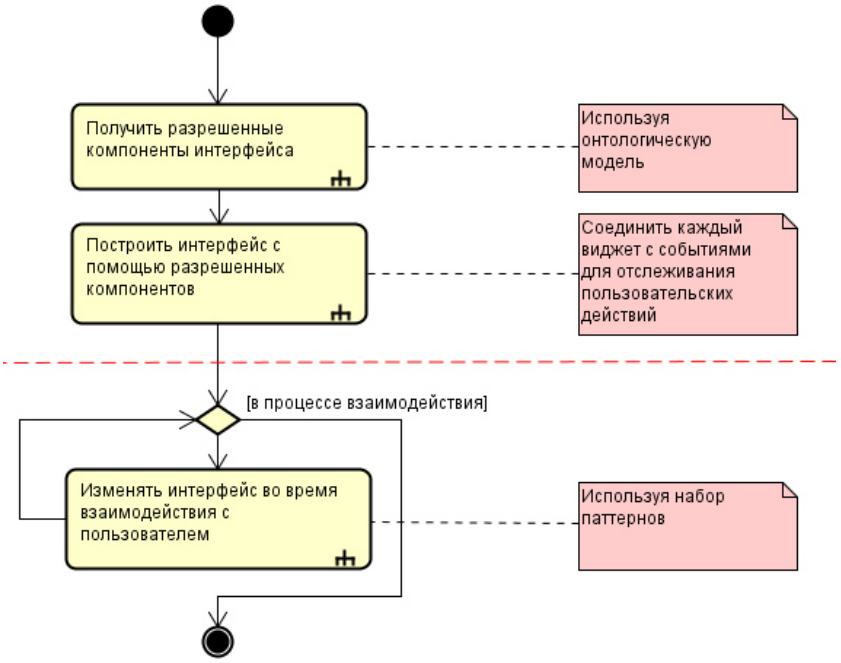


Рис. 3. Алгоритм двухэтапного метода адаптации (нотация UML)

элементы интерфейса. Каждый из элементов интерфейса должен быть связан с событиями, происходящими в процессе взаимодействия, для сбора информации о поведении пользователя, это необходимо для реализации второго этапа алгоритма. На втором этапе метода периодически в процессе взаимодействия пользователя и приложения собираются данные о поведении пользователя, собранные данные анализируются и сопоставляются с условиями применения паттернов интерфейса и формируется набор интерфейсных решений для адаптации текущего интерфейса.

На первом этапе (рис. 4) происходит анализ текущего интерфейса для пользователя с рядом проблем, вызванных его заболеванием, и осуществляется поиск неудобных или невозможных для использования элементов интерфейса для данного пользователя, поиск происходит на основе SWRL-правил из соответствующей категории в онтологии. Затем осуществляется поиск решений для каждой проблемы пользователя с помощью соответствующих SWRL-правил.

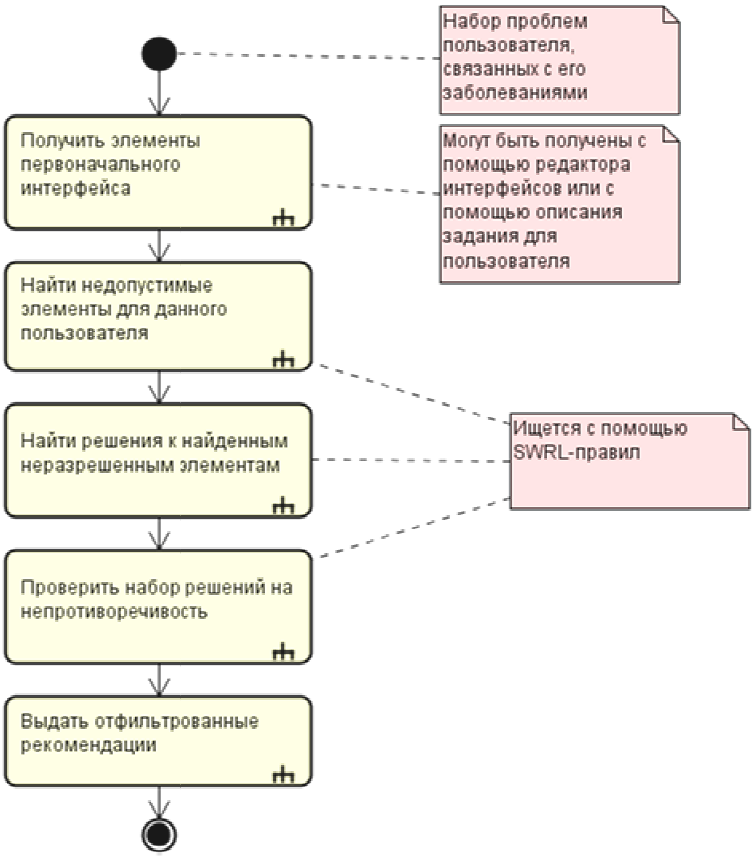


Рис. 4. Первый этап метода адаптации интерфейса. Алгоритм генерации рекомендаций по проектированию интерфейса (нотация UML)

Полученные для каждой отдельной проблемы интерфейсные решения могут друг другу противоречить, поэтому необходимо проанализировать найденные решения, проверить их на непротиворечивость и сгенерировать набор непротиворечивых рекомендаций для разработчика интерфейса на основе механизма разрешения противоречий.

На втором этапе метода созданный ранее интерфейс продолжает адаптироваться для конкретного пользователя в режиме реального времени с помощью набора паттернов интерфейса. Паттерны были созданы на основании рекомендаций концерна W3C [10] по проектированию интерфейсов для пользователей с особыми потребностями.

На втором этапе метода (рис. 5) происходит итерационный процесс сбора данных и анализа данных о действиях пользователя в процессе его взаимодействия с приложением, после чего условие применения каждого паттерна проверяется на истинность и формируется набор паттернов, готовых к применению. Затем этот набор анализируется на противоречивость, к нему применяется механизм разрешения противоречий и формируется набор непротиворечивых паттернов, которые последовательно применяются к интерфейсу.

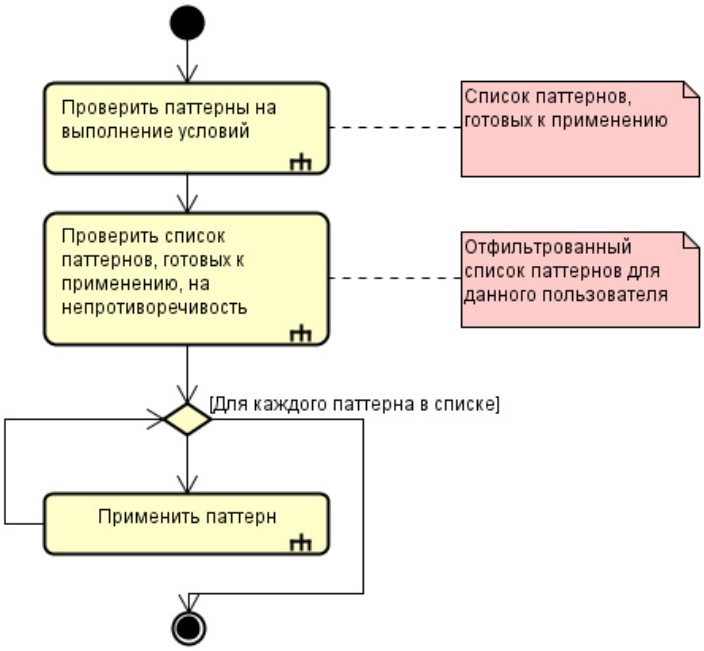


Рис. 5. Второй этап метода адаптации интерфейса.
Алгоритм применения паттернов (нотация UML)

Таким образом, в соответствии с предложенным методом, сначала будет сформирован рекомендуемый интерфейс для пользователя с рядом нарушений на основе рассуждений по правилам на онтологической модели, а затем интерфейс будет последовательно адаптироваться в режиме реального времени на основе применения соответствующих паттернов интерфейса.

Выводы

Предложен двухэтапный метод адаптации интерфейса для пользователей с ограниченными возможностями на основе рассуждений по правилам на онтологии и применения паттернов интерфейса. Разработана онтологическая модель пользователя и алгоритмы рассуждений по правилам на данной модели для генерации профиля интерфейса на основе профиля пользователя и ситуации взаимодействия с интерфейсом. Разработана модель паттерна интерфейса и алгоритм адаптации интерфейса в процессе взаимодействия с пользователем на основе применения паттернов. Онтологическая база знаний предметной области и база паттернов интерфейса разрабатывались и тестировались в сотрудничестве со специалистами Областного реабилитационного центра для детей-инвалидов «Надежда». Данная работа является частью международного проекта по созданию специализированного программного средства, предназначенного для разработки адаптивных интерфейсов для людей с ограниченными возможностями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. World Health Statistics / World Health Organization. – 2015. – 284 p.

2. *Abascal*, J. A modular approach to user interface adaptation for people with disabilities in ubiquitous environments / J. Abaskal, A. Aizpurua, I. Cearreta, B. Gamecho, N. Garay, R. Minon ; // Internal Technical Report No. EHU-KAT-IK-01-11.- 2011.

3. *Skillen*, K.L. Ontological User Profile Modeling for Context-Aware Application Personalization / K.L. Skillen, L. Chen, C.D. Nugent, M.P. Donnelly, W. Burns, I. Solheim ; // Series: Lecture Notes in Computer Science. Springer, Vol.7656. 2012. – P. 261–268.

4. *Peissner*, M. A Design Patterns Approach to Adaptive User Interfaces for Users with Special Needs / M. Peissner, A. Shuller, D. Spath ; // Proceedings: 14th international conference on Human-computer interaction: design and development approaches, Part I, HCII 2011, Berlin, Heidelberg, July, 2011. Series: Communications in Computer and Information Science. Springer-Verlag. 2011. – P. 268–277.

5. *Castillejo*, E. Ontology-Based Model for Supporting Dynamic and Adaptive User Interfaces / E. Castillejo, A. Almeida, D. Lopez-de-Ipina ; // International Journal of Human-Computer Interaction, No. 30, 2014. – P. 771–786.

6. Gamecho, B. Automatic Generation of Tailored Accessible User Interfaces for Ubiquitous Services / B. Gamecho, R. Minon, A. Aizpurua, I. Cearreta, M. Arrue, N. Garay-Vitoria, J. Abaskal ; // IEEE Transactions on Human-Machine Systems, Vol.45, No. 5, October 2015. – P. 612–623.

7. Llinas, P. Adaptive Interfaces for People with Special Needs. Series: Lecture Notes in Computer Science / P. Llinas, G. Montoro, M. Garcia-Herranz, P. Haya, X. Alaman ; // Series: Lecture Notes in Computer Science. Springer, Vol.5518. 2009. – P.772–779.

8. *Кульцова, М.Б.* Онтологическая модель пользователя для автоматизированного создания адаптивных интерфейсов для людей с ограниченными возможностями / М.Б. Кульцова, Р.Р. Романенко, А.С. Поцелуйко // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016 [*третий выпуск*]

9. *Kultsova, M.* An ontology-based approach to automated generation of adaptive user interface based on user modeling / M. Kultsova, R. Romanenko, A. Anikin, A. Poceluico // Proceedings: 7th International Conference of Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA2016), Chalkidiki, Greece, July 13–15, 2016.

10. W3C: Accessibility 2016, Web Design and Applications Recommendations. – Access mode: https://www.w3.org/standards/webdesign/accessibility

УДК: 004.5

А. В. Скориков, О. Н. Ляпина, И. Г. Жукова, Р. Р. Романенко

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДХОДА НА ОСНОВЕ ПАТТЕРНОВ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АДАПТИВНОГО ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ДЛЯ ЛЮДЕЙ С ОГРАНИЧЕННЫМИ ВОЗМОЖНОСТЯМИ

Волгоградский государственный технический университет

skorikov.alexv@gmail.com

В работе исследована проблема повышения уровня доступности мобильных приложений для людей с ограниченными возможностями, которая требует создания специализированных интерфейсов. Рассматривается подход к созданию адаптивных интерфейсов для людей с ограниченными возможностями на основе паттернов. Приводится разработанная модель паттерна и алгоритм адаптации интерфейса на основе паттернов. Описан процесс создания интерфейса мобильного приложения в разработанном инструментальном средстве.

Ключевые слова: люди с ограниченными возможностями, адаптивные интерфейсы, процесс адаптации интерфейса, паттерны интерфейса, инструментальное средство создания интерфейсов.

A. V. Skorikov, O. N. Lyapina, I. G. Zhukova, R. R. Romanenko

DEVELOPMENT OF DESIGN PATTERN APPROACH TO ADAPTIVE INTERFACES FOR PEOPLE WITH DISABILITIES

Volgograd State Technical University

This paper describes the problem of increasing accessibility of mobile applications for people with disabilities, which requires creation of specialized user interfaces. Describes pattern-based approach to creation of adaptive user interfaces for people with disabilities. Represents the developed pattern model and the adaptation algorithm based on patterns. Shows the process of creating user interface in the developed software tool.

Keywords: people with disabilities, adaptive interfaces, process of interface adaptation, interface design patterns, software tool for creation of user interfaces.

Введение

Согласно мировой статистике за 2015 год в мире насчитывается более миллиарда человек (15% мирового населения) с какой-либо формой инвалидности [1]. Поэтому значимой проблемой общества является повышение уровня доступности объектов и услуг в приоритетных сферах жизнедеятельности инвалидов и маломобильных групп населения, а также устранение социальной разобщенности между инвалидами и гражданами, не являющимися инвалидами. Важным шагом для решения этой проблемы является преобразование электронных ресурсов и мобильных приложений в доступные для людей с ограниченными возможностями. Для этого они должны обладать программными интерфейсами, учитывающими особенности людей с ограниченными возможностями.

Создание таких интерфейсов является сложной задачей для разработчика. Ему необходимо знать и соблюдать стандарты и требования, предъявляемые при разработке интерфейсов мобильных приложений для людей с ограниченными возможностями. К тому же большое разнообразие физических, сенсорных и когнитивных нарушений, имеющееся у людей с ограниченными возможностями, требует персонализированной настройки интерфейсов мобильных приложений для различных типов пользователей. В существующих на данный момент редакторах для создания интерфейсов процесс создания интерфейсов для людей с ограниченными возможностями занимает длительное время и имеет высокую сложность, а также не учитывает необходимые специализированные знания, требуемые для разработки. Таким обра-

© Скориков А. В., Ляпина О. Н., Жукова И. Г., Романенко Р. Р., 2017

зом, является актуальной задача создания специализированного инструментального средства разработки интерфейсов мобильных приложений для людей с ограниченными возможностями, которое позволит сократить время и трудоемкость процесса разработки приложений для людей с ограниченными возможностями, а также повысит качество разрабатываемых интерфейсов.

Создание интерфейсов для людей с ограниченными возможностями

В общем виде процесс создания интерфейсов для людей с ограниченными возможностями представлен на рис. 1.

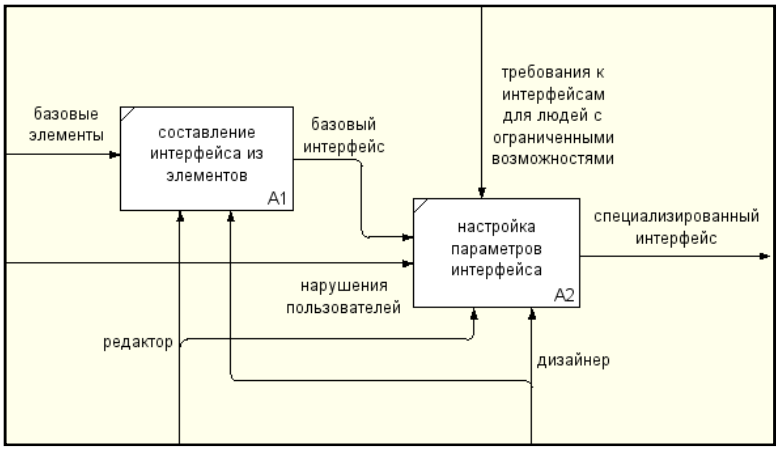


Рис. 1. Диаграмма IDEF0 (as_is), отображающая процесс создания интерфейсов для людей с ограниченными возможностями

Процесс разработки интерфейса проходит в два этапа:

1) создается базовая версия интерфейса, не ориентированная на какую-либо группу пользователей с нарушениями;

2) происходит настройка параметров созданного интерфейса под особенности людей с ограниченными возможностями, причем настройка производится вручную дизайнером интерфейса и на этом этапе не осуществляется никакой проверки полученных результатов на корректность. Этот этап является проблемным местом в процессе создания интерфейсов для людей с ограниченными возможностями.

Известен ряд подходов, используемых для решения проблемы настройки интерфейса под различные типы пользователей:

1. Технология «Проектирование для всех» («design for all»). Данная технология предполагает создание таких продуктов или услуг, которыми могли бы пользоваться максимальное количество людей вне зависимости от наличия у пользователя того или иного нарушения любой степени, причем без необходимости специализированной адаптации [2].

2. Настройка интерфейса производится конечным пользователем. При таком подходе в разрабатываемое приложение добавляется окно настроек, в котором пользователь может лично задать подходящие ему параметры, такие как размер шрифта, цветовая схема, количество объектов на экране и т. д., в зависимости от имеющихся потребностей.

3. Создание адаптивных интерфейсов. При использовании данного подхода интерфейсы могут в определенных пределах распознавать нужды пользователя и автоматически подстраиваться под них [3].

3.1. Адаптация с использованием онтологических моделей. Составляются онтологические модели пользователя (содержащие необходимые свойства каждого типа пользователей) и устройства (включающие его аппаратные и программные характеристики). Далее выделяют некоторый функционал интерфейса, который может быть адаптирован. Это позволяет выбрать наилучший способ адаптации для конкретного функционала интерфейса, зная типы пользователя и его устройства [4].

3.2. Применение паттернов интерфейса. Паттерны представляют собой проверенные решения, используемые для настройки интерфейса под указанные характеристики пользователя. Паттерны определяют глобальные параметры пользовательского интерфейса, такие как размер шрифта или наиболее подходящий способ представления информации (картинки или текст), которые определяют общий внеш-

ний вид персонализированного пользовательского интерфейса [5].

Технология «Проектирование для всех» плохо применима к созданию интерфейсов для пользователей с ограниченными возможностями в силу огромной вариативности физических, когнитивных и сенсорных нарушений, которые к тому же могут комбинироваться в произвольных сочетаниях, что делает невозможным нахождение общего универсального решения для всех случаев. Недостатком предоставления настройки интерфейса пользователям является то, что далеко не все из них смогут освоить такую задачу, причем наибольшие трудности с этим испытывают именно люди с ограниченными возможностями. В таких случаях настройку интерфейса выполняет их опекун. Подход с использованием онтологий достаточно трудоемок в реализации и требует разработки множества онтологий для решения задачи настройки интерфейса. Сложность подхода на основе паттернов заключается в этапе извлечения знаний для разработки базы паттернов интерфейса. Однако при наличии такой базы, их применение для создания программного интерфейса происходит автоматически. Также к преимуществам данного подхода можно отнести его модульность – новые паттерны добавляются без изменения структуры приложения и алгоритмов настройки интерфейса, что позволяет начать работу по созданию интерфейса с небольшого набора паттернов, а затем пополнять и увеличивать базу паттернов в процессе получения новых знаний. Таким образом, наиболее перспективным для создания программных интерфейсов для людей с ограниченными возможностями является подход на основе паттернов.

Подход к адаптации интерфейса на основе паттернов

Для решения поставленной цели было предложено создать специализированный редактор адаптивных мобильных интерфейсов для людей с ограниченными возможностями, в котором настройка параметров создаваемого интерфейса под заданный профиль пользователя происходит автоматизированно с использованием разработанных паттернов интерфейса.

Подход к созданию адаптивных интерфейсов для людей с ограниченными возможностями на основе паттернов проектирования интерфейсов опирается на разработку, проведенную в рамках проекта MyUI [6]. Основная идея подхода заключается в том, что паттерны содержат знания экспертов о требованиях к интерфейсам для людей с ограниченными возможностями. Они задают глобальные настройки интерфейса (такие как размеры шрифтов и интерактивных областей, предпочитаемый режим предоставления информации и т. д.) в соответствии с указанным типом пользователей (перечислением имеющихся у целевой группы пользователей физических, когнитивных и сенсорных нарушений). Таким образом, паттерны составляют профиль интерфейса приложения по заданному профилю пользователя. После применения всех настроек получается кастомизированный интерфейс, наиболее доступный для пользователей с указанными нарушениями (см. рис. 2).

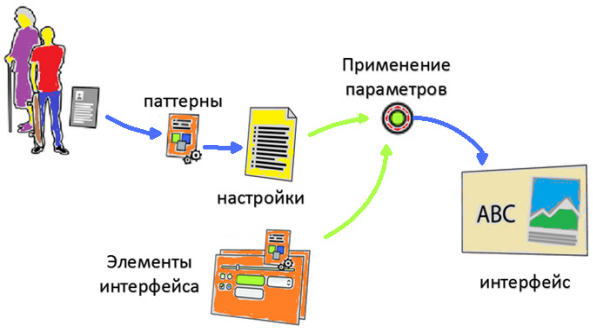


Рис. 2. Настройка интерфейса с применением паттернов

Для реализации данного подхода было необходимо решить следующие задачи: разработать модель паттерна и алгоритм настройки интерфейса; создать базу паттернов интерфейса; разработать и протестировать инструментальное средство создания интерфейсов для людей с ограниченными возможностями.

Модель паттерна

В работе была предложена следующая модель паттерна:

$$Pattern = < PatternName, Problem, PatternGroup, Context, Solution >,$$

где PatternName – название паттерна; Problem – описание проблемы, которую решает данный паттерн; PatternGroup – группа, к которой относится данный паттерн; Context – $\{(userProblem_1: value_1), \ldots (userProblem_n:value_n)\}$ – описание правил, при выполнении которых срабатывает данный паттерн, где UserProblem – нарушения пользователя, value – их степень; Solution – $\{(setting_1:value_1), \ldots (setting_n:value_n)\}$ – решение проблемы, представляет собой множество переменных профиля интерфейса и задаваемые им значения.

Пример описания паттерна в соответствии с предложенной моделью представлен в табл. 1.

Таблица 1

Пример описания паттерна

Паттерн	Размер шрифта – крупный
Проблема	Людям с ухудшением зрения требуется увеличенный размер шрифта
Группа паттернов	Размер шрифта
Контекст (условия)	2 <= ухудшение зрения < 3
Решение	размер основного текста = 51 размер дополнительного текста = 32

Паттерны сгруппированы в зависимости от задаваемых ими параметров (например, все паттерны, задающие размер шрифта, находятся в одной группе).

Модель группы паттернов описывается следующим образом:

$$PatternGroup = \\ = < GroupName, Problem, Context, SetVariables, \\ Patterns, DefaultPattern >$$

где GroupName – название группы паттернов; Problem – описание проблемы, которая решается с помощью паттернов этой группы; Context – описание условий выбора паттернов в текстовом виде; SetVariables – $\{variable_1, ... variable_N\}$ – множество переменных профиля интерфейса, которые задаются паттернами данной группы; Patterns – $\{pattern_1, ... pattern_N\}$ - множество паттернов, входящих в данную группу; DefaultPattern – элемент из Patterns, используемый в качестве паттерна по умолчанию.

Таблица 2

Группа паттернов «размер шрифта»

Название	Размер шрифта
Проблема	Для разных типов пользователей наиболее удобными являются различные размеры шрифта
Паттерны	Размер шрифта – маленький. Размер шрифта – средний. Размер шрифта – большой. Размер шрифта – очень большой
Задаваемые переменные	Размер основного шрифта. Размер дополнительного шрифта
Паттерн по умолчанию	Размер шрифта – маленький
Контекст	Если ухудшение зрения отсутствуют – маленький. Если ухудшение зрения незначительное – средний. Если ухудшение зрения серьезное – большой. Если ухудшение зрения очень серьезное – очень большой

Пример описания группы паттернов представлен в табл. 2.

Разработанная модель паттерна позволяет применить модульный подход к проектированию, а также задает единые правила описания для решений различных проблем создания интерфейсов для людей с ограниченными возможностями. На основе данных моделей была разработана тестовая база данных паттернов, включающая в себя 4 группы паттернов: размер шрифта, размер интерактивных областей, доступность элементов для ввода текста и предпочитаемый режим отображения (текст или картинки).

Алгоритм адаптации интерфейса

Для реализации задачи адаптации интерфейса был разработан алгоритм адаптации интерфейса на основе паттернов (см. рис. 3).

Шаг 1. Дизайнер с помощью редактора интерфейса задает профиль пользователя, то есть указывает те проблемы, которыми обладает целевая группа пользователей. Для каждой проблемы указывается степень ее выраженности.

Шаг 2. Обновленный профиль пользователя передается в базу данных паттернов. Из каждой группы паттернов выбирается тот, который больше всего подходит для заданного профиля пользователя – это определяется путем проверки условий контекста каждого паттерна из группы. Если контекст не выполнился ни для одного паттерна из группы, то активным задается паттерн по умолчанию. В результате выполнения шага получаем набор подходящих паттернов – по одному из каждой группы.

Шаг 3. Настройка профиля интерфейса. Для этого мы применяем каждый паттерн из набора активных паттернов: задаем переменным профиля интерфейса значения, указанные в решении паттерна.

Шаг 4. Все элементы интерфейса обновляют свои настройки в соответствии с новыми значениями переменных профиля интерфейса. Также при добавлении новых элементов они сразу будут настроены под текущий профиль интерфейса.

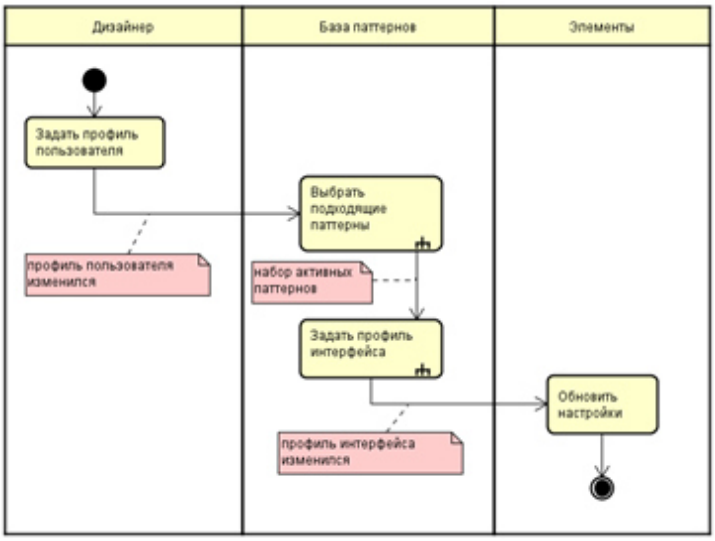


Рис. 3. Алгоритм адаптации интерфейса

Данный алгоритм адаптации позволяет автоматизировать настройку интерфейса под заданный профиль пользователя за счет применения разработанной базы данных паттернов.

Разработка интерфейсов на основе паттернов с использованием специализированного редактора

На основе описанного подхода, разработанной модели паттерна и алгоритма адаптации интерфейса был реализован и протестирован прототип специализированного инструментального средства создания интерфейсов для людей с ограниченными возможностями. Разработанное инструментальное средство позволяет: задавать профиль пользователя, для которого создается интерфейс, содержащий список его нарушений; создавать и редактировать адаптивные интерфейсы для людей с ограниченными возможностями; сохранять интерфейс и загружать ранее созданный интерфейс.

Процесс разработки интерфейсов для людей с ограниченными возможностями с использованием созданного редактора включает в себя три этапа:

Этап 1. Задание целевого типа пользователей – осуществляется путем выбора физических, когнитивных и сенсорных нарушений, которые присутствуют у группы пользователей, для которых разрабатывается интерфейс. В результате этого этапа из базы данных паттернов интерфейса выбираются такие паттерны, которые лучше всего подходят для пользователей с заданными нарушениями.

Этап 2. Создание интерфейса из базовых элементов (графических виджетов). Элементы автоматически настраиваются в соответствии с выбранными паттернами для целевого пользователя.

Этап 3. Ручная корректировка интерфейса – в процессе применения паттернов могут возникнуть конфликты применения настроек. Для устранения этой проблемы в редакторе есть панель настройки параметров элементов. Таким образом, процесс создания интерфейсов с использованием паттернов является автоматизированным. Необходимо отметить, что нельзя задать настройки, противоречащие выбранным паттернам.

В качестве примера создания интерфейса в разработанном редакторе рассмотрим создание интерфейса коммуникатора, в котором целевая группа пользователей имеет следующие нарушения: незначительное ухудшение зрения; сильное нарушение мелкой моторики; значительные проблемы с составлением текста (дислексия).

Шаг 1. Составляем интерфейс приложения из базовых элементов: картинок, кнопок, полей ввода (см. рис. 4). Для добавления новых элементов используется панель элементов в правой части окна. Зеленой рамкой вокруг элементов выделены интерактивные области для кнопок и поля ввода.

Шаг 2. Задаем профиль пользователя. Выбираем в меню пункт “настройка пользователя” (User’s type) и задаем параметры нашей целевой группы (см. рис. 5).

Шаг 3. Применение паттернов. После нажатия на кнопку “применить” (Apply), интерфейс автоматически перестраивается, используя выбранные для данного профиля пользователя паттерны (см. рис. 6). В результате размеры

шрифтов увеличились, чтобы пользователю было проще воспринимать тексты, также увеличились и размеры интерактивных областей, чтобы уменьшить количество промахов при попытке пользователя нажать на кнопку, а текстовое поле ввода стало недоступным (отображается полупрозрачным), так как пользователь не обладает возможностью его применить.

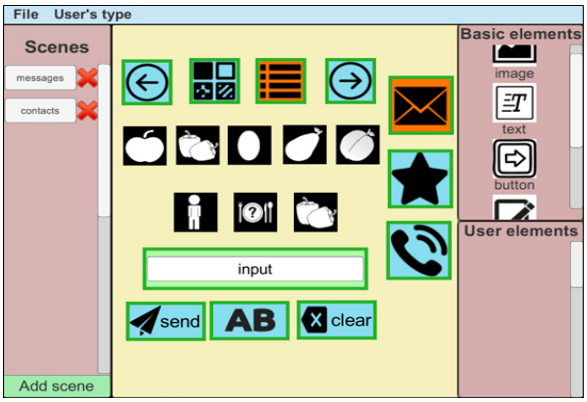


Рис. 4. Главное окно редактора с созданным интерфейсом коммуникатора

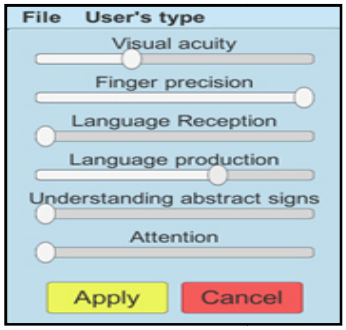


Рис. 5. Панель настройки профиля пользователя

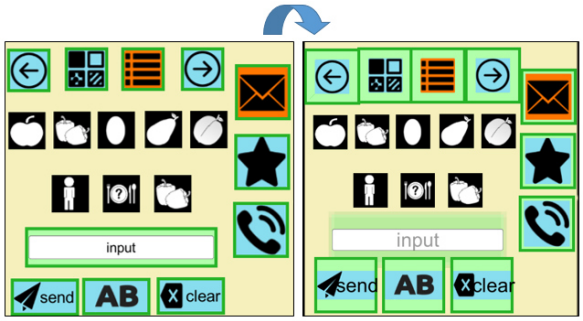


Рис. 6. Результат применения паттернов

Шаг 4. Ручная корректировка интерфейса. Для исправления ошибок при применении паттернов (см. рис. 6) в редакторе имеется панель ручной настройки параметров элементов (см. рис. 7). Необходимо заметить, что разработчик не можете задать параметры интерфейса, противоречащие выбранным паттернами (например, нельзя задать размер шрифта меньше 34).

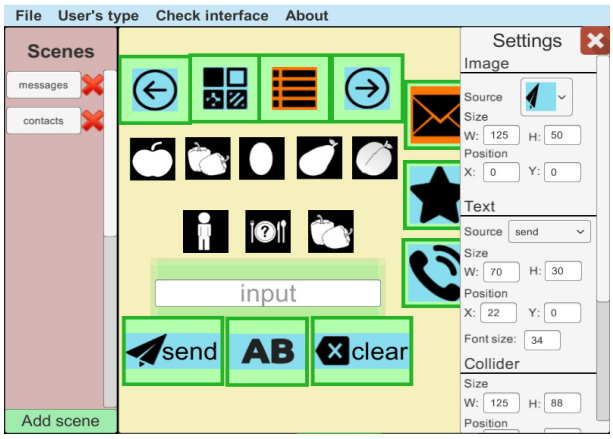


Рис. 7. Панель настройки элемента

Выводы

Разработанное инструментальное средство, использующее созданную базу паттернов и предложенный алгоритм адаптации интерфейса, позволит сократить время, трудоемкость разработки и кастомизации интерфейсов приложений для людей с ограниченными возможностями, а также повысить их качество. В свою очередь это позволит увеличить количество разрабатываемых приложений, и соответственно повысить уровень доступности мобильных приложений для людей с ограниченными возможностями. В дальнейшем планируется расширение базы паттернов, добавление механизмов разрешения конфликтных ситуаций при применении паттернов, расширение возможностей редактора, а также добавление адаптации интерфейса в процессе работы мобильного приложения за счет сбора статистики о поведении пользователя.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. World Health Statistics / World Health Organization. – 2015. – 284 p.

2. Guidelines to identify «Design for All» aspects in ETSI deliverables [Electronic resource] // ETSI. – 2014. — Mode of access: http://www.etsi.org/deliver/etsi_eg/202900_202999/202952/01.01.01_60/eg_202952v010101p.pdf.

3. *Kobsa, A.* Adaptive interfaces [Electronic resource] / A. Cobsa // Encyclopedia of Human-Computer Interaction / ed. W. S. Bainbridge. – 2004. – Mode of access: http://www.ics.uci.edu/~kobsa/papers/2004-HCI-Encyclopedia-kobsa.pdf.

4. *Дворянкин, А.М.* Разработка алгоритма адаптации интерфейсов для людей с ограниченными возможностями / А.М. Дворянкин, Р.Р. Романенко, А.С. Поцелуйко // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 14(178). 2015. С. 49–55.

5. *Peissner, M. A.* Design Patterns Approach to Adaptive User Interfaces for Users with Special Needs / M. Peissner, A. Schuller, D. Spath // Human-Computer Interaction. Design and Development Approaches, 14th International Conference, HCI International 2011, Orlando, FL, USA, Proceedings, Part I. Lecture Notes in Computer Science / ed. J.A. Jacko. – Orlando, 2011. – Vol. 6761. – P. 268–277.

6. MyUIProject [Electronic resource]. – 2011. – Mode of access: http://www.myui.eu/.

ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ И ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

УДК 004.5

Д. В. Быков, Т. Т. Воронина

МОДУЛЬ БИОМЕТРИЧЕСКОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ ЛИЦА ЧЕЛОВЕКА

Волгоградский государственный технический университет
mitril@list.ru, tatianavoronina93@yandex.ru

Ставится проблема развития методов обеспечения безопасности хранимой информации, важной частью которой является процесс защиты данных от несанкционированного получения их лицами, не имеющими на это полномочий. Рассматривается разработка модуля, выполняющего данную функцию, а также приводится реализованный алгоритм метода главных компонент. Приводится пример использования реализованного алгоритма.

Ключевые слова: биометрия, аутентификация, метод главных компонент, изображение лица человека, матрица ковариации, коэффициент распознавания, собственный вектор.

D. V. Bykov, T. T. Voronina

DEVELOPMENT UNIT OF BIOMETRIC AUTHENTICATION FACIAL IMAGE RIGHTS

Volgograd State Technical University

Here is described the common problem of the development of the security of stored information practices, which is an important part of the data protection process from unauthorized reception of persons who have no authority on it. We consider the development of a module that performs this function, and is realized by the algorithm of principal component. An example of the use of the implemented algorithm.

Keywords: biometrics, authentication, principal component analysis, a person's face image, the covariance matrix, the recognition factor, characteristic vector.

Введение

С появлением компьютеров на сегодняшний день насчитывается около миллиона единиц программного обеспечения, большая часть хранимой информации на обычной бумаге была так же перенесена в память этих незаменимых устройств. Каждый второй пользователь имеет это устройство у себя дома и активно использует в своей повседневной жизни. И сегодня такие продвинутые пользователи хранят свои данные, документы, определенную конфиденциальную информацию у себя в персональных компьютерах. Следовательно, доступ к этим данным нужно ограничивать конкретному числу лиц, если разговор идет о какомнибудь предприятии или вообще только одному лицу, если это обычный среднестатистический пользователь.

Отсюда вытекает проблема надежности защиты данных и системы в целом. Точнее сказать, что проблема заключается в изобретении более надежного метода защиты, который будет трудно взломать или подделать. Такой надежность могут похвастаться биометрические методы, в входными данными которых являются отпечаток пальца, скан сетчатки глаза, изображение лица, голос и т.д.

В рамках данной работы мы предлагаем реализовать метод, который распознавал изображение лица человека, который будет внедрен в модуль, с помощью которого пользователь смог бы проходить аутентификацию в систему и получать доступ к своим данным.

Таким образом, цель нашей работы – реализация данного метода и исследование его работы на различных тестах.

© Быков Д. В., Воронина Т. Т., 2017

1. Предметная область

Следует начать с биологической точки зрения. Каждый человек – это определенный генетически набор данных, часть из которых мы наследуем от родителей. Гены определяют внешность человека, особенности внутреннего строения, а также психические особенности. В среднем, у каждого человека около 20 000–25 000 генов. Зачастую дети похожи на своих родителей, но полного сходства нет, а вероятность того, что гены случайно выбранных людей совпадут, вообще ничтожно мала, поэтому все люди различны.

Мы различаем друг друга по чертам лица, которые запоминаем и находим по ним определенного человека в окружении других. Это распознавание существует с древних времен и вот с годами такие люди, как программисты решили обучить этой функции машин, роботов, которые бы выполняли ее в зависимости от поставленной цели и ситуации. Такая же процедура встречается нами, когда, например, в аэропорту при предъявлении паспорта сравнивают нас и фото в паспорте и делают вывод наш это паспорт или нет. В ситуации распознавания машинами, компьютер лишь автоматизирует процедуру, выполняя аналогичную процедуру, с той разницей, что вместо материального фото применяются биометрические данные, записанные в эталонном образе, в роли которых выступает фото, выполненное с веб-камеры. Так как используются физиологические характеристики человека, этот метод относится к статическим методам биометрии. Это самый интуитивно понятный метод идентификации, наиболее близкий к тому, как люди идентифицируют друг друга.

В этой работе мы подробно рассмотрим шаги реализации алгоритма машинного распознавания.

2. Общий алгоритм распознавания биометрическими методами

У биометрических методов распознавания, как и у любой другой технологии, существует общий подход к решению задачи, который предусматривает выделение подзадач и их поэтапное выполнение. Общий алгоритм решения данной задачи приведен на рис. 1. Рисунок представляет собой диаграмму процессов решения данного типа задач. Можно увидеть, что каждый процесс имеет по три типа входных и один тип выходных данных. Сверху на каждый этап влияет управление, которым может являться различные алгоритмы, внешние факторы вроде помех и т. д. На вход каждого этапа поступают входные данные, которыми обычно являются числовые характеристики. Снизу на каждый процесс воздействуют такие подстанции, как артефакты. Под артефактами здесь следует подразумевать такие устройства, которые участвуют в обработки данного действия. И последними в рассмотрении являются выходные данные – это данные, полученные на выходе каждого процесса в результате работы той или иной итерации общего алгоритма.

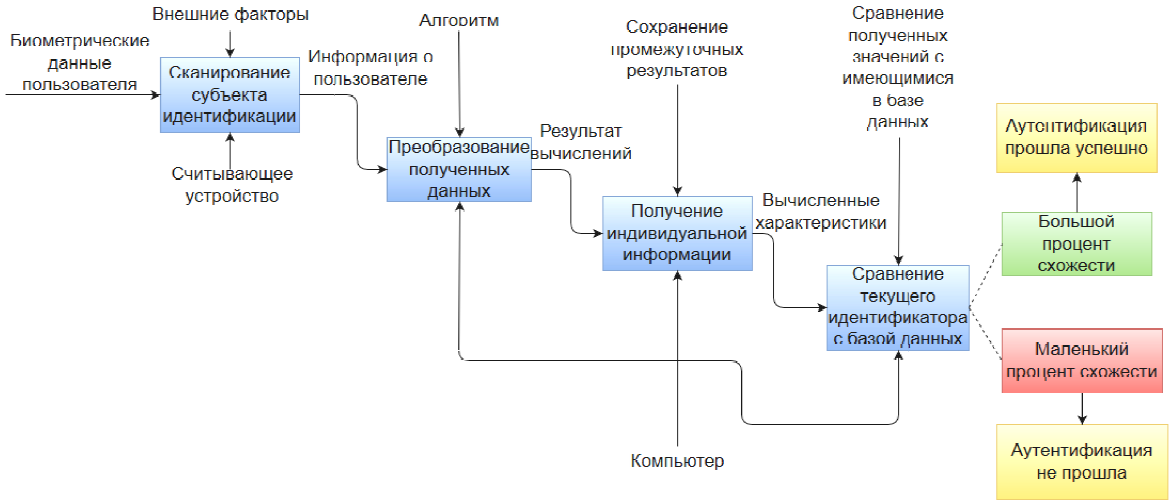


Рис. 1. Общий алгоритм решения распознавания образов

Теперь рассмотрим каждый этап представленной схемы подробнее:

– на первом этапе пользователь, взаимодействуя со считывающим устройством, отправля-

ет свои данные компьютеру. Считывающим устройством здесь выступает веб-камера, предпочтительнее с лучшим качеством съемки. Пользователь делает снимок своего лица и в силу вступает следующий этап. Результатом первого этапа является полученное изображение;

– на втором этапе полученные данные предаются обработке по реализованному разработчиком алгоритму. Это самая важная и сложная подзадача приведенного алгоритма решения. На данном этапе может, к примеру, строиться граф описывающий изображение лица, либо производится обработка на основе нейронной сети, либо на основе Марковских моделей, либо вычисляются контрольные точки. Результатом данного этапа являются вычисленные индивидуальные характеристики, полученные на этапе ранее обработанного изображения. Преобразование изображения в математическую модель;

– на третьем этапе мы получаем построенную математическую модель со всеми вычисленными значениями и здесь мы сохраняем эти значения, которые нам понадобятся на следующем этапе;

– на заключительном этапе мы получаем вычисленные характеристики иимея определенную базу данных с уже имеющимися характеристиками. Суть этапа состоит в том, что происходит сравнение поступивших на вход значений с теми, что уже существуют и на основе сравнения определяется процент схожести с уже имеющимися характеристиками, что и является результатом данного этапа. Можно так же сказать, что от процента схожести будет определяться прошел ли пользователь аутентификацию. И как видно из рисунка, если процент схожести мал, то аутентификация не прошла, иначе – прошла успешно.

3. Метод главных компонент

Метод решения поставленной задачи будет осуществляться методом главных компонент. Метод имеет исключительно математическую основу. Основная суть метода состоит в том, чтобы уменьшить размерность поступающих признаков и отсеять ненужные шумы.

Данный метод применим для этой задачи, потому что в качестве входной информации выступает фотография конкретного пользователя, и мы должны из нее извлечь всю необходимую для нас информацию. Этой информацией являются характерные точки, которые являются уникальными для каждого человека. Из этих точек будет построена матрица, с которой будут осуществляться несколько этапов математических расчетов. Полученная матрица будет уменьшена в размерности, будет удалена вся лишняя информация. Конечно же, информация никогда не бывает лишней, поэтому прежде чем выявить и удалить все шумы, они будут определенное количество раз анализироваться.

В итоговой матрице мы получим самые существенные признаки, которые исходя из названия метода и будут называться главными компонентами.

Еще одной проблемой решения задачи является то, что размерность матрицы зависит от обучающегося набора лиц, содержащегося в базе данных. И чем больше будет этот набор, тем больше будет размерность итоговой матрицы. А матрица входного изображения, поступающего на вход, в разы будет меньше. Поэтому для решения этой проблемы, за основную размерность мы берем размерность матрицы входного изображения. Преобразовав обучающую матрицу к основной размерности, начинаем сравнение. Сравнение заключается в следующем: обучающая матрица содержит пороговые значения, с которыми сравниваются значения матрицы входного изображения. Если значения элементов входного изображения меньше значений элементов обучающей матрицы, то метод не увенчивается успехом и текущий объект не распознан. А распознавание объекта происходит только в том случае, если значения элементов матрицы входного изображения больше, либо равны значениям элементов обучающей матрицы.

Основными шагами метода главных компонент являются:

– преобразование набора лиц в общую матрицу;

– нормировка полученной матрицы;

– построение из полученной матрицы матрицы ковариации;

– выбор первых k-векторов, соответствующих размерности.

И на основе полученной матрицы в последнем шаге можно проводить сравнение с входными значениями. А вообще, эти данные применяются для любой поставленной задачи в таких научных областях, как биология, химия, физика и т. д. Метод является достаточно распространенным, поэтому применим для любой задачи, целью которой является извлечение основных данных и отсеивание ненужных. Рассмотрим подробнее каждый этап данного метода.

На рис. 2 представлен общий вид алгоритма метода главных компонент. Следует сказать, что некоторые этапы из-за своей объемности были разбиты на более малые подзадачи. Каждый этап подробнее будет рассмотрен далее, но скажем о самом основном. Проект обращается к базе данных, где содержатся некоторые фотографии лиц пользователей. Эти фотографии преобразовываются в матрицу, тоже самое происходит и с фотографией, поступившей на вход программы для распознавания. Далее, согласно алгоритму происходят некоторые математические действия, в результате чего обе матрицы нормализуются, приводятся к определенному виду, из которых строятся матрицы ковариации, а из которых уже находятся собственные значения и вектора, которые являются главными компонентами или признаками. Все эти шаги выполняются именно для выделения этих главных признаков, тем самым уменьшая размерности данных, с которыми работает программа.

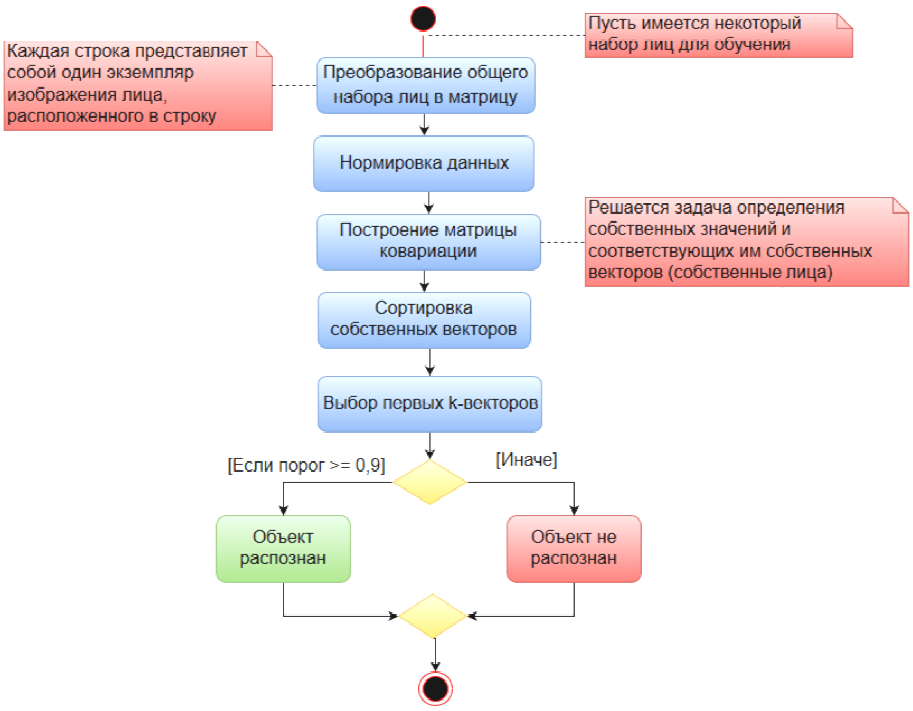


Рис. 2. Алгоритм метода главных компонент

Как уже говорилось ранее, выбранный алгоритм носит название метод главных компонент. Алгоритм так назван, потому что его предназначение – это уменьшить размерность данных с наименьшей потерей количества информации. Данный алгоритм очень часто применяется в таких сферах, как распознавание образов, компьютерном зрении, сжатии данных и т. д.

Вычисление главных компонент в данном алгоритме сводится к вычислению собственных векторов и собственных значений построенной ковариационной матрицы исходных данных. Данный алгоритм очень вариативен и имеет некоторое количество модификаций. Рассмотрим основные его этапы, применяемые в разработанной программе.

Алгоритм оперирует исключительно с математическими матрицами. На первом этапе мы получаем матрицу, содержащую информацию о лице человека, которое мы получили со сделанной фотографии. На втором этапе из уже имеющейся матрицы, мы строим матрицу ковариации, в которой находятся основные признаки изображения лица. Необходимо сказать, что на данном этапе исходная матрица уменьшает свои размеры.

Далее, мы находим собственные значения и векторы полученной матрицы ковариации. На этом этапе матрица также уменьшает свои размеры, оставляя только самую необходимую информацию о лице пользователя. На выходе третьего шага мы получает векторы, эти векторы содержат главные компоненты, о которых нам повествует само название метода.

На предпоследнем этапе мы производим сравнение уже имеющихся данных, собранных с обучающей выборки с данными, которые были собраны с поступившей фотографии. Срав-

нение происходит на основе функции корреляции. Суть сравнения заключается в том, что делается расчет коэффициента корреляции, а именно: отклонении признаков недавних данных от данных обучающей выборки. По результатам этого сравнения на последнем шаге мы получаем коэффициент проводящего распознавания.

Выводы

Целью данной работы была реализация модуля защиты или биометрической аутентификации любых персональных данных. В качестве биометрических данных было выбрано лицо, как уникальная характеристика каждого человека, по которому будет выполняться аутентификация. На вход программы поступает изображение лица человека, снятое на веб-камеру, которая открывается в окне данного приложения. Фотография текущего пользователя анализируется с фотографиями пользователей, которые хранятся в базе данных проекта, а на выходе пользователь получает сообщение о том, прошел ли он аутентификацию в данной системе. Данный модуль может являться защитным программным обеспечением, как для пользовательских систем, так и для персональных компьютеров в целом. Можно считать, что защитное программное обеспечение поднялось на ступень выше, стало доступнее, удобнее и взломщик имеет меньше шансов проникнуть в защищенную систему, а это значит, что цель данной работы считается достигнутой. При этом можно рассмотреть встраивание описанного метода аутентификации в один из стандартных протоколов защиты, например TLS [0].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Брилюк, Д.* Распознавание человека по изображению лица и нейросетевые методы / Д. Брилюк, В. Старовойтов. – Минск : Институт Технической Кибернетики Национальной Академии Наук Беларуси, 2001. – 54 с.

2. *Гонсалес, Р.* Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2005. – 1072 с.

3. *Кухарев, Г. А.* Биометрические системы : Методы и средства идентификации личности человека. – СПб. : Политехника, 2001. – 240 с.

4. *Simon, J. D.* Computer Vision : Models, Learning, and Inference [Электронный ресурс]. – Режим доступа : http://www.computervisionmodels.com/ (дата обращения 21.04.2016).

5. *Быков, Д.В.* Особенности реализации протокола диалога TLS с использованием отечественных стандартов шифрования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2007. Т. 2. № 2(28). С. 113–115.

УДК 004.5

Д. В. Быков, А. А. Мохов

СИСТЕМА ЗАЩИТЫ ОТ НЕСАНКЦИОНИРОВАННОГО ДОСТУПА НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОЛОСА

Волгоградский государственный технический университет

mitril@list.ru, mohovand@gmail.com

Описывается структура системы, обеспечивающей защиту от несанкционированного доступа. Идентификация пользователя осуществляется на основе особенностей его речи. Описаны подсистемы, выбранные алгоритмы. Представлены результаты работы программы.

Ключевые слова: информационная безопасность, биометрия, анализ спектральных характеристик голоса, корреляционный анализ, преобразование Фурье.

D. V. Bykov, A. A. Mokhov

SYSTEM TO PROTECT AGAINST UNAUTHORIZED ACCESS BASED ON THE ANALYSIS OF THE SPECTRAL CHARACTERISTICS OF VOICE

Volgograd State Technical University

The structure of system that provides protection against unauthorized accessis described. User identificationis based on the characteristics of his speech.Subsystems and selected algorithms described. Results of the program are presented.

Keywords: information security, biometrics, analysis of the spectral characteristics of voice, correlation analysis, Fourier transform.

С совершенствованием компьютерных сетей и систем автоматизации увеличивается важность информации. Данные все чаще проходят через электронные устройства. Возможности Интернета открывают большой потенциал для электронной коммерции, но в то же время

© Быков Д. В., Мохов А. А., 2017

требуют более продвинутые системы защиты электронных данных от взлома. Поэтому сегодня для защиты данных нужны совершенно новые методы, построенные на новых принципах. Для устранения таких ситуаций при входе в систему требуется использовать способы идентификации, которые неразрывно связаны с пользователем. Данному требованию соответствуют биометрические атрибуты человеческого организма. И конкретно в этой статье рассмотрено, как работает система на основе голосовой биометрии.

Предпочтение голосовой биометрии объясняется тем, что работа с аудиоинформацией дает приличный уровень надежности распознавания. К тому же большая доля рабочих компьютеров имеют необходимое оснащение для работы со звуком.

Постановка задачи

Разработать и проверить на наборе тестов диктор-независимую систему. Принцип выделения структурных единиц – распознавание по шаблону. В качестве алгоритма распознавания использовать корреляционный анализ спектральных характеристик записи.

Процедура распознавания голосовой команды состоит из двух основных этапов [1]: этапа предварительной обработки, фильтрации и выделения ключевых параметров речи и этапа сравнения входящей реализации команды с множеством предварительно созданных эталонов (шаблонов). Результатом распознавания является эталон с минимальным расхождением входной реализации и шаблона словаря. К тому же, эталон должен сам по себе иметь большой процент совпадения с шаблоном.

Представление аналогового речевого сигнала в цифровой форме

В результате аналогово-цифрового преобразования (АЦП) непрерывный сигнал переводится в ряд дискретных временных отсчетов, каждый из которых является числом. Таким образом, голосовой акустический сигнал, поступающий с микрофона при помощи АЦП, подвергается дискретизации и квантованию [2]. Главная цель процесса оцифровки заключается в получении цифровых данных с высоким отношением сигнал/шум, что необходимо для обеспечения высокой производительности приложений распознавания. В описываемой системе сигнал дискретизируется с частотой 8 кГц и разрядностью 16 битов на каждый отсчет.

Для выполнения записи применяется библиотека NAudio, которая записывает сигнал в массив за определенное время, и сохраняет полученный массив данных в wave файл. При инициализации можно выбрать желаемые параметры записываемого сигнала – частоту дискретизации, число каналов и число бит для задания амплитуды сигнала.

Так как частота речи человека лежит в диапазоне до 4000 Гц, для записи достаточно частоты дискретизации [2] в 8 кГц (по теореме Котельникова), именно такое значение и было выбрано. Используется один канал.

Wave-файл состоит из двух частей – первые 44 байта содержат в себе информацию о записанных данных, частоту дискретизации, число семплов, разрядность (и т. д.), остальное – это последовательность семплов, представляющих значения амплитуды исходного сигнала. Размер каждого семпла определяется числом бит для кодирования амплитуды.

После того, как массив сформирован, он представляет собой набор целых чисел (в нашем случае при 16 битах на амплитуду это значения в диапазоне [–32 768, 32 767], который неудобен для работы, поэтому значения в массиве подвергаются нормализации и становятся дробными числами в диапазоне [–1, 1].

Распространяясь через воздух, величина речевого сигнала будет затухать, а частота увеличивается. Для того чтобы предотвратить это, пропускаем речевой сигнал через речевой фильтр высоких частот [3] для обработки. Разностное уравнение фильтра высоких частот показано в следующем виде:

$$S(n) = X(n) - 0.95X(n-1), 1 \le n \le L,$$

где S (n) представляет собой сигнал, который был обработан с предварительной коррекцией, а $X(n)$ представляет собой исходный сигнал, и L есть длина каждого кадра аудио-сигнала (число выборок).

Выполнение преобразования Фурье

Для формирования вектора параметров в системах распознавания речи наиболее широко применяются методы спектрального анализа, так как наиболее важная информация скрыта именно в частотной области сигнала.

Поэтому, для перевода записанного сигнала и шаблонов в спектральное представление, нам необходимо произвести над ними преобразование Фурье. Это является самым основным элементом распознавания.

Дискретное преобразование Фурье[4] – это одно из преобразований Фурье, широко применяемых в алгоритмах цифровой обработки сигналов (его модификации применяются в сжатии звука в MP3, сжатии изображений в JPEG и др.), а также в других областях, связанных с анализом частот в дискретном (к примеру, оцифрованном аналоговом) сигнале.

Формула ДПФ:

$$F(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \left(f(n) \cdot \exp\left(-i \frac{2\pi}{N} \cdot n \cdot k \right) \right),$$
$$k = 0..N-1,$$

где N – число выборок; n – номер отсчета; k – номер частотного коэффициента.

После выполнения преобразования получен новый массив частот исходного сигнала, который вдвое короче исходного – 4096 значений.

Выполнение последовательного корреляционного анализа

Далее, когда у нас есть массив амплитуд спектра исходного сигнала, и шаблонов, мы можем производить вычисление коэффициента корреляции между ними. Для этого сначала находятся математические ожидания, по формуле:

$$m_x = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N} X(n),$$

где N – число выборок;

Затем находятся центральные моменты, используются формулы:

$$Q_x = \sum_{n=0}^{N} (m_x - X(n))^2,$$

$$Q_y = \sum_{n=0}^{N} \left(m_y - Y(n)\right)^2,$$

$$Q_{xy} = \sum_{n=0}^{N} (m_x - X(n))(m_y - Y(n)).$$

После этого вычисляется коэффициент корреляции по формуле:

$$P_{xy} = \frac{Q_{xy}}{\sqrt{Q_x \cdot Q_y}}.$$

Значение коэффициента корреляции считается для каждой пары – шаблон – исходный сигнал, затем выбирается шаблон с наибольшим коэффициентом корреляции, и он принимается за распознанную команду.

Результаты тестирования программы

При первом тестировании задействовались шесть мужских голосов и два женских для определения нижнего порога совпадения. Совпадение голосов исчисляется в процентах, поэтому необходимо было определить максимально допустимый порог схожести. Эталонный голос является мужским, поэтому для тестирования применялись в основном мужские голоса. В табл. 1 отражены совпадения голоса испытуемого пользователя с эталонными моделями в процентном соотношении.

Таблица 1

Соотношения схожести голосов с эталонными образцами

Голос	Образец 1, %	Образец 2, %	Образец 3, %
Мужской голос №1	79	78	80
Мужской голос №2	65	67	70
Мужской голос №3	50	55	62
Мужской голос №4	75	78	63
Мужской голос №5	60	68	55
Женский голос №1	40	35	42
Женский голос №2	50	48	45
Эталонный	83	94	82

По данной информации нижний порог совпадения был взят 82%.

Для второго тестирования работы программы были записаны несколько различных голосов. В частности, женский и два мужских голоса произносили слово «пароль».

Первоначально распознавание проводилось с использованием одного набора шаблонов для каждой команды. Результаты тестирования приведены в табл. 2. По ним можно судить о среднем коэффициенте распознавания в 0,667.

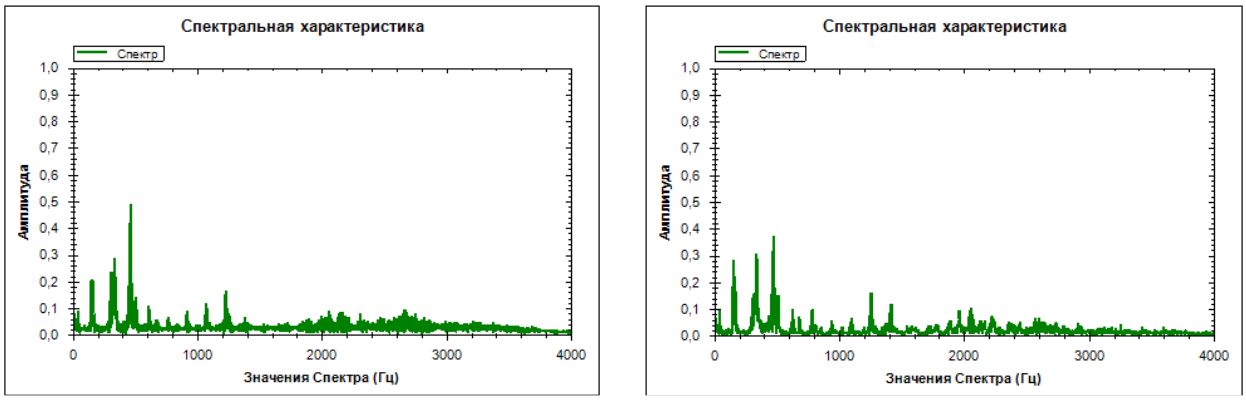


Рис. 1. Спектр шаблонов для женского голоса

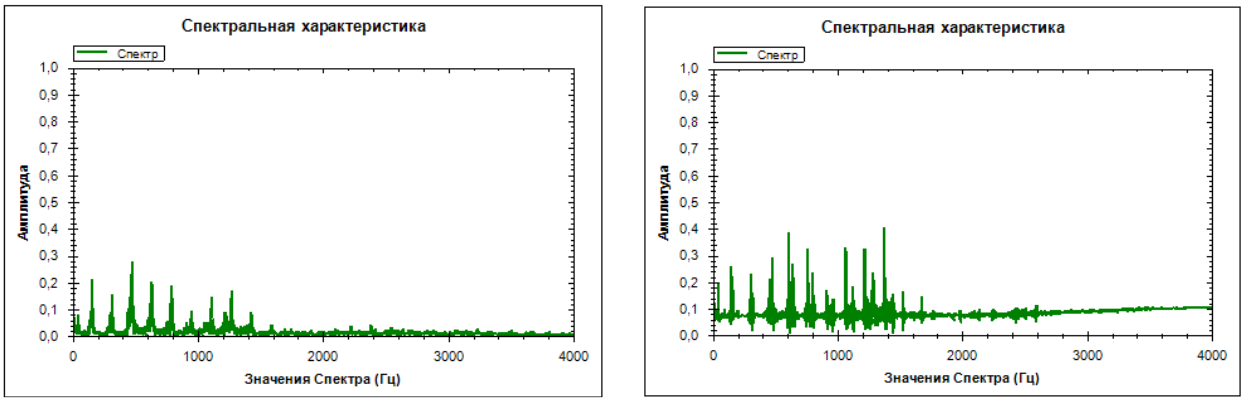


Рис. 2. Спектр шаблонов для мужского голоса № 1

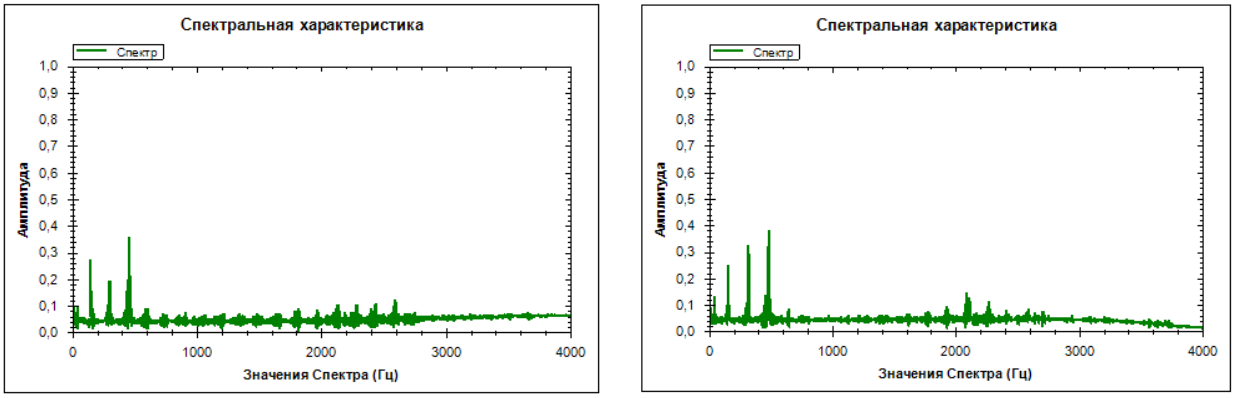


Рис. 3. Спектр шаблонов для мужского голоса № 2

Таблица 2

Результаты исследования на распознавание (1 шаблон)

Женский голос				Мужской голос № 1				Мужской голос № 2			
F	B	L	+/-	F	B	L	+/-	F	B	L	+/-
0,721	0,523	0,717	+	0,351	0,388	0,350	+	0,427	0,706	0,431	-
0,746	0,584	0,662	+	0,716	0,700	0,673	-	0,310	0,648	0,226	-
0,617	0,607	0,682	-	0,432	0,680	0,340	+	0,670	0,443	0,788	+
0,689	0,471	0,686	+	0,361	0,678	0,249	+	0,684	0,459	0,756	+
0,804	0,580	0,711	+	0,750	0,555	0,773	-	0,636	0,562	0,729	+

Окончание табл. 2

Женский голос				Мужской голос № 1				Мужской голос № 2			
0,287	0,623	0,163	-	0,572	0,738	0,478	+	0,674	0,595	0,841	+
0,638	0,565	0,588	+	0,805	0,676	0,766	-	0,773	0,689	0,690	-
0,694	0,745	0,633	-	0,638	0,755	0,602	+	0,672	0,623	0,777	+
0,800	0,644	0,738	+	0,614	0,764	0,537	+	0,715	0,685	0,815	+
0,799	0,526	0,757	+	0,532	0,708	0,392	+	0,508	0,727	0,743	-
Распознано:		70%		Распознано:		70%		Распознано:		60%	
Общий коэффициент распознавания:								0,667			

Результаты тестирования показали, что использование только одного шаблона не очень хорошо отражается на отделении шаблонов друг от друга (так как их огибающие довольно похожи), поэтому было решено использовать для каждой команды не один, а несколько шаблонов. Это должно увеличить качество отделения похожих команд друг от друга и повысить устойчивость системы к изменению голосовых характеристик диктора.

Таблица 3

Результаты мужского голоса (3 шаблона)

Женский голос			Мужской голос № 1			Мужской голос № 2			+/-
B1	B2	B3	F1	F2	F3	L1	L2	L3	
0,481	0,647	0,518	0,733	0,584	0,579	0,730	0,602	0,594	+ (F1)
0,605	0,375	0,610	0,441	0,680	0,723	0,486	0,321	0,334	+ (F3)
0,353	0,529	0,347	0,522	0,525	0,414	0,541	0,594	0,568	- (L2)
0,595	0,653	0,681	0,713	0,693	0,721	0,702	0,641	0,610	+(F3)
0,608	0,477	0,657	0,573	0,698	0,743	0,576	0,427	0,404	+ (F3)
0,531	0,543	0,611	0,618	0,649	0,680	0,624	0,511	0,465	+ (F3)
0,663	0,505	0,689	0,589	0,744	0,799	0,569	0,450	0,434	+ (F3)
0,533	0,644	0,564	0,752	0,710	0,672	0,727	0,603	0,608	+ (F1)
0,468	0,649	0,519	0,665	0,631	0,586	0,671	0,689	0,671	- (L2)
0,601	0,313	0,575	0,436	0,633	0,694	0,469	0,248	0,267	+ (F3)
0,502	0,549	0,550	0,564	0,656	0,630	0,580	0,586	0,568	+ (F2)
0,450	0,281	0,433	0,357	0,595	0,568	0,375	0,290	0,303	+ (F2)
0,547	0,304	0,537	0,382	0,688	0,679	0,402	0,289	0,336	+ (F2)
0,430	0,583	0,459	0,625	0,587	0,563	0,598	0,539	0,536	+ (F1)
0,551	0,450	0,551	0,580	0,691	0,693	0,578	0,386	0,375	+ (F3)
Общий коэффициент распознавания:							0,867		

При использовании 3-х шаблонов для каждой команды вместо одного, как и ожидалось, коэффициент распознавания увеличился (0,867 вместо 0,667). Следовательно, целесообразность использовать несколько наборов шаблонов для каждой команды подтверждена.

С мощной звуковой картой и качественным микрофоном результаты могут оказаться гораздо лучше.

Заключение

При разработке системы были выполнены следующие задачи:

– написана программа, использующая преобразование Фурье и методы математической статистики (автокорреляция) и позволяющая распознавать пользователей по заранее записанным шаблонам;

– проведено тестирование созданного программного продукта для получения нижней

границы распознавания и определения качества работы системы в целом.

Проведенные тесты показывают, что программа имеет достойный процент распознавания и может соперничать с аналогами в плане надежности. Кроме этого, разработка является перспективной и может быть улучшена использованием более сложных типов преобразований, методов обработки сигналов. Существует возможность использовать нейросети для построения системы распознавания речи. Главные причины использовать нейросети – это систематизирование и способность классифицировать, обучаясь без учителя. Все голосовые сообщения имеется возможность представить вектором в определенном параметрическом пространстве, потом данный вектор остается только сохранить в нейросети [5]. Пример модели нейросети, накапливающей информацию без учителя – это самоорганизующаяся карта признаков Кохонена. В ней для большого количества входных импульсов создаются нейронные ансамбли, описывающие эти импульсы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Малькова, Е.С., Шабалина, О.А.* Методы распознавания речи в задаче автоматизированного выявления дефектов произношения // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 2(157). С. 65–70.

2. *Лукин, А. С.* Введение в цифровую обработку сигналов (математические основы) : учебное пособие факультета ВМК МГУ / А. С. Лукин. – М., 2007. – 54 с.

3. *Лайонс, Р.* Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс ; пер. с англ. под ред. А. А. Бритова. – 2-е изд. – М. : Бином-Пресс, 2006. – 656 с. : ил.

4. *Смит, С.* Цифровая обработка сигналов. Практическое руководство для инженеров и научных работников / Стивен Смит ; пер. с англ. А. Ю. Линовича, С. В. Витязева, И. С. Гусинского. – М. : Додэка-XXI, 2012. – 720 с.

5. *Фролов, А.* Синтез и распознавание речи. Современные решения [Электронный ресурс] / А. Фролов, Г. Фролов, 2003. – Режим доступа : http://www.frolov-lib.ru (дата обращения 07.06.2016).

УДК 004.942

Д. В. Козлов

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ УГРОЗ МОШЕННИЧЕСТВА В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Волгоградский государственный университет

mrdiko4@gmail.com

В статье проводится анализ использования существующих моделей, методов и алгоритмов обнаружения и предотвращения угроз мошенничества. Описываются основные тренды, применяемые в анти-мошеннических системах. Перечисляются наиболее важные направления исследования в области управления угрозами информационной безопасности.

Ключевые слова: анализ угроз, статистический анализ, проактивный мониторинг, машинное обучение, информационная система.

D. V. Kozlov

ANALYSIS METHODS FOR DETECTION AND PREVENTION FRAUD IN INFORMATION SYSTEMS

Volgograd State University

The article analyzes the use of existing models, methods and algorithms for fraud detection and prevention. It describes the basic trends that apply to the anti-fraud systems. It lists the most important areas of research in the field of fraud management.

Keywords: fraud analysis, statistical analysis, proactive monitoring, machine learning, information system.

Введение

На сегодняшний день компьютерные технологии охватывают практически все сферы деятельности и оказывают влияние на качество жизни современного человека. Повсеместное внедрение информационно-телекоммуникационных систем и технических средств связано с появлением новых видов преступлений, связанных с злоумышленными воздействиями на компьютерные системы. Для предотвращения этой деятельности создаются системы управления информационной безопасностью в самых разных сферах деятельности. Требования к методам информационной безопасности существенно повысились с появлением интернет-банкинга, распространением интернет-торговли и платежных систем, ориентированных на интернет-транзакции.

© Козлов Д. В., 2017

В данной статье рассматриваются подходы к предотвращению компьютерных преступлений, связанных с умышленным искажением, изменением или раскрытием данных с целью получения выгоды, которые принято называть компьютерным мошенничеством.

«Глобальное исследование мошенничества» 2014, проведенное Ассоциацией сертифицированных специалистов по расследованию хищений (ACFE) [1] показало, что типичная организация теряет в среднем 5% доходов каждый год из-за мошенничества. В глобальном масштабе, по оценкам экспертов по борьбе с мошенничеством, это приводит к потерям в размере около $ 3,7 трлн. В последние годы развитие новых технологий также предоставило дополнительные способы, с помощью которых преступники могут совершить мошенничество [2].

Для использования методов анализа данных и машинного обучения необходимы достаточно сложные и трудоемкие исследования, которые имеют дело с различными областями знаний, таких как финансовая сфера, экономика, деловая практика и право. Первые отрасли, в которых начали использовать методы анализа данных для предотвращения мошенничества, были телефонные компании, страховые компании и банки [3].

В последнее время особую популярность приобрели методы, основанные на анализе данных и проактивном мониторинге. Благодаря проактивному мониторингу становится возможным оперативное определение и устранение угроз безопасности, прогнозирование поведения системы и выявление «слабых» мест. Согласно докладу ACFE от 2014 года [1], организации, использующие мониторинг и анализ данных, снизили свои средние потери по сравнению с теми организациями, которые эти инструменты не использовали, на 59,7%.

На рынке специализированного программного обеспечения имеется широкий спектр инструментов, способных поддержать и усилить антимошенническую активность, однако не все из них достаточно эффективны. Связано это, прежде всего, с постоянным изменением и усложнением сценариев злоумышленников. Случаи мошенничества могут быть похожи по содержанию и внешнему виду, но, как правило, не являются идентичными [4]. В связи с этим необходимо совершенствовать методы обнаружения и предотвращения угроз мошенничества.

Общие подходы к обнаружению и предотвращению угроз мошенничества в информационных системах

Обнаружение угроз в информационных системах, как правило, связано с анализом больших объемов данных. Анализ данных можно представить как углубленное изучение значимых и существенных характеристик имеющихся данных с целью выявления значимой информации, с использованием специальных методов и приемов.

Согласно специальной литературе, связанной с анализом данных в качестве системы для предупреждения и выявления мошенничества, можно выделить более 24 видов анализа [5], которые условно можно разбить на две группы: оперативный анализ и стратегический анализ [6] (см. таблицу).

Методы и инструменты анализа мошеннических угроз

Метод	Стратегический анализ	Оперативный анализ
Методы	Анализ рисков, Анализ результатов, Анализ явлений, Ситуационный анализ изображений, Статистический анализ, SWOT-анализ PESTEL анализ, Метод сценариев	Ситуационный анализ (Case-анализ), Сравнительный ситуационный анализ (Сравнительный case-анализ) Анализ ссылок (Links analysis), Анализ потока (Flow analysis), Анализ событий (Event analysis) Анализ активностей (Analysis of activities), Финансовой анализ, Анализ фона (Analysis phones), Анализ рисков, SWOT-анализ, Анализ подозрительных профайлов, Геопространственный анализ, Технологический сценарий и т.д.
Процедуры	Графическое представление (гистограммы, карты отношений, карта потоков, карты активностей, карта событий, геопространственные карты), Пространственный просмотр (Space viewing), Трехмерный просмотр и т.д.	
Инструменты	Mathematics, Statistics, Office Excel, Access, SAS, iDEA, GeoMedia Professional, GPS, Map, ANB, iBase, Palantir, paper, pencil, etc.	

Для управления угрозами информационной безопасности (Fraud Management) применяют следующие подходы:

– имитационное моделирование и оценки сценариев действий злоумышленников [7];

– интеллектуальный анализ данных для классификации, кластеризации сегментации данных, автоматического нахождения ассоциаций и правил в данных [8];

– экспертный анализ, содержащий автоматизированные экспертизы для выявления мошенничества в виде правил;

– методы машинного обучения для автоматического определения характеристик мошенничества, анализа профилей пользователей, паттернов поведения.

Примерами применения методов статистического анализа данных в сфере информационной безопасности могут служить:

– расчет средних значений параметров, характеризующих функционирование информационных систем и поведение пользователей, анализ их вариативности;

– анализ распределения вероятностей бизнес-процессов, с учетом динамики изменения параметров распределений;

– анализ динамики показателей, характеризующих функционирование информационных систем и поведения пользователей;

– методы обнаружения аномалий транзакций пользователей.

Методы машинного обучения и искусственного интеллекта могут быть разделены на две категории: «контролируемое» и «неконтролируемое» обучение.

Контролируемые методы

При «контролируемом» обучении берется случайная подвыборка всех ситуаций, и каждая из них вручную классифицируется как «мошенническая» или «немошенническая». Относительно редкие события, такие как мошенничество, должны иметь большое количество проб для того, чтобы получить достаточно большой размер выборки. Эти вручную классифицированные записи затем используются для обучения контролируемых алгоритмов машинного обучения. После построения модели с использованием этих данных, алгоритм должен иметь возможность классифицировать новые записи как мошеннические или не мошеннические.

Контролируемые нейронные сети, нечеткие нейронные сети, а также комбинации нейронных сетей и правил, были широко изучены и использованы для обнаружения мошенничества в сетях мобильной связи и мошенничества в финансовой отчетности [9–10].

Байесовское обучение нейронной сети осуществляется для обнаружения мошенничества с кредитными картами, телекоммуникационного мошенничества, выявления случаев мошенничества автопретензий, и мошенничества медицинского страхования.

В работе [11] описан подход, основанный на интегрировании экспертных и статистических методов для выявления угроз информационной безопасности.

В других источниках [12–13] описаны методы использующие инструменты анализа социальных сетей и ссылок (Link Analysis) для отслеживания социальных связей известных мошенников и сопоставления их со связями других лиц.

Контролируемы методы обнаружения мошенничества способны обнаружить только те ситуации, которые имели место ранее и были классифицированы человеком. Для обнаружения нового типа мошенничества может потребоваться использование неконтролируемого алгоритма машинного обучения.

Неконтролируемые методы

В противоположность контролируемым методам, неконтролируемые методы не используют помеченных записей.

Следует упомянуть некоторые важные исследования с неконтролируемым обучением для выявления случаев мошенничества. Например, в работе [14] используется Peer Group Analysis и Break Point Analysis для анализа угроз при операциях с использованием кредитных карт. Описываемый подход основан на обнаружении отдельных объектов, которые демонстрируют аномальное поведение и отслеживании мест аномального поведения для конкретной учетной записи.

Анализ поведенческих изменений на основе метода трехуровневого профилирования описан в работе [15]. Данный метод работает на уровне аккаунта и указывает на какое-либо значительное отклонение от нормального поведения учетной записи, что может свидетельствовать о наличии рисков мошенничества. Для этого «нормальные» профили создаются на основе данных без мошеннических записей. Эта же идея используется авторами работы [16], отличительной особенностью которой является использование рекуррентной нейронной

сети для обнаружения аномального поведения, которое может свидетельствовать об имеющихся мошеннических угрозах.

Заключение

Методы анализа данных и машинного обучения в качестве инструмента для предотвращения и обнаружения мошенничества могут быть успешно использованы в самых разных областях.

На сегодняшний день не существует набора инструментов, одновременно сочетающего в себе статистический анализ, визуализацию данных, интеллектуальный анализ данных и инструменты фильтрации. Таким образом, является актуальной задача разработки систем проактивного мониторинга и анализа мошеннических угроз, сочетающие в себе все четыре перечисленные особенности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Report to the Nations on Occupational Fraud and Abuse. [Электронный ресурс] // Association of Certified Fraud Examiners (ACFE). 2014. URL: https://www.acfe. com/rttn/docs/2014-report-to-nations.pdf (дата обращения: 13.12.2016).

2. *Bolton, R. & Hand, D.* (2002). Statistical Fraud Detection: A Review (With Discussion). Statistical Science 17(3): 235–255.

3. *Decker, P.* March/April 1998. Data Mining's Hidden Dangers. Banking Strategies, 6–14.

4. *G.K. Palshikar.* The Hidden Truth – Frauds and Their Control: A Critical Application for Business Intelligence, Intelligent Enterprise, vol. 5, no. 9, 28 May 2002, pp. 46–51.

5. *Banarescu, A.* Detecting and Preventing Fraud with Data Analytics, Emerging Markets Queries in Finance and Business – EMQFB, Bucuresti, 2014.

6. *Cofan S.M., Ivan, L., Dogaru V., Cios A., Savin M.* 2014. Analiza Informatiilor. Manual, ed. Ministerului Afacerilor Interne, ISBN 978-973-745-129-3.

7. *Умницын, М.Ю., Садовникова, Н.П.* Формализация построения сценариев злоумышленных воздействий на информационную систему // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2016. № 14(198). С. 80–83.

8. *Bresfelean, V. P., Bresfelean, M., Ghisoiu, N., & Comes, C. A.* 2008. Determining students' academic failure profile founded on data mining methods. In Information Technology Interfaces, IEEE, pp. 317–322.

9. *Green, B. P. and J. H. Choi* (1997). "Assessing the Risk of Management Fraud Through Neural Network Technology." Auditing: A Journal of Practice & Theory 16(1): 14–28.

10. *Estevez, P., C. Held, and C. Perez* (2006). Subscription fraud prevention in telecommunications using fuzzy rules and neural networks. Expert Systems with Applications 31, 337–344.

11. *Fawcett, T.* (1997). AI Approaches to Fraud Detection and Risk Management: Papers from the 1997 AAAI Workshop. Technical Report WS-97-07. AAAI Press.

12. *Phua, C., Lee, V., Smith-Miles, K. and Gayler, R.* (2005). A Comprehensive Survey of Data Mining-based Fraud Detection Research. Clayton School of Information Technology, Monash University.

13. *Cortes, C. & Pregibon, D.* (2001). Signature-Based Methods for Data Streams. Data Mining and Knowledge Discovery 5: 167–182.

14. *Bolton, R. & Hand, D.* (2001). Unsupervised Profiling Methods for Fraud Detection. Credit Scoring and Credit Control VII.

15. *Murad, U. & Pinkas, G.* (1999). Unsupervised Profiling for Identifying Superimposed Fraud. Proceedings of PKDD'99.

16. *Burge, P. & Shawe-Taylor, J.* (2001). An Unsupervised Neural, Network Approach to Profiling the Behaviour of Mobile Phone, Users for Use in Fraud Detection. Journal of Parallel and Distributed Computing 61: 915–925.

РОБОТОТЕХНИКА

УДК 519.71+ 531.32+ 62-529+629+ 623.1/.7:623.41

А. В. Леонард, Е. С. Брискин, И. А. Горбов

О ВЛИЯНИИ «ХАРАКТЕРА» ГРУППЫ РОБОТОВ НА ИХ ДВИЖЕНИЕ*

Волгоградский государственный технический университет

Alex-Leonard@yandex.ru, dtm@vstu.ru, gorbovigor34@yandex.ru

Описывается подход формирования поведения в группе роботов с помощью введения «характера» для каждого робота и группы роботов в виде линейной взвешенной свертки интегральных показателей – «черт характера». В качестве примера выступает задача о взаимодействии двух роботов при их движении вдоль прямой линии.

Ключевые слова: характер робота, групповое управление, планирование поведения.

A. V. Leonard, E. S. Briskin. I. A. Gorbov

INFLUENCE OF «CHARACTER» ROBOTS GROUPS TO THEIR MOVEMENT

Volgograd State Technical University

The approach of behavior's formation in a robots group by introducing a «character» for each robot and a robots group in the form of a linear weighted convolution integral indicators – «character traits» was described . As an example serves the problem of interaction between the two robots as they move along a straight line.

Keywords: character of the robot, group control, planning behavior.

Введение

В настоящее время, в области робототехники, одной из актуальных задач является задача интеллектуализации управления как одного робота, так роботов в составе группы [1–4]. Примером таких задач могут быть задачи связанные с автоматизацией транспортной логистики, систем пожаротушения, диагностики участков земли средствами беспилотных летательных аппаратов, комплексные исследования других планет. Подобные системы, учитывающие быстроменяющиеся особенности окружающей среды, должны быть снабжены средствами измерения, оценки информации и планирования поведения [5] группы роботов, решающих общую задачу. Но понятие интеллектуального управления не однозначно и различными исследователями трактуется по-разному. Выбор непосредственно роботом вида своего движения при перемещении из одного положения в пространстве в другое является предметом интеллектуального управления, так же как и выбор человеком вида движения автомобиля при перемещении его из одного места в другое. Поэтому определение уравнений движений перед его началом или в процессе – есть планирование. Любая задача интеллектуального управления – это задача об оптимизации выполнения той или иной операции. Для мобильных роботов, суть которых перемещение из одного положения в другое, есть только одно обобщенное свойство – движение. А как робот осуществляет это движение – можно назвать «поведением». В соответствии с этим, как одним из элементов интеллектуального управления, вводится и формализуется понятие «характер» мобильного робота. По аналогии с человеком «характер» робота определяется набором черт, например таких как: «целеустремленность», «осторожность», «бережливость» и др. После формализации «характера» на базе интегральных критериев [6] строятся законы программного движения, обеспечивающие Парето-оптимальность. Однако некоторые «лингвистически

© Леонард А. В., Брискин Е. С., Горбов И. А., 2017

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 16-38-60086 мол_а_дк, 14-08-01002 А).

нечетко» вводимые «черты характера», для робота, взаимодействующего в группе, «вежливость» или «агрессивность» могут формализовываться не только через характеристики самого робота, но и через параметры роботов, находящихся в его окружении, которые либо помогают, либо препятствуют выполнению задачи. При взаимовлиянии параметров в «характерах» одних роботов на параметры в «характерах» других можно говорить и о возможности введения «характера» группы роботов в целом.

1. Постановка задачи

Рассматривается прямолинейное вдоль одной оси движение центров масс группы из N роботов, которые в начальный момент времени находятся в покое с координатами x_{0i}. Движение осуществляется в течении времени τ. Т. е. должен быть построен характер (индивидуальные правила поведения) не одного робота, а группы взаимодействующих роботов и определено влияние такого характера на движение группы. Пусть характер группы роботов описывается критерием I [7–9], который представляет собой аддитивную взвешенную свертку показателей H_{ij}, описывающих характеры каждого из роботов в отдельности, и слагаемых H_{ik}, которые учитывают их взаимодействие:

$$I = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{M_i} k_{ij}H_{ij} + \sum_{i=1}^{N}\sum_{k=1}^{N} k_{ik}H_{ik} + \ldots,$$

где M_i – количество показателей, слагающих характер i-го робота,

Для рассматриваемого случая характер каждого робота в отдельности описывается одним показателем – «осторожность» / «беспечность», который формализуется следующим образом:

$$H_i = \int_0^{\tau} \ddot{x}_i^2 dt.$$

«Вежливость» / «грубость» k-го робота по отношению к i-му роботу определяется свойством пропускать вперед k-м роботом i-го робота и формируется на основе показателя:

$$H_{ik} = \int_0^{\tau} \left(x_k - x_i\right) dt.$$

Если требуется целеориентировать группу роботов на движение в одном направлении, то соответствующей «чертой характера» группы роботов может являться следующий показатель:

$$H = \int_0^{\tau} \sum_{i=1}^{N} x_i dt.$$

Тогда необходимо так определить уравнения движения роботов, что бы функция качества

$$I = \sum_{i=1}^{N} k_i \int_0^{\tau} \ddot{x}_i^2 dt - \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} k_{ij} \int_0^{\tau} \left(x_j - x_i\right) dt - k \int_0^{\tau} \sum_{i=1}^{N} x_i dt \qquad (1.1)$$

была минимальна, где k_i, k_{ij}, k – весовые коэффициенты, устанавливающие значимость той или иной черты характера каждого робота и их группы.

2. Метод решения

Метод решения поставленной задачи основывается на определении неизвестных функций, обеспечивающих минимум функционала (1.1). Для этого составляются уравнения Эйлера – Пуассона, которые в рассматриваемом случае имеют вид [10], [11], [12], [13]:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_i} - \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{x}_i}\right) + \frac{d^2}{dt^2}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{x}_i}\right) = 0, \qquad (2.1)$$

где

$$\Phi = \sum_{i=1}^{N} k_i \ddot{x}_i^2 + \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N} k_{ij}\left(x_j - x_i\right) - k\sum_{i=1}^{N} x_i. \qquad (2.2)$$

В общем случае могут иметь место и изопериметрические условия и тогда в (2.2) появятся множители Лагранжа. После подстановки (2.2) в (2.1) формируется система дифференциальных уравнений 4-го порядка.

3. Моделирование поведения группы из двух роботов

В соответствии с (1.1) и (2.2):

$$\Phi = k_1\ddot{x}_1^2 + k_2\ddot{x}_2^2 - k_3\left(x_2 - x_1\right) - k\left(x_1 + x_2\right).$$

Осуществляя преобразования и подстановки:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x_1} = k_3 - k, \quad \frac{\partial \Phi}{\partial x_2} = -k_3 - k,$$

$$\frac{d^2}{dt^2}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{x}_1}\right) = 2k_1 x_1^{IV}, \quad \frac{d^2}{dt^2}\left(\frac{\partial \Phi}{\partial \ddot{x}_2}\right) = 2k_2 x_2^{IV},$$

$$\left\{ x_1^{IV} = \frac{k - k_3}{2k_1}, \; x_2^{IV} = \frac{k + k_3}{2k_2}, \right.$$

уравнения движения, двух роботов способных к взаимодействию, принимают следующий общий вид:

$$\begin{cases} x_1 = \dfrac{k-k_3}{2k_1}\dfrac{t^4}{24} + C_{11}\dfrac{t^3}{6} + C_{12}\dfrac{t^2}{2} + C_{13}t + C_{14}, \\ x_2 = \dfrac{k+k_3}{2k_2}\dfrac{t^4}{24} + C_{21}\dfrac{t^3}{6} + C_{22}\dfrac{t^2}{2} + C_{23}t + C_{24}. \end{cases}$$

Если роботы стартуют с наперед заданными координатами, скоростями, ускорениями и резкостями ($\dddot{x}_1, \dddot{x}_2$):

$$\begin{cases} C_{14} = x_1(0), \\ C_{13} = \dot{x}_1(0), \\ C_{12} = \ddot{x}_1(0), \\ C_{11} = \dddot{x}_1(0), \end{cases} \quad \begin{cases} C_{24} = x_2(0), \\ C_{23} = \dot{x}_2(0), \\ C_{22} = \ddot{x}_2(0), \\ C_{21} = \dddot{x}_2(0), \end{cases}$$

то законы перемещения сводятся к следующим функциям:

$$\begin{cases} x_1 = \dfrac{k-k_3}{2k_1}\dfrac{t^4}{24} + \dddot{x}_1(0)\dfrac{t^3}{6} + \ddot{x}_1(0)\dfrac{t^2}{2} + \dot{x}_1(0)t + x_1(0), \\ x_2 = \dfrac{k+k_3}{2k_2}\dfrac{t^4}{24} + \dddot{x}_2(0)\dfrac{t^3}{6} + \ddot{x}_2(0)\dfrac{t^2}{2} + \dot{x}_2(0)t + x_2(0). \end{cases}$$

Таким образом уравнения, описывающие поведение роботов в группе, зависят от начальных условий и от соотношений весовых коэффициентов «черт группового характера». Для упрощенной иллюстрации влияния особенностей роботов – соотношений $(k-k_3)/k_1$, $(k+k_3)/k_2$ на процесс движения, рассматриваются законы движения при $\dddot{x}_{1(2)}(0)=0$, $\ddot{x}_{1(2)}(0)=0$, $\dot{x}_{1(2)}(0)=0$:

$$\begin{cases} x_1 = \dfrac{k-k_3}{2k_1}\dfrac{t^4}{24} + x_1(0), \\ x_2 = \dfrac{k+k_3}{2k_2}\dfrac{t^4}{24} + x_2(0). \end{cases}$$

Пусть отстающим роботом в начале движения является второй робот с соответствующей координатой $x_2(0)$, а соотношения равны: $(k-k_3)/k_1 = -1$, $(k+k_3)/k_2 = 1$. В этом случае поведение роботов характеризуется кривыми рис. 1.

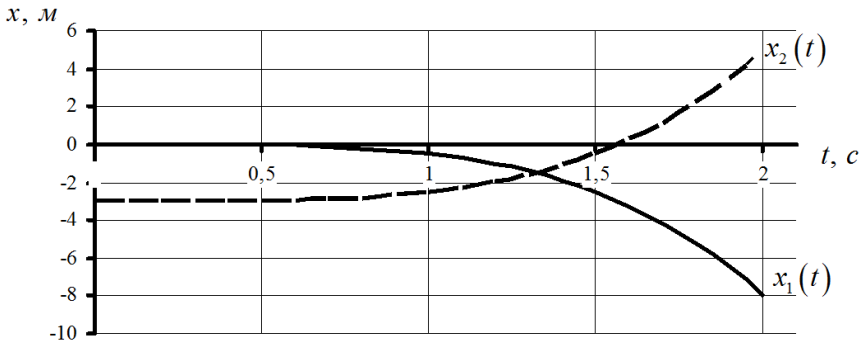


Рис. 1. Встречное движение двух роботов

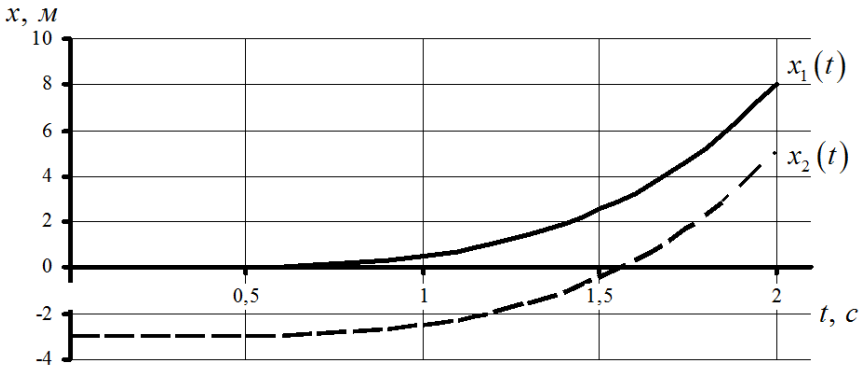


Рис. 2. Сближение двух роботов

Полученные графики изменения координат роботов показывают, что установленные соотношения весовых коэффициентов заставляют двигаться роботов навстречу друг друга, после чего они удаляются друг от друга.

При $\left(k-k_3\right)/k_1=1,\ \left(k+k_3\right)/k_2=1$ роботы начинают совместно двигаться в одном направлении, но неограниченно долго сближаясь (рис. 2). Установка коэффициентов $\left(k-k_3\right)/k_1=1,$ $\left(k+k_3\right)/k_2=2$ приводит к желаемому результату – второй робот опережает первого (рис. 3).

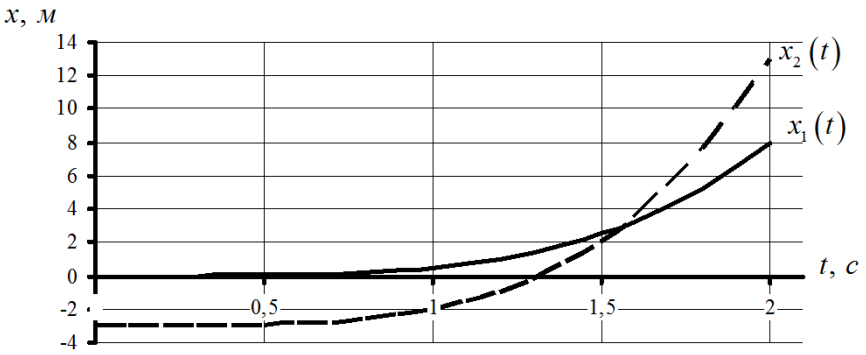


Рис. 3. Опережение одного робота другим

Изменяя указанные соотношения коэффициентов, можно регулировать поведение роботов.

Заключение

Управление посредством введения «характера» каждого робота в отдельности и группы взаимодействующих роботов подразумевает наличие канала обмена информацией между роботами (процедуры согласования), при котором осуществляется распределение ролей: «отстающий» и «опережающий», через установку соответствующих соотношений $\left(k-k_3\right)/k_1,$ $\left(k+k_3\right)/k_2$. Так как в процессе выполнения общей задачи возможна необходимость неоднократной смены ролей роботов, то $\left(k-k_3\right)/k_1,\ \left(k+k_3\right)/k_2$ оказываются функциями времени и подчиненными условиям смены ролей. Например: ситуация пожаротушение. Оба робота-пожарника двигаются по одной дороге к источнику возгорания, но второй робот обладает запасом воды, а первый – нет. В этом случае возникает необходимость, чтобы второй робот опередил первого. Установка общих логических правил оценки ситуации обоими роботами: наличие/отсутствие воды на борту, наличие/отсутствие впереди идущей машины позволяют роботам выбрать $\left(k-k_3\right)/k_1,$ $\left(k+k_3\right)/k_2$ для режима «опережения», что может расцениваться как интеллектуализация поведения в группе роботов. Таким образом, предлагаемый подход к планированию поведения в группе роботов позволит реализовать интеллектуальную систему управления для роботов разного типа в том числе и шагающих [14–18].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Lin Rui, Du Zhijiang and Sun Lining* Moving Object Tracking based on Mobile Robot Vision" // ICMA. – 2009.

2. *Darintsev, O. V. and Migranov, A. B.* Genetic Algorithms-Based Path- Planning System for the Motion of a Group of Mobile Micro-robots // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2007. – Vol. 46, No 3.

3. *Hiroshi Koyasu and Jun Miura* Mobile robot motion planning considering path ambiguity of moving obstacles // Intelligent Autonomous Systems. – 2006. – No 9.

4. *Eiji Uchibe, Masakazu Yanase, and Minoru Asada* Behavior generation for a mobile robot based on the adaptive fitness function // IAS-6. – 2000.

5. *Юревич, Е.И.* Интеллектуальные роботы. М.: Машиностроение, 2007.

6. *Леонард, А.В., Горбов, И.А., Калинин, Я.В., Брискин, Е.С.* Интеллектуализация системы управления робота, моделируемого материальной точкой на плоскости // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2015. № 14(178).

7. *Васильев, Е.М.* Система оптимального управления подвешенным грузом // Вестник ВГТУ. – 2012. – № 1.

8. *Жога, В.В., Гаврилов, А.Е., Еременко, А.В.* Оптимальный закон горизонтального перемещения мобильного робота с ортогональными шагающими движителями // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2010. Т. 8. № 6(66). С. 28–32.

9. *Statnikov, R.B. Matusov, J.B.* Multicriteria Optimization and Engineering. – Springer, 1995.

10. *Охоцимский, Д.Е., Энеев, Т.М.* Некоторые вариационные задачи, связанные с запуском искусственного спутника Земли // Успехи физических наук. – 1957.

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.

12. *Briskin, E.S., Kalinin, Ya. V., Maloletov, A. V., Chernyshev, V.V.* On the energy efficiency of cyclic mechanisms // Mechanics of Solids. – 2014. – Vol. 49, No 1.

13. *Ловейкин, В.С., Шевчук, О.Г.* Влияние параметров крановой тележки с гибким подвесом груза на оптимальный динамический режим движения // Вестник ХНАДУ. – 2014. – № 65–66.

14. *Леонард, А.В.* Цикловый шагающий движитель с направляющими. Свойства. Управление. Пути совершенствования // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2013. Т. 16. № 8 (111).

15. *Briskin, E.S, Shurygin, V.A., Chernyshev, V.V., Maloletov, A.V., Sharonov, N.G., Kalinin, Ya.V., Leonard, A.V., Serov, V.A., Mironenko, K.B., Ustinov, S.A.* Problems of Increasing Efficiency and Experience of Walking Machines Elaborating // ROMANSY 2014.

16. *Briskin, E.S., Zhoga, V.V., Chernyshev, V.V., Maloletov, A.V., Kalinin, Ya.V., Sharonov, N.G.* Walking machines (elements of theory, experience of elaboration, application) // CLAWAR 2010. – 2010.

17. *Briskin, E.S., Leonard, A.V.* Stability of translational motion of a walking machine with cyclic drives // Journal of Computer and Systems Sciences International. – 2013. – Vol. 52, No 6.

18. *Briskin, E.S., Chernyshev, V.V., Maloletov, A.V.* Power efficiency and control algorithms of walking machine with cycle propellers // CLAWAR 2003. – 2003.

Редактор
Л. Н. Рыжих

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–61113 от 19 марта 2015 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 24-80-00
E-mail: president@vstu.ru

Темплан 2017 г. Поз. № 1ж. Подписано в печать 27.01.2017 г. Формат 60 х 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 13,95. Уч.-изд. л. 14,45.
Тираж 80 экз. Заказ №
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.