



Издается
с января 2004 г.

ISSN 2500-0586

Главный редактор журнала
В. И. Лысак – академик РАН,
д-р техн. наук, профессор,
ректор университета

Редакционная коллегия:

И. И. **Артюхов** – д.т.н., проф., СГУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
А. В. **Баранов** – д.ф.-м. н., проф.,
РГУ нефти и газа, г. Москва
А. Б. **Голованчиков** – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. Е. **Городецкий** – д.т.н., проф., ИПМаш
РАН, г. Санкт-Петербург
А. П. **Дарманян** – д.т.н., проф. ВГАУ,
г. Волгоград
А. М. **Иванов** – д. т. н., проф.,
МГТУ (МАДИ), г. Москва
В. В. **Коротаев** – д.т.н., проф., ИТМО,
г. Санкт-Петербург
Г. О. **Котиев** – д. т. н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. **Львов** – д. т. н., проф., СГУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
Мертен Клеменс – д. т. н., проф.,
университет г. Штутгарт, Германия
В. А. **Марков** – д. т. н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. В. **Навроцкий** – д.х.н., проф., ВолгГТУ
Б. В. **Скворцов** – д.т.н., проф., СГАУ
им. академика С. П. Королева, г. Самара
О. А. **Тишин** – д.т.н., проф., ВолгГТУ
Е. А. **Федянов** – д.т.н., проф., ВолгГТУ
В. М. **Шаповалов** – д.т.н., проф., ВолгГТУ;
В. М. **Шарипов** – д.т.н., проф., МГТУ
(МАМИ), г. Москва
А. Н. **Шилин** – д.т.н., проф., ВолгГТУ

Ответственный секретарь
Ю. В. **Аристова** – доц., к.т.н.

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по каталогу
Агентства «Роспечать»
для Российской Федерации –
94193(ОК+ЭК). По вопросам
подписки обращаться
в издательство.

Тел. издательства ВолгГТУ:
+7 (8442) 24-84-06,
fax: +7 (8442) 24-84-06,
e-mail: otr@vstu.ru

Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт научно-технический журнал

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору
в сфере связи, информационных технологий и массовых
коммуникаций (Роскомнадзор)
ПИ № ФС77-64543 от 22 января 2016 г.

№ 4 (21)
Декабрь
2017

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет»

Периодичность: четыре раза в год

Адрес редакции:
РФ, 400005, Волгоград, пр. В.И. Ленина, 28
Гл. редактор: телефон: – (8442) 23-00-76
e-mail: rector@vstu.ru

Отв. секретарь: телефон: – (8442) 24-84-31
e-mail: pahp@vstu.ru

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

*Перепечатка из журнала «Энерго- и ресурсосбережение:
промышленность и транспорт» категорически запрещена без
оформления договора в соответствии с действующим
законодательством РФ*

*При перепечатке материалов ссылка на журнал «Энерго- и
ресурсосбережение: промышленность и транспорт» обязательна*

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

Energo- i resursosberezhenie:

Promyshlennost' i transport

(Energy and Resource Saving:
Industry and Transport)
science-technical journal

ISSN 2500-0586

Journal is registered in the Federal Service for supervision
of communications, information technology and mass media
(Roscomnadzor) registration certificate:
ПН .N° (ФЦ77-64543, registration date: 22 January 2016

Editor-in-chief

V. I. Lysak – Academician of
RAS Academician of RAS,
D. Sc. (Technical), Professor,
Rector of VSTU

Editorial Board:

I. I. Artuchov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
A. V. Baranov – D. Sc. (Physical and Math.),
Prof., Gubkin University, Moscow.
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. E. Gorodetskij – D. Sc. (Engineering),
Prof., IPME, St. Petersburg
A. P. Darmanyan – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSAU, Volgograd
A. M. Ivanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
MADI, Moscow
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
ITMO University, St. Petersburg
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
M. Clemens – D. Sc. (Engineering), Prof.,
University of Stuttgart, Germany
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. V. Navrotsky – D. Sc. (Chemistry), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. V. Skvortsov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
Samara University, Samara
O. A. Tishin – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
V. M. Shapovalov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
V. M. Sharipov – D. Sc. (Engineering),
Prof., UMech, Moscow

Executive Secretary
Yu. V. Arisova – PhD, Associate Prof.

The journal is distributed by subscription.
Index of the journal in the catalogue
of the Agency «Rospechat» for the Russian
Federation – 94193(OK+ЭК).
Concerning subscription turn to the editorial
office.

VSTU Publisher tel.:
+7 (8442) 24-84-06,
fax: +7 (8442) 24-84-06,
e-mail: otr@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,
«Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport », 2017

№ 4 (21)
December
2017

FOUNDER:

**Federal State Budgetary Educational Institution of Higher
Education «Volgograd State Technical University»**

Periodicity: four times per year

Editorial office address:

Russia, 400005, Volgograd, Lenin avenue, 28. Editor-In-Chief:
tel.: +7 (8442) 23-00-76 e-mail: rector @vstu.ru

Executive Secretary: +7 (8442) 24-84-31 e-mail:
pahp@vstu.ru

Official website: www.vstu.ru

Published by 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 – retained by the authors.***

*Reprint from the journal « Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i
transport » is strongly forbidden -without conclusion of an agreement in accordance
with the current legislation of the Russia Federation.*

*When reprint the materials, the citation to the journal «Energo- i
resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is obligatory*

The articles are published for free.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Агапитов Н. П. 30
Алексейчук В. А. 20
Ву Т. Х. 37
Голованчиков А. Б. 37, 40, 48, 58, 62, 66, 76
Горбаченко В. И. 69
Горюнов В. А. 28
Горюнов И. В. 28
Губицкая Е. В. 40, 51
Доан М. К. 37
Евдошенко Т. Г. 66
Закожурников С. С. 23
Закожурникова Г. С. 23
Залипаева О. А. 48, 62
Каблов В. Ф. 76
Карапузова Н. Ю. 13, 17
Катруш Е. В. 30
Коберник А. А. 62
Коворова П. Э. 37
Ковылин А. В. 13, 17
Курылева Л. В. 76
Лапшина С. В. 72
Левин Ю. В. 20
Лепилов В. И. 7
Лучковский Д. В. 40, 51
Мазина Л. В. 40, 51
Меренцов Н. А. 66
Минатуллаев Ш. М. 34
Парахневич Д. В. 40, 51
Парахневич Е. Д. 40, 51
Прохоренко А. В. 58
Прохоренко Н. А. 58
Русакова Г. Г. 40, 51
Русакова М. М. 40, 51
Рябов И. М. 34
Сазонов Б. П. 13, 17
Сильченков Д. Д. 70
Стефаненко И. В. 7
Топилин М. В. 66
Усадский Д. Г. 7
Федянов Е. А. 20, 28
Хилдаяти А. 48
Шагарова А. А. 69
Шаповалов В. М. 72
Шестов И. О. 28
Ширяев С. А. 34
Шумский С. Н. 20
Юсупов Ю. Г. 34

AUTHOR INDEX

- Agapitov N. P. 31
Alekseichuk V. A. 20
Doan M. C. 37
Evdoshenko T. N. 66
Fedyanov E. A. 20, 28
Golovanchikov A. B. 37, 40, 48, 58, 62, 66
Gorbachenko V. I. 70
Goryunov I. V. 28
Goryunov V. A. 28
Gubitskaya E. V. 40, 51
Hildayati A. 48
Kablov V. F. 76
Karapuzova N. Yu. 14, 17
Katrush E. V. 31
Kobernik A. A. 62
Kovorova P. E. 37
Kovylin A. V. 14, 17
Kuryleva L. V. 76
Lapshina S. V. 72
Lepilov V. I. 7
Levin Y. V. 20
Luchkovskij D. V. 40, 51
Masina L. V. 40, 51
Merencov N. A. 66
Minatullaev S. M. 34
Parakhnevich D. V. 40, 51
Parakhnevich E. D. 40, 51
Prohorenko A. V. 58
Prohorenko N. A. 58
Rusakova G. G. 40, 51
Rusakova M. M. 40, 51
Ryabov I. M. 34
Sazonov B. P. 14, 17
Shagarova A. A. 70
Shapovalov V. M. 72
Shestov I. O. 28
Shiryayev S. A. 34
Shumskiy S. N. 20
Silchenkov D. D. 31
Stefanenko I. V. 7
Topilin M. V. 66
Usadsky D. G. 7
Vu T. H. 37
Yusupov Yu. G. 34
Zakozhurnikov S. S. 29
Zakozhurnikova G. S. 23
Zalipaeva O. A. 48, 62

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Стефаненко И. В., Усадский Д. Г., Лепилов В. И.</i> Исследование теплотехнических параметров ограждений для повышения энергетической эффективности зданий и сооружений.....	7
<i>Карапузова Н. Ю., Ковылин А. В., Сазонов Б. П.</i> Исследование тепловых режимов светопрозрачных конструкций ограждений зданий.....	13
<i>Карапузова Н. Ю., Сазонов Б. П., Ковылин А. В.</i> Влияние теплофизических свойств на тепловой режим ограждающих конструкций зданий.....	17
<i>Федянов Е. А., Левин Ю. В., Алексейчук В. А., Шумский С. Н.</i> Использование добавок свободного водорода для улучшения топливной экономичности роторно-поршневого двигателя ванкеля.....	20
<i>Закожурникова Г. С., Закожурников С. С.</i> Моделирование эффективного коэффициента теплопроводности пористых тел.....	23
<i>Горюнов И. В., Шестов И. О., Горюнов В. А., Федянов Е. А.</i> Обоснование новых методик расчета систем горячего водоснабжения.....	28
<i>Сильченко Д. Д., Катруш Е. В., Агапитов Н. П.</i> Повышение безопасности дорожного движения на участке ул. Карбышева в границах ул. Молодогвардейцев и бул. Профсоюзов (г. Волжский).....	30
<i>Рябов И. М., Юсупов Ю. Г., Минатуллаев Ш. М., Ширяев С. А.</i> Оценка доли кинетической энергии автобуса, накапливаемой в аккумуляторе системы рекуперации при торможении.....	34
<i>Голованчиков А. Б., Ву Т. Х., Коворова П. Э., Доан М. К.</i> Моделирование процесса ультрафильтрации с учетом структуры потока очищаемого раствора.....	37
<i>Русакова Г. Г., Голованчиков А. Б., Русакова М. М., Парахневич Е. Д., Парахневич Д. В., Мазина Л. В., Лучковский Д. В., Губицкая Е. В.</i> Определение технологических параметров процесса сушки отходов горчишно-маслобойного производства.....	40
<i>Голованчиков А. Б., Залипаева О. А., Хилдаяти А.</i> Исследование гидродинамических характеристик гофрированной нерегулярной насадки.....	48
<i>Русакова Г. Г., Русакова М. М., Парахневич Д. В., Парахневич Е. Д., Мазина Л. В., Лучковский Д. В., Губицкая Е. В.</i> Технологическая стадия извлечения биологически активных веществ из отходов переработки семян горчицы.....	51
<i>Прохоренко Н. А., Голованчиков А. Б., Прохоренко А. В.</i> Реконструкция отделения рассева пульверизата алюминия.....	58
<i>Голованчиков А. Б., Залипаева О. А., Коберник А. А.</i> Методика определения значения константы генри для процесса абсорбции.....	62
<i>Голованчиков А. Б., Топилин М. В., Меренцов Н. А., Евдошенко Т. Г.</i> Насадка для тепло- и массообменных процессов.....	66
<i>Шагарова А. А., Горбаченко В. И.</i> Анализ выбора полупроницаемых мембран в зависимости от технологических параметров процесса ультрафильтрации.....	69
<i>Лапина С. В., Шаповалов В. М.</i> При течении жидкости эллиса в трубе.....	72
<i>Голованчиков А. Б., Каблов В. Ф., Курьева Л. В.</i> Интегральная оценка экологической безопасности при одновременном воздействии нескольких источников загрязнений.....	76

CONTENTS

<i>Stefanenko I. V., Usadsky D. G., Lepilov V. I.</i> INVESTIGATION OF HEAT-TECHNICAL PARAMETERS OF FENCES FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF BUILDINGS AND STRUCTURES.....	7
<i>Karapuzova N. Yu., Kovylin A. V., Sazonov B. P.</i> RESEARCH OF A THERMAL CONDITIONS OF TRANSLUCENT DESIGNS OF PROTECTIONS OF BUILDINGS.....	14
<i>Karapuzova N. Yu., Sazonov B. P., Kovylin A. V.</i> INFLUENCE OF THERMAL PROPERTIES ON A THERMAL CONDITIONS OF THE PROTECTING STRUCTURES OF BUILDINGS.....	17
<i>Fedyanov E. A., Levin Y. V., Alekseichuk V. A., Shumskiy S. N.</i> USE OF HYDROGEN ADDITIVES FOR IMPROVEMENT OF FUEL ECONOMICITY OF ROTARY-PISTON WANKEL ENGINE.....	20
<i>Zakozhurnikova G. S., Zakozhurnikov S. S.</i> MODELING OF THE EFFECTIVE COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY OF POROUS MATERIALS.....	23
<i>Goryunov I. V., Shestov I. O., Goryunov V. A., Fedyanov E. A.</i> JUSTIFICATION OF NEW METHODS OF CALCULATION OF HOT WATER SUPPLY SYSTEMS.....	28
<i>Silchenkov D. D., Katrush E. V., Agapitov N. P.</i> IMPROVEMENT OF TRAFFIC SAFETY ON THE AREA OF ST. KARBYSHEVA WITHIN ST. MOLODOGVARDEITSEV AND BLVD. PROF SOYUSOV IN VOLZHISKY CITY.....	31
<i>Ryabov I. M., Yusupov Yu. G., Minatullaev S. M., Shiryaev S. A.</i> THE FRACTION OF THE KINETIC ENERGY OF THE BUS IS STORED IN THE ACCUMULATOR OF THE RECOVERY SYSTEM WHEN BRAKING.....	34
<i>Golovanchikov A. B., Vu T. H., Kovorova P. E., Doan M. C.</i> MODELLING ULTRAFILTRATION PROCESS WITH ACCOUNT TAKEN OF THE FLOWS STRUCTURE OF THE CLEANING SOLUTION.....	37
<i>Rusakova G. G., Golovanchikov A. B., Rusakova M. M., Parakhnevich E. D., Parakhnevich D. V., Mazina L. V., Luchkovskij D. V., Gubitskaya E. V.</i> DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS THE DRYING PROCESS OF WASTE MUSTARD OIL PRODUCTION.....	40
<i>Golovanchikov A. B., Zalipaeva O. A., Hildayati A.</i> INVESTIGATION OF HADRODYNAMIC CHARACTERISTICS OF CORRUGATED IRREGULAR PACKING.....	48
<i>Rusakova G. G., Rusakova M. M., Parakhnevich D. V., Parakhnevich E. D., Masina L. V., Luchkovskij D. V., Gubitskaya E. V.</i> TECHNOLOGICAL STAGE OF EXTRACTION OF BIOLOGICALLY ACTIVE SUBSTANCES FROM WASTES OF MUSTARD SEEDS.....	51
<i>Prohorenko N. A., Golovanchikov A. B., Prohorenko A. V.</i> RECONSTRUCTION OF THE BRANCH OF THE SCREENING OF PULVERIZATE ALUMINUM.....	58
<i>Golovanchikov B. B., Zalipaeva O. A., Kobernik A. A.</i> METHODOLOGY FOR DETERMINING THE VALUE OF HENRY CONSTANTS FOR THE PROCESS OF ABSORPTION.....	62
<i>Golovanchikov A. B., Topilin M. V., Merencov N. A., Evdoshenko T. N.</i> PACK FOR HEAT AND MASS-EXCHANGE PROCESSES.....	66
<i>Shagarova A. A., Gorbachenko V. I.</i> ANALYSIS OF SEMI-PROPELLED MEMBRANES SELECTION IN DEPEND OF ULTRAPHILTRATION'S TECHNOLOGICAL PARAMETERS..	70
<i>Lapshina S. V., Shapovalov V. M.</i> CURVE RESPONSE TO IMPULSE DISTURBANCES IN FLUID FLOW ELLIS PIPE.....	72
<i>Golovanchikov A. B., Kablov V. F., Kuryleva L. V.</i> INTEGRATED ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACT OF SECURITY WHILE SEVERAL SOURCES OF CONTAMINATION.....	76

УДК 697.31

И. В. Стефаненко, Д. Г. Усадский, В. И. Лепилов

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ОГРАЖДЕНИЙ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ**

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: usadsky@bk.ru

Приведена методика исследования теплотехнических параметров ограждений неразрушающими методами контроля, которая может применяться при повышении энергетической эффективности существующих зданий и сооружений. Рассмотрено влияние неоднородности конструкции ограждений на теплофизические свойства материалов.

Ключевые слова: теплофизические свойства, ограждающие конструкции, неразрушающие методы контроля, энергетическая эффективность.

I. V. Stefanenko, D. G. Usadsky, V. I. Lepilov

**INVESTIGATION OF HEAT-TECHNICAL PARAMETERS
OF FENCES FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY
OF BUILDINGS AND STRUCTURES**

Volgograd State Technical University

The technique of research of thermal technical parameters of fences by non-destructive control methods is given, which can be applied at increase of energy efficiency of existing buildings and constructions. The influence of the heterogeneity of the fence construction on the thermophysical properties of materials is considered.

Keywords: thermophysical properties, enclosing structures, non-destructive methods of control, energy efficiency.

При решении задач повышения энергетической эффективности существующих зданий и сооружений важную роль играет определение фактических теплотехнических параметров ограждающих конструкций. В выборе методик исследования очевидный приоритет перед другим способами имеют неразрушающие методы контроля. При проектировании здания теплотехнические характеристики отдельной ограждающей конструкции (например, стены) считаются условно однородными. Однако на практике допускаемые в процессе строительства и эксплуатации зданий нарушения приводят к перераспределению тепловых потоков в ограждениях и образуются очаги с повышенными тепловыми потерями (мостики холода). Поэтому перед устранением указанных дефектов (например, при капитальном ремонте жилого фонда) требуется максимально достоверно определять размеры «проблемных» участков и теплотехнические характеристики ограждающих конструкций в целом.

Тепловизионное обследование как метод предварительной диагностики позволяет проявить картину тепломассообменных процессов в ограждающих конструкциях. В данном примере тепловизионное обследование здания выполнено в соответствии с «Требованиями к проведению обследования теплозащитных качеств ограждающих конструкций зданий с использованием теплового метода неразрушающего контроля» для оценки теплозащитных характеристик наружных ограждающих конструкций, оценки теплоаккумулирующей способности здания и выявления утечек тепловой энергии, вызванной дефектами строительных конструкций и неправильной регулировкой систем отопления.

Тепловизионное обследование проведено при устойчивой работе системы отопления, при отсутствии атмосферных осадков, тумана, смога и задымленности.

Обследуемые поверхности во время проведения измерений не подвергались воздействию прямого и отраженного солнечного облучения, а также отопительных приборов.

Обследование проводилось при помощи тепловизора Testo 882 сер. № 1982985.

Диапазон измерения температуры – $-20\text{ °C} \dots 100\text{ °C} / 0\text{ °C} \dots 350\text{ °C}$.

Тип детектора – FPA 320x240 пикселей, a.Si.

Погрешность измерения температуры – $\pm 2\text{ °C}$, $\pm 2\%$ от изм. значения ($-20\text{ °C} \dots 350\text{ °C}$) / 3% от изм. зн. ($+350\text{ °C} \dots 550\text{ °C}$).

Оптическое поле зрения – $32^\circ \times 23^\circ$.

Спектральный диапазон – $8 \dots 14\ \mu\text{m}$.

Частота обновления кадров – 9 Гц.

Система наведения – ручное.

Функции отображения тепловизора – ИК-изображение, реальное изображение, ИК-изображение + реальное изображение.

Фокусировка памяти тепловизора – ручная + моторизированная.

Устройство памяти тепловизора – SD карта памяти, 2 Гб (приблизительно 1000 снимков).

Защита от внешних воздействий – класс защиты корпуса IP 54.

Источник питания тепловизора – быстрозаряжаемый, литиево-ионный аккумулятор.

Время автономной работы тепловизора – приблизительно 4 часа

Тепловизионное обследование проводилось 10.12.2012 года в 08 часов утра.

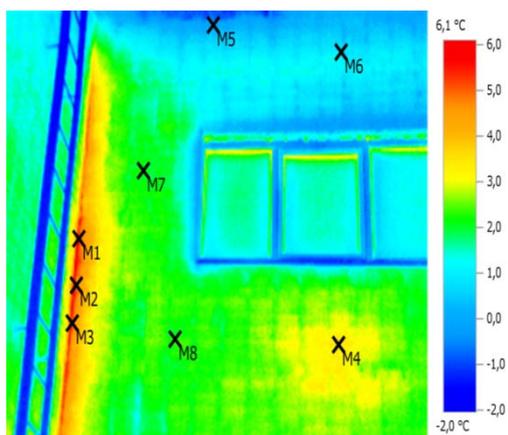
Температура окружающего воздуха на момент обследования от -1 °C до -4 °C .

Влажность – 50 %.

Погодные условия – облачно.

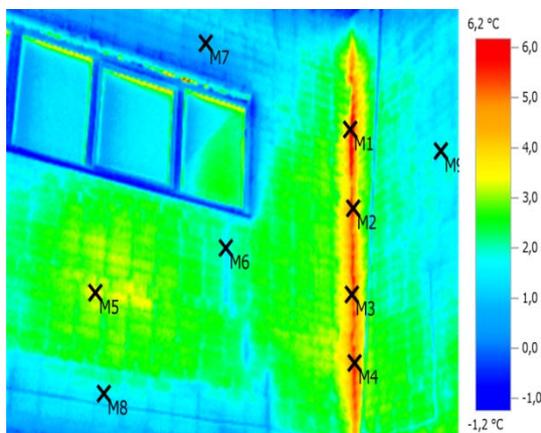
Отдельно стоящее нежилое административное здание, двухэтажное.

Год ввода в эксплуатацию – 1986 год.



Термограмма № 1

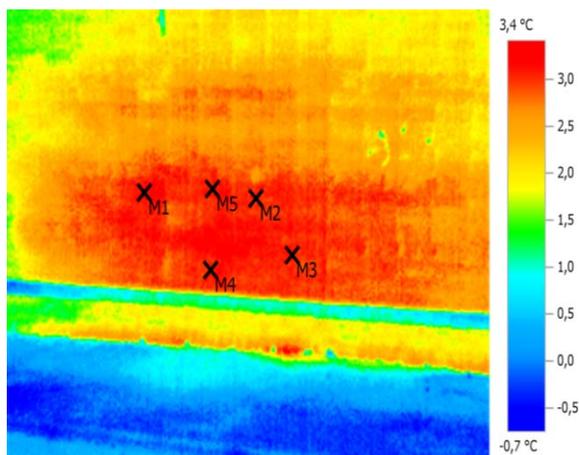
На термограмме № 1 обнаружено тепловое проявление радиаторов отопления, мостики холода в угловой части здания.



Термограмма № 2

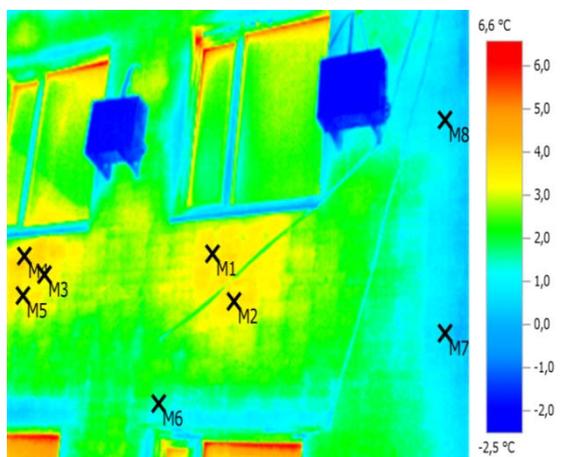
На термограмме № 2 обнаружено тепловое проявление радиатора отопления, мостики холода в угловой части здания.





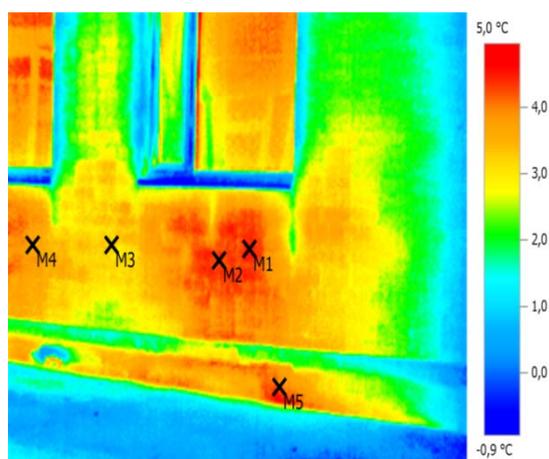
Термограмма № 3

На термограмме № 3 обнаружены мостики холода в цокольной части здания.



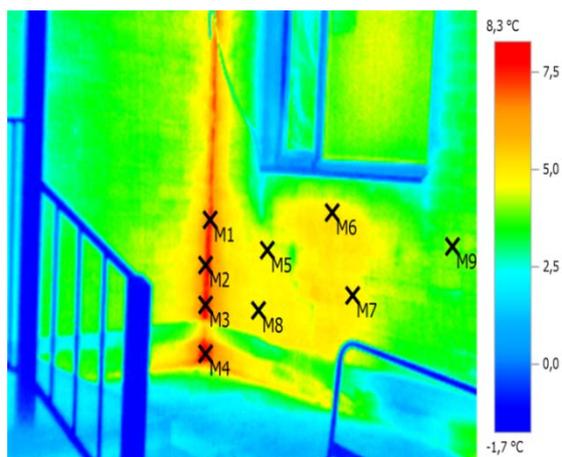
Термограмма № 4

На термограмме № 4 обнаружено тепловое проявление радиаторов отопления.



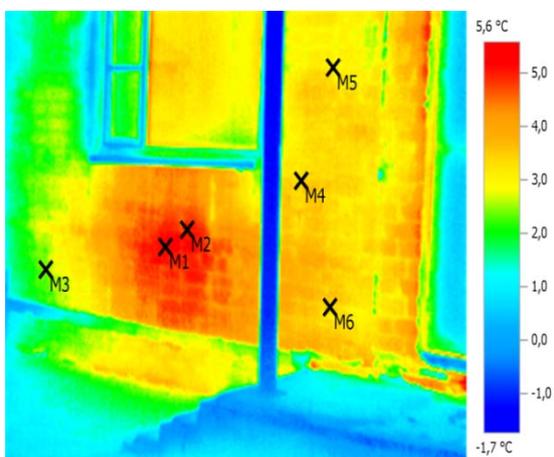
Термограмма № 5

На термограмме № 5 обнаружено тепловое проявление радиатора отопления.



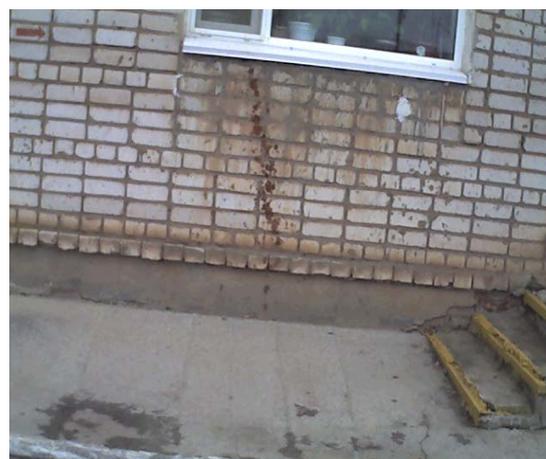
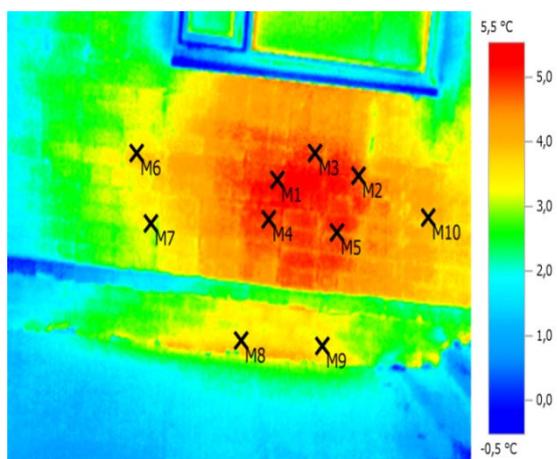
Термограмма № 6

На термограмме № 6 обнаружено тепловое проникновение радиаторов отопления, мостики холода в угловой части здания.



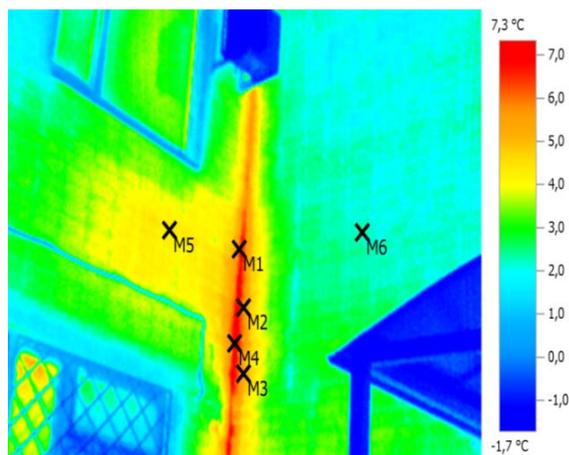
Термограмма № 7

На термограмме № 7 обнаружены мостики холода в цокольной части здания.



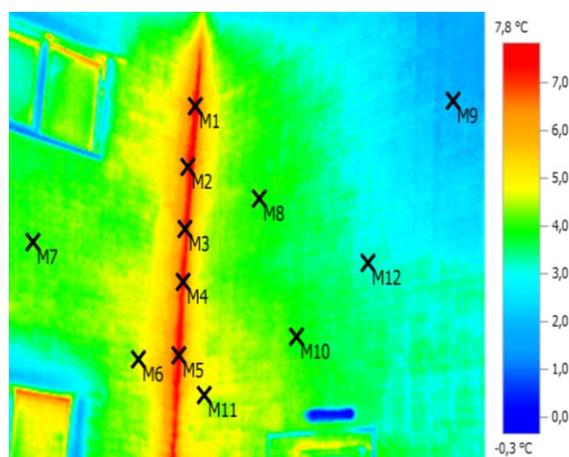
Термограмма № 8

На термограмме № 8 обнаружено тепловое излучение подземных тепловых сетей.



Термограмма № 9

На термограмме № 9 обнаружено тепловое проявление радиаторов отопления, мостики холода в примыкании стен.



Термограмма № 10

На термограмме № 10 обнаружено тепловое проявление радиаторов отопления, мостики холода в угловой части здания.



Теплотехническое обследование является комплексным. Оно предусматривает осуществление контроля основных теплотехнических параметров конструкций, используя при этом только неразрушающие и расчетные способы исследования.

В результате проведения тепловизионного обследования были выявлены тепловые потери через стеновые панели, межпанельные швы, обнаружено тепловое проявление радиаторов системы отопления. Также обнаружены тепловые потери через неплотности и щели в оконных проемах, отсутствие тамбуров в подъездах. Обнаружены тепловые потери в деревянных окнах и частично в пластиковых окнах, что связано с недостаточным остеклением стеклопакетов.

Для сокращения тепловых потерь рекомендуется установить теплоотражающие экраны за

радиаторами, устранить неплотности и щели в оконных проемах, восстановить оконные проемы в техническом подполье и местах общего пользования.

Для экспериментального определения теплотехнических свойств ограждений зданий из стекла выбирается стеклопакет толщиной δ . Используя переносной тепломер, устанавливаются датчики температур и теплового потока, выполняются замеры плотности теплового потока на поверхности ограждения здания из стекла в течение суток, а также температуры на наружной и внутренней поверхности стеклопакета.

Для определения коэффициента теплопроводности λ , объемной удельной теплоемкости (c_p) и коэффициента температуропроводности a , замеряется расстояние δ между датчиками температур на поверхностях стеклопакета. Датчи-

ками температур замеряются температуры на наружной и внутренней поверхности стеклопакета в течение суток. Измерителем тепловых потоков ИТП-МГ4 «Поток» или ИТП «Теплограф» замеряется плотность теплового потока в течение суток. Выявляется максимальная плотность теплового потока q_{Π}^{\max} на наружной поверхности стеклопакета и для этого периода времени определяется разность температур между внутренней $T_{\Pi 1}$ и наружной $T_{\Pi 2}$ поверхностью стеклопакета.

Схема установки датчиков температур и теплового потока на наружных поверхностях ограждающей конструкции приведена на рис. 1.

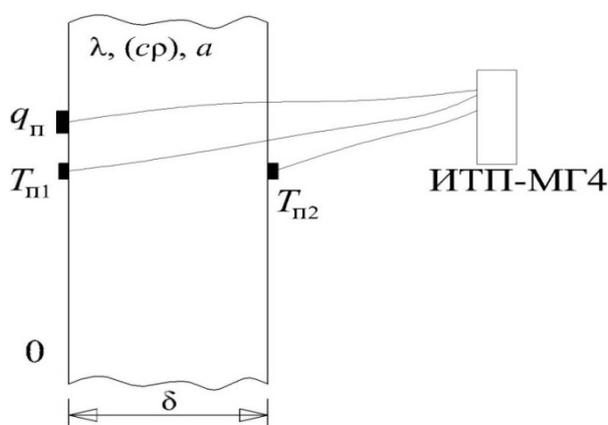


Рис. 1. Схема установки датчиков температур и теплового потока на наружных поверхностях стеклопакета:

$T_{\Pi 1}$ – температуры на наружной поверхности стеклопакета; $T_{\Pi 2}$ – температуры на внутренней поверхности стеклопакета; q_{Π} – удельный тепловой поток; δ – толщина стеклопакета; ИТП-МГ4 – измеритель тепловых потоков

Используя закон теплопроводности Фурье, определяется коэффициент теплопроводности стеклопакета по формуле:

$$\lambda = (q_{\Pi}^{\max} \cdot \delta) / (T_{\Pi 2} - T_{\Pi 1}), \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}. \quad (1)$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной полуволны на наружной поверхности стеклопакета определяется по формуле:

$$g_{\Pi}^{\max} = 0,5(T_{\Pi 1}^{\max} - T_{\Pi 1}^{\min}), \quad (2)$$

где $T_{\Pi 1}^{\max}$, $T_{\Pi 1}^{\min}$ – максимальная и минимальная температуры на наружной поверхности стеклопакета по амплитуде колебаний в течение суток.

Коэффициент теплоусвоения стеклопакета определяется по формуле:

$$B = q_{\Pi}^{\max} / g_{\Pi}^{\max}, \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}. \quad (3)$$

Коэффициент теплоусвоения определяется из выражения:

$$B = \sqrt{\lambda \cdot (ср) \cdot \omega},$$

где $(ср)$ – объемная теплоемкость материала; $\omega = 2\pi / z$ – частота колебаний температуры; z – полный период колебаний температурной волны.

Полный период колебаний температуры на наружной поверхности стеклопакета z составляет 24 часа или 86400 с. Тогда объемная теплоемкость $(ср)$ ограждающей конструкции стеклопакета определится из выражения:

$$(ср) = (B^2 \cdot z) / (\lambda \cdot 2\pi), \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{К)}. \quad (4)$$

Коэффициент температуропроводности a стеклопакета определится из соотношения:

$$a = \lambda / (ср), \text{ м}^2/\text{с}. \quad (5)$$

Термическое сопротивление теплопроводности стеклопакета определяется из выражения:

$$R = \delta / \lambda, \text{ (м}^2\cdot\text{К)/Вт}. \quad (6)$$

Тепловая инерция стеклопакета рассчитывается в соответствии с ГОСТ Р 51337–99 по формуле:

$$b = \lambda \cdot (ср), \text{ Дж}^2/(\text{с}\cdot\text{м}^4\cdot\text{К}^2). \quad (7)$$

Методика неразрушающего контроля, основанная на измерении температур на наружной и внутренней поверхности стеклопакета и измерении плотности теплового потока на наружной поверхности стеклопакета, позволяет определять весь комплекс теплофизических свойств стеклопакета:

- коэффициент теплопроводности λ ;
- объемную теплоемкость $(ср)$;
- коэффициент температуропроводности a ;
- коэффициент теплоусвоения B ;
- тепловую инерцию b .

Все графические построения и математические расчеты не представляют сложности и легко выполняются в программе Excel или других аналогичных программах ЭВМ.

Требуемое сопротивление теплопередаче наружных стен согласно СП 50.13330.2012. «Свод правил. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003» и СНиП 23-02-2003 «Тепловая защита зданий» составляет $2,78 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$. Согласно типовому проекту сопротивление теплопередаче наружных стен предусмотрено $1,012 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$. Фактически определенное термическое сопротивление наружной стены составило $0,84 \text{ м}^2 \cdot \text{°C/Вт}$. Исходя из сравнительного анализа данных величин, обнаружено, что требуемое сопротивление теплопередаче превышает фактически измеренное в 3,2 раза. Проектное сопротивление

теплопередаче и фактически измеренное практически не отличаются. Следовательно, при строительстве данного здания были учтены завышенные потери тепла на отопление вследствие использования материалов ограждающих конструкций с заниженным сопротивлением теплопередаче.

Полученные данные являются актуальным исходным материалом при формировании и исполнении программ проведения капитального ремонта общего имущества в многоквартирных домах, выполняемых в соответствии с Жилищным кодексом Российской Федерации. В настоящее время очередность проведения капитального ремонта общего имущества определяется в том числе физическим износом основных конструктивных элементов зданий. При этом мониторинг технического состояния многоквартирных жилых домов осуществляется на основании утвержденного постановлением соответствующего органа местного самоуправления. Согласно ст. 17 закона Волгоградской области от 19 декабря 2013 года № 174-ОД «Об организации проведения капитального ремонта общего имущества в многоквартирных домах, расположенных на территории Волгоградской области» для восстановления теплотехнических характеристик ограждающих конструкций в перечень работ по капитальному ремонту входит утепление фасада. Однако указанное мероприятие является дорогостоящим и имеет высокие сроки окупаемости, поэтому его применение всегда должно быть обоснованно технико-экономическим расчетом. Приведенная методика определения теплотехнических

характеристик ограждающих конструкций неразрушающими методами контроля эксплуатируемого жилого фонда позволяет получать достоверные данные для определения технико-экономических показателей работ по капитальному ремонту общего имущества в многоквартирных домах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Усадский, Д. Г. Методы технического контроля эффективных энергетических систем зданий и сооружений / Д. Г. Усадский // Новая наука: стратегии и векторы развития. – 2016. – № 4–2 (76). – С. 181–184.
2. Пашенко, Н. М. Разработка ресурсосберегающих мероприятий на объектах строительства с использованием методик тепловизионного контроля / Н. М. Пашенко, В. М. Фокин, Д. Г. Усадский // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 30. – С. 222–225.
3. Усадский, Д. Г. Тепловой метод неразрушающего контроля ограждающих конструкций при научном обосновании энергоэффективных строительных систем / Д. Г. Усадский, Н. М. Пашенко, В. М. Фокин, А. В. Ковылин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2013. – № 30. – С. 226–231.
4. Карапузова, Н. Ю. Теоретические основы расчетов тепломассообменного оборудования систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха / Н. Ю. Карапузова, Д. Г. Усадский, В. И. Лепилов, А. В. Ковылин. – Волгоград: изд-во ВолГАСУ, 2016. – 130 с.
5. Фокин, В. М. Стеклопакеты и их теплофизические свойства: монография / В. М. Фокин, А. В. Ковылин, Д. Г. Усадский. – СПб.: Научное издание технологий, 2017. – 130 с.
6. Лепилов, В. И. Теоретические основы определения теплофизических свойств материалов и тепломассообменных процессов в ограждениях: учебное пособие / В. И. Лепилов, Н. Ю. Карапузова, А. В. Ковылин, А. В. Попова, Д. Г. Усадский. – М-во обр. и науки РФ, ВолГАСУ. – Волгоград, 2015. – 113 с.

УДК 692.82:699.86

Н. Ю. Карапузова, А. В. Ковылин, Б. П. Сазонов

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ОГРАЖДЕНИЙ ЗДАНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: Kovylin.andrei@mail.ru

Приведены исследования тепловых режимов светопрозрачных конструкций с теплозащитным покрытием: пленкой, напылением и без покрытия. Рассмотрено влияние применения теплозащитной пленки на теплофизические свойства светопрозрачных конструкций. Рассмотрено влияние применения разного количества стекол на теплофизические свойства светопрозрачных конструкций.

Ключевые слова: теплофизические свойства (ТФС), светопрозрачные конструкции, однокамерный стеклопакет, двухкамерный стеклопакет, теплозащитное покрытие.

N. Yu. Karapuzova, A. V. Kovylin, B. P. Sazonov

RESEARCH OF A THERMAL CONDITIONS OF TRANSLUCENT DESIGNS OF PROTECTIONS OF BUILDINGS

Volgograd State Technical University

Researches of a single-chamber and two-chamber double-glazed window with a heat-shielding covering are given: film (Bronze), a dusting and without covering. Influence of application of a heat-shielding film on heatphysical properties of a double-glazed window is considered. Influence of application of different amount of glasses on heatphysical properties of a double-glazed window is considered.

Keywords: thermophysical properties, single-chamber windows, two-chamber double glazing, heat-proof coating.

Существуют различные виды светопрозрачных конструкций: однокамерные, двухкамерные, а также с возможным различным напылением и покрытием теплозащитной пленкой. Для решения проблемы энергосбережения и снижения потерь теплоты в окружающую среду от наружных ограждений зданий – светопрозрачных конструкций – нужно знать теплопроводность λ , термическое сопротивление теплопроводности R , плотность теплового потока q [1, 2]. Чтобы выяснить, какой стеклопакет имеет меньшие или большие тепловые потери, необходимо знать теплофизические свойства (ТФС) стеклопакета.

Для исследования ТФС светопрозрачных конструкций ограждений зданий, были изготовлены однокамерные и двухкамерные стеклопакеты с покрытием стекол пленкой и без покрытия. Размеры стеклопакетов:

– однокамерный стеклопакет без пленки $250 \times 250 \times 24$ мм (4–16–4) мм;

– однокамерный стеклопакет $250 \times 250 \times 24$ мм с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–16–4) мм;

– однокамерный стеклопакет $250 \times 250 \times 32$ мм с пленкой (напылением) на одном стекле (4И–24–4) мм;

– однокамерный стеклопакет $250 \times 250 \times 24$ мм с пленкой (Бронза) на одном стекле (4Бронза–16–4) мм;

– двухкамерный стеклопакет без пленки $250 \times 250 \times 32$ мм (4–10–4–10–4) мм;

– двухкамерный стеклопакет $250 \times 250 \times 32$ мм с расположением пленок на двух крайних стеклах (4И–10–4–10–И4) мм;

– двухкамерный стеклопакет $250 \times 250 \times 32$ мм с расположением пленок на среднем и крайнем стеклах (4–10–4И–10–И4) мм.

Толщина двух стекол однокамерного стеклопакета по 4 мм и зазор между ними 16 мм либо 24 мм, а у двухкамерного стеклопакета три стекла толщиной по 4 мм и зазорами 10 мм. Для исследования ТФС оконных стеклопакетов для ограждений зданий использовался заводской прибор: измеритель теплопроводности ИТП-МГ4-250. Измеритель теплопроводности ИТП-МГ4-250 (размер испытываемого образца 250×250 мм толщиной 5...50 мм) предназначен для определения коэффициента теплопроводности λ и термического сопротивления R твердых строительных материалов и тепловой изоляции зданий при стационарном тепловом режиме.

Задавая в приборе ИТП-МГ4-250 значения температуры холодильника t_x от 5 °С до 20 °С и нагревателя t_n от 25 °С до 46 °С, получены значения коэффициента теплопроводности λ , термического сопротивления теплопроводности R и плотности теплового потока q однокамерного и двухкамерного стеклопакетов с пленками и без них.

В табл. 1 приведены полученные экспериментальные значения ТФС однокамерного (4–16–4) стеклопакета.

Таблица 1

ТФС однокамерного стеклопакета (4–16–4)

δ , мм	t_{cp} , °С	Δt , °С	t_n , °С	t_x , °С	λ , Вт/(м·°С)	R , (м ² ·К)/Вт	q , Вт/м ²
24	15	20	25	5	0,149	0,161	124,2
	17,5	15	25	10	0,155	0,154	97
	20	10	25	15	0,162	0,148	67,6
	22	6	25	19	0,168	0,142	42,1
	22,5	7	26	19	0,168	0,142	49
	25	12	31	19	0,17	0,141	85
	25	20	35	15	0,169	0,142	140,8
	27,5	17	36	19	0,173	0,138	122,4
	30	20	40	20	0,177	0,135	147,4
	30	22	41	19	0,176	0,136	161,3

Средняя температура стеклопакета определяется по формуле [3, 4]:

$$t_{cp} = (t_n + t_x) / 2, \quad (1)$$

где t_n – температура нагревателя, °С; t_x – температура холодильника, °С.

Разность температур стеклопакета определяется по формуле:

$$\Delta t = t_n - t_x. \quad (2)$$

На рис. 1 приведено экспериментальное распределение коэффициента теплопроводности λ от средней температуры t_{cp} однокамерного стеклопакета (4–16–4).

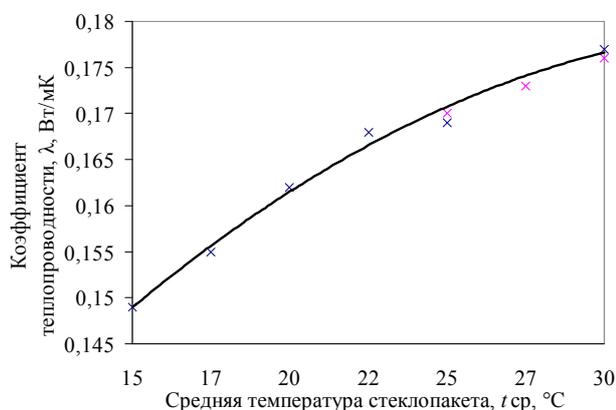


Рис. 1. Экспериментальные распределения коэффициента теплопроводности λ от средней температуры t_{cp} однокамерного стеклопакета (4–16–4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием средней температуры t_{cp} стеклопакета от 15 до 30 °С коэффициент теплопроводности λ увеличивается на 18,1 %. Так, например, при средней температуре стеклопакета $t_{cp} = 15$ °С коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,149$ Вт/(м·°С), а при средней температуре стеклопакета $t_{cp} = 30$ °С коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,177$ Вт/(м·°С) [3].

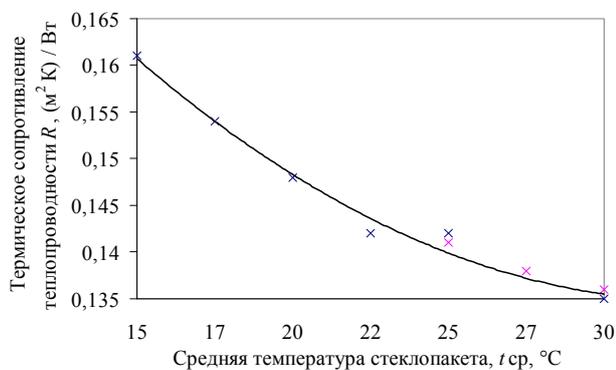


Рис. 2. Экспериментальные распределения термического сопротивления теплопроводности R от средней температуры t_{cp} однокамерного стеклопакета (4–16–4)

На рис. 2 приведены значения термического сопротивления теплопроводности R от средней температуры t_{cp} однокамерного стеклопакета (4–16–4).

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием средней температуры стеклопакета от 15 до 30 °С термическое сопротивление теплопроводности R уменьшается на 15,5 %. Так, например, при средней температуре стеклопакета $t_{cp} = 15$ °С термическое сопротивление теплопроводности $R = 0,161$ (м²·К)/Вт, а при средней температуре стеклопакета $t_{cp} = 30$ °С, $R = 0,135$ (м²·К)/Вт [5, 6].

На рис. 3 приведены значения плотности теплового потока q от разницы температур Δt однокамерного стеклопакета (4–16–4).



Рис. 3. Экспериментальные распределения плотности теплового потока q от разности температур Δt однокамерного стеклопакета (4–16–4)

По результатам экспериментальных исследований можно сделать вывод, что с возрастанием разности температуры стеклопакета Δt от 7 до 22 °С плотность теплового потока q увеличивается на 229,2 %. Так, например, при разности температур стеклопакета $\Delta t = 7$ °С плотность теплового потока $q = 49$ Вт/м², а при разности температур стеклопакета $\Delta t = 22$ °С плотность теплового потока $q = 161,3$ Вт/м² [7, 8].

Также были проведены экспериментальные исследования однокамерного и двухкамерного стеклопакетов с теплозащитным покрытием – пленкой (напылением). Рассмотрено влияние применения теплозащитной пленки на теплофизические свойства стеклопакета. Стеклопакеты с энергосберегающими стеклами с низкоэмиссионным покрытием пропускают свет (в световом диапазоне) почти как обычное стекло, но способны отражать обратно в помещение большую часть теплового (инфракрасного) излучения, а стекла называют И-стекла.

Результаты экспериментальных исследований однокамерного стеклопакета с теплозащитной пленкой (Бронза) (4Бронза-16-4), двухкамерного стеклопакета без пленки (4-10-4-10-4), двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками (напылением) на среднем и крайнем стеклах (4И-10-4И-10-4),

однокамерного стеклопакета с теплозащитной пленкой (напылением) (4И-24-4), однокамерного стеклопакета с теплозащитной пленкой (напылением) (4И-16-4), двухкамерного стеклопакета с теплозащитными пленками (напылением) на двух крайних стеклах (4И-10-4-10-И4), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Средние значения коэффициента теплопроводности λ , термического сопротивления теплопроводности R и плотности теплового потока q однокамерного и двухкамерного стеклопакета

Вид стеклопакета	Свойства стеклопакета	$\lambda_{\text{ср}}$, Вт/(м·°С)	$R_{\text{ср}}$, (м ² ·К)/Вт	$q_{\text{ср}}$, Вт/м ²
Однокамерный стеклопакет без пленки (4-16-4)		0,167	0,144	103,7
Однокамерный стеклопакет с пленкой (Бронза) (4Бронза-16-4)		0,160	0,149	106,7
Двухкамерный стеклопакет без пленки (4-10-4-10-4)		0,125	0,256	63,5
Двухкамерный стеклопакет с пленкой (напылением) на крайнем и среднем стеклах (4И-10-4И-10-4)		0,072	0,447	38,1
Однокамерный стеклопакет с пленкой (напыление) (4И-24-4)		0,054	0,597	28,5
Однокамерный стеклопакет с пленкой (напыление) (4И-16-4)		0,05	0,48	33,3
Двухкамерный стеклопакет с пленкой (напылением) на двух крайних стеклах (4И-10-4-10-И4)		0,049	0,655	26,1

Сравнивая полученные экспериментальные данные однокамерных стеклопакетов, с теплозащитной пленкой (напыление), пленкой (Бронза) и без пленки, можно сделать выводы [9]:

1. Наименьший коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ср}} = 0,05$ Вт/(м·°С) имеет однокамерный стеклопакет с пленкой (напыление) (4И-16-4), что в три раза (в 3,3 раза) меньше коэффициента теплопроводности однокамерного стеклопакета без пленки (4-16-4).

2. Самое высокое значение термического сопротивления теплопроводности $R_{\text{ср}} = 0,597$ (м²·К)/Вт имеет однокамерный стеклопакет с пленкой (напыление) (4И-24-4), что в 4,1 раза больше термического сопротивления теплопроводности однокамерного стеклопакета без пленки (4-16-4).

3. Плотность теплового потока наибольшая в однокамерном стеклопакете с пленкой (Бронза) (4Бронза-16-4), что в 3,8 раза больше чем плотность теплового потока однокамерного стеклопакета с пленкой (напыление) (4И-24-4).

Сравнивая полученные экспериментальные данные двухкамерных стеклопакетов, с теплозащитной пленкой и без пленки, можно сделать выводы.

1. Наименьший коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{ср}} = 0,049$ Вт/(м·°С) имеет двухкамер-

ный стеклопакет с пленкой на двух крайних стеклах (4И-10-4-10-И4), что почти в три раза (в 2,5 раза) меньше коэффициента теплопроводности двухкамерного стеклопакета без пленки (4-10-4-10-4).

2. Самое высокое значение термического сопротивления теплопроводности $R_{\text{ср}} = 0,655$ (м²·К)/Вт имеет двухкамерный стеклопакет с пленкой на двух крайних стеклах (4И-10-4-10-И4), что в 2,5 раза больше термического сопротивления теплопроводности двухкамерного стеклопакета без пленки (4-10-4-10-4).

3. Плотность теплового потока наибольшая в двухкамерном стеклопакете без пленки (4-10-4-10-4), что в 2,4 раза больше чем плотность теплового потока двухкамерного стеклопакета с пленкой на двух крайних стеклах (4И-10-4-10-И4).

Сравнивая полученные экспериментальные данные однокамерного и двухкамерного стеклопакетов с теплозащитной пленкой и без пленки, можно сделать выводы:

1. Более оптимальным вариантом цена – качество теплофизических свойств, предпочтительнее однокамерный стеклопакет с теплозащитной пленкой (напылением) 4И-16-4.

2. Однако необходимо учитывать, что стоимость низкоэмиссионного стекла И (20...25

у.е./м²) в два раза превышает цену обычного стекла (8...12 у.е./м²).

3. Необходимо учитывать, что звукопоглощение выше в двухкамерном стеклопакете по сравнению с однокамерными стеклопакетами (в плане дальнейших исследований).

4. В литературе нет данных по сроку службы, долговечности и времени эксплуатации теплозащитных пленок и напыления, что также представляется в планах дальнейшего исследования.

5. Необходимо провести исследования пластикового профиля оконных блоков от их толщины, количества камер и фирмы изготовителя (Rehau, Decseuninck favorit, КВЕ).

6. Необходимо провести исследование по соотношению размеров стеклопакета к пластиковому профилю.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий.
2. Пат. № 2421711 Российская Федерация, МПК⁸ G 01 N 25/00 Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов / Фокин В. М., Ковылин А. В.; заявитель и патентообладатель ВолгГАСУ. – № 2009129316/28; заявл. 29.07.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 9 с.
3. Фокин, В. М. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов / В. М. Фокин, А. В. Ковылин, В. Н. Чернышов. – М.: Спектр, 2011. – 155 с.

4. Фокин, В. М. Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля / В. М. Фокин, А. В. Ковылин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Строительство и архитектура»; вып. 14 (33)). – С. 123–127.

5. Ковылин, А. В. Определение теплотехнических свойств оконного стекла для ограждений зданий / А. В. Ковылин, В. М. Фокин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета / ВолгГАСУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Строительство и архитектура»; вып. 21 (40)). – С. 124–127.

6. Фокин, В. М. Стеклопакеты и их теплофизические свойства: монография / В. М. Фокин, А. В. Ковылин, Д. Г. Усадский. – СПб.: Научное издание, 2017. – 130 с.

7. Лепилов, В. И. Теоретические основы определения теплофизических свойств материалов и теплообменных процессов в ограждениях: учебное пособие / В. И. Лепилов, Н. Ю. Карапузова, А. В. Ковылин, А. В. Попова, Д. Г. Усадский // М-во обр. и науки РФ, ВолгГАСУ. – Волгоград, 2015. – 113 с.

8. Карапузова, Н. Ю. Теоретические основы расчетов теплообменного оборудования систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: учебное пособие / Н. Ю. Карапузова, Д. Г. Усадский, В. И. Лепилов, А. В. Ковылин // М-во обр. и науки РФ, ВолгГАСУ. – Волгоград, 2016. – 130 с.

9. Чернышов, В. Н. Энергоэффективная измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий / В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов, М. В. Жарикова / Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах Тезисы докладов 3-ей Международной конференции с элементами научной школы. 2016. – С. 374–375.

УДК 692.82

Н. Ю. Карапузова, Б. П. Сазонов, А. В. Ковылин
ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ НА ТЕПЛОВОЙ
РЕЖИМ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ
Волгоградский государственный технический университет
 e-mail: Kovylin.andrei@mail.ru

Рассмотрено влияние теплофизических свойств на тепловой режим ограждающих конструкций зданий и на энергосбережение в зданиях и сооружениях. Рассмотрен пример расчета теплофизических свойств: эквивалентный коэффициент теплопроводности, объемная теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности. Приведен график распределения температур и теплового потока на ограждении здания.

Ключевые слова: энергосбережение в зданиях, теплофизические свойства (ТФС), эквивалентный коэффициент теплопроводности, объемная теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности.

N. Yu. Karapuzova, B. P. Sazonov, A. V. Kovylin
INFLUENCE OF THERMAL PROPERTIES ON A THERMAL
CONDITIONS OF THE PROTECTING STRUCTURES OF BUILDINGS
Volgograd State Technical University

Influence of thermal properties on a thermal conditions of the protecting structures of buildings and on energy saving in buildings and constructions is considered. An example of calculation of thermal properties is reviewed: the equivalent thermal conductivity, specific heat per unit volume, the equivalent thermal diffusivity. The schedule of distribution of temperatures and a heat flux is given in a building protection.

Keywords: energy saving in buildings, thermal properties (TFS), the equivalent thermal conductivity, specific heat per unit volume, the equivalent thermal diffusivity.

Энергосбережение в зданиях и сооружениях строится на сбережении теплоты в системах отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: устройств вентилируемых наружных стен, дополнительного утепления наружных ограждений, теплоизоляции стен за отопительным прибором (с внутренней стороны), устройства вентилируемых окон, трехслойного или теплоотражающего (в инфракрасном излучении) остекления, устройств застекленных лоджий, применения воздушного отопления с использованием теплонасосных установок и энергии низкого потенциала (конденсата, воды, воздуха).

В настоящее время одной из наиболее актуальных проблем является поиск и создание энергосберегающих мероприятий и инженерных решений по реализации тепло- и технологических процессов с минимальными тепловыми потерями. Большую роль в этом играет знание теплофизических свойств используемых и вновь разрабатываемых строительных, теплоизоляционных, облицовочных материалов и изделий [1, 2].

Теплофизические свойства (ТФС) ограждающих конструкций существенно влияют на тепловой и воздушный режим зданий различного назначения, а также работу систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха, потребляющих в настоящее время значительное количество тепловой энергии [3, 4].

Для определения ТФС ограждающих конструкций зданий и сооружений предлагается методом неразрушающего контроля. Для определения ТФС нет необходимости разрушать материал, создавать дополнительный нагрев или охлаждение ограждающей конструкции, создавать специальные условия на поверхности ограждающей конструкции (степень черноты, коэффициент теплоотдачи), что позволяет не использовать электрическую и тепловую энергию и не требует создания экспериментальных установок требующих энергетических затрат. В предлагаемом методе достаточно естественных условий, в каких находится ограждающая конструкция.

В разные периоды года происходит нагрев или охлаждение ограждающей конструкции здания. Также в течение суток за счет солнечного излучения температура ограждающей конструкции здания меняется. В результате этого через ограждающую конструкцию здания проходят тепловые потоки, которые меняются в течении суток (а также в течении года): зимой

тепловой поток направлен от внутренней стенки к наружной, а в летний период – наоборот. В результате, в ограждающей конструкции возникают температурные волны [5, 6].

В этом случае для определения комплекса теплофизических характеристик (коэффициентов теплопроводности, объемной теплоемкости и температуропроводности) достаточно естественных условий: охлаждение наружной ограждающей конструкции в холодный период года или нагрев наружной стенки в теплый период года.

Используя методику, разработанную на кафедре «Энергоснабжение и теплотехника» [7, 8], можно рассчитать эквивалентный коэффициент теплопроводности $\lambda_{\text{экв}}$, Вт/(м·К), объемную теплоемкость ($c\rho$), кДж/(м³·К), эквивалентный коэффициент температуропроводности $a_{\text{экв}}$, м²/с.

Комплексный способ определения теплофизических свойств ограждающей конструкции методом неразрушающего контроля заключается в том, что вначале определяется эквивалентный коэффициент теплопроводности по формуле:

$$\lambda_{\text{экв}} = (q_{\text{п}}^{\text{max}} \delta) / (t_{\text{вн}} - t_{\text{нар}}). \quad (1)$$

Максимальная амплитуда колебаний температурной волны на наружной поверхности ограждения определяется по формуле:

$$\vartheta_{\text{п}}^{\text{max}} = 0,5(t_1 - t_2). \quad (2)$$

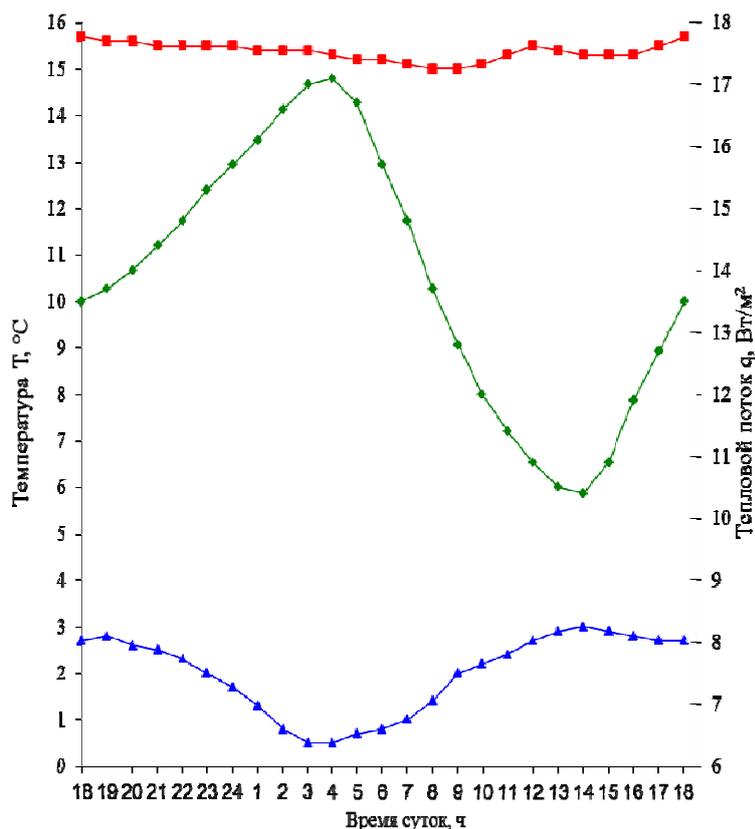
Коэффициент теплоусвоения ограждения определяется по формуле:

$$B = q_{\text{п}}^{\text{max}} / \vartheta_{\text{п}}^{\text{max}}. \quad (3)$$

Коэффициент теплоусвоения B характеризует аккумулирующую способность массива. В количественном смысле коэффициент теплоусвоения массива при термической релаксации – это отношение теплового потока на поверхности в данный момент времени к постоянной максимальной разности температур системе [9].

Рассмотрим пример распределения температур внутренней и наружной стенки и теплового потока на ограждении здания. Максимальная плотность теплового потока наблюдается в ночные часы, а минимальная плотность теплового потока – в дневные. Пример приведен на рисунке.

Для определения объемной теплоемкости использовался коэффициент теплопроводности, рассчитанный по формуле (1), и максимальная амплитуда колебаний температурной волны, рассчитанная по формуле (2).



Пример распределения температур и теплового потока на ограждении здания

Объемная теплоемкость ограждения определяется по формуле:

$$(c_p) = (B^2 z) / (\lambda_{\text{экв}} \cdot 2\pi). \quad (4)$$

Эквивалентный коэффициент температуропроводности ограждения здания определяется по формуле (5):

$$a_{\text{экв}} = \lambda_{\text{экв}} / (c_p). \quad (5)$$

Предложенная методика определения ТФС свойств ограждающих конструкций зданий позволяет достаточно точно определить эквивалентный коэффициент теплопроводности, объемную теплоемкость, эквивалентный коэффициент температуропроводности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий.
2. Пат. № 2421711 Российская Федерация, МПК⁸ G 01 N 25/00 Способ неразрушающего контроля комплекса теплофизических характеристик твердых строительных материалов / Фокин В. М., Ковылин А. В.; заявитель и патентообладатель ВолГАСУ. – № 2009129316/28; заявл. 29.07.2009; опубл. 10.02.2011, Бюл. № 4. – 9 с.
3. Фокин, В. М. Энергоэффективные методы определения теплофизических свойств строительных материалов / В. М. Фокин, А. В. Ковылин, В. Н. Чернышов. – М.: Спектр, 2011. – 155 с.
4. Фокин, В. М. Теоретические основы определения теплопроводности, объемной теплоемкости и температуро-

проводности материалов по тепловым измерениям на поверхности методом неразрушающего контроля / В. М. Фокин, А. В. Ковылин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета / ВолГАСУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Строительство и архитектура»; вып. 14 (33)). – С. 123–127.

5. Ковылин, А. В. Определение теплотехнических свойств оконного стекла для ограждений зданий / А. В. Ковылин, В. М. Фокин // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета / ВолГАСУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Строительство и архитектура»; вып. 21 (40)). – С. 124–127.

6. Фокин, В. М. Стеклопакеты и их теплофизические свойства: монография / В. М. Фокин, А. В. Ковылин, Д. Г. Усадский. – СПб.: Научное издание, 2017. – 130 с.

7. Лепилов, В. И. Теоретические основы определения теплофизических свойств материалов и тепломассообменных процессов в ограждениях: учебное пособие / В. И. Лепилов, Н. Ю. Карапузова, А. В. Ковылин, А. В. Попова, Д. Г. Усадский // М-во обр. и науки РФ, ВолГАСУ. – Волгоград, 2015. – 113 с.

8. Карапузова, Н. Ю. Теоретические основы расчетов тепломассообменного оборудования систем отопления, вентиляции и кондиционирования воздуха: учебное пособие / Н. Ю. Карапузова, Д. Г. Усадский, В. И. Лепилов, А. В. Ковылин // М-во обр. и науки РФ, ВолГАСУ. – Волгоград, 2016. – 130 с.

9. Чернышов, В. Н. Энергоэффективная измерительная система неразрушающего контроля теплофизических характеристик строительных материалов и изделий / В. Н. Чернышов, А. В. Чернышов, М. В. Жарикова / Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах Тезисы докладов 3-ей Международной конференции с элементами научной школы. – 2016. – С. 374–375.

УДК 621.437

*Е. А. Федянов, Ю. В. Левин, В. А. Алексейчук, С. Н. Шумский***ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОБАВОК СВОБОДНОГО ВОДОРОДА
ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ
РОТОРНО-ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВАНКЕЛЯ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: tig@vstu.ru

В статье рассматриваются результаты экспериментальных исследований рабочего процесса роторно-поршневого двигателя Ванкеля ВАЗ-311 с добавками водорода на режимах холостого хода и частичных нагрузок. Полученные данные свидетельствуют об улучшении топливной экономичности двигателя Ванкеля.

Ключевые слова: роторно-поршневой двигатель Ванкеля, добавка водорода, удельный эффективный расход топлива, массовый расход бензина.

*E. A. Fedyanov, Y. V. Levin, V. A. Alekseichuk, S. N. Shumskiy***USE OF HYDROGEN ADDITIVES FOR IMPROVEMENT OF FUEL
ECONOMICITY OF ROTARY-PISTON WANKEL ENGINE****Volgograd State Technical University**

The results of the experimental research workflow rotary-piston engine Wankel VAZ-311 with hydrogen additives at idle and partial load conditions. The results show an improvement of fuel efficiency of the Wankel engine.

Keywords: Wankel rotary engine, hydrogen additive, specific effective fuel consumption, mass consumption of gasoline.

Роторно-поршневые двигатели (РПД) Ванкеля обладают большей удельной мощностью по сравнению с традиционными поршневыми двигателями внутреннего сгорания, что позволяет рассматривать данный тип двигателя в качестве силовой установки для легкомоторной беспилотной авиации [1, 2], маломерных судов [3] и наземных транспортных средств [4–7]. Однако недостатки, в том числе связанные с повышенным расходом топлива, препятствуют широкому распространению РПД Ванкеля [4, 6]. Причиной большего расхода топлива служит неполное сгорание топливовоздушной смеси в рабочей камере РПД. Уменьшить недогорание топливовоздушной смеси и, как следствие, расход топлива можно за счет использования добавок такого активного, с точки зрения горения, газа как водород [3, 8, 9].

Экспериментальные исследования по влиянию добавок водорода на топливную экономичность были проведены на односекционном РПД ВАЗ-311 с приведенным рабочим объемом 649 см³ и степенью сжатия 9,3. Испытания проводились на режимах частичных нагрузок при частоте вращения эксцентрикового вала 2000 мин⁻¹ и холостого хода.

В качестве основного топлива использовался бензин марки АИ-92. Подача водорода осуществлялась через дополнительную форсунку

во впускной коллектор РПД. Система фазированного впрыска топлива позволяет в широких пределах варьировать момент начала и длительность впрыска топлива [10].

Влияние добавок свободного водорода на топливную экономичность РПД на режимах частичных нагрузок (см. рис. 1) оценивали в ходе экспериментальных исследований по значению удельного эффективного расхода топлива:

$$g_e = \frac{G_b + G_{H_2} \cdot H_{uH_2} / H_{ub}}{N_e}, \quad (1)$$

где G_b , G_{H_2} – соответственно массовые расходы бензина и водорода, г/ч; H_{ub} , H_{uH_2} – соответственно низшие теплоты сгорания бензина и водорода, МДж/кг; N_e – эффективная мощность двигателя, кВт.

На рис. 1 приведены полученные в ходе испытаний РПД нагрузочные характеристики по величине удельного эффективного расхода топлива при различных значениях массовых добавок свободного водорода. Отметим, что в ходе испытаний на данном режиме длительности впрыскивания водорода и бензина подбирались таким образом, чтобы в камеру РПД поступала топливовоздушная смесь стехиометрического состава.

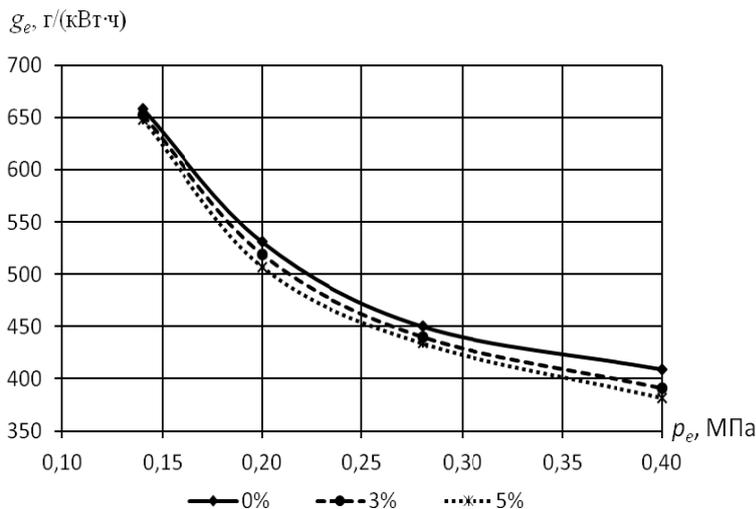


Рис. 1. Зависимость удельного расхода топлива от эффективного давления ($n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $\alpha = 1$) при различных добавках свободного водорода

Как показывают результаты проведенных исследований, массовая добавка 5 % водорода на режимах малых нагрузок ($p_e = 0,14 - 0,28 \text{ МПа}$) снижает удельный расход топлива на 4,2 %. По мере повышения нагрузки эффект от добавки водорода увеличивается: при $p_e = 0,4 \text{ МПа}$, как видно из рис. 1, величина удельного эффективного расхода топлива снижается за счет добавки 5 % водорода на 5,7 %. Ослабление влияния добавок водорода на величину удельного эффективного расхода топлива по мере уменьшения нагрузки связано с тем, что снижается вклад от недогорания топлива в общей величине потерь, обуславливающих ухудшение топливной экономичности двигателя на малых нагрузках: по мере снижения нагрузки все большая доля потерь оказывается следствием дросселирования на впуске.

На рис. 2 приведены результаты испытаний

РПД при обеднении топливовоздушной смеси, проведенные на режиме, соответствующем среднему режиму городского ездового цикла ($n = 2000 \text{ мин}^{-1}$, $p_e = 0,2 \text{ МПа}$). Как видно из рисунка, с увеличением добавки водорода предел эффективного обеднения заметно смещается в сторону обеднения топливовоздушной смеси. Если без добавок водорода четко выраженный предел эффективного обеднения достигается уже при $\alpha = 1,1 \dots 1,12$, то при добавке 5 % водорода этот предел равен примерно 1,25 и выражен уже не столь ярко, как без добавки водорода, что свидетельствует о положительном влиянии водорода на межцикловую стабильность процесса сгорания – доля «плохих» циклов при добавке водорода нарастает не так интенсивно, как при работе без этой добавки. При этом удельный эффективный расход топлива на данном режиме снижается на 7,7 %.

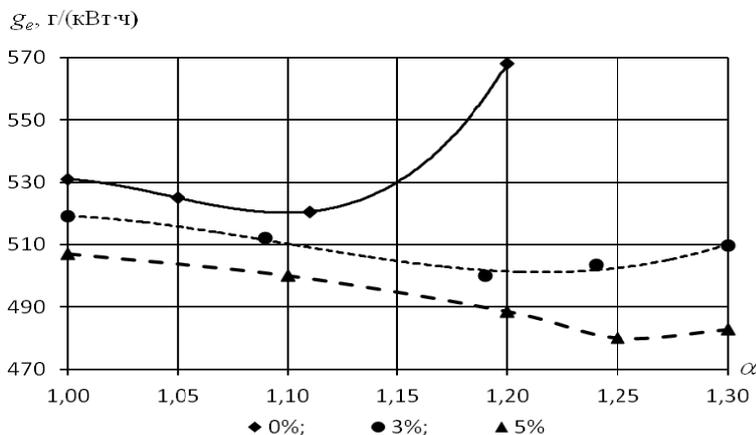


Рис. 2. Зависимость удельного расхода воздуха от коэффициента избытка воздуха с различными добавками водорода при $n=2000 \text{ мин}^{-1}$

Дополнительные испытания по влиянию добавок водорода на топливную экономичность проводились на режиме холостого хода. Работа двигателя в режиме холостого хода может достигать до 35 % от общего времени эксплуатации транспортного средства [11]. Влияние добавок свободного водорода на режиме холостого хода оценивалось по величине массового расхода основного топлива. С добавками водо-

рода состав бензоводородовоздушной смеси соответствовал стехиометрическому. Однако без добавок водорода двигатель работал на слегка обогащенной бензовоздушной смеси ($\alpha = 0,95$), так как при больших значениях коэффициента избытка воздуха устойчивость работы нарушалась. На рис. 3 рядом с экспериментальными точками указаны значения коэффициента избытка воздуха.

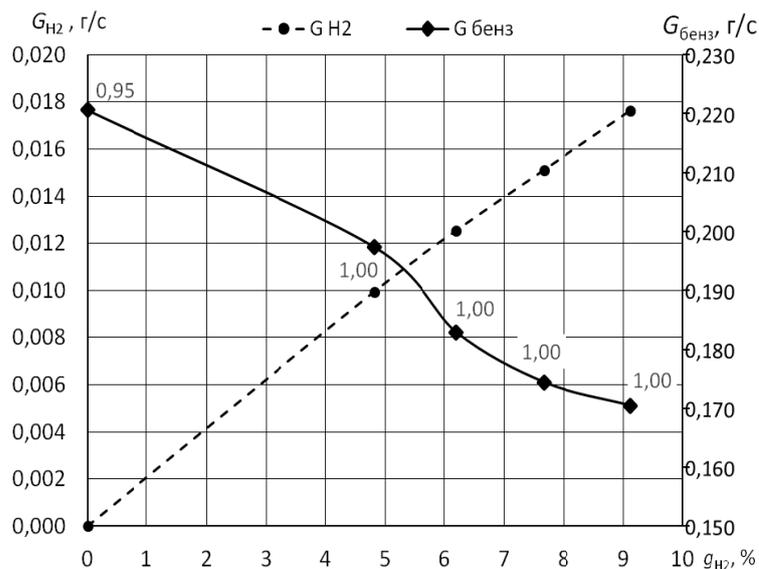


Рис. 3. Зависимость массовых расходов бензина и водорода от величины добавляемого водорода на холостом ходу

Как видно из рис. 3, при работе двигателя на стехиометрической топливовоздушной смеси ($\alpha = 1$) добавка водорода 5 % снижает массовый расход бензина на 10,5 %, а при 8 % добавке водорода – на 21 %.

Проведенные эксперименты показали, что за счет добавок водорода РПД приобретает способность работать на режиме холостого хода даже при некотором обеднении топливовоздушной смеси. Так, массовый расход бензина при обеднении топливовоздушной смеси до 1,16 и использовании массовой добавки водорода 6,6 % снизился на 24,2 %.

В результате проведенных экспериментальных исследований показана возможность улучшения топливной экономичности РПД Ванкеля за счет добавок свободного водорода к основной бензовоздушной смеси. При добавке свободного водорода в количестве 5 % от массы бензовоздушной смеси удельный эффективный расход топлива с учетом расхода водорода снижается на осредненном режиме городского ездового цикла на 4,2 % ($p_e = 0,2$ МПа и $n = 2000$ мин⁻¹). Добавка свободного водорода к основной бен-

зовоздушной смеси позволяет повысить предел эффективного обеднения. При добавке 5 % свободного водорода предел эффективного обеднения достигается при $\alpha = 1,25$, в то время как без добавки свободного водорода он равен 1,12.

Таким образом, уменьшение расхода основного топлива свидетельствует о том, что добавки свободного водорода способствуют повышению полноты сгорания топливовоздушной смеси в РПД Ванкеля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Броладзе, К. Э. Многотопливные РПД «WANKEL» AG / К. Э. Броладзе // Международный научный журнал «Воздушный транспорт». – 2013. – № 1 (8). – С. 16–36.
2. Boretti, A. Modelling unmanned aerial vehicle jet ignition Wankel engines with CAE /CFD / A. Boretti // Advances in Aircraft and Spacecraft Science. – 2015. – №. 4. – P. 445–467.
3. Amrouche, F. An experimental investigation of hydrogen-enriched gasoline in a Wankel rotary engine / F. Amrouche, P. Erickson, J. Park, S. Varnhagen // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Т. 39 – p. 8525–8534.
4. Ribau, J. Analysis of four-stroke, Wankel, and micro-turbine based range extenders for electric vehicles / J. Ribau et al. // Energy Conversion and Management. – 2012. – Т. 58. – P. 120–133.

5. Development of hydrogen rotary engine vehicle / N. Wakayama et al. // 16th World Hydrogen Energy Conference (Lyon, France, 2006). – 2006.

6. Heller, D. A. International Strategic Alliances and Technology Strategy: The Case of Rotary-Engine Development at Mazda. – 2005. – Т. 52. – С. 31–56.

7. Ohkubo, M. Developed technologies of the new rotary engine (RENESIS) / M. Ohkubo et al. // SAE Technical Paper, 2004. – №. 2004-01-1790.

8. Влияние добавки водорода на экологические показатели роторно-поршневого двигателя Ванкеля / Ю. В. Левин, Е. А. Федянов, Е. А. Захаров, К. В. Приходьков // Альтернативные источники энергии в транспортно-технологическом комплексе: проблемы и перспективы рационального использования. – 2015. – Т. 2, № 2. – С. 392–396.

9. Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a gasoline rotary engine at part load and stoichiometric conditions / Ji C. et al. // Energy Conversion and Management. – 2016. – Т. 121. – С. 272–280.

10. Улучшение показателей роторно-поршневого двигателя Ванкеля за счет фазированной подачи водорода / Е. А. Федянов, Ю. В. Левин, Е. А. Захаров, В. А. Алексейчук // Сборник тезисов докладов международной научно-технической конференции «Двигатель–2017». – Москва, 2017. – С. 49–50.

11. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Д. Н. Вырубов и др. ; под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. – Изд. 4-е, перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983.

УДК 536.24

Г. С. Закожурникова¹, С. С. Закожурников²

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРИСТЫХ ТЕЛ

¹ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет»

²Московский финансово-юридический университет МФЮА

e-mail: tig@vstu.ru

В статье рассмотрены существующие методы исследования эффективного коэффициента теплопроводности пористых тел. Представлена модель расчета эффективного коэффициента теплопроводности. Показано влияние эффективного коэффициента теплопроводности на характер температурных кривых на примере процесса образования карбида кремния (SiC). Проведено расчетное исследование и анализ результатов на основе эксперимента.

Ключевые слова: пористые материалы, производство карбида кремния, математическая модель, коэффициент теплопроводности.

G. S. Zakozhurnikova¹, S. S. Zakozhurnikov²

MODELING OF THE EFFECTIVE COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY OF POROUS MATERIALS

¹Volgograd State Technical University, Russia

²Moscow University of Finance and Law MFUA

The article considers the existing methods of research the effective coefficient of thermal conductivity of porous media. A model for calculating the effective coefficient of thermal conductivity is presented. The influence of the effective coefficient of thermal conductivity on the example of the formation of silicon carbide (SiC) is shown. A calculated study and analysis of the results based on the experiment was carried out.

Keywords: porous materials, production of silicon carbide, mathematical model, coefficient of thermal conductivity.

Пористые материалы широко используются во многих отраслях промышленности. Определение теплофизических свойств пористых структур является сложной задачей, так как исследуемые материалы состоят из нескольких компонент. В нестационарных процессах возникают сложности при определении степени взаимодействия компонент друг с другом.

Исследование теплопроводности пористых тел проводится двумя путями.

Первый путь – экспериментальное исследование теплофизических характеристик материалов. Теоретические предпосылки при этом

в большинстве случаев соблюдаются с некоторым приближением, этот путь дает возможность определить эффективные значения теплофизических характеристик с достаточной точностью. Надежные измерения теплопроводности пористых тел необходимы не только для получения количественных данных, но и для понимания основных явлений переноса теплоты в таких системах, так как хорошо поставленный эксперимент дает возможность изучить зависимость тепловых свойств материалов от температуры, давления и рода газа в порах, пористости, частиц твердой фазы и других факторов.

Акцентирование внимания на чисто количественных величинах, на многочисленных эмпирических и полуэмпирических соотношениях без теоретического анализа, без рассмотрения взаимного влияния различных факторов уводит от понимания фундаментальных процессов переноса теплоты, имеющих место в гетерогенных системах. Поэтому весьма распространенным является второй путь, основанный на рассмотрении реальной структуры пористого материала, моделировании такой системы и последующем расчете ее эффективной теплопроводности для реальных условий работы материала.

Несмотря на большое разнообразие реальных гетерогенных пористых систем по их химическому составу, пористости, размерам частиц и пор, их различную ориентацию по отношению к тепловому потоку и сложность теоретического анализа и математического описания тепловых процессов, происходящих в таких материалах, в настоящее время существуют теоретические зависимости, позволяющие с большей или меньшей точностью рассчитать эффективную теплопроводность пористых гетерогенных систем. Однако следует подчеркнуть, что все еще отсутствуют соотношения, которые были бы общепринятыми для расчета эффективной теплопроводности капиллярно-пористых и дисперсных систем.

Широко распространенным и достаточно эффективным методом теоретического исследования теплопроводности пористых тел является использование для этой цели принципа обобщенной проводимости [1], базирующегося на аналогии между дифференциальными уравнениями стационарного потока теплоты, электрического тока, электрической и магнитной индукции, потока массы. Необходимо отметить, что использование принципа обобщенной проводимости оказывается наиболее эффективным, если оно сопровождается рассмотрением структуры материала, оценкой пористости системы, размеров частиц и пор, способов контактирования частиц между собой, оценкой влияния кондуктивной, конвективной и радиационной составляющих на эффективную теплопроводность системы.

Передача теплоты в дисперсных материалах осуществляется с помощью механизмов:

- теплопроводности самих частиц материала;
- теплопроводности газа, заполняющего поры материала;

– передачи теплоты теплопроводностью от одной частицы к другой в местах их соприкосновения;

– конвекции газа, в среде которого находится засыпка;

– излучения от частицы к частице.

Даже простое перечисление всех этих видов переноса в дисперсных системах делает очевидным тот факт, что эффективная теплопроводность такой системы является сложнейшей функцией температуры, давления газа, химического состояния материала и газа, пористости, размеров и форм частиц и пор и многих других факторов.

Составление, анализ и решение уравнений, учитывающих все виды переноса теплоты и все указанные выше факторы, встречает очень большие трудности. Поэтому все полученные к настоящему времени расчетные соотношения выведены на основе некоторых принципиальных и частных допущений, на основе упрощения физической картины рассматриваемого процесса и идеализированного представления о структуре материала.

Существует большое количество расчетных соотношений, выведенных для определения эффективной теплопроводности дисперсных систем [2, 3]. При этом, однако, необходимо отметить, что многие расчетные зависимости дают заметное расхождение с экспериментом, что объясняется многими причинами:

– требуется различный подход к расчетам эффективной теплопроводности дисперсных систем в зависимости от взаимного расположения и количества составляющих систему фаз;

– ни одна теория не может учесть влияния на контактную теплопроводность реального распределения частиц и пор по размерам, их форм и контактов между соседними частицами.

Авторы [4] выделили из всего многообразия методов теории обобщенной проводимости наиболее продуктивные и дали их обоснование. Предложен метод, позволяющий анализировать не только тепло- и электропроводность неоднородных материалов, но и диффузионные, магнитные, механические свойства в широком диапазоне температур, в условиях наложения различных физических полей, при фазовых переходах.

В. Н. Щелкачев, Б. Б. Лапук в своей книге [5] рассматривают упрощенные модели идеального и фиктивного грунтов. Реальные пористые пласты отличаются от фиктивного грунта тем,

что слагающие их частицы (песчинки) разнообразны по своим размерам, форме и шероховатости поверхности. Поэтому для применения формул, полученных для фиктивного грунта, заменяют реальный грунт фиктивным грунтом, причем этот эквивалентный фиктивный грунт должен обладать таким же гидравлическим

Рассмотрим модель расчета эффективного коэффициента теплопроводности на основании построенной авторами [6] общей математической модели определения температурного поля процесса карбидообразования.

Пусть в частном варианте «а» двухкомпонентная система имеет вид чередующихся слоев однородных компонентов, когда можно считать, что тепловой поток, определяемый теплопроводностью (верхний индекс «т») направлен вдоль слоев. Пусть ε – объемная доля компонента 2.

Тогда в рамках модели сплошной среды

$$\lambda_{\text{эф,а}}^{\text{т}} = \lambda_1(1-\varepsilon) + \lambda_2\varepsilon, \quad (1)$$

где «а» – индекс варианта.

Пусть в ином частном варианте «б» двухкомпонентная система имеет вид чередующихся слоев однородных компонентов, когда можно считать, что тепловой поток направлен поперек слоев по нормали к ним. Тогда

$$\lambda_{\text{эф,б}}^{\text{т}} = \left(\frac{1-\varepsilon}{\lambda_1} + \frac{\varepsilon}{\lambda_2} \right)^{-1}, \quad (2)$$

где «б» – индекс варианта.

Полагая, что в пористой системе многообразная форма пор, и их случайное расположение определяют равную вероятность любого угла φ ($0 < \varphi < 90^\circ$) между нормалью к поверхности раздела «твердая составляющая – газовая составляющая» и вектором плотности теплового потока, имеем из (1) и (2)

$$\lambda_{\text{эф}}^{\text{т}} = \frac{2\lambda_1\lambda_2 + \varepsilon(1-\varepsilon)(\lambda_1 - \lambda_2)^2}{2[\lambda_2(1-\varepsilon) + \lambda_1\varepsilon]}. \quad (3)$$

Кроме теплового потока, определяемого теплопроводностью, в пористой системе следует учесть составляющую теплового потока, связанную с излучением (индекс «изл»), $q_{\text{изл}}$. Представим проекцию $q_{\text{изл}}$ на ось ξ , как

$$q_{\text{изл},\xi} = -\lambda_{\text{изл},\xi} \frac{\partial T}{\partial \xi}, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{изл},\xi}$ – условный коэффициент теплопроводности излучения.

Поскольку должно выполняться условие $q_{\text{изл},\xi} \rightarrow 0$, если $\varepsilon \rightarrow 0$ и если $\varepsilon \rightarrow 1$, то

$$\lambda_{\text{изл},\xi} = \varepsilon(1-\varepsilon)\lambda_{\text{изл},\xi}^0. \quad (5)$$

Примем для $q_{\text{изл}}^0$ модель Стефана–Больцмана:

$$q_{\text{изл},\xi}^0 = \sigma_0\varepsilon_r(T_{\text{яч,1}}^4 - T_{\text{яч,2}}^4) = -\lambda_{\text{изл},\xi}^0 \frac{\partial T}{\partial \xi},$$

где $T_{\text{яч,1}} = T$ – температура поверхности пор со стороны ячейки 1; $T_{\text{яч,2}}$ – температура поверхности тех же пор со стороны ячейки 2, граничащей с ячейкой 1 по направлению ξ ; ε_r – степень черноты поверхности пор; σ_0 – постоянная Стефана–Больцмана.

Вследствие малости пор $T_{\text{яч,2}} = T_{\text{яч,1}} + \frac{\partial T}{\partial \xi} d\xi$.

Тогда

$$T_{\text{яч,1}}^4 - T_{\text{яч,2}}^4 = -4T^3 \frac{\partial T}{\partial \xi} d\xi; \quad (6)$$

$$q_{\text{изл},\xi}^0 = -4T^3\sigma_0\varepsilon_r \frac{\partial T}{\partial \xi} d\xi.$$

Откуда

$$\lambda_{\text{изл},\xi}^0 = 4T^3\sigma_0\varepsilon_r d\xi$$

и

$$\lambda_{\text{изл},\xi} = k_\xi\varepsilon(1-\varepsilon)T^3, \quad (7)$$

где k_ξ – есть параметр, зависящий от шага расчетной сетки l_ξ по направлению ξ :

$$k_\xi = 4\sigma_0\varepsilon_rl_\xi.$$

Окончательно

$$\text{div } q = -\text{div} \left\{ \left(\lambda_{\text{эф}}^{\text{т}} + \lambda_{\text{изл}} \right) \text{grad } T \right\}. \quad (8)$$

На рис. 1 и рис. 2 показано влияние эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}^{\text{т}}$ на формирование температурного поля. Если представить $\lambda_{\text{эф}}^{\text{т}}$ как суперпозицию $\lambda_{\text{эф,а}}^{\text{т}}$ (1) и $\lambda_{\text{эф,б}}^{\text{т}}$ (2) с вероятностью $1-W$ наличия слоев однородных компонентов, расположенных так, что нормаль к поверхностям слоев совпадает по направлению с вектором плотности теплового потока, обусловленного молекулярной теплопроводностью, то

$$\lambda_{\text{эф}}^{\text{т}} = W\lambda_{\text{эф,а}}^{\text{т}} + (1-W)\lambda_{\text{эф,б}}^{\text{т}}.$$

На рис. 1 и рис. 2 отражены предельные случаи: $W = 1$ и $W = 0$.

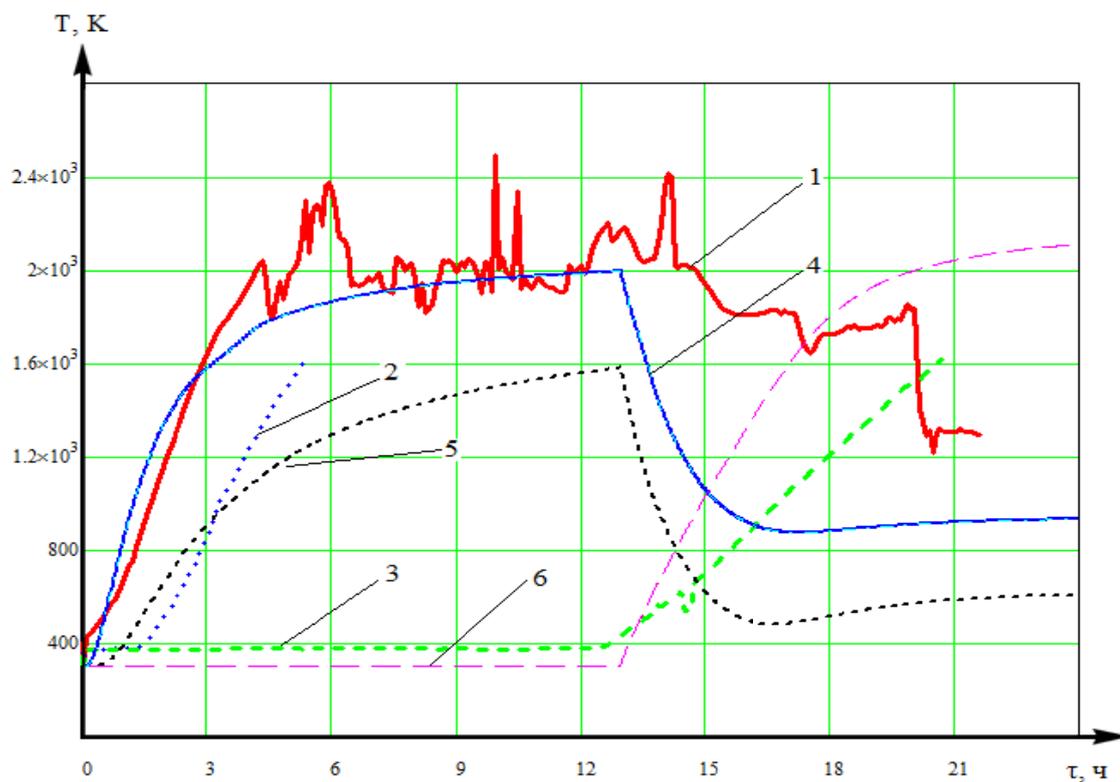


Рис. 1. Графики температур для карбида кремния черного при $W = 1$:
 1, 2, 3 – кривые, построенные по экспериментальным данным [7]; 4, 5, 6 – кривые, соответствующие
 кривым 1, 2, 3, построенные по результатам численных экспериментов при $W = 1$

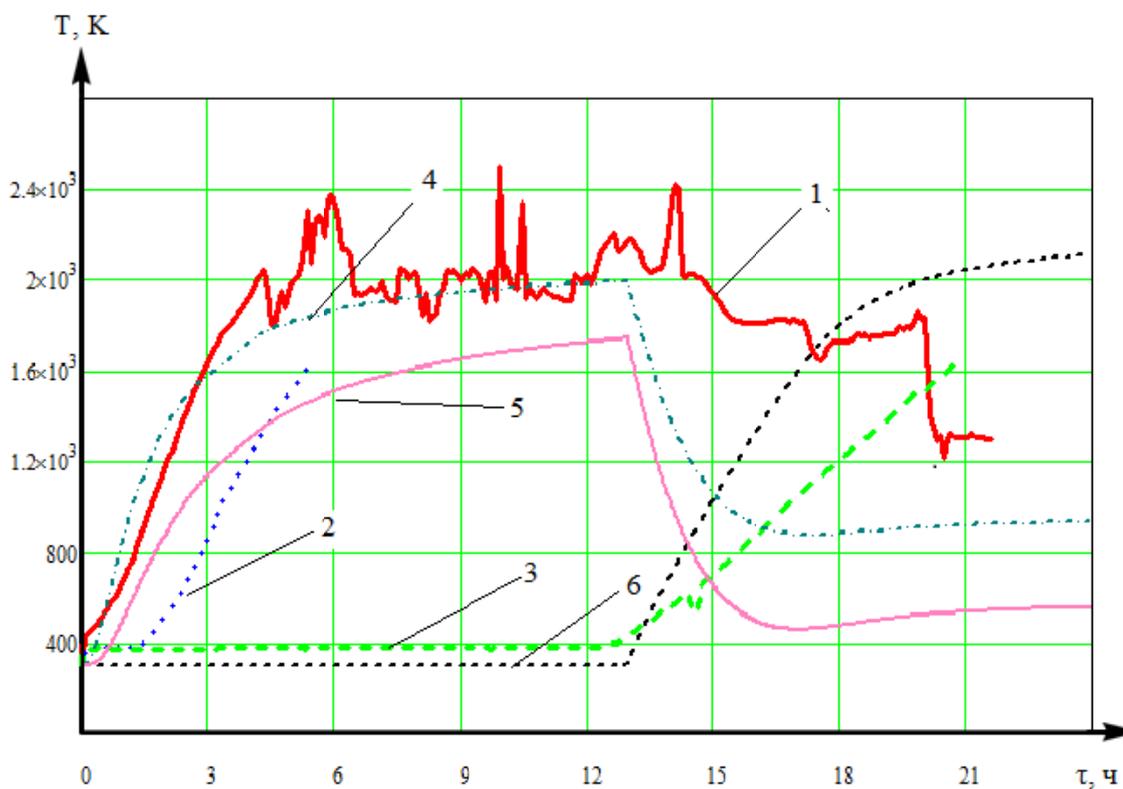


Рис. 2. Графики температур для карбида кремния черного при $W = 0$:
 1, 2, 3 – кривые, построенные по экспериментальным данным [7]; 4, 5, 6 – кривые, соответствующие
 кривым 1, 2, 3, построенные по результатам численных экспериментов при $W = 0$

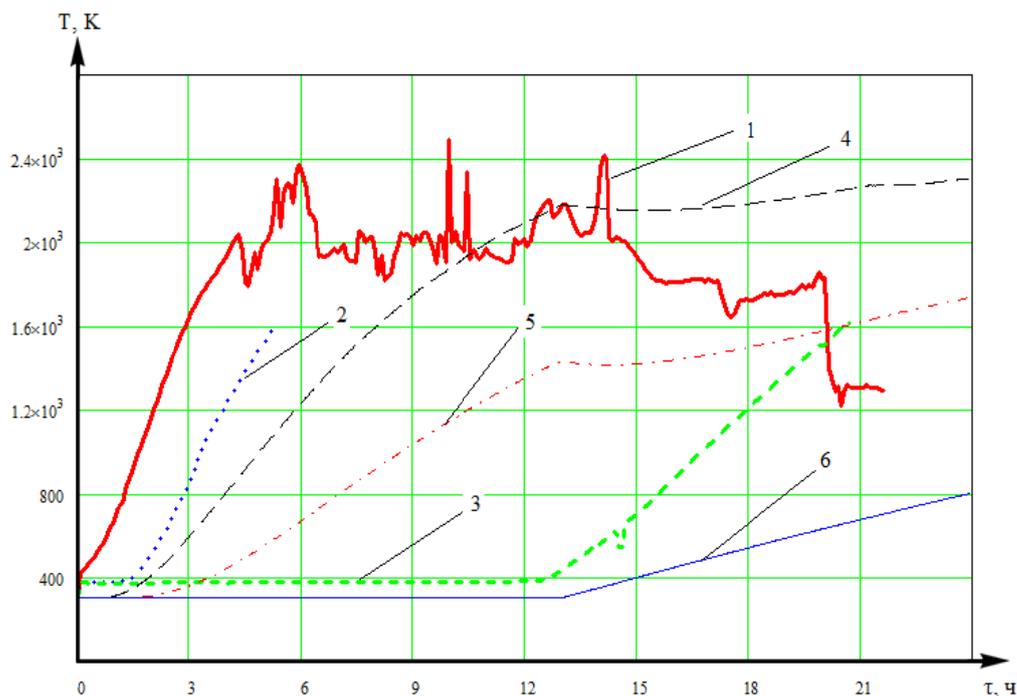


Рис. 3. Графики температур для карбида кремния черного:

1, 2, 3 – кривые, построенные по экспериментальным данным [7]; 4, 5, 6 – кривые, соответствующие кривым 1, 2, 3, построенные с использованием эффективного коэффициента теплопроводности по формуле Максвелла

Заметим при этом, что в базовом варианте расчета принято $W = 0,5$, что отражено в зависимости (3).

Расчетное исследование влияния коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}^T$ на установление температурного поля демонстрирует существенную роль этого коэффициента в зонах, где радиационная составляющая теплопереноса мала. В зоне, прилегающей к керну, влияние коэффициента теплопроводности $\lambda_{\text{эф}}^T$ незначительно.

Важным является и то, что роль коэффициента $\lambda_{\text{эф}}^T$ увеличивается при уменьшении пористости системы. Последнее демонстрируют рис. 1 и рис. 2, где в момент времени $\tau = 13$ часов принято изменение пористости ϵ на 20 % вследствие осадки керна.

На рис. 3 показан расчет температурного поля, в котором был принят вариант описания $\lambda_{\text{эф}}^T$ формулой Максвелла.

Из анализа результатов расчета в их сравнении с экспериментом видно, что принятие $\lambda_{\text{эф}}^T$ по модели Максвелла неприемлемо.

Предложенная авторами модель для определения эффективного коэффициента тепло-

проводности показала более точное совпадение с экспериментом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Чудновский, А. Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов / А. Ф. Чудновский. – М. : Физматгиз, 1962. – 456 с.
2. Лыков, А. В. Теплообмен: Справочник / А. В. Лыков. – М. : Энергия, 1978. – 480 с.
3. Васильев, Л. Л. Теплофизические свойства пористых материалов / Л. Л. Васильев, С. А. Танаева. – Минск : Наука и техника, 1971. – С. 268.
4. Дульнев, Г. Н. Процессы переноса в неоднородных средах / Г. Н. Дульнев, В. В. Новиков. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1991. – 248 с.
5. Щелкачев, В. Н. Подземная гидравлика / В. Н. Щелкачев, Б. Б. Лапук. – Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 736 с.
6. Кузеванов, В. С. Модели процессов и расчет температурного поля в печи сопротивления для производства карбида кремния / В. С. Кузеванов, Г. С. Закожурникова, С. С. Закожурников, А. Б. Гаряев // Вестник ивановского государственного энергетического университета. – 2017. – № 4. – С. 21–29.
7. Закожурникова, Г. С. Повышение энергетической эффективности производства карбида кремния на основе моделирования плавильного процесса : автореф. дис. ... канд. техн. наук 05.14.04 / Закожурникова Г. С. – ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ», 2015. С. 1–20.

УДК 696.4

*И. В. Горюнов¹, И. О. Шестов¹, В. А. Горюнов², Е. А. Федянов²***ОБОСНОВАНИЕ НОВЫХ МЕТОДИК РАСЧЕТА СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ**¹ ООО «Группа компаний «Элита», Санкт-Петербург² Волгоградский государственный технический университет

e-mail: i.goryunov@elitacompany.ru

Действовавший до недавнего времени строительный технический регламент в части проектирования систем водоснабжения предусматривал использование осредненных коэффициентов, полученных обобщением опыта типового строительства. В современных условиях большого разнообразия проектов зданий, в том числе индивидуальной застройки, использование осредненных данных может приводить к существенным погрешностям расчета. В современные строительные правила для проектирования систем водоснабжения и водоотведения введены расчетные формулы. На примере сравнительных расчетов нескольких вариантов схем горячего водоснабжения показана эффективность применения расчетных формул. Дана ссылка на разработанную авторами компьютерную программу, которая позволяет выполнять проектные расчеты систем водоснабжения в соответствии с действующими строительными правилами.

Ключевые слова: строительные нормы и правила, горячее водоснабжение, методы расчета.

*I. V. Goryunov¹, I. O. Shestov¹, V. A. Goryunov², E. A. Fedyanov²***JUSTIFICATION OF NEW METHODS OF CALCULATION OF HOT WATER SUPPLY SYSTEMS**¹ Group of Companies Elita LLC² Volgograd State Technical University

Until recently, the building technical regulations in the design of water supply systems included the use of averaged coefficients obtained by generalizing the experience of standard construction. In the modern conditions of a wide variety of building projects, including individual building, the use of averaged data can lead to significant calculation errors. In the modern building rules for the design of water supply and wastewater systems, design formulas have been introduced. Using the example of comparative calculations of several variants of schemes of hot water supply, the efficiency of the application of calculation formulas is shown. Reference is made to the computer program developed by the authors, which allows performing design calculations of water supply systems in accordance with the current building rules.

Keywords: construction norms and rules, hot water supply, calculation methods.

Современное жилищное строительство ведется при большом разнообразии инженерных решений в конструкции зданий. Это разнообразие касается и сетей водоснабжения. Вместе с тем действовавшие до недавнего времени регламенты на проектирование и прокладку этих сетей оставались неизменными с конца прошлого века, когда строительство велось в подавляющем большинстве случаев по типовым проектам и не существовало разнообразия строительных материалов, видов трубопроводов и тепловой изоляции. В соответствие с принятой в то время практикой проектирования и строительства нормативные материалы содержали большое число осредненных коэффициентов, представленных, в основном, в табличной форме. В настоящее время в условиях разнообразия проектов расчет систем холодного и горячего водоснабжения на основе осредненных величин приводит во многих случаях к существенным погрешностям.

В настоящее время принят новый СП 30.13330.2016 [3], в котором значительная часть параметров систем водоснабжения определяется расчетами по формулам, учитывающим особенности конструктивного решения систем, вид трубопроводов, тепловой изоляции.

При подготовке для нового СП раздела, касающегося горячего водоснабжения, авторами было собрано и систематизировано большое количество практических данных, характеризующих работу различных систем. Обработка данных была проведена с помощью специально разработанной для этой цели программы «УМНАЯ ВОДА» [4, 5]. Результаты проделанной работы позволили утверждать, что значения многих коэффициентов из ранее действующих СНиП 2.04.01-85* [1] и СП 30.13330.2012 [2], а также методику некоторых расчетов необходимо подвергнуть существенной корректировке. Поясним это на примере расчета циркуляционного расхода в системе горячего водоснабжения (ГВС).

Для расчета циркуляционного расхода, в первую очередь, необходимо выполнить расчет тепловых потерь для всех участков проектируемой системы (трубопроводы, полотенцесушители, оборудование). Этот расчет сложен и трудоемок, так как приходится учитывать множество параметров, и к тому же число расчетных участков может исчисляться сотнями. В современных зданиях вариabильность числа расчетных участков и параметров, характеризующих трубопроводы, тепловую изоляцию, оборудование, велика, и расчет по осредненным значениям показателями во многих случаях будет давать ошибочный результат. В крайних случаях система ГВС, спроектированная на основе таких расчетов, будет неработоспособна.

В нашем примере проведен расчет системы горячего водоснабжения для двух зданий. Рассмотрены четыре различные схемы системы ГВС для односекционного здания – 2 схемы для нижней зоны (1–10 этаж) и 2 схемы для верхней зоны (11–20 этаж). Для сопоставления были рассмотрены подобные схемы для двухсекционного здания, в котором количество квартир, стояков и магистралей в 2 раза больше. На рис. 1 для примера приведены две расчетные схемы для нижней зоны односекционного здания. Сплошными и пунктирными линиями на схемах показаны подающие и обратные трубопроводы.

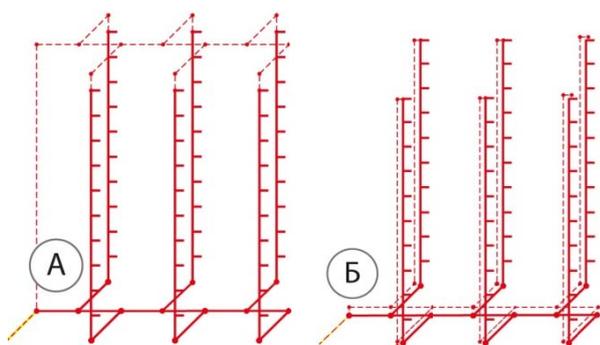


Рис. 1. Пример расчетных схем систем ГВС

Для каждой из восьми схем было проведено моделирование четырех вариантов инженерной оснащённости систем – наличие или отсутствие полотенцесушителей (ПС+, ПС-), наличие или отсутствие изоляции (И+, И-). Всего было составлено 32 различные схемы.

Расчет производился при следующих условиях. В качестве изоляционного материала применен вспененный полиэтилен толщиной 20 мм с коэффициентом теплопроводности

$\lambda=0,043$ Вт/(м·К). Полотенцесушитель выбран М-образный, 500×500 мм, DN32. Трубопровод полипропиленовый SDR7.4, армированный стекловолокном. Температура воздуха в жилых помещениях была принята равной 20 °С, в подвале и на чердаке 5 °С. Температура подаваемой в систему воды 60 °С, кинематическая вязкость $0,47 \cdot 10^{-6}$ м²/с, плотность 983,9 кг/м³.

Расход воды на хозяйственно-питьевое потребление для первых четырех схем был найден из расчета 180 потребителей. Он составил 1,49 л/с. Для двухсекционного дома максимальный секундный расход составил из расчета на 360 потребителей 2,3 л/с. Таким образом, при увеличении числа жителей в 2 раза расход вырос не в 2, а примерно в 1,5 раза. Как показывают результаты моделирования, при увеличении числа потребителей в 3 раза (540 чел.) расход возрастает примерно в 2 раза (3,01 л/с.). Таким образом, относительный прирост расхода с увеличением числа потребителей уменьшается.

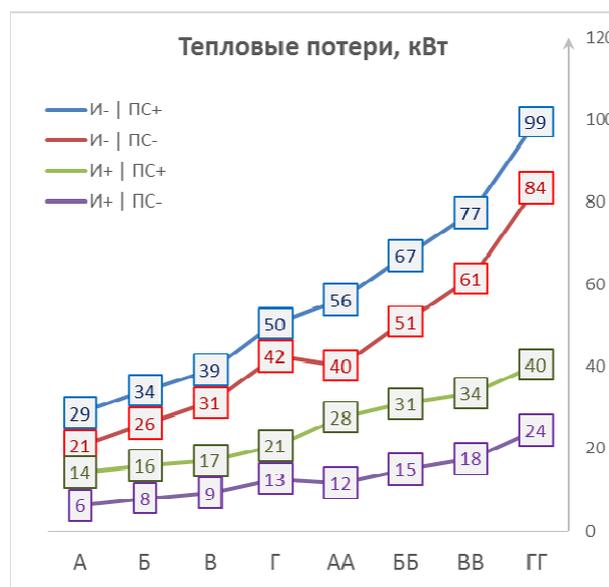


Рис. 2. Тепловые потери для различных схем системы ГВС

С величиной тепловых потерь (рис. 2) наблюдается иная картина. При увеличении числа потребителей эти потери растут опережающими темпами. Причина кроется в том, что потери зависят как от длины трубопроводов, так и от их диаметра. С увеличением числа потребителей длина трубопроводов и их диаметр растут. В нашем примере увеличение числа потребителей в 2 раза привело к повышению тепловых потерь в 1,9–2,1 раза, а при увеличении

числа потребителей втрое тепловые потери возросли в 3–3,1 раза.

Сильно влияет на величину тепловых потерь оснащённость систем ГВС, т. е. наличие или отсутствие тепловой изоляции, наличие или отсутствие полотенцесушителей.

Нижний график на рис. 2 отражает наиболее благоприятную, с точки зрения экономии теплоты, систему – в этой системе есть тепловая изоляция трубопроводов и нет полотенцесушителей (И+, ПС-). Верхний график соответствует самому неблагоприятному случаю – в системе отсутствует тепловая изоляция и есть полотенцесушители (И-, ПС+). Из сопоставления графиков видно, что в зависимости от оснащённости системы тепловые потери могут различаться в 4...5 раз! Следует отметить, что даже при наличии тепловой изоляции действительные тепловые потери в смонтированных системах могут быть больше расчетных вследствие некачественной установки изоляции.



Рис. 3. Доля циркуляционного расхода в различных схемах системы ГВС

Приведенные выше результаты расчетов свидетельствуют о том, что зависимость циркуляционного расхода в системе ГВС (рис. 3) от числа потребителей не является линейной и сильно зависит от оснащённости систем. Этот расход нельзя принимать, как это делалось в предыдущей редакции СНиП, равным 30 % от водопотребления и необходимо вычислять в каждом конкретном случае проектирования системы ГВС. В нашем примере доля циркуляционного расхода от водопотребления менялась в зависимости от технической оснащённости систем в пределах от 9 до 46 % для односекционного здания и от 25 до 104 % для двухсекционного.

Результаты выполненных исследований позволяют сделать следующие выводы: 1) циркуляционный расход не следует определять как долю от расхода на водопотребление; 2) циркуляционный расход необходимо вычислять исходя из величины тепловых потерь в системе ГВС; 3) тепловые потери зависят от оснащённости инженерных систем, протяженности и диаметров трубопроводов, температур воды и воздуха.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СНиП 2.04.01-85* «Внутренний водопровод и канализация зданий»
2. СП 30.13330.2012 «Внутренний водопровод и канализация зданий». Актуализированная редакция СНиП 2.04.01-85*
3. СП 30.13330.2016 «СНиП 2.04.01-85* Внутренний водопровод и канализация зданий»
4. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016662937 «Умная Вода» – программа для проектирования систем внутреннего водопровода и канализации зданий. – 25.11.2016.
5. УМНАЯ ВОДА – программа для проектирования систем внутреннего водопровода и канализации зданий [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://www.smartwater.su> (дата обращения 22.11.17 г.)

УДК 656.13.08 (470.45)

Д. Д. Сильченков, Е. В. Катруш, Н. П. Агапитов

ПОВЫШЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ НА УЧАСТКЕ УЛ. КАРБЫШЕВА В ГРАНИЦАХ УЛ. МОЛОДОГВАРДЕЙЦЕВ И БУЛ. ПРОФСОЮЗОВ (Г. ВОЛЖСКИЙ)

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: atrans@vstu.ru

В статье проведено анализ участка УДС ул. Карбышева в границах ул. Молодогвардейцев и бул. Профсоюзов г. Волжский и доказана целесообразность его совершенствования. Предложена модель новой схемы организации дорожного движения на данном участке УДС.

Ключевые слова: пересечение, организация дорожного движения, безопасность дорожного движения, конфликтные точки.

D. D. Silchenkov, E. V. Katrush, N. P. Agapitov

IMPROVEMENT OF TRAFFIC SAFETY ON THE AREA OF ST. KARBYSHEVA WITHIN ST. MOLODOGVARDEITSEV AND BLVD. PROFSOYUSOV IN VOLZHISKY CITY

Volgograd State Technical University

In the article the area of road network of sr. Karbysheva within the borders of sr. Molodogvardeitsev and blvd. Profsoyusov in Volzhsky city was analyzed and proved the feasibility of its improvement. A model of a new scheme for traffic organizing at this intersection is proposed.

Keywords: intersection, organization of traffic, road safety, conflict areas.

Актуальность исследования в следующем. Исследуемый участок ул. Карбышева от ул. Молодогвардейцев до бул. Профсоюзов является одним из наиболее проблемных участков улично-дорожной сети г. Волжский. Проблемы заключаются в большом годовом количестве «неучетных» ДТП, возникающих по причине несоблюдения очередности проезда перекрестка, больших транспортных задержках по ул. Карбышева в часы пик. Целью данного исследования является повышение безопасности дорожного движения на рассматриваемом участке УДС путем разработки мероприятий, направленных на снижение числа ДТП и уменьшения транспортных задержек по ул. Карбышева. Рассматриваемый участок УДС состоит из двух перекрестков: пересечение ул. Карбышева с ул. Молодогвардейцев и пересечение ул. Карбышева с бул. Профсоюзов. Так как расстояние между центрами перекрестков не превышает 150 м, примерно 40 % транспортных средств совершают маневр: ул. Молодогвардейцев – ул. Карбышева – бул. Профсоюзов и наоборот, было решено рассматривать оба перекрестка как

единый участок. На рис. 1 представлено рассматриваемое пересечение.

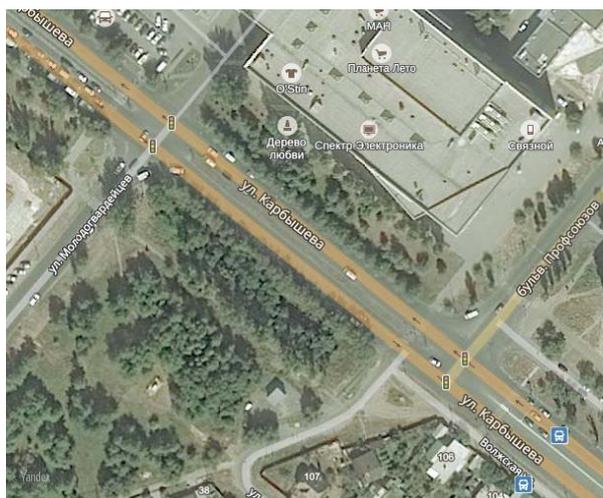


Рис. 1. Рассматриваемый участок улично-дорожной сети

На данном участке организована сложная система светофорного регулирования. Схема существующего светофорного цикла представлена ниже на рис. 2.



Рис. 2. Схемы светофорных циклов на рассматриваемом участке УДС

С целью повышения безопасности дорожного движения на пересечении ул. Карбышева в границах ул. Молодогвардейцев и бул. Профсоюзов предлагаются новая схема светофорного регулирования и новые фазы на данном пересечении, показанные на рис. 3 и 4.

Данный светофорный цикл будет одинаковым на рассматриваемых двух перекрестках,

что также позволит скоординировать дорожное движение.

Для уменьшения транспортных задержек нами предлагается следующее:

- расширить проезжую часть на ул. Карбышева в границах ул. Молодогвардейцев и Профсоюзов на 1 полосу движения в каждом направлении;

Пересечение ул. Карбышева и Молодогвардейцев				
I фаза Ул. Карбышева (подход со стороны старой части города)	32	3		
II фаза Ул. Карбышева (подход со стороны новой части города)		30	3	
III фаза Ул. Молодогвардейцев и бул. Профсоюзов			17	3

Рис. 3. Предлагаемая схема работы светофора

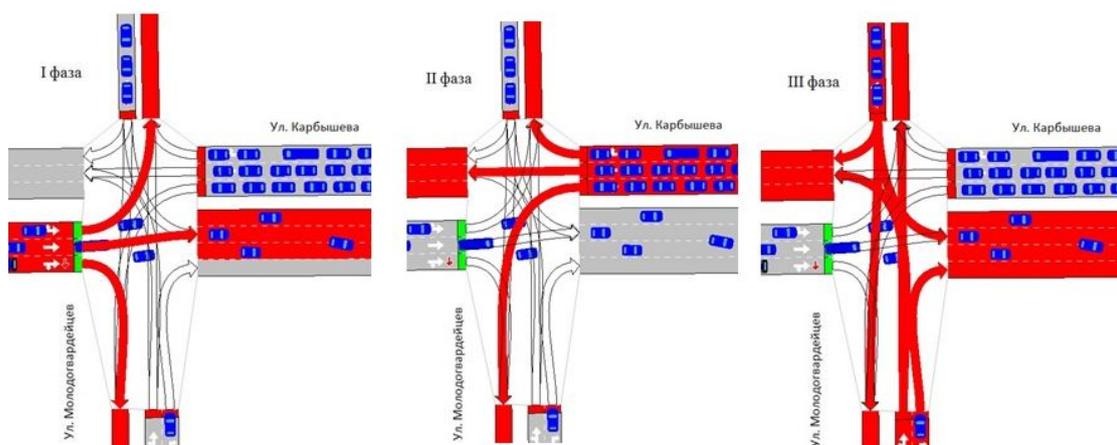


Рис. 4. Новые фазы светофорного цикла

- организовать возможность левого поворота в обоих направлениях с двух полос, так как интенсивность левоповоротного движения на данном участке достаточно высока, примерно 40 %;
- расширить ул. Молодогвардейцев, с двух полос до четырех, на протяжении 50 м до перекрестка для соответствующих поворота направо и левоповоротного потока с ул. Карбышева;
- на каждом подходе к перекресткам организовать поворотную стрелку направо, работающую постоянно;

- установить соответствующие знаки, предупреждающие о новой организации движения на данном участке и поясняющие в каком направлении и куда возможно движение;
- нанести необходимую разметку на данном участке УДС для более понятных условий движения.

Модель дорожного движения на рассматриваемом участке в программе AIMSUN представлена на рис. 5.

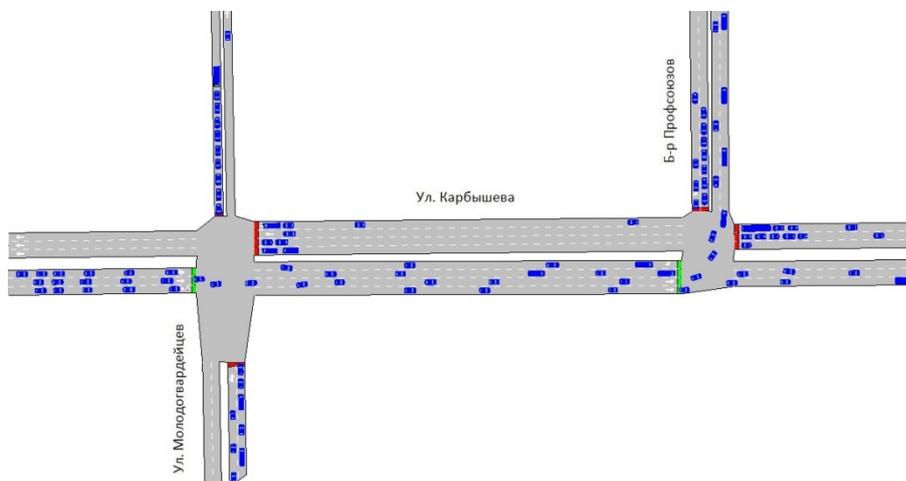


Рис. 5. Модель дорожного движения на рассматриваемом участке

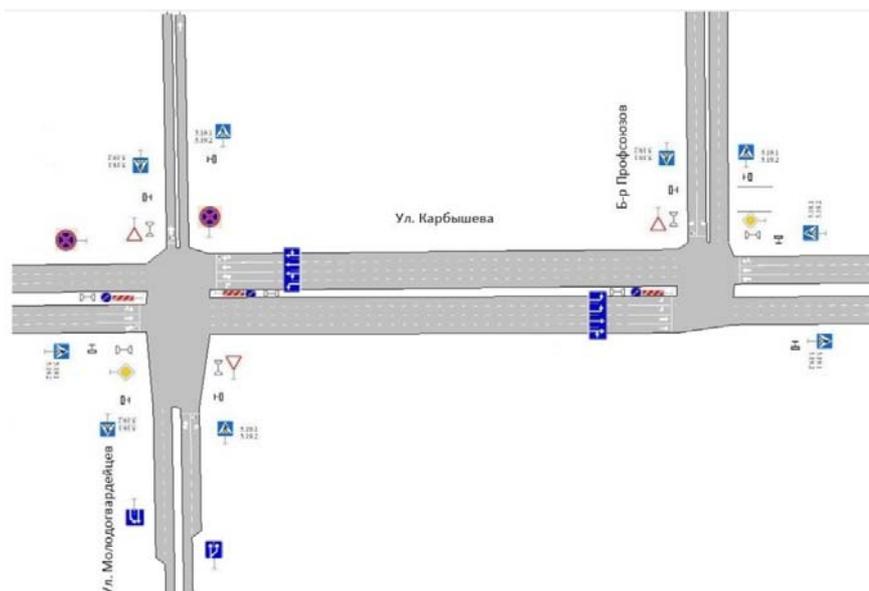


Рис. 6. Новая схема организации движения на участке с восстановленными знаками и разметкой

После восстановления соответствующих знаков и разметки, и добавлением новых знаков дорожного движения, схема участка будет выглядеть см. рис. 6.

Сравнение некоторых параметров старой и новой схемы ОДД представлено в табл. 1.

Таблица 1

Сравнительная таблица существующей и предлагаемой схемы ОДД

Критерий	Существующая схема ОДД	Предлагаемая схема ОДД
Конфликтные точки		
I фаза	29	16
II фаза	4	20
III фаза	26	34
IV фаза	70	–
V фаза	58	–
Σ	187	70
Средняя вероятность снижения	P	P
– числа ДТП с пострадавшими	–	0,46
– общего числа ДТП	–	0,58
Средняя скорость, км/ч	20	35

После введенных мероприятий произведем расчет задержек автотранспорта на исследуемом пересечении. Для сравнения ситуации до и после предлагаемых решений необходимо рассчитать задержки, при той же интенсивности и направлений движения.

Расчет средней задержки одного автомобиля вычисляется по формуле:

$$t_0 = \frac{M_i(T_{\text{ц}} - t_3)^2}{2T_{\text{ц}}(M_i - N_i)}, \quad (1)$$

где t_0 – средняя задержка в данной фазе в данном направлении, с; N_i – приведенная интенсивность автомобилей, проходящих в сечении в час, авт/час; M_i – поток насыщения для одной полосы равен $M_1 = 1800$ авт/час, 5400 – для трех полос; $T_{\text{ц}}$ – время полного цикла транспортного светофора (84 с.); t_3 – время зеленого сигнала светофора.

Сравнение задержек до и после мероприятий представлено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительная таблица задержек транспортных средств

Подход	Существующая схема ОДД	Предлагаемая схема ОДД
Из старой части города на перекрестке ул. Карбышева – Молодогвардейцев	22,6	14,6
Из новой части города на перекрестке ул. Карбышева – Молодогвардейцев	11,3	10
Из старой части города на перекрестке ул. Карбышева – Б-р Профсоюзов	11,6	9,6
Из новой части города на перекрестке ул. Карбышева – Б-р Профсоюзов	25,4	14

Для определения эффективности предложенных решений был произведен сравнительный расчет часового расхода топлива основного вида транспорта (легковых автомобилей и маршрутных) по формуле:

$$G = \sum_{i=1}^n r \Delta t N, \quad (2)$$

$$G = (1 \cdot 0,002 \cdot 1374) + (1 \cdot 0,0003 \cdot 1569) + (1 \cdot 0,0005 \cdot 1710) + (1 \cdot 0,003 \cdot 1377) = 2,75 + 0,47 + 0,86 + 4,13 = 8,21 \text{ (л/час)}$$

Исходя из полученных расчетов получаем часовой расход топлива для легкового транспорта равен 8,21 л/час, для маршрутного – 0,72 л/час. Из этого можно сделать вывод, что часовой расход топлива на данном участке снизится на 8,93 л/час.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Клинковштейн, Г. И.* Организация дорожного движения: учебник для вузов / Г. И. Клинковштейн, М. Б. Афанасьев. – 5-е изд. перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 2001. – 106 с.

где G – часовой расход топлива, л/час; r – средний расход топлива автомобиля в час на холостом ходу, л/час; Δt – снижение времени задержек для одного автомобиля на i -ом подходе; N – приведенная интенсивность.

Пример расчета часового расхода топлива для легковых автомобилей:

2. *Коноплянко, В. И.* Организация и безопасность дорожного движения : учебник для вузов / под ред. В. И. Коноплянко. – Москва : Транспорт, 1991. – 183 с.

3. *Сильченко, Д. Д.* Применение современных методов проектирования при организации дорожного движения : учеб. пособие / Д. Д. Сильченко, Р. Р. Санжапов, А. В. Шустов. – Волгоград: ВолгГТУ, 2015. – 95 с.

УДК 629.113

И. М. Рябов¹, С. А. Ширяев¹, Ю. Г. Юсупов², Ш. М. Минатуллаев³

ОЦЕНКА ДОЛИ КИНЕТИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ АВТОБУСА, НАКАПЛИВАЕМОЙ В АККУМУЛЯТОРЕ СИСТЕМЫ РЕКУПЕРАЦИИ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

¹Волгоградский государственный технический университет

²Махачкалинский филиал Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ)

³Дагестанский государственный аграрный университет им. Джембулаева М. М., Махачкала, Россия
e-mail: sh-sa@mail.ru

В статье получено уравнение энергетического баланса и выражение для определения доли кинетической энергии автобуса, которая может быть накоплена системой рекуперации энергии торможения.

Ключевые слова: автобус, транспортное средство, движение по городу, система рекуперации энергии торможения, тормозной механизм, энергетический баланс, кинетическая энергия, доля энергии, пневмогидравлический аккумулятор.

I. M. Ryabov¹, S. A. Shiryayev¹, Yu. G. Yusupov², S. M. Minatullaev³

THE FRACTION OF THE KINETIC ENERGY OF THE BUS IS STORED IN THE ACCUMULATOR OF THE RECOVERY SYSTEM WHEN BRAKING

¹Volgograd State Technical University

²Makhachkala branch of the Moscow automobile-road State Technical University (MADI)

³Dagestan State agrarian University them Dzhabulaeva M. M., Makhachkala, Russia

In the article the obtained equation of the energy balance and the expression for determining the fraction of the kinetic energy of the bus, which can be accumulated by the energy recovery system braking.

Keywords: bus, vehicle, traffic in the city, the system energy recovery braking, the braking mechanism, the energy balance, kinetic energy, energy, hydro-pneumatic of battery.

Скорость движения автобусов и других транспортных средств по городу непрерывно изменяется вследствие чередующихся штатных

разгонов и торможений на перекрестках, переездах и остановках (рис. 1) [1].

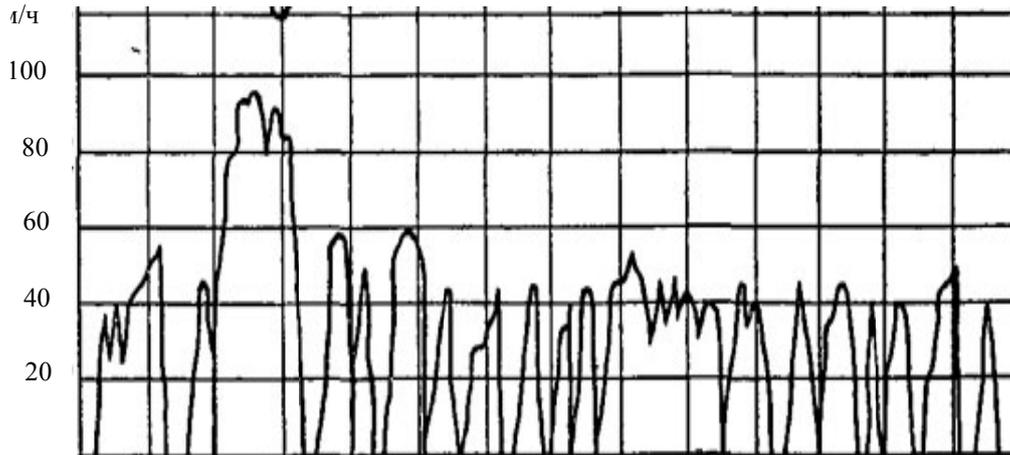


Рис. 1. Изменение скорости v автомобиля за время τ движения по городскому маршруту, протяженностью 12 км

Анализ рис. 1 показывает, что в подавляющем большинстве случаев торможение осуществляется до полной остановки транспортного средства и начинается со скорости около 40 км/ч. Среднее время между остановками составляет 75 секунд. Тогда, за время в наряде 12 часов автобус совершает не менее 576 остановок и разгонов, а за год – более 200 000. Поэтому разработка и внедрение систем рекуперации энергии торможения (РЭТ) на городском автомобильном транспорте: автобусах, маршрутных и легковых такси очень актуальны.

Наиболее перспективными в настоящее время являются системы рекуперации энергии торможения автотранспортных средств, у которых часть кинетической энергии автомобиля в процессе торможения переводится в энергию сжатого газа в пневмогидравлическом аккумуляторе (ПГА) или гидрогазовом накопителе (рис. 2). Он представляет собой цилиндр с крышками, в котором установлен плавающий поршень, разделяющий жидкость и сжатый газ.



Рис. 2. Схема автомобиля с системой рекуперации энергии торможения

Для снижения массы и стоимости системы РЭТ важно осуществить рациональный выбор емкости ПГА, что можно сделать с помощью энергетического баланса. Энергетический баланс автомобиля при торможении рассматривали в своих работах акад. Е. А. Чудаков и проф. Н. А. Бухарин [2, 3] и другие исследователи [4, 5].

Энергетический баланс процесса торможения автобуса до полной остановки при штатном торможении с постоянным замедлением и качении всех заторможенных колес по ровной горизонтальной поверхности без системы РЭТ можно представить в следующем виде:

$$W_{TC} = \frac{\delta_{ep} m_a \vartheta_a^2}{2} = \sum A_i \quad (1)$$

где W_{TC} – полная кинетическая энергия автобуса, Нм; δ_{ep} – коэффициент, учитывающий влияние вращающихся масс трансмиссии и колес автобуса (при отключенном двигателе); m_a – масса автобуса, кг; ϑ_a^2 – скорость автобуса в момент начала торможения, м/с; $\sum A_i$ – результирующая работа, поглощаемая в процессе торможения автобуса.

$$\sum_1^7 A_i = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7, \quad (2)$$

Здесь A_1 – работа результирующей силы трения в тормозных механизмах автобуса между колодками и дисками или барабанами:

$$A_1 = F_{cp} \alpha_r (1 - \sigma) s_r, \quad (3)$$

где F_{cp} – среднее значение результирующей силы трения между колодками и дисками или барабанами; α_r – коэффициент равный отношению среднего радиуса действия силы трения

к радиусу колеса; σ – коэффициент скольжения затормаживаемого колеса относительно поверхности дороги.

A_2 – работа силы сопротивления воздуха:

$$A_2 = P_{wcp} s_{\tau}, \quad (4)$$

где P_{wcp} – средняя величина силы сопротивления воздуха на пути торможения автобуса; s_{τ} – длина тормозного пути.

A_3 – работа сил трения при скольжении затормаживаемых колес относительно дороги:

$$A_3 = m_a g f \sigma s_{\tau}, \quad (5)$$

где g – ускорение силы тяжести; f – коэффициент сопротивления качению колес ТС; σ – коэффициент скольжения затормаживаемого колеса относительно поверхности дороги.

A_4 – работа сил трения трансмиссии:

$$A_4 = P_{mp} (1 - \sigma) s_{\tau}, \quad (6)$$

где P_{mp} – средняя сила трения трансмиссии, приведенная к радиусу колеса;

A_5 – работа сил трения между колесами и дорогой:

$$A_5 = m_a g f s_{\tau} \quad (7)$$

В энергетическом балансе процесса торможения автобуса до полной остановки при штатном торможении снабженного системой РЭТ необходимо учесть энергию, накапливаемую в аккумуляторе, потери в гидравлической машине, а также потери на трение уплотнений плавающего поршня ПГА.

Тогда полная кинетическая энергия автобуса

$$W_{TC} = W_a + A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 + A_6 + A_7. \quad (8)$$

Здесь W_a – энергия, накапливаемая в ПГА; A_6 – работа связанная с потерями энергии в гидронасосе; A_7 – работа, связанная с потерями уплотнениях плавающего поршня ПГА

$$A_6 = \sum_1^5 A_i (1 - \eta), \quad (9)$$

где η – КПД в гидронасоса (у шестеренчатого насоса $\eta = 0,7$, у аксиального $\eta = 0,9$):

$$A_7 = \sum_1^6 A_i (1 - \eta_y), \quad (10)$$

где η_y – КПД поршневого гидроаккумулятора ($\eta_y = 0,95$).

Тогда, из выражения (8) энергия, накапливаемая в ПГА

$$W_a = W_{TC} - A_1 - A_2 - A_3 - A_4 - A_5 - A_6 - A_7. \quad (11)$$

Если торможение осуществляется только за счет системы РЭТ и тормозные механизмы не используются, то работа последних $A_1 = 0$.

Доля кинетической энергии автобуса, накапливаемой в аккумуляторе системы рекуперации при торможении:

$$D = W_a / W_{TC}. \quad (12)$$

Расчеты, выполненные для микроавтобуса «ГАЗель», показали, что при использовании наиболее дешевого шестеренчатого гидронасоса доля энергии, которая может накопиться в поршневом пневмогидравлическом аккумуляторе, составляет 60 % от кинетической энергии автобуса в момент начала торможения, а при использовании аксиального насоса, имеющего более высокий КПД – до 80 %.

Полученные результаты позволяют осуществить рациональный выбор пневмогидравлического аккумулятора с учетом используемой гидравлической машины и могут быть использованы для определения скорости разгона автобуса системой РЭТ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мацкерле, Ю. Современный экономичный автомобиль / Ю. Мацкерле; пер. с чешск. В. Б. Иванова; под ред. А. Р. Бенедиктова. – М.: Машиностроение, 1987. – 320 с.
2. Чудаков, Е. А. Теория автомобиля / Е. А. Чудаков. – М.-Л.: Машгиз, 1940. – 396 с.
3. Бухарин, Н. А. Тормозные системы автомобилей / Н. А. Бухарин. – Л.-М.: Машгиз, 1950. – 292 с.
4. Бухарин, Н. А. Автомобили. Конструкция, нагрузочные режимы, рабочие процессы, прочность агрегатов автомобиля: учебное пособие для вузов / Н. А. Бухарин, В. С. Прозоров, М. М. Щукин. – Ленинград: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1973. – 504 с.
5. Подригало, М. А. Теоретическое обоснование и разработка тормозного управления колесных тракторов и трансформируемых энерготехнологических агрегатов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.05.03 / Подригало М. А. – Харьков, 1993. – 397 с.
6. Рябов, И. М. Системы рекуперации энергии торможения автомобиля на базе гидропневматического аккумулятора / И. М. Рябов, А. М. Ковалев, К. В. Чернышов // Транспортные и транспортно-технологические системы: матер. междунар. науч.-техн. конф. (20 апр. 2011 г.); ГОУ ВПО «Тюменский гос. нефтегаз. ун-т». – Тюмень, 2011. – С. 232–236.
7. Система рекуперации энергии торможения автомобиля на базе шарико-винтовой передачи и гидропневмоаккумулятора / А. М. Ковалев, Ю. Г. Юсупов, И. М. Рябов, К. В. Чернышов // XVI региональная конференция молодых исследователей Волгоградской области, Волгоград, 8–11 ноября 2011 г.: тез. докл. / ВолГТУ [и др.]. – Волгоград, 2012. – С. 61–63.
8. Системы рекуперации энергии торможения автомобиля на базе гидропневматического аккумулятора / К. Д. Белоусов, С. Е. Мохов, И. М. Рябов, А. В. Куликов // Тезисы докладов смотр-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов Волгоградского гос. техн. университета, 14–17 мая 2013 г. / ВолГТУ, Совет СНТО. – Волгоград, 2013. – С. 133–134.
9. Пат. на полезную модель 103516 РФ, МПК В 60 К 6/12, г. Рекуператор / Рябов И. М., Чернышов К. В., Ковалев А. М.; заявитель и патентообладатель ВолГТУ. – 2011.

УДК 66.081.6.666.081.63

*А. Б. Голованчиков, Т. Х. Ву, П. Э. Коворова, М. К. Доан***МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ
С УЧЕТОМ СТРУКТУРЫ ПОТОКА ОЧИЩАЕМОГО РАСТВОРА****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: pahp@vstu.ru

Проведено сравнение параметров ультрафильтрационной очистки раствора, рассчитанного по типовому алгоритму, опирающемуся на идеальное вытеснение, с описанным в работе алгоритмом, когда структура потока этого раствора соответствует идеальному смешению. Показано, что при идеальном смешении для обеспечения заданной степени очистки по пермеату необходимо переходить к мембране с меньшим размером пор и удельной производительности, что потребует увеличение площади поверхности мембраны в несколько раз при снижении степени концентрирования.

Ключевая слова: ультрафильтрация, идеальное вытеснение, идеальное смешение, концентрация, пермеат, ретант, исходный раствор, площадь поверхности, полупроницаемая мембрана.

*A. B. Golovanchikov, T. H. Vu, P. E. Kovorova, M. C. Doan***MODELLING ULTRAFILTRATION PROCESS WITH ACCOUNT TAKEN
OF THE FLOWS STRUCTURE OF THE CLEANING SOLUTION****Volgograd State Technical University**

The comparison of the parameters of the ultrafiltration purification of the solution, calculated according to the standard algorithm is based on the ideal displacement, as described in the algorithm, when the flow of the solution structure corresponds to an ideal mixing. It is shown that under ideal mixing to provide the desired degree of purification necessary membrane with a smaller pore size and specific performance, requiring an increase in the surface area of the membrane several times while reducing the degree of concentration.

Keywords: ultrafiltration, an ideal displacement, an ideal mixing, concentration, permeate, retant, the initial solution, the surface area, the semipermeable membrane.

Известный алгоритм расчета технологических и геометрических параметров полупроницаемой мембраны для ультрафильтрационной очистки раствора основан на структуре потока идеального вытеснения по ретанту, когда его расход от входа к выходу постепенно уменьшается, а концентрация растворенных молекул повышается [1–4].

Однако часто для уменьшения концентрационной поляризации, связанной с повышенной концентрацией молекул растворенного вещества около рабочей поверхности мембраны применяют статические или динамические смесители, вибрацию и другие методы и устройства разрушающие, уменьшающие или даже предотвращающие концентрационную поляризацию. В этом случае структура потока очищаемого раствора, движущегося над поверхностью мембраны, становится далекой от идеального вытеснения и может приближаться при интенсивном перемешивании к структуре потока идеального потока.

Схема рассматриваемого процесса ультрафильтрации на полупроницаемой мембраны приведена на рис. 1 (механическая мешалка показана условно, чтобы подчеркнуть режим идеального смешения по очищаемому раствору).

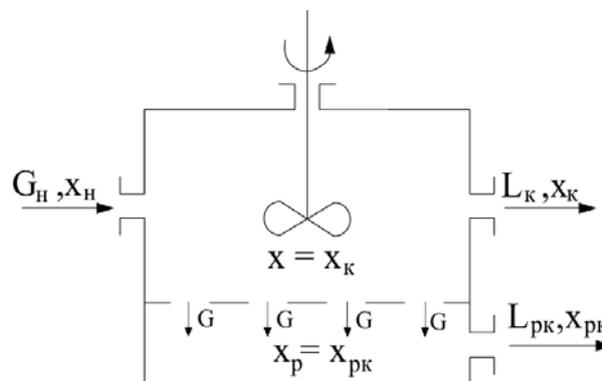


Рис. 1. Схема ультрафильтрационного процесса при идеальном смешении очищаемого раствора

Материальные балансы по потокам и концентрациям молекул растворенного вещества могут быть записаны в виде:

$$G_H = L_K + L_{PK}; \quad (1)$$

$$G_H x_H = L_K x_K + L_{PK} x_{PK}. \quad (2)$$

Так как концентрация в пермеате связана с концентрацией в ретанте [1–4]

$$x_P = (1 - \phi)x, \quad (3)$$

а концентрация в ретанте $x = x_K$ постоянна, то

$$x_{PK} = (1 - \phi)x_K. \quad (4)$$

Решение уравнений (1) и (2) относительно неизвестных L_K и L_{PK} с учетом уравнения (3) имеют вид:

$$L_{PK} = \frac{G_H(x_K - x_H)}{\varphi \cdot x_K}; \quad (5)$$

$$L_K = G_H - L_{PK}. \quad (6)$$

Необходимая площадь поверхности ультрафильтрационной мембраны определяется по формуле:

$$F_m = \frac{L_{PK}}{G}. \quad (7)$$

Соответственно длина мембраны, свернутой в рулон:

$$l_m = \frac{F_m}{b}. \quad (8)$$

Формулы (3), (6), (7) являются общими и не зависят от структуры потока очищаемого раствора, движущегося над ультрафильтрационной мембраной, будь то идеальное смешение или идеальное вытеснение. А вот расход пермеата в мембране со структурой потока идеального вытеснения определяется по формуле [1–4]:

$$L_p = G_H(1 - K^{-1/\varphi}), \quad (9)$$

при этом концентрация прошедших в пермеат молекул растворенного вещества запишется в виде:

$$x_{PK} = x_H \left[\left(k^{1/\varphi} - k \right) - \left(k^{1/\varphi} - 1 \right) \right]. \quad (10)$$

Последнюю формулу для расчета x_{PK} можно упростить, исходя из уравнения материального баланса по растворенным молекулам:

$$x_{PK} = \frac{G_H x_H - L_K x_K}{L_{PK}}. \quad (11)$$

Кроме того, в отличие от постоянства концентрации молекул растворенного вещества в объеме раствора над мембраной x_K и пермеата под ней x_{PK} в ультрафильтрационном аппарате с идеальным вытеснением эти концентрации меняются вдоль площади и длины мембраны, увеличиваясь от входа к выходу (рис. 2). Так, профиль концентрации растворенного вещества в растворе под мембраной можно рассчитать по формуле, получаемой из дифференциально растворенным молекулам:

$$x = \frac{x_H}{\left(1 - \frac{bGZ}{G_H} \right)^\varphi}. \quad (12)$$

Соответственно концентрация проскакивающих в пермеат молекул растворенного вещества определяется по формуле (3).

В таблице приведены исходные и справочные данные и расчетные параметры ультрафильтрационной мембраны для концентрирования водного раствора ацилазы при идеальных режимах вытеснения и смешения для раствора, находящегося над мембраной и пермеата, образующегося под мембраной.

Исходные и справочные данные и расчетные параметры ультрафильтрационной мембраны для концентрирования водного раствора ацилазы

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
Исходные данные			
1. Производительность по начальному раствору	кг/с	G_H	0,2
2. Начальная массовая концентрация молекул ацилазы в начальном растворе	%	x_H	0,015
3. Конечная массовая концентрация ацилазы в ретанте	%	x_K	0,15
4. Перепад давления на мембране	МПа	Δp	0,2
5. Рабочая температура	°С	t	25
Справочные данные			
1. Диаметр молекулы ацилазы	мк	d_M	7
2. Истинная селективность мембраны	–	φ	0,998
3. Диаметр пор в мембране УАМ - 150	мк	d_p	15
4. Константа проницаемости по чистой воде	кг/(м ² ·с·МПа)	a	0,075
5. Плотность раствора	кг/м ³	ρ	1036
6. Коэффициент кинематической вязкости раствора	м ² /с	ν	$9,44 \cdot 10^{-7}$

Окончание таблицы

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина	
7. Динамическая вязкость воды при рабочей температуре	Па·с	μ_0	$8,94 \cdot 10^{-4}$	
8. Ширина мембраны	м	b	1	
Расчетные параметры				
1. Степень концентрирования	–	K	10	
2. Удельная производительность при рабочем перепаде давления	кг/(м ² ·с)	G_e	$3,4 \cdot 10^{-3}$	
3. Динамическая вязкость раствора	Па·с	μ	$1,0007 \cdot 10^{-3}$	
4. Удельная производительность по раствору	кг/(м ² ·с)	G	$3,054 \cdot 10^{-3}$	
Расчетные параметры для разных структур потоков раствора над мембраной				
	Идеальное вытеснение	Идеальное смешение		
1. Производительность по пермеату	кг/с	L_P	0,18	0,18
2. Производительность по ретанту	кг/с	L_K	0,02	0,02
3. Конечная массовая концентрация ацилазы в пермеате	%	x_{PK}	$7,67 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-4}$
4. Поверхность мембраны	м ²	F_m	59	59
5. Длина мембраны	м	l_m	59	59

Как видно из расчетных параметров таблицы, оба режима структуры потоков обеспечивают практически одинаковую производительность по пермеату и ретанту при одинаковых поверхностях и длин рулона мембраны. Однако, если концентрации на выходе ретанта при обоих режимах структуры потоков равны, то конечная концентрация в пермеате почти в 4 раза выше при идеальном смешении, чем при идеальном вытеснении. Последнее объясняется тем, что постоянная по площади и наибольшая концентрация молекул в ретанте при-

водит к большому проскоку молекул в пермеат – см. формулу (4), то есть при идеальном смешении значительно возрастает проскок молекул растворенного вещества в пермеат. Таким образом, идеальное смешение нецелесообразно применять, если целевым продуктом является пермеат с высокой чистотой по сплошной фазе. В противном случае придется переходить к мембранам с меньшим диаметром пор, что потребует большей поверхности мембраны, росту гидравлического сопротивления и энергозатрат.

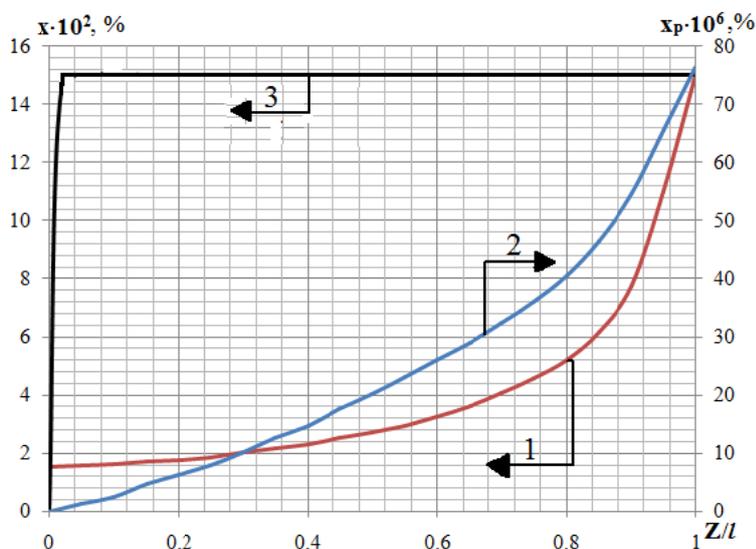


Рис. 2. Профили концентрацией молекул ацилазы по относительной длине ультрафильтрационной мембраны при идеальном вытеснении раствора под мембраной: 1 – в растворе над мембраной; 2 – в пермеате под мембраной; 3 – при идеальном смешении в растворе над мембраной

Для получения в пермеате такой же концентрации на выходе, как в решении идеального вытеснения $x_{PK} = 7,67 \cdot 10^{-5} \%$ в режиме идеального смешения, необходимо снизить степень концентрирования так, чтобы она удовлетворила условию, получаемому из уравнения (4), решенного относительно $x_K = \frac{x_{PK}}{1-\varphi}$, тогда получаем $x_K = 3,825 \cdot 10^{-2} \%$ и допустимая степень концентрирования для смесителя должна быть

$$K = \frac{3,825 \cdot 10^{-2}}{1,5 \cdot 10^{-2}} = 2,55.$$

Производительность по пермеату составит согласно уравнению (5) $L_{pc} = 0,124$ кг/с, а по ретанту $L_{KC} = 0,2 - 0,124 = 0,076$ кг/с, то есть упадет по пермеату почти в 1,5 раза а по ретанту возрастает почти в 3 раза (см. таблицу). Можно увеличить степень концентрирования за счет перехода к мембране с меньшим размером пор, например $d_p = 3$ мкм и константой проницаемости по чистой воде $a = 0,0015 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \times \text{с} \times \text{МПа}}$, то есть в 5 раз меньшей, чем в рассчитанной ранее мембране УАМ-150 [1], в этом случае $\varphi = 0,999$ и $x_K = 7,67 \cdot 10^{-3} \%$ массовых. Тогда допустимая степень концентрирования для сме-

ителя с такой мембраной $K = \frac{0,0767}{0,015} = 5,11$ ж,

производительность по пермеату составит:

$$L_{pc} = \frac{0,2(7,67 \cdot 10^{-2} - 1,5 \cdot 10^{-2})}{0,99 \cdot 7,67 \cdot 10^{-2}} = 0,174 \text{ кг/с,}$$

а по ретанту $L_{KC} = 0,2 - 0,174 = 0,026$ кг/с, при этом поверхность мембраны возрастает до 245 м^2 , то есть в 5 раз.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Основные процессы и аппараты химической технологии. Пособие по проектированию / Под ред. Ю. И. Дытнерского. – М.: Химия, 1985. – 272 с.
2. Тимонин, А. С. Инженерно-физический справочник. Т. 2 / А. С. Тимонин. – Калуга : Издательство Н. Бочкаревой, 2003. – 884 с.
3. Машины и аппараты химической промышленности: учебник для вузов / А. С. Тимонин, Б. Г. Балдин, В. Я. Борщев, Ю. И. Гусев и др. ; под общ. ред. А. С. Тимонина. – Калуга : Издательство Ноосфера, 2014. – 856 с.
4. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. Часть 2. Моделирование гидромеханических процессов : учебное пособие / А. Б. Голованчиков. – Волгоград: ВолГТУ, 1995. – 122 с.
5. Родионов, А. И. Техника защиты окружающей среды: учебник для вузов / А. И. Родионов, В. Н. Клушин, Н. С. Торыешников. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1985. – 512 с.
6. Проскуряков, В. А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В. А. Проскуряков, Л. И. Шмидт. – Л.: Химия, 1977. – 464 с.
7. Выгодский, М. Я. Справочник по высшей математике / М. Я. Выгодский. – М.: АСТ: Астрель, 2006. – 991 с.

УДК 628. 004.8

*Г. Г. Русакова, А. Б. Голованчиков, М. М. Русакова, Е. Д. Паракхневич,
Д. В. Паракхневич, Л. В. Мазина, Д. В. Лучковский, Е. В. Губицкая*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СУШКИ ОТХОДОВ ГОРЧИЧНО-МАСЛОБОЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: pahp@vstu.ru

В статье рассматриваются результаты определения параметров сушки отходов горчично-маслобойного производства на различных типах сушилок.

Ключевые слова: отходы горчично-маслобойного производства, параметры сушки, результаты исследований.

*G. G. Rusakova, A. B. Golovanchikov, M. M. Rusakova, E. D. Parakhnevich,
D. V. Parakhnevich, L. V. Mazina, D. V. Luchkovskij, E. V. Gubitskaya*

DETERMINATION OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS THE DRYING PROCESS OF WASTE MUSTARD OIL PRODUCTION

Volgograd State Technical University

The article discusses the results of determination of parameters of drying of waste mustard oil manufacturing various types of dryers.

Keywords: waste mustard oil production, drying parameters, the results of the research.

Сушка является нестационарным термодиффузионным процессом, в котором в общем случае влагосодержание и температура материала непрерывно изменяются во времени, поэтому для разработки рациональных конструкций агрегатов и оптимальных режимов влагоудаления необходимо знать кинетические закономерности процесса и разработку на их основе технологических параметров сушки и конструктивные параметры технических средств [1–6].

В связи с тем, что в промышленных условиях аппаратное оформление технологической схемы подготовки материала к сушке (филт-

рация, центрифугирование) и тип сушилки могут быть разными (распылительная, тоннельная, в кипящем слое и др.) [7], необходимо знать время сушки материала с различным содержанием в нем влаги.

Результаты исследований приведены на рис. 1–4, в соответствии с которыми, уменьшение содержания влаги в высушиваемом материале требует соответствующих технических средств.

На рис. 1 приведены результаты сушки материала с влажностью 50 % на туннельной сушилке.

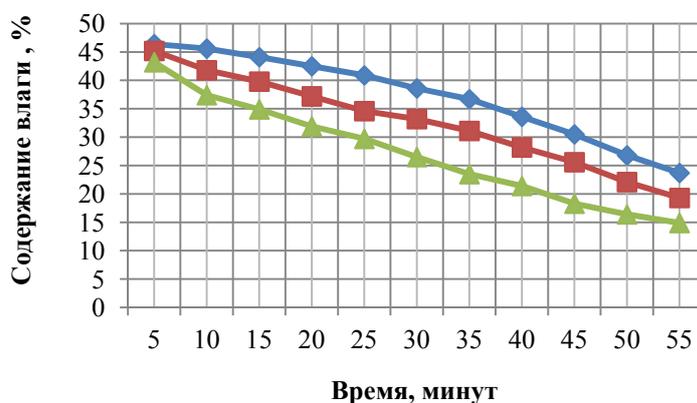


Рис. 1. Кривая сушки гидролизата в туннельной сушилке

На туннельной сушилке достичь требуемого результата сушки отходов горчично-маслобойного производства также не представилось возможным. Высушиваемая масса также покрывалась коркой. Содержание влаги внутри корки было 20...25 %, общая влага высушиваемой массы составляла 16,5...14,8 %. Такой продукт также следует скармливать в течение суток, так как при хранении он загнивал, и к скармливанию был не пригоден;

Рекомендовать такие сушилки в многотоннажное промышленное производство с нашей точки зрения также нецелесообразно.

Полученные данные по сушке продуктов переработки семян горчицы в неподвижном слое, указывают, что применение более высоких температур приводит к ухудшению технологических показателей вследствие неравномерного нагревания материала и подгорания продукта.

Таблица 1

Результаты сушки гидролизата в туннельной сушилке

б слоя	τ, мин	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
3,0 мм	Содержание влаги, %	51,3	46,4	45,6	44,1	42,5	40,9	38,6	36,7	33,6	30,5	26,8	23,7
2,0 мм		51,3	45,2	41,8	39,8	37,5	34,9	33,2	31,1	28,2	25,6	22,1	19,3
1,0 мм		51,3	43,2	37,4	34,9	31,9	29,7	26,5	23,5	21,4	18,3	16,4	14,3

В промышленности используется технологический процесс гидролиза синигрина гидратацией в реакторе с мешалкой. Содержание сухого вещества в суспензии 15...18 % [8]. Сушку такой суспензии следует вести в распылительной сушилке.

На рис. 2 приведены результаты сушки пятнадцати 15 %-ной суспензии на распылительной сушилке.

Кривая сушки гидролизата в распылительной сушилке, представленная на рис. 2 показывает, что 15 %-ную суспензию в распылитель-

ной сушилке можно высушить за 0,5 мин при температуре 120 °С. Качество кормового продукта и возможность использования его в комбикормовой промышленности приведены в работе [9].

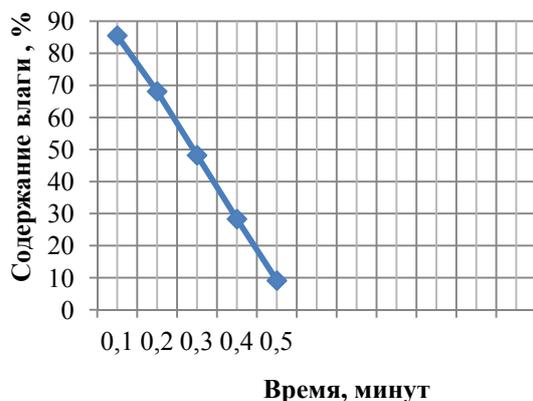


Рис. 2. Кривая сушки гидролизата в распылительной сушилке

Сушка 15 %-ной суспензии в распылительной сушилке энергоемка, что указывает на необходимость разработки технологии переработки отходов горчично-маслобойного производства с меньшими энергетическими затратами. В промышленности используется технологический процесс гидролиза синигрина при смачивании отходов водой не более чем на 50 %, это связано с тем, что при увеличении значения содержания влаги в суспензии значительно повышаются расходы на последующую сушку.

На рис. 3 приведены результаты сушки материала с влажностью 50 % в вакуумной барабанной сушилке с двухвинтовым шнековым валом.

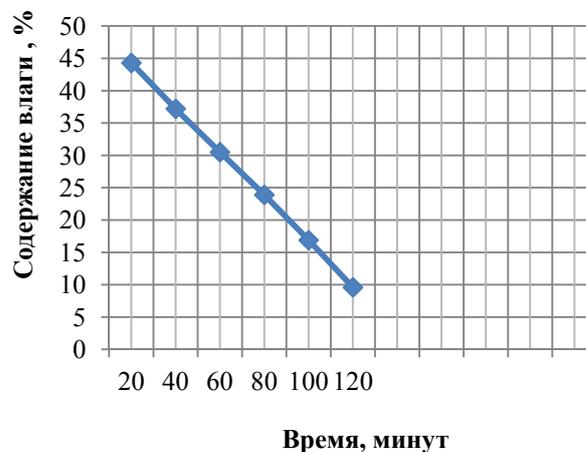


Рис. 3. Кривая сушки гидролизата в вакуумной барабанной сушилке с двухвинтовым шнековым валом

Кривая сушки гидролизата в вакуумной барабанной сушилке с двухвинтовым шнековым валом, представленная на рис. 3, показывает, что материала с влажностью 50 % в такой сушилке можно высушить за 120 минут.

На рис. 4 приведены результаты сушки материала с влажностью 50 % в барабанной вакуумной гребковой сушилке.

Кривая сушки гидролизата в вакуумной барабанной гребковой сушилке, представленная на рис. 4, показывает, что материала с влажностью 50 % в такой сушилке можно высушить за 180 мин.

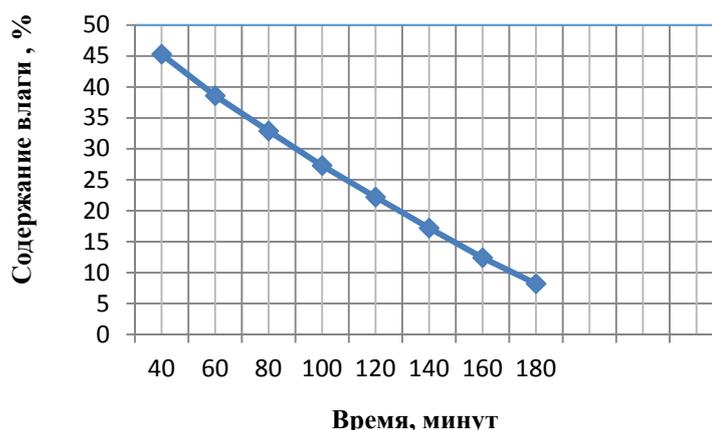


Рис. 4. Кривая сушки гидролизата в вакуумной гребковой сушилке

В процессе исследований кинетики сушки материала с влажностью 50 % в вакуумных сушилках установлены недостатки: продукты переработки семян горчицы в сушилке подгора-

ют; образуются окатыши; потери 18 % протеина в кормовом продукте; имеет место унос мелкодисперсной пыли высушенного продукта, схемы металлоемки.

Качество кормового продукта и возможность использования его в комбикормовой промышленности приведены в работе [10].

Из анализа результатов выполненных работ существующих сушильных устройств и обеспечения рациональных параметров, и режимов технологического процесса сушки продуктов переработки семян горчицы после извлечения из них эфирного масла, нами предложена схема конструкции сушилки с кипящим слоем в виде вертикального аппарата колонного типа с переменным сечением по высоте. В поперечном сечении нижней части колонны установлена воздухораспределительная решетка.

Для исследования процесса сушки гидролизата на сушилке с псевдоожиженным слоем необходимо предварительно провести ситовой анализ высушиваемого материала.

- плотность:
- насыпная плотность:
- удельная теплоемкость
- температура материала, поступающего на сушку
- температура выгружаемого высушенного материала принята равной температуре отходящих газов.

Изучение процесса сушки гидролизата после выделения из него эфирного горчичного масла проводили на установке ООО ВГМЗ «Сарепта» [11].

Таблица 2
Результаты ситового анализа

Фракции, мм	10,0...8,0	7,0...5,0	4,0...2,0	1,9...1,0
Содержание, %	30	25	30	15

Среднеситовые диаметры фракций:

$$d_1 = 10 + 8 / 2 = 9 \text{ мм};$$

$$d_2 = 7 + 5 / 2 = 6 \text{ мм};$$

$$d_3 = 4 + 2 / 2 = 3 \text{ мм};$$

$$d_4 = 1,9 + 1,0 / 2 = 1,5 \text{ мм}.$$

На основе ситового анализа был определен эквивалентный диаметр фракций транспортируемого продукта, $d_{\text{экв}} = 4 \text{ мм}$.

На основании полученных значений определили скорость витания $\omega_{\text{вит}} = 15,2 \text{ м/с}$.

При выполнении указанных исследований были определены ниже перечисленные характеристики высушиваемого материала:

$$\rho_{\text{кр}} = 1150 \text{ кг/м}^3.$$

$$\rho_{\text{нас}} = 514 \text{ кг/м}^3.$$

$$c_{\text{кр}}^{\text{тп}} = 1,55 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}.$$

$$t = 50 \text{ }^\circ\text{C}.$$

При выполнении экспериментальных работ по сушке гидролизата на сушилке с псевдоожиженным слоем получены следующие данные (рис. 5).

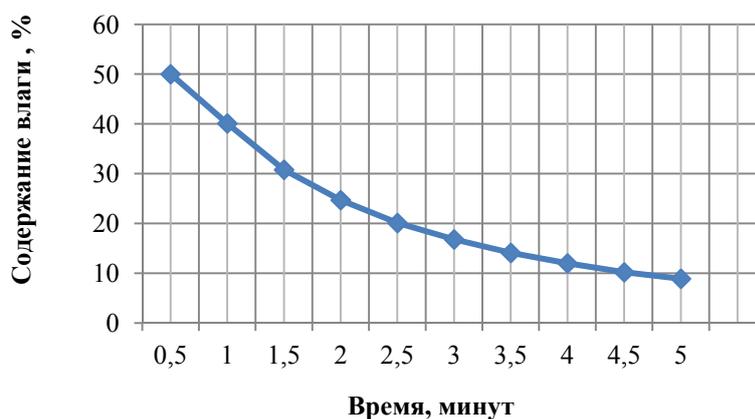


Рис. 5. Кривая сушки гидролизата в сушилке с псевдоожиженным слоем

Остаточное содержание влаги в пробах высушиваемого продукта определяли по ГОСТ 13979.1-68.

Экспериментальные исследования процесса сушки в развитой стадии псевдоожиженного слоя подтвердили возможность применения повышенных температур $140 \div 150 \text{ }^\circ\text{C}$ нагретого воздуха для сушки пищевых волокон. При суш-

ке в кипящем слое интенсивное перемешивание частиц в вихревом потоке воздуха выравнивает температуру нагретого воздуха и частиц, исключая местные перегревы материала. Кроме этого, значительное сокращение продолжительности сушки при применении высоких температур уменьшает суммарное воздействие тепла на материал. Высушенные частицы со-

храняют свою форму и объем и имеют пористую структуру, что улучшает их восстанавливаемость. Это объясняется малой усадкой при сушке в кипящем слое с температурным режимом выше 100 °С, так как в этом случае влага внутри частиц перемещается только в виде пара, внутреннее давление которого уравнивает силы, вызывающие усадку материала [5]. Для обоснования рациональности того или иного способа сушки важны не только вид и свойства исходного сырья, вид удаляемой из материала влаги, начальное и конечное влагосодержание, плотность, но и сведения об изменениях формы и состояния, которые материал может претерпевать при сушке, производительность установки и т. д.

По мере высыхания в активном гидродинамическом режиме крупные агломерированные частицы продуктов переработки семян горчицы распадаются, отдельные частицы пищевых волокон с подсушенным поверхностным слоем при ожигении образуют достаточно гидродинамически устойчивый кипящий слой.

При выполнении указанных исследований экспериментально подтверждена рациональность сушки продуктов переработки семян горчицы в псевдоожигенном слое с получением высокого качества готового продукта, снижения энергоемкости процесса и простоте конструктивного исполнения сушильного аппарата, также были определены технологические параметры сушки в сушилке с псевдоожигенным слоем для сушки 1 т гидролизата:

количество влажного материала

$$(G_{кр.ф}^{вл} = 63,9 \text{ кг/час или } 0,0117 \text{ кг/с});$$

количество испаряемой влаги

$$(W = 22,24 \text{ кг/час});$$

расход тепла ($Q = 69740 \text{ кДж/час}$);

удельный расход тепла

$$(Q = q/W = 3135,8 \text{ кДж/кг влаги});$$

расход воздуха на испарение

$$(L = 863,12 \text{ кг/час});$$

удельный расход воздуха

$$(L = l/W = 38,81 \text{ кг/кг влаги});$$

температура воздуха на входе в сушилку (после подогрева в калорифере) ($t_1 = 137 \text{ °C}$);

давление греющего пара ($p_{абс} = 3,2 \text{ атм}$);

производительность вентилятора

$$(V = 708,2 \text{ М}^3/\text{час});$$

расход греющего пара ($Q_{гр.п} = 39,9 \text{ кг/час}$);

средняя разность температур в калорифере

$$(t_{cp} = 45 \text{ °C});$$

поверхность нагрева калорифера ($F = 5,6 \text{ м}^2$);

эквивалентный диаметр частиц высушиваемого материала ($d_{экр} = 4,0 \text{ мм}$);

число псевдоожигения ($K_w = 6,4$);

критическая скорость псевдоожигения

$$(W_{кр} = 0,9 \text{ м/с});$$

скорость воздуха (считая на полное сечение решетки) ($W = 5,22 \text{ м/с}$);

скорость воздуха непосредственно у решетки ($W_{реш} = 6,36 \text{ м/с}$);

критическая скорость псевдоожигения для укрупненных частиц ($W_{отв} = 2,26 \text{ м/с}$) при $K_w = 6,4$;

скорость воздуха в отверстиях решетки

$$(W_{отв} = 14,5 \text{ м/с})$$

диаметр укрупненных частиц

$$(d_{окатыш} = 8,2 \text{ мм});$$

разность температур в калорифере между температурой греющего пара и температурой входящего воздуха ($t_6 = 135 \text{ °C}$);

разность температур в калорифере между температурой греющего пара и температурой выходящего воздуха ($t_m = 10 \text{ °C}$);

энтальпия воздуха калорифера

$$(i_1 = 165564 \text{ Дж/кг сухого воздуха});$$

энтальпия воздуха после калорифера

$$(i_0 = 35 \text{ кДж/кг});$$

плотность сухого воздуха

$$(p_b, 1,22 \text{ кг/м}^3 \text{ при } t_0 = 15 \text{ °C});$$

порозность кипящего слоя ($E = 0,55$);

объем неподвижного слоя ($V_c = 0,008 \text{ м}^3$);

высота неподвижного слоя ($H_0 = 0,13 \text{ м}$);

высота взвешенного слоя ($H = 0,24 \text{ м}$);

гидравлическое сопротивление слоя

$$(P_{сл} = 678,3 \text{ Па});$$

гидравлическое сопротивление решетки

$$(P_{реш} = 357 \text{ Па});$$

гидравлическое сопротивление аппарата

$$(P_{сл} = 1053,33 \text{ Па}).$$

На основании отработанных параметров процесса сушки гидролизата были определены параметры сушилки с псевдоожигенным слоем.

При рассмотрении влияния технологических параметров на степень сушки продуктов переработки семян горчицы (гидролизата) после извлечения из них эфирного горчичного масла на сушилках с неподвижным слоем, на туннельной, распылительной, барабанных, с псевдоожигенным слоем пришли к следующим выводам:

1. На сушилках с неподвижным слоем и в туннельной сушилке достичь требуемого результата сушки отходов горчично-маслобойного производства с содержанием влаги до 50 %

не представилось возможным, так как высушиваемая масса покрывалась зачастую подгоравшей коркой с влагой до 2 %. Содержание влаги внутри корки было 20÷25 %, общая влага высушиваемой массы составляла 16,5÷14,8 %. Рекомендовать такие сушилки в многотоннажное промышленное производство нецелесообразно поскольку высушенный продукт можно скормить в течение суток, так как при хранении он будет загнивать, и к скормлению будет не пригоден, что дало основание исследовать применение сушилок с подвижным слоем;

2. Гидролизат, содержащий 15÷18 % сухого вещества в распылительной сушилке, можно высушить за 0,5 минуты. Качество кормового продукта и возможность использования его в комбикормовой промышленности соответствует требованиям отрасли. Сушка пятнадцати процентной суспензии в распылительной сушилке энергоемка, что указывает на необходимость разработки технологии переработки отходов горчишно-маслобойного производства с меньшими энергетическими затратами.

3. Сушка гидролизата с применением барабанных вакуум сушилок приводит к образованию окатышей, подгоранию высушиваемого продукта, время сушки 120÷180 минут, потеря протеина до 18 %.

4. При сушке гидролизата с содержанием влаги 40 ÷ 50 % после извлечения из него эфирного горчичного масла в сушилке с псевдооживленным слоем время сушки составляет 5 минут.

5. В процессе выполнения исследований для данного типа сушилки были определены технологические параметры сушки, что явилось основанием для определения параметров сушилки с псевдооживленным слоем для сушки гидролизата в промышленных исследованиях на реальных средах не менее 1 т/сутки.

Корреляционный анализ полученной зависимости

В ходе выполнения экспериментального исследования были получены значения количества влаги материала ω от времени сушки τ . Для исследования было проведено основных опытов (m) = 10, число параллельных опытов (mp) = 3. Полученные данные представлены на рис. 6.

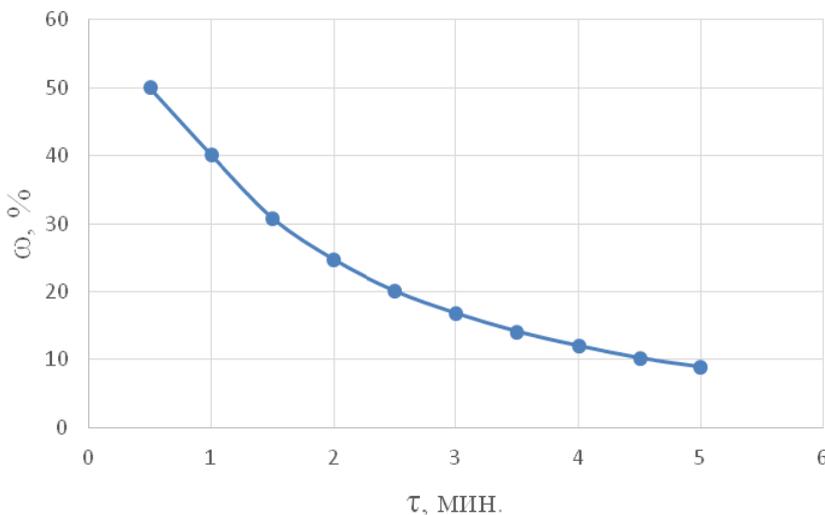


Рис. 6. График зависимости количества влаги ω от времени τ

Таблица 3

Ошибка в каждой точке в линеаризованном виде

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
su	0,02627	0,0146	0,01744	0,0352	0,0236	0,0165	0,0195	0,0073	0,0189	0,00423

Расчетное значение критерия Кохрена
 $Gr = 0,1606$.

Табличное значение критерия Кохрена
 $Gt = 0,445$.

$Gr \leq Gt$ ($0,1606 \leq 0,445$) – воспроизводимость удовлетворяет условию.

Ошибка опыта $SO_2 = 1,095770E-002$.

Сумма $sum = 3,520397E-002$.

Чтобы наилучшим образом подобрать коэффициенты k, n в реологическом уравнении (1) Оствальда-де-Вилля, это уравнение линеаризируется:

$$\omega = k \cdot \tau^n \tag{1}$$

$$\ln \omega = \ln k + n \cdot \ln \tau \tag{2}$$

$$y = a + bx. \tag{3}$$

Таблица 4

Полученные значения

x	y	y1	y2	y3	x	y	y1	y2	y3
-0,693	-0,566	-0,693	-0,47	-0,536	1,2527	-1,957	-1,958	-1,857	-2,055
0	-0,919	-0,913	-0,837	-1	1,3862	-2,094	-2,12	-2,024	-2,137
0,405	-1,183	-1,177	-1,093	-1,280	1,504	-2,279	-2,282	-2,18	-2,375
0,6931	-1,381	-1,398	-1,241	-1,505	1,6094	-2,344	-2,312	-2,322	-2,396
0,9162	-1,601	-1,604	-1,491	-1,709					
1,0986	-1,794	-1,783	-1,709	-1,890					

Таблица 5

Теоретический график, дискретный (усредненный) и отклонение

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
t^*	0,57	0,399	0,307	0,252	0,202	0,166	0,142	0,1233	0,11	0,096
tt	0,667	0,383	0,2771	0,2202	0,18426	0,15928	0,141	0,12658	0,12	0,1059
$del, \%$	16,95	-4,13	-9,72	-12,83	-8,929	-4,4271	-0,59	2,6325	12,22	10,323

* t – среднее значение количества влаги материала.

tt – теоретическое значение количества влаги материала.

del – не линеаризованная относительная ошибка, найденная МНК.

Таблица 6

Значения yt, y, S_{yy}

i	yt^*	y	S_{yy}
1	-0,40554	-0,566	0,02588
2	-0,95932	-0,919	0,02746
3	-1,28326	-1,183	0,03735
4	-1,5131	-1,381	0,05465
5	-1,69137	-1,601	0,06267
6	-1,83704	-1,794	0,06448
7	-1,96019	-1,957	0,06449
8	-2,06688	-2,094	0,06523
9	-2,16098	-2,279	0,07926
10	-2,24515	-2,344	0,08905

* yt – теоретические значения линеаризованной системы, найденные по МНК.

y – среднее значение от $\ln \omega (i)$ по отношению к числу параллельных опытов.

S_{yy} – сумма квадратов отклонений экспериментальных значений от расчетных.

Среднее значение x линеаризованной системы: $x_c = 0,81729$.

Среднее значение y линеаризованной системы: $y_c = -1,6122860$.

Сумма значений $x(i)$ линеаризованной системы: $S_{0x} = 4,8359160$.

Сумма значений $y(i)$ линеаризованной системы: $S_{0y} = 3,1758070$.

Сумма произведений $x(i) \cdot y(i)$ линеаризованной системы:

$$S_{yx} = -3,8635810.$$

Коэффициент корреляции: $r = -0,985879$.

Коэффициенты по МНК:

$$a = -0,798; \quad b = -0,9593;$$

$$k = 0,38315; \quad n = -0,79893.$$

Дисперсия адекватности МНК

$$S_{yy} = 0,089058; \quad S_{ad} = 0,022264.$$

Расчетное значение критерия Фишера:

$$Fr = 2,03187$$

Табличное значение критерия Фишера:

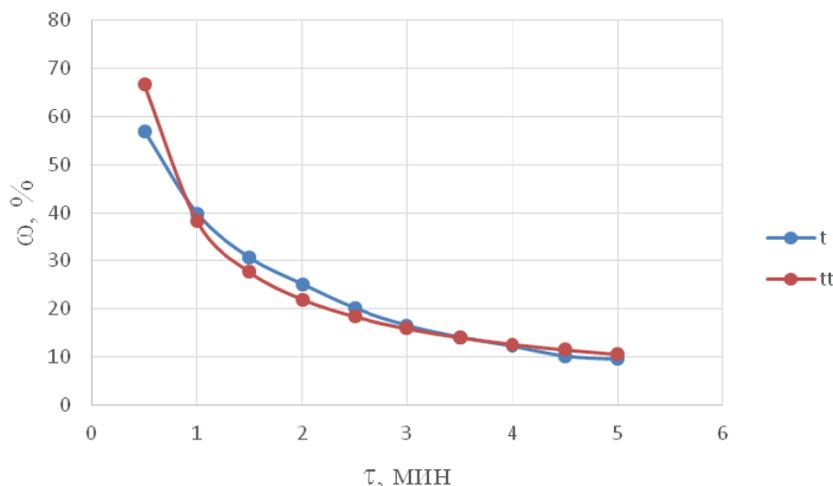
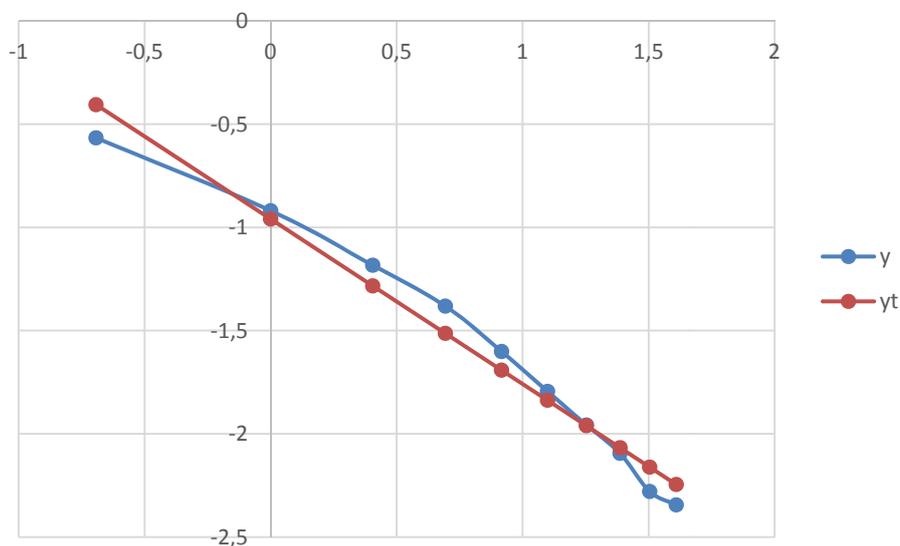
$$Ft = 3,44$$

Ошибка опыта: $SO_2 = 0,010957$ – среднее значение ошибки опыта

Расчетное значение критерия Стьюдента: $ta = 24,1352, tb = 28,98$.

Табличное значение критерия Стьюдента: $St = 2,07$.

ta и $tb > st$ – коэффициенты значимы.

Рис. 7. Теоретический и дискретный графики зависимости $\omega = f(\tau)$ Рис. 8. Графики зависимости $y = f(x)$, $yt = f(x)$

По результатам корреляционного анализа экспериментальной зависимости количества влаги материала ω от времени сушки τ (3 параллельных опыта по 10 измерений) можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент корреляции $r = -0,985879$, это значит, что зависимость $y = y(x)$ обратная и высокая.

2. Интегральная зависимость количества влаги высушиваемого материала от времени сушки может быть описана степенным уравнением $\omega = 0,38315\tau^{(-0,79893)}$.

3. Нелинеаризованная относительная ошибка по МНК:

максимальная: $\text{del}_{\max} = 16,95 \%$; средняя: $\text{del}_{\text{средн}} = 8,27512 \%$.

4. Критерий Кохрена, рассчитанный в линеаризованном виде $Gr^{\text{расч}} = 0,1606 \leq Gr^{\text{таб}} = 0,445$.

Это значит, что дисперсия опытов однородна и воспроизводимость хорошая;

5. Критерий Фишера, рассчитанный по МНК $Fp^{\text{расч}} = 2,03187 < Fp^{\text{таб}} = 3,44$ – модель адекватна;

6. Критерий Стьюдента, рассчитанный по МНК $ta = 24,1352$; $tb = 28,98 > St = 2,07$ – оба коэффициента значимы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гинзбург, А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов / А. С. Гинзбург. – М.: Колос, 1973. – 528 с.
2. Лыков, М. В. Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. – М.: Химия, 1970. – 432 с.
3. Муштаев, В. И. Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
4. Сажин, Б. С. Основы техники сушки / Б. С. Сажин. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
5. Филоненко, Г. К. Кинетика сушильного процесса / Г. К. Филоненко; Иван. энергет. ин-т им. В. И. Ленина. – М.-Л.: Оборониздат, 1939. – 140 с.

6. *Чернобыльский, И. И.* Сушильные установки химической промышленности / И. И. Чернобыльский. – Киев, 1969. – 280 с.

7. *Касаткин, А. Г.* Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. пос. для хим.-технол. спец. вузов. – 8-е изд. перераб – М.: Химия, 1971. – 784 с.

8. *Русакова, Г. Г.* Технологический процесс выделения эфирного горчичного масла из продуктов переработки семян горчицы / Г. Г. Русакова Т. В. Киселева, Е. Д. Парахневич, Д. В. Парахневич, // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – Волгоград: ИПК «Нива» ФГОУ «Волгоградская ГСХА» № 4. – 2012. – С.

9. *Русакова Г. Г.* Извлечение синигрина из продуктов переработки семян горчицы / Г. Г. Русакова М. М. Русакова, Я. В. Дергилев, Т. В. Киселева, В. Б. Котенко, Е. Д. Па-

рахневич, Д. В. Парахневич // Комбикорма. – 2012. – № 6. – С. 75–76.

10. *Русакова, М. М.* Технологический процесс получения кормовой добавки из побочных продуктов горчично-маслобойного производства / М. М. Русакова, Я. В. Дергилев, Г. Г. Русакова, Е. Д. Парахневич, Д. В. Парахневич, Т. В. Киселева // Пути интенсификации производства и переработки сельскохозяйственной продукции в современных условиях: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. ГНУ ПНИИ ПиП ММП РАСХН и ВолгГТУ. Волгоград 28–29 июня 2012 г. Ч. 2. Перераб. сельскохоз. сырья и пищевых пр-в. – Волгоград: ИУНЛ ВолгГТУ, 2012. – С. 63–68.

11. *Русакова, Г. Г.* Комплексная переработка семян горчицы: монография / Г. Г. Русакова, В. А. Хомутов, Д. В. Парахневич, М. М. Русакова. – Волгоград: ИПК «Нива» ФГОУ ВПО ВГСХА, 2009. – 193 с.

УДК 66.021.13

А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, А. Хилдаяти

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОФРИРОВАННОЙ НЕРЕГУЛЯРНОЙ НАСАДКИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: pahp@vstu.ru

Проведены экспериментальные исследования с использованием нерегулярной гофрированной насадки из полимера. Приведен сравнительный анализ гидродинамики аппарата при различных высотах насадки. Получены расчетные уравнения для определения гидравлического сопротивления сухой и орошаемой насадки.

Ключевые слова: гидродинамика, гофрированная насадка, гидравлическое сопротивление.

A. B. Golovanchikov, O. A. Zalipaeva, A. Hildayati

INVESTIGATION OF HADRODYNAMIC CHARACTERISTISTICS OF CORRUGATED IRREGULAR PACKING

Volgograd State Technical University

This paper describes an experimental work on hydrodynamic of corrugated packing from polymer. The experiment was focused on comparing hydraulic resistance with different height packing element. A calculated equation for determining hydraulic resistance of dry and irrigated packing is obtained.

Keywords: hydrodynamic, corrugated packing, hydraulic resistance.

В химической, пищевой, фармацевтической и других отраслях промышленности широко используются процессы массопереноса. Для проведения массообменных процессов обычно используются аппараты с контактными устройствами. Насадочные контактные устройства обладают большой пропускной способностью и более низким гидравлическим сопротивлением [1]. Недостаточные исследования проводятся с насадочными аппаратами малого диаметра при небольших скоростях жидкой фазы, где нецелесообразно применение тарельчатых контактных устройств.

Как известно, конструкция насадки для различных колонн должна обладать максимальной удельной поверхностью, химической стойко-

стью, низкой стоимостью и низким гидравлическим сопротивлением. В настоящее время представляет интерес исследование малокоордирующих насадок для колонн с малым поперечным сечением аппаратов, в которых не могут быть использованы существующие насадки (кольца Паля, кольца Рашига, седловидные насадки и т. п.) из-за своих габаритных размеров по отношению к диаметру аппарата [2]. Применение в малоразмерных аппаратах существующих насадок приводит к пристеночному эффекту.

Известны регулярные гофрированные металлические насадки для аппаратов небольшого диаметра [3]. Несмотря на низкое гидравлическое сопротивление, такие регулярные насадки

имеют большую чувствительность к начальному распределению жидкости и газа. Поэтому разработка высокоэффективных нерегулярных насадок для малоразмерных колонных аппаратов, имеющих повышенную удельную поверхность и позволяющих проводить массообменные процессы при небольших скоростях газовой фазы, является актуальной задачей [4]. Кроме того, применение таких насадок позволяют сократить высотные размеры аппарата и увеличить время пребывания контактирующих фаз. Перспективным материалом для насадок

может служить полимер, благодаря низкой стоимости и коррозионной стойкости.

В качестве насадки для малотоннажных производств и лабораторных установок предлагается кольцевая нерегулярная гофрированная насадка из полимерного материала. Для исследования было изготовлено три типа насадок, общий вид которых представлен на рис. 1. Геометрические размеры элемента насадки сведены в таблицу, причем боковая поверхность предлагаемой насадки выполнена в виде прямоугольных гофр.

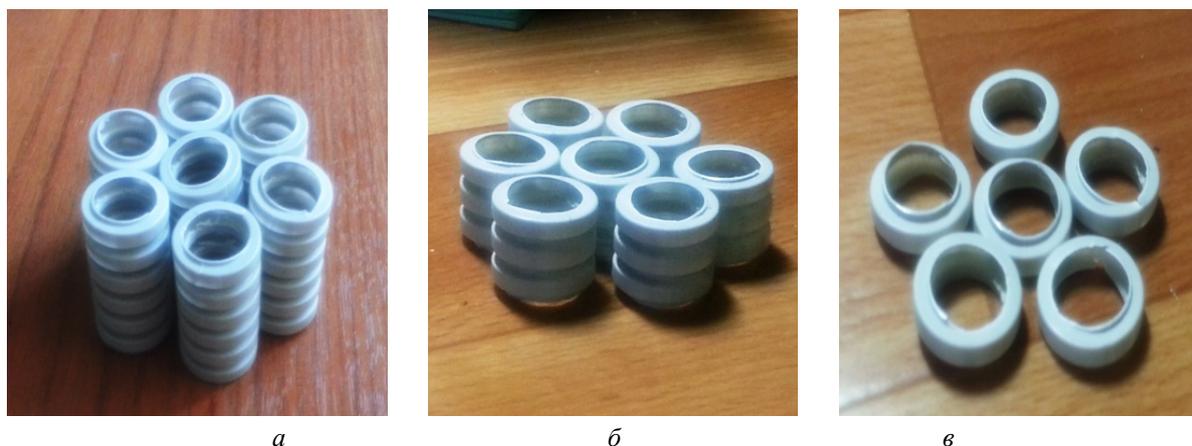


Рис. 1. Общий вид элемента насадки:
а – насадка 1 (H=21 мм); б – насадка 2 (H=12 мм); в – насадка 3 (H=3 мм)

Данная насадка обладает коррозионной стойкостью, малой плотностью и при повыше-

нии расхода газа имеется возможность проводить процесс в псевдооживленном слое насадки.

Характеристики гофрированных нерегулярных насадок

Параметры	Насадка1	Насадка2	Насадка3
Высота элемента насадки, мм	21	16	3
Диаметр наружного кольца насадки, мм	12	12	12
Диаметр внутреннего кольца насадки, мм	16	16	16
Удельная поверхность, a , m^2/m^3	175	208	239
Удельный свободный объем ϵ , m^3/m^3	0,95	0,926	0,917

Целью работы являлось экспериментальное исследование гидродинамического сопротивления предлагаемых элементов насадки. Экспериментальные исследования проводились при равномерном орошении в аппарате диаметром 0,06 м на установке, позволяющей исследовать гидродинамику насадочных устройств в условиях противоточного движения

воздушного-водяного потока. При этом высота насадочного слоя составляла 0,3 м.

Результаты исследований в виде графических зависимостей гидравлического сопротивления ΔP сухой и орошаемой гофрированной нерегулярной насадки от фиктивной скорости газа ω представлены на рис. 2.

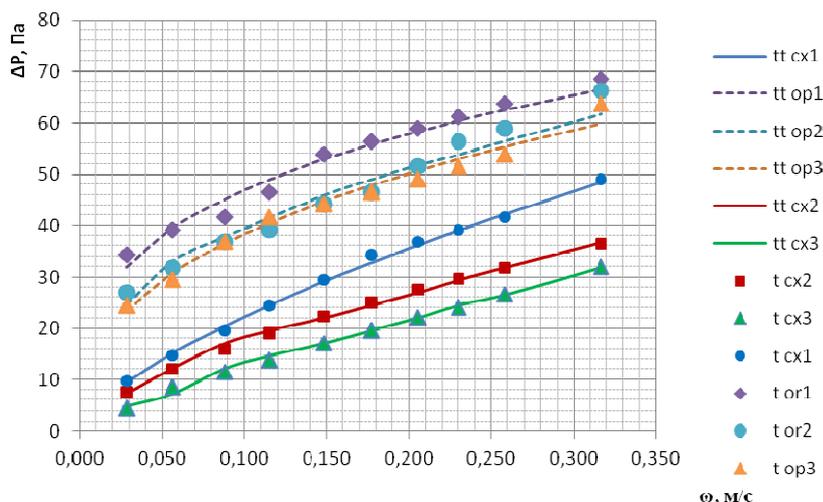


Рис. 2. Зависимости гидравлического сопротивления насадки от скорости газа при расходах жидкости $L = 0$ кг/с — ; $L = 0,011$ кг/с —

Как видно из графиков, гидравлическое сопротивление слоя насадки, имеющей максимальное отношение размера элемента насадки ее к диаметру, имеет более высокое значение по отношению к другим типам используемых насадок. Это обусловлено распределением насадки в аппарате преимущественно в горизонтальном положении, что создает дополнительное сопротивление газовому потоку. В то же время такая насадка из-за наличия прямоугольных гофр обладает максимальной удерживающей способностью, что способствует максимальному времени пребывания фаз в аппарате. Наименьшее гидравлическое сопротивление имеет насадка с минимальным отношением размера высоты элемента насадки к диаметру. Это обусловлено низкой массой насадки, хорошей пропускной способностью и возможностью осуществлением массообменного процесса в условиях псевдооживленного слоя. Благодаря интенсивному перемешиванию в псевдооживленном слое выравнивается поле температур и устраняется возможность появления локальных перегревов, но при этом снижается эффективность массопереноса.

Проведен корреляционный анализ экспериментальных зависимостей гидравлических сопротивлений насадок второго типа от фиктивной скорости газа. Обобщенное уравнение неорошаемой насадки получено в виде $\Delta P = 94,76\omega^{0,373}$.

В орошаемой насадке имеется некоторое количество жидкости вследствие смачиваемости насадки, что ведет к уменьшению свободного объема и к повышению гидравлического

сопротивления орошаемой насадки по сравнению со значением гидравлического сопротивления сухой насадки:

$$\Delta P = 76,25\omega^{0,643}$$

Относительные отклонения значений гидравлических сопротивлений нерегулярной гофрированной насадки, рассчитанных по полученным выражениям, не превышают 10 %.

Таким образом, применение гофрированной насадки с подбором значения отношения ее высоты к диаметру позволяет создавать устойчивый процесс массопереноса в газожидкостном слое. Наличие гофр и возможность проводить процесс при малых значениях скоростей газа способствует увеличению времени пребывания контактирующих фаз в аппарате. Небольшие размеры элементов насадки и их высокая коррозионная стойкость могут быть использованы в малотоннажных производствах и установках лабораторного типа.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рамм, В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М. : Химия, 1976. – 656 с.
2. Лантев, А. С. Контактные насадки промышленных теплообменников аппаратов / А. М. Каган, А. С. Лаптев, А. С. Пушнов, М. И. Фарахов. – Казань: Отечество, 2013. – 454 с.
3. Бурмистров, Д. А. Гидродинамические характеристики новой регулярной гофрированной насадки / Д. А. Бурмистров, М. М. Фарахов, М. И. Фарахов, А. В. Клинов // Вестник Казанского технологического университета : сб. науч. ст. № 7. – Казань, 2010. – С. 310–314.
4. Степин, Б. Д. Методы получения особо чистых веществ / Б. Д. Степин, И. Г. Горштейн, Г. З. Блюм, Г. М. Курдюмов, И. П. Оглоблина. – Л. : Химия, 1969. – 480 с.

УДК 628.004.8

*Г. Г. Русакова, М. М. Русакова, Д. В. Парахневич, Е. Д. Парахневич,
Л. В. Мазина, Д. В. Лучковский, Е. В. Губицкая*

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СТАДИЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ
БИОЛОГИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ
ИЗ ОТХОДОВ ПЕРЕРАБОТКИ СЕМЯН ГОРЧИЦЫ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: pahp@vstu.ru

Рассмотрены технологические аспекты извлечения биологически активных веществ из отходов переработки семян горчицы.

Предлагается технологическая стадия извлечения биологически активного вещества – эфирного горчичного масла – из отходов переработки семян горчицы. Особое внимание уделено конструктивному оформлению блока эфирного горчичного масла из отходов переработки семян горчицы.

Ключевые слова: отходы переработки семян горчицы, эфирное горчичное масло, отпарка.

*G. G. Rusakova, M. M. Rusakova, D. V. Parakhnevich, E. D. Parakhnevich,
L. V. Masina, D. V. Luchkovskij, E. V. Gubitskaya*

**TECHNOLOGICAL STAGE OF EXTRACTION OF BIOLOGICALLY
ACTIVE SUBSTANCES FROM WASTES OF MUSTARD SEEDS**

Volgograd State Technical University

Discusses the technological aspects of extraction of biologically active substances from waste pererabotchikam mustard.

Proposed technological stage of extraction of biologically active substances – essential of mustard seed oil, waste mustard seeds. Special attention is paid to the constructive design of the unit is essential mustard oil from wastes of mustard seeds.

Keywords: waste processing seeds of mustard, essential oil of mustard, oparka.

В своем составе семена горчицы и продукты их переработки содержат сложную многокомпонентную смесь химических соединений разного класса: свободные жирные кислоты, триглицериды, белки, углеводы, фосфолипиды, альдегиды, кетоны, ферменты, витамины, тиогликозиды, эфирное масло и ряд других соединений. В них содержится значительное количество биологически активных соединений: витаминов, токоферолов, стероидов, фосфатидов, микро- и макроэлементов, минеральных солей, что указывает на возможность использования их в качестве пищевой добавки для обогащения продуктов веществами, которые обладают высокой биологической активностью [1–3]. Содержащиеся в семенах горчицы гликозиды (синигрин) и фитонциды (эфирное горчичное масло) принято считать антипитательными веществами [3–5]. Наличие антипитательных веществ в семенах горчицы требует их специальной подготовки для последующего использования в пищевой и сельскохозяйственной отраслях народного хозяйства [3–9].

Традиционно из семян горчицы прессованием получают пищевое масло и жмых с последующей переработкой его в порошок [10].

При выработке из семян горчицы пищевого масла и горчичного порошка образуются следующие побочные продукты: жмых, высевки и шелуха, которые отнесены к отходам производства.

Принятая схема переработки семян горчицы не предусматривает выделение из них биологически активного вещества – эфирного горчичного масла с широким спектром действия [11].

Одним из необходимых параметров технологического процесса является время извлечения эфирного горчичного масла из суспензии.

В связи с тем, что в промышленных условиях аппаратное оформление технологической схемы подготовки суспензии к сушке (фильтрация, центрифугирование) и тип сушилки могут быть разными (распылительная, тоннельная, в кипящем слое и др.) [12], необходимо было определить время извлечения эфирного горчичного масла из суспензии с различным содержанием в ней сухого вещества.

Результаты исследований приведены на рис. 1, в соответствии с ним уменьшение содержания сухого вещества в суспензии сокращает время отпаривания из нее эфирного горчичного масла.

В промышленности используется технологический процесс гидролиза синигрина при смачивании отходов водой не более чем на 30 %, это

связано с тем, что при увеличении значения содержания влаги в суспензии значительно повышаются расходы на последующую сушку.

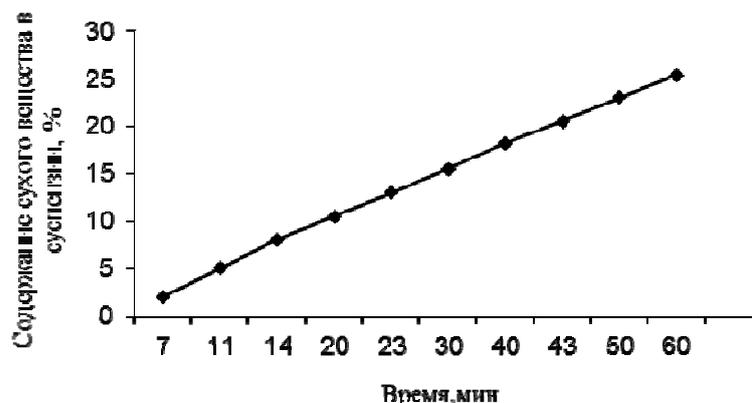


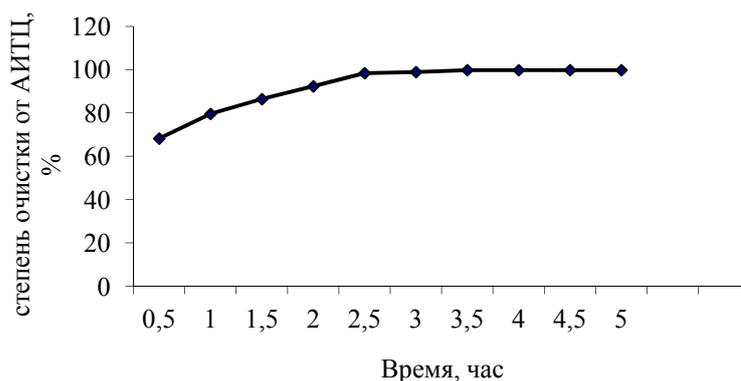
Рис. 1. Время извлечения эфирного горчичного масла из суспензии с различным содержанием сухого вещества

Для определения времени извлечения эфирного горчичного масла из такой суспензии к отходам переработки семян горчицы добавляли тридцать процентов теплой воды, выдерживали суспензию при 40 °С в течение 15 минут и отпаривали эфирное горчичное масло острым паром при постоянном перемешивании реакционной массы в реакторе с мешалкой. Результаты приведены на рис. 2.

В соответствии с рис. 2, время отпаривания эфирного горчичного масла из продуктов переработки семян горчицы, смоченных 30 % воды, составляет 2,5 ÷ 3,0 часа.

На основании результатов лабораторных

исследований, и для подтверждения их при выполнении опытных работ на реальных средах, с последующим созданием промышленной установки с использованием пароструйного транспортера рекомендованы следующие параметры технологического процесса отпаривания эфирного горчичного масла из побочных продуктов горчично-маслобойного производства после гидролиза синигрина: время отпаривания эфирного горчичного масла не более 40 минут; температура суспензии при отпаривании эфирного горчичного масла не должна превышать 95 °С во избежание денатурации белка (мирозиназы).



зии

Поскольку суспензия из продуктов переработки семян горчицы, смоченных 30 % воды, нетекучая, то для обеспечения выполнения данных параметров была разработана конструкция пароструйного транспортера, приведенного на рисунке, представляющего собой ин-

жектор, в сопло которого под давлением подается пар (рис. 3).

Пароструйный транспортер предназначен для перемещения продуктов переработки семян горчицы и одновременного начального отпаривания эфирного горчичного масла.

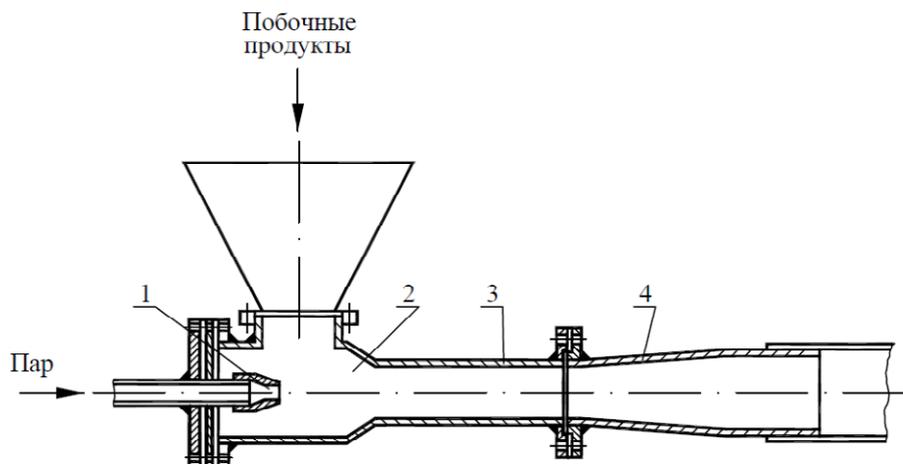


Рис. 3. Пароструйный транспортер:
1 – паровое сопло; 2 – смесительная камера; 3 – горло диффузора; 4 – диффузор

Рабочая среда в пароструйном транспортере включает: водяной насыщенный пар, влажный гидролизат после гидролиза синигрина в продуктах переработки семян горчицы, пары эфирного горчичного масла и поэтому является химически агрессивной, требующей материал для изготовления пароструйного транспортера из нержавеющей стали.

В аппарате давление пара в смеси с окатышами побочных продуктов горчично-маслобойного производства в трубопроводе после диффузора транспортера должно быть достаточным, чтобы преодолеть гидравлическое сопротивление трубопровода для транспортировки продуктов переработки семян горчицы.

Для преодоления гидравлического сопротивления трубопровода на основе ситового анализа был определен эквивалентный диаметр фракций транспортируемого продукта.

Результаты ситового анализа представлены в таблице.

Результаты ситового анализа

Фракции, мм	10,0 ÷ 8,0	7,0 ÷ 5,0	4,0 ÷ 2,0	1,9 ÷ 1,0
Содержание, %	30	25	30	15

Среднеситовые диаметры фракций:

$$d_1 = 10 + 8 / 2 = 9 \text{ мм};$$

$$d_2 = 7 + 5 / 2 = 6 \text{ мм};$$

$$d_3 = 4 + 2 / 2 = 3 \text{ мм};$$

$$d_4 = 1,9 + 1,0 / 2 = 1,5 \text{ мм}.$$

Эквивалентный диаметр фракций транспортируемого продукта $d_{\text{экр}} = 4 \text{ мм}$.

На основании полученных значений определили скорость витания $\omega_{\text{внт}} = 15,2 \text{ м/с}$ [12].

Поскольку пароструйный транспортер представляет собой инжектор, в сопло которого под давлением подается пар, он смешивается с продуктами переработки семян горчицы и происходит частичная отпарка эфирного горчичного масла, результаты которой приведены на рис. 4.

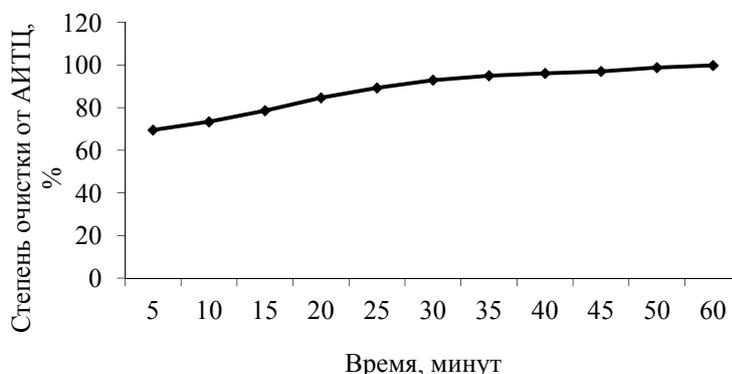


Рис. 4. Результаты проверки эффективности отпаривания эфирного горчичного масла из гидролизата с применением пароструйного транспортера

Как видно из приведенного графика, достаточная надежность обезвреживания гидролизата достигается после $50 \div 60$ минут обработки, что не сокращает продолжительность процесса по сравнению с отпариванием в реакторе с мешалкой. Таким образом, пароструйный транспортер не может являться основным оборудованием для проведения процесса отпарки эфирного горчичного масла.

Затем смесь паров и сырья по трубопроводу через подогреватель и испаритель подается в дегазатор. В подогревателе продукты переработки семян горчицы разогреваются до температуры $90 \div 95$ °С, эфирное горчичное масло при этом из продуктов переработки семян горчицы переходит в пар. В дегазаторе пар отделяется от продуктов переработки семян горчицы и через штуцер в крышке аппарата по трубопроводу поступает в конденсатор для конден-

сации эфирного горчичного масла. Контроль температуры в дегазаторе осуществляется с помощью термометра. Освобожденные от эфирного горчичного масла продукты переработки семян горчицы из конуса днища дегазатора с помощью шнекового дозатора подаются на сушку. С целью предотвращения смешивания и зависания продуктов переработки семян горчицы, в дегазаторе увлажненные продукты переработки семян горчицы постоянно перемешиваются многоярусной мешалкой. Дегазатор герметично уплотнен. Результаты отпарки эфирного горчичного масла в дегазаторе приведены на рис. 5.

В соответствии с рис. 5, время отпарки в дегазаторе эфирного горчичного масла (аллилизотиоцианата) из отходов, смоченных 30 % воды, сокращается до $30 \div 40$ минут по сравнению с отпариванием в реакторе с мешалкой.

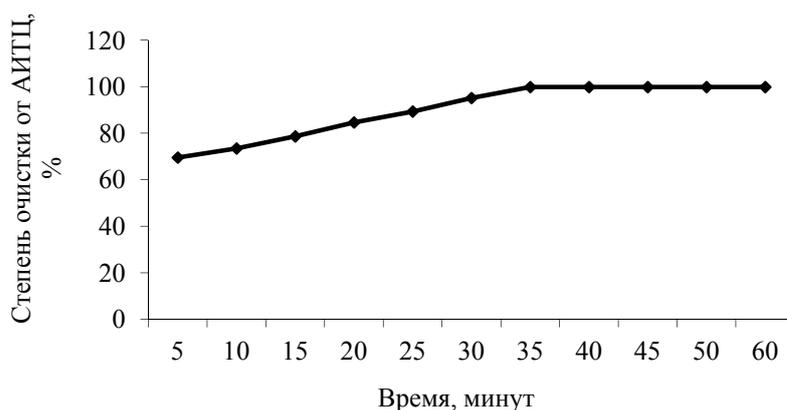


Рис. 5. Результаты отпаривания эфирного горчичного масла в дегазаторе

При выполнении указанных исследований были определены ниже перечисленные технологические параметры пароструйного транспортера эквивалентный диаметр окатышей продуктов переработки семян горчицы ($d_{\text{экв}} = 4$ мм); расход пара на транспортировку продуктов переработки семян горчицы ($Qn = 4,8 \cdot 10^{-3}$ м³/с); массовый расход пара на транспортировку продуктов переработки семян горчицы ($Gn_m = 2,86 \cdot 10^{-3}$ кг/с (10,3 кг/час)); массовый расход пара на нагрев продуктов переработки семян горчицы до $t_{\text{отп}} = 95$ °С ($t_{\text{отп}} = 95$ °С: $Gn_n = 1,2$ кг/час); массовый расход пара на нагрев и транспортировку продуктов переработки семян горчицы ($Gn_{\text{отп}} = 11,5$ кг/час); массовая доля продуктов переработки семян горчицы в смеси с паром ($x_{\text{жвл}} = 0,83$); плотность влажных продуктов переработки семян горчицы ($1/\rho_{\text{жвл}} = 1124$ кг/м³); плотность смеси (пар + продукты переработки семян горчицы) ($1/\rho_{\text{см}} = 3,5$ кг/м³); объем влаж-

ных продуктов переработки семян горчицы ($V_{\text{жвл}} = 49,4 \cdot 10^{-3}$ м³); объемная доля продуктов переработки семян горчицы в смеси с паром ($\varphi_{\text{ж}} = 2,9 \cdot 10^{-3}$); вязкость смеси ($\mu_{\text{с}} = 0,013 \times 10^{-3}$ Пас); напор, необходимый для подъема смеси на заданную высоту ($P_{\text{под}} = 189$ Па); напор на создание скорости движения смеси ($P_{\text{ск}} = 404$ Па); напор на преодоление сопротивления трубопровода ($d_{\text{экв}} / e = 100$, $Re = 82 \cdot 103$; $P_{\text{тр}} = 6625$ Па); напор на преодоление местных сопротивлений ($P_{\text{м.с.}} = 1293$ Па); гидравлическое сопротивление трубопровода ($P_{\text{с}} = 8511$ Па); критическую скорость пара в сопле инжектора ($d^* = 450$ м/с).

Изучение процесса извлечения эфирного горчичного масла из гидролизата проводили на установке, представленной на рис. 6.

Отпаривание эфирного горчичного масла из гидролизата осуществлялось острым паром при атмосферном давлении. Принимая во внимание,

что температура водяного насыщенного пара при атмосферном давлении составляет $99,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура кипения воды $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, а температура кипения эфирного масла $149 \div 151\text{ }^{\circ}\text{C}$, то процесс отпаривания переходит в фазу медленного испарения жидкостей.

Учитывая, что концентрации испаряемых компонентов в паровой фазе пропорциональны концентрациям этих компонентов в жидкой фазе, поэтому концентрация паров эфирного масла в газовой фазе будет незначительна. Испаряется в основном вода.

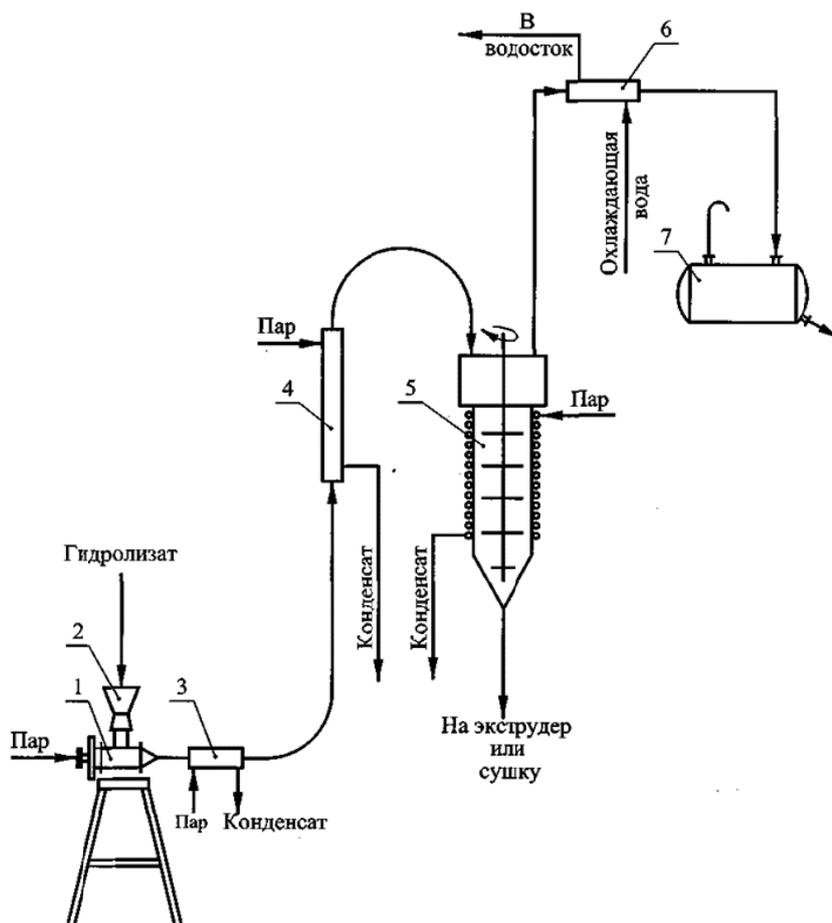


Рис. 6. Установка для перегонки эфирного горчичного масла из гидролизата:
1 – пароструйный транспортер; 2 – приемная воронка; 3 – подогреватель; 4 – испаритель;
5 – перегонный аппарат; 6 – холодильник; 7 – приемник

Парциальное давление паров эфирного горчичного масла в пузырьках острого пара незначительно, в силу чего молекулы эфирного масла из насыщенного водного раствора, а также из капель эфирного горчичного масла, переходят в пар. Вспененный гидролизат поступает в расширитель, где пена разрушается.

Гидролизат, смешанный с паром через подогреватель и испаритель, по трубопроводу подается в дегазатор. В подогревателе побочные продукты горчично-маслобойного производства разогреваются до температуры $90 \div 95\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Время извлечения эфирного горчичного масла – $25 \div 45$ минут. Выделившаяся из пены парогазовая смесь по трубопроводу направляется на конденсацию.

Гидролизат, не содержащий эфирного горчичного масла, с помощью шнекового дозатора через фильеру подается на сушику.

При отсутствии запаха, присущего столовой горчице, пробу суспензии отбирали на анализ для определения остаточного содержания эфирного горчичного масла по ГОСТ 13979.7-78. Полученные данные лабораторных исследований при двухфакторном эксперименте были подтверждены при проведении опытов в производственных условиях, при которых установлено, что отпаривание эфирного горчичного масла паром из гидролизата с физической влагой не менее 30 % проходит в течение 40 минут при температуре $90 \div 95\text{ }^{\circ}\text{C}$. При несоблюдении данных параметров, будет проходить денатурация

белка, увеличение кислотного числа кормового продукта с образованием целого ряда других химических соединений [13, 14]. Перегонка эфирного горчичного масла из гидролизата осуществляется острым паром при атмосферном давлении. Так как температура водяного насыщенного пара при атмосферном давлении составляет 99,1 °С, температура кипения воды 100 °С, а температура кипения эфирного масла 149 ÷ 151 °С, то процесс перегонки переходит в фазу медленного испарения жидкостей.

Концентрация паров эфирного масла в газовой фазе будет незначительна, так как концентрации испаряемых компонентов в паровой фазе пропорциональны концентрациям этих компонентов в жидкой фазе, поэтому испаряться будет вода.

Установка для перегонки эфирного горчичного масла из гидролизата работает следующим образом. После завершения гидролиза синигрина отходы горчично-маслобойного производства (гидролизат), содержащие эфирное горчичное масло, из конусного днища гидролизера [15] подаются в приемную воронку 2 пароструйного транспортера 1, который представляет собой инжектор, в сопло которого подается острый пар, выполняющий роль транспортного агента и теплоносителя.

Гидролизат, смешанный с острым паром, поступая в подогреватель 3, подогревается в нем до температуры 75 ÷ 80 °С, а затем в испарителе 4 подогревается до 90 ÷ 95 °С. Парциальное давление паров эфирного горчичного масла в пузырьках острого пара незначительно, в силу чего молекулы эфирного масла из насыщенного водного раствора, а также из капель эфирного горчичного масла, переходят в пар. Гидролизат поступает в расширитель перегонного аппарата 5, в котором за счет механического переме-

шивания гидролизата, дополнительного его подогрева и испарения эфирного горчичного масла обеспечивается интенсивный его унос в холодильник 6, из которого после конденсации эфирное масло поступает в приемник 7.

Время перегонки эфирного горчичного масла составляет 25 ÷ 45 минут.

При отсутствии запаха, присущего столовой горчице, пробу гидролизата отбирают на анализ для определения остаточного содержания эфирного горчичного масла по ГОСТ 13979.7–78. Степень извлечения эфирного горчичного масла из гидролизата на заявляемой установке составляет 98,8...99,9 %, что значительно выше, чем в прототипе, в котором степень извлечения эфирных масел составляет 80,6 ÷ 92,9 %.

Увеличение степени извлечения эфирного масла обеспечивается дополнительной установкой последовательно соединенных пароструйного транспортера, подогревателя и испарителя, соединенного трубопроводом с перегонным аппаратом.

Данная установка также позволяет осуществлять перегонку эфирного горчичного масла острым паром при атмосферном давлении.

Подтверждена эффективность последовательной установки в технологической схеме пароструйного транспортера и дегазатора.

Результаты обработки отобранных проб отражены на рис. 7, в соответствии с которыми, обезвреживание гидролизата происходит через 15 минут.

Определение параметров лабораторных исследований и опытных работ на реальных средах выполняли на приборах, прошедших метрологическую оценку, пробы и показатели анализировались не менее трех параллелей и принимались при статистической достоверности $P < 0,05$.

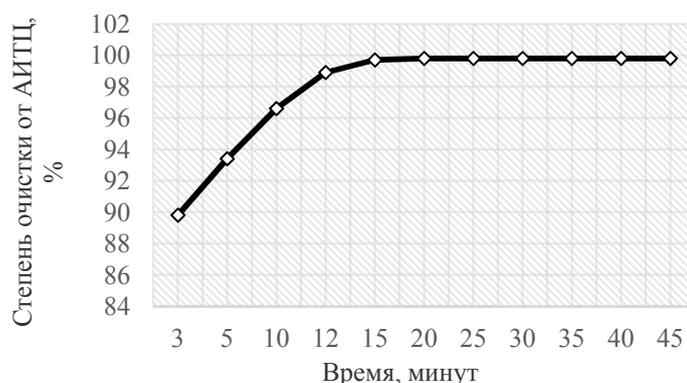


Рис. 7. Результаты проверки эффективности отпаривания эфирного масла из суспензии с применением пароструйного транспортера и дегазатора предложенной конструкции

Для промышленного внедрения предлагаемой технологии дегазации гидролизата от эфирного горчичного масла, необходимо определить технологические и конструктивные параметры дегазатора. Технические характеристики дегазатора (рис. 8) определены в результате проведенных испытаний с активным поиском оптимальных параметров с применением метода регрессивного анализа [16–18].

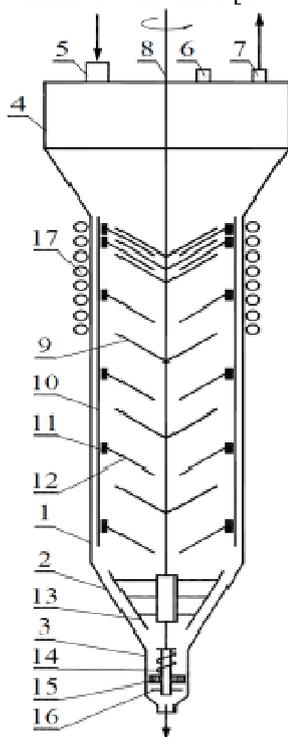


Рис. 8. Эскиз дегазатора:

1 – корпус; 2 – коническое днище; 3 – штуцер выхода готового продукта; 4 – верхнее днище; 5 – штуцер входа основного компонента; 6 – штуцер для подачи технической воды; 7 – штуцер для выхода эфирного масла; 8 – консольный вал; 9 – лопастные мешалки; 10 – вертикальные планки; 11 – винтовые пружины; 12 – стальные ножи; 13 – якорная мешалка; 14 – шнековый дозатор; 15 – фильера; 16 – стальной нож; 17 – змеевикова рубашка

Используя активный эксперимент, были заданы и поддерживались на определенных уровнях значения факторов, влияющих на остаточное содержание эфирного горчичного масла в гидролизате. После обработки результатов эксперимента получено уравнение регрессии в канонической форме [19]:

$$Y_y - 0,110 = 0,182 X_1^2 - 0,232 X_2^2 - 0,134 X_3^2 - 0,081 X_4^2$$

рекомендованы следующие значения факторов: x_1 – частота вращения вала 49,3 мин⁻¹; x_2 – расход пара на транспортировку и подогрев 11,4 кг/с; x_3 – количество лопастей на 1-м уровне 4; x_4 – количество лопастей на втором уровне 8. При этом остаточное содержание эфирного горчичного масла составит 0,12 % [20].

не 8. При этом остаточное содержание эфирного горчичного масла составит 0,12 % [20].

По результатам проведенных исследований для переработки одной тонны сырья в сутки, дегазатор должен иметь параметры:

1. Объем цилиндрической части (загрузка)

$$V_{цз} = 2,9 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

2. Высота цилиндрической части (загрузка)

$$H_{цз} = 0,15 \text{ м}.$$

3. Высота конической части (загрузка)

$$H_{кз} = 0,2 \text{ м}.$$

4. Общий объем зоны дегазации

$$V_{д} = 8,03 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

5. Объем конической части $V_{кд} = 0,93 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3$.

6. Объем цилиндрической части

$$V_{цд} = 7,1 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3.$$

7. Высота цилиндрической части $H_{цд} = 1,0 \text{ м}$.

8. Общая высота дегазатора $H_{д} = 1,625 \text{ м}$.

9. Шаг винта шнекового дозатора $S = 0,03 \text{ м}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Щербаков, В. Г. Химия и биохимия переработки масличных семян / В. Г. Щербаков. – М.: Пищевая промышленность, 1977. – 317 с.
- Щербаков, В. Г. Биохимия и товароведение масличного сырья / В. Г. Щербаков. – М.: Агропромиздат, 1991. – 250 с.
- Демченко, П. П. Обзор по биохимическим и физиологическим свойствам семян горчицы / П. П. Демченко [и др.]. // Отчет о НИР. – Л.: ВНИИЖ, 1992. – С. 2–29.
- Дублянская, Н. Ф. Химический состав современных сортов сарептской горчицы / Н. Ф. Дублянская. – М.: Минжирпром, 1959. – 78 с.
- Харченко, Л. Н. Изучение эфирного горчичного масла семян крестоцветных / Л. Н. Харченко // МЖП. – № 3. – 1964. – С. 14–17.
- Русакова, Г. Г. Сарептская горчица – ценное сырье для различных отраслей народного хозяйства / Г. Г. Русакова, В. А. Хомутов. – Волгоград: Офсет, 1998. – 45 с.
- Русакова, Г. Г. Семена горчицы и продукты их переработки – ценный корм для сельскохозяйственных животных и птицы / Г. Г. Русакова. – Волгоград: ИКЦ ООО «Фирма Л.Б.Ф.», 1998. – 92 с.
- Русакова, Г. Г. Технологические процессы утилизации токсичных отходов горчично-маслобойного производства: монография // Г. Г. Русакова, В. А. Хомутов, В. М. Рыжков, Е. А. Свириденко, В. А. Сороколетов, С. Н. Муромцев, Л. В. Хорошевская, А. М. Лагутин, А. Е. Мерлин, М. М. Русакова. – Волгоград: ВолгГТУ Политехник. – 2008. – 178 с.
- Русакова, Г. Г. Производство пищевой столовой горчицы / Г. Г. Русакова [и др.]; под ред. Г. Г. Русаковой. – Волгоград: Политехник, 2004. – 143 с.
- Руководство по технологии получения и переработки растительных масел и жиров. Т. 1, кн. 1. – Л., ВНИИЖ, 1975. – С. 568–584.
- Русакова, Г. Г. Использование эфирного горчичного масла в различных отраслях сельского хозяйства /

Г. Г. Русакова, Е. Д. Парахневич, Д. В. Парахневич, М. М. Русакова // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и профессиональное образование. – 2014. – № 4 (36). – С. 173–175.

12. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. пос. для хим.-технол. спец. вузов / А. Г. Касаткин. – 8-е изд. перераб. – М.: Химия, 1971. – 784 с.

13. Зелепуха, С. И. Антимикробные свойства растений употребляемых в пищу / С. И. Зелепуха. – Киев: Наукова Думка. – 1973. – С. 90–92.

14. Чичибабин, А. Е. Основные начала органической химии: учеб. для вузов / А. Е. Чичибабин. – М.: Химия, 1954. – Т. 1. – 797 с.

15. Русакова, Г. Г. Комплексная переработка семян горчицы: монография / Г. Г. Русакова, В. А. Хомутов, Д. В. Парахневич, М. М. Русакова. – Волгоград: ИПК «Нива» ФГОУ ВПО ВГСХА, 2009. – 193 с.

16. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической промышленности / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1978. – 319 с.

17. Дегтярев, Ю. П. Регрессионный анализ на ПЭВМ / Ю. П. Дегтярев, А. И. Филатов // Труды Волгоградского СХИ. – 1992. – С. 128–131.

18. Мельников, С. В. Планирование эксперимента в исследованиях сельско-хозяйственных процессов / С. В. Мельников, В. Р. Алешкин, П. М. Рощин. – М.: Колос, 1972. – 200 с.

19. Русакова, Г. Г. Оптимизация режимов извлечения эфирного масла из отходов переработки семян горчицы / Г. Г. Русакова, Е. Д. Парахневич, Д. В. Парахневич, С. В. Тронева // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и профессиональное образование. – 2014. – № 3 (35). – С. 149–154.

20. Русакова, Г. Г. Технологический процесс выделения эфирного горчичного масла из продуктов переработки семян горчицы / Г. Г. Русакова, Т. В. Киселева, Е. Д. Парахневич, Д. В. Парахневич, // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. – Волгоград: ИПК «Нива» ФГОУ «Волгоградская ГСХА» № 4 (28). – 2012. – С. 164–169.

УДК 621.86.067:620.22-492

Н. А. Прохоренко¹, А. Б. Голованчиков¹, А. В. Прохоренко²

РЕКОНСТРУКЦИЯ ОТДЕЛЕНИЯ РАССЕВА ПУЛЬВЕРИЗАТА АЛЮМИНИЯ

¹Волгоградский государственный технический университет

²ООО «ВАЛКОМ-ПМ»

e-mail: pahp@vstu.ru

Проведена реконструкция отделения фракционирования пульверизата алюминия, в которой производится замена загрузочного бункера на более перспективный. Решены вопросы экологичности и транспортировки сыпучего материала.

Ключевые слова: бункерные устройства, алюминий, сыпучие материалы, отделение фракционирования, загрузочный участок, пульверизат алюминия, рассев порошкообразных материалов, дозатор.

N. A. Prohorenko¹, A. B. Golovanchikov¹, A. V. Prohorenko²

RECONSTRUCTION OF THE BRANCH OF THE SCREENING OF PULVERIZATE ALUMINUM

¹Volgograd State Technical University

²ООО «VALCOM-PM»

The reconstruction of the separation of fractionation of pulverizate aluminum, which is replaced, the hopper the more promising ones. Resolved the issues of sustainability and transport of the bulk material.

Keywords: bunker device, aluminium, bulk materials, the separation of fractionation, loading area, pulverized aluminum sieving of powder materials, dispenser.

В настоящее время используют большое количество методов производства металлических порошков, что позволяет варьировать их свойства с целью повышения качества и экономических показателей [1].

Рассмотрим технологическую схему существующего процесса получения алюминиевых порошков в Волгоградском алюминиевом заводе порошковой металлургии (ВАЛКОМ-ПМ) (рис. 1).

Процесс получения пульверизата включает операции:

- плавления металла в печи;
- распыление расплава сжатым воздухом или азотом;
- осаждение пульверизата по аппаратам технологической цепи.

Твердый алюминий расплавляется в плавильной камере печи 1 и через канал в стене печи перетекает в выносной карман. Уровень металла в печи должен быть ниже на 50 мм от верхней кромки кармана печи. Для распыления металла используется эжекционная форсунка 10 с сужающимся соплом для истечения металла.

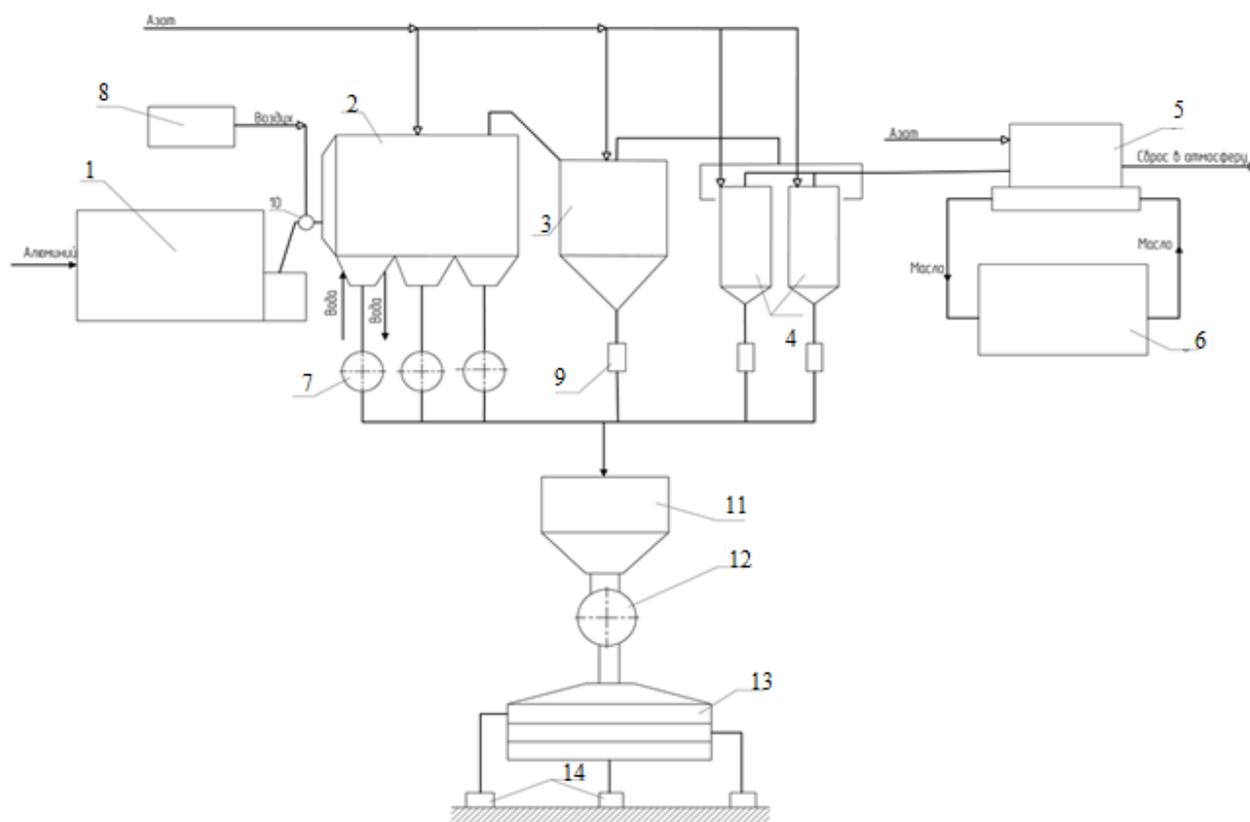


Рис. 1. Технологическая схема получения алюминиевого порошка:

1 – электрическая печь; 2 – пылесадительная камера; 3 – циклон; 4 – батарейный циклон; 5 – масляный фильтр; 6 – бак отстойник; 7 – кубель; 8 – блок осушки; 9 – загрузочная емкость; 10 – форсунка; 11 – загрузочный бункер; 12 – ячейковый питатель; 13 – вибрационное сито; 14 – тара

Интенсивность подвода тепла в пылесадитель 2 и температура в нем в значительной степени определяют производительностью процесса распыления. При повышении температуры в пылесадителе процесс охлаждения и затвердевания частиц замедляется, возникает опасность слипания частиц и затрудняется выгрузка pulverизата. Температура в пылесадителе не должна превышать $160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплосъем с оборудования и pulverизата производится водоохлаждением кессонов первой секции пылесадителя. Вода в кессон подается по трубопроводу с вентилями.

Получаемый pulverизат осаждается в бункерах герметичного прямоугольного пылесадителя длиной 14,1 м. Полученный pulverизат через мягкие рукава с переходами выгружается в кубель 7, которые транспортируются электропогрузчиком на участок рассева. Заполненный pulverизатом кубель транспортируют электропогрузчиком к погрузочной площадке тельфера, которым поднимают его на загрузочную галерею. Перед загрузкой кубель 7 с pulverизатом герметично соединяют с загрузочным бункером 11 и открывают вентиль аспирационной линии сброса газа, вытесняемого по-

рошком при загрузке. Загруженный из кубеля в бункер pulverизат ячейковым питателем 12 по материалопроводу подается в вибросито 13.

Для рассева pulverизата в вибросито устанавливают сетки с размерами ячейки, соответствующими марке получаемого продукта, при этом могут быть установлены две, три или четыре сетки для параллельного получения двух и более продуктов различной дисперсности. Гранулометрический состав продуктов и качество рассева регулируется производительностью подачи порошка в вибросито и вибрационными параметрами настройки вибросита (амплитуда и частота колебаний). При работе вибросита необходимо следить за равномерностью подачи исходного и разгрузки просеянного продукта и целостностью сеток, которая определяется периодическим анализом продуктов рассева на контрольном сите. Для обеспечения безопасности процесса рассев ведут в атмосфере азотнокислородной смеси с содержанием кислорода не более 8 % при избыточном давлении в вибросите 20–50 мм вод. ст. Подача азотнокислородной смеси в вибросита производится от азотопровода [2].

В данной технологической схеме производилась модернизация и реконструкция схемы рассева алюминиевого порошка, с помощью усовершенствования работы бункерного устройства, улучшения экологии и условий труда.

При затаривании, пересыпании и других операциях с алюминиевым порошком возникает опасность воспламенения и взрыва, связанная с пылением порошков и образованием взрывоопасных аэрозолей [1].

Технологическое оснащение реконструированной линии в отличие от действующей на производстве предусматривает:

- систему подачи материала (порошка) в аппараты через рукав (шланг);
- обеспечение бесперебойной работы бункера за счет исключения сводообразования и зависания материала в результате установки в бункере упругого рабочего органа в виде герметичной камеры из эластичного материала.

Анализ схем технологических операций с сыпучими грузами в транспортно-складских комплексах показывает, что бункеры являются неотъемлемым элементом складской системы. Это справедливо для любых форм поставок, как в тарированном виде, так и в бестарном.

Качественная и бесперебойная работа транспортно-складских комплексов на загрузке подвижного состава и внутрискладских транспортировках груза зависит от отлаженности технологического процесса производства и в том числе от стабильного истечения грузов из емкости хранения.

Процесс истечения сыпучих грузов из бункеров нарушается, в первую очередь, вследствие возникновения явлений сводообразования. Особенно сильно этому явлению подвержены сыпучие материалы. Сыпучий груз имеет способность сохранять равновесие в пределах, обусловленных силами внутреннего трения. При открытии затвора сыпучий груз лишается части опоры столба насыпи, при этом нарушается равновесие частиц груза в емкости. Частицы груза, примыкающие к выгрузному отверстию, получают перемещение, что обуславливает истечение сыпучего груза. В свою очередь частицы вышележащих слоев, потеряв опору, движутся к месту выгрузки, что сопровождается колебанием давления в потоке груза. Нарушение равновесия слоев происходит последовательно от нижних к верхним, тем самым обеспечивая непрерывное движение потока к выпускному отверстию емкости. Далее про-

исходит изменение давления по высоте емкости, геометрической формы и физико-механических свойств сыпучего груза, что в итоге приводит к сводообразованию, а зачастую и к сегрегации частиц сыпучего материала.

Таким образом, в процессе функционирования емкости с нормальным истечением при выпуске выгружается сначала вновь загруженный материал, а затем оставшийся. Это приводит к образованию застойных зон, где содержимое емкости остается длительное время. Поэтому для переработки слеживающихся и сыпучих материалов было сконструировано специальное вибрационное устройство, позволяющее интенсифицировать работу за счет обеспечения непрерывной подачи перерабатываемого материала из загрузочного бункера в канал питателя.

Разработанное вибрационное устройство имеет малую металлоемкость, а удельные энергозатраты практически не зависят от производительности. Конструкция вибрационного устройства проста и надежна, отличается небольшими габаритами и отсутствием вращающихся частей [3].

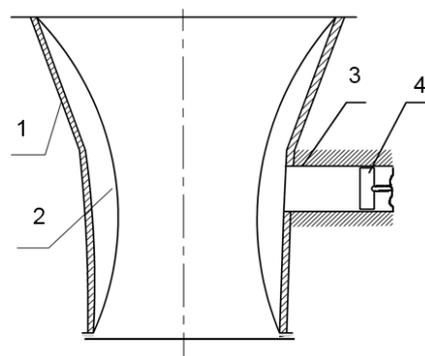


Рис. 2. Предлагаемая конструкция вибрационного устройства:
1 — загрузочный бункер; 2 — герметичная камера;
3 — цилиндр; 4 — поршень

На рис. 2 схематично изображен общий вид предлагаемой конструкции вибрационного устройства для выпуска слеживающихся материалов. Вибрационное устройство работает следующим образом. Из бункера в загрузочный участок подают сыпучий материал, а через поршень 4 по цилиндру 3 между стенками загрузочного участка 1 и герметичной камерой 2 воздух. Так как поршень периодически подает, то удаляет воздух из камеры, то его давление между стенками загрузочного участка и герметичной камерой изменяется, что изменяет объем и саму форму поверхности эластич-

ного материала герметичной камеры. Такой вибрационный режим приводит к уменьшению адгезии материалов к поверхности эластичного материала, ликвидации застойных зон и сводообразования и, как следствие, к повышению производительности бункера загрузки и всей установки в целом.

Общий вид реконструированной схемы представлен на рис. 3.

Воздух в пространство между герметичной камерой и бункером будет подаваться с помощью ресивера 8 компрессором 7. Чтобы технологическая линия не простаивала в зоне подачи

материала к питателю, спроектированный по геометрическим размерам бункер рассчитан с запасом материала (технологическая линия рассчитана на 1 тонну, бункер спроектирован на 1,6 тонн).

В данной схеме решены вопросы экологичности, путем соединения между собой аппаратов герметичными шлангами, выполненными из резины. Также решены вопросы транспортировки пульверизата к загрузочному бункеру на третий этаж, с помощью установки L-образного конвейера сплошного волочения (с погружными скрепками).

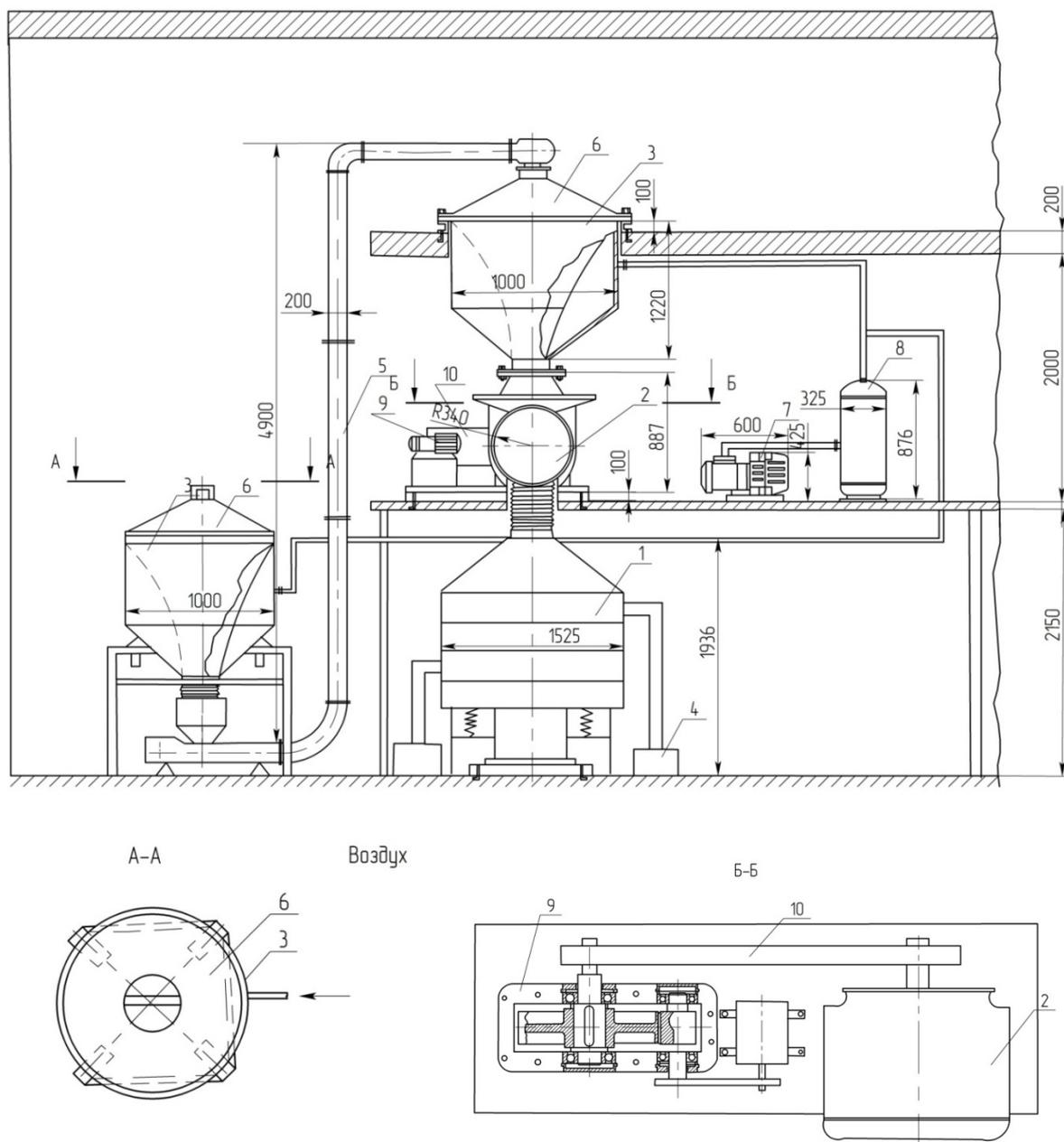


Рис. 3. Реконструированная схема рассева порошка:
1 – вибрационное сито; 2 – ячейковый питатель; 3 – загрузочный бункер; 4 – тара; 5 – конвейер сплошного волочения; 6 – крышка; 7 – компрессор; 8 – ресивер; 9 – редуктор; 10 – мотор

Подвезенный электропогрузчиком герметичный бункер 6 на стойках, ставится над загрузочным отверстием конвейера 5 и соединяется герметичным рукавом. Пульверизат попадает из бункера с герметичной камерой в конвейер и транспортируется на третий этаж к бункеру, после этого в ячейковый питатель 2 и вибросито 1. Алюминиевый порошок в виде готовой продукции сыпается в тару 4 с помощью герметичного шланга.

Таким образом, использование этих устройств уменьшит трудозатраты, обеспечит защиту от пыления и взрывобезопасность порошка при его транспортировке, а также бесперебойную работу оборудования [4].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованчиков, А. Б. Перспективные конструкции устройств для разрушения сводов сыпучего материала

в загрузочных бункерах / А. Б. Голованчиков, А. А. Шагарова, Н. А. Прохоренко, Л. Е. Тарасенко // ПРЭТ-2014, г. Иваново, 23–26 сентября 2014 г.

2. Голованчиков, А. Б. Экспериментальные исследования работы зоны загрузки шнековых машин в процессе вибрации / А. Б. Голованчиков, А. А. Шагарова, А. П. Шапочников, Н. А. Прохоренко, М. К. Доан, В. Н. Карев // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (154) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»). – С. 107–110.

3. П. м. 153117 РФ, МПК В65G27/10. Вибрационное устройство для выпуска связных, липких и слеживающихся материалов / Голованчиков А. Б., Шагарова А. А., Прохоренко Н. А.; ВолгГТУ. – 2015.

4. Прохоренко, Н. А. Реконструкция отделения фракционирования пульверизата алюминия / Н. А. Прохоренко, А. А. Шагарова, А. Б. Голованчиков // VIII Региональная научно-практическая студенческая конференция «Россия – творческую молодежь», г. Камышин, 22–23 апреля 2015 г. / ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2015.

УДК 66:02 (075)

А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, А. А. Коберник

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗНАЧЕНИЯ КОНСТАНТЫ ГЕНРИ ДЛЯ ПРОЦЕССА АБСОРБЦИИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: pahp@vstu.ru

Описывается экспериментальная методика нахождения равновесной зависимости процесса абсорбции. Приводится порядок нахождения коэффициента Генри с использованием метода наименьших квадратов.

Ключевые слова: абсорбция, равновесная зависимость, метод наименьших квадратов, константа Генри.

A. B. Golovanchikov, O. A. Zalipaeva, A. A. Kobernik

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE VALUE OF HENRY CONSTANTS FOR THE PROCESS OF ABSORPTION

Volgograd State Technical University

An experimental method for determining the equilibrium dependence of the absorption process is described. The order of finding the Henry coefficient using the method of least squares is given.

Keywords: absorption, equilibrium dependence, least squares, Henry's constant.

Абсорбция широко применяется в химической, пищевой и смежных отраслях промышленности. На практике абсорбция чаще всего применяется для разделения смесей, состоящих из веществ, имеющих различную способность к поглощению подходящими абсорбентами. При этом целевыми продуктами могут быть как абсорбированные, так и не абсорбированные компоненты смесей [1]. В процессе абсорбции контактируют газовая и жидкая фазы, имеющие различные физические и химические параметры, обу-

словленные исходными и целевыми продуктами. Для технологических расчетов абсорбционных аппаратов используются равновесные зависимости и значения константы Генри, приведенные в справочной литературе для некоторых контактируемых фаз [2]. Справочные значения константы Генри не всегда с достаточной точностью описывают рассматриваемый процесс, так как не учитывают всех действующих возмущающих воздействий. Для некоторых контактируемых фаз равновесные зависимости не определены.

Целью работы является описание экспериментальной методики определения равновесной зависимости и значения константы Генри процесса абсорбции на примере поглощения паров CO_2 из воздуха водным раствором моноэтаноламина. Данная методика применима для различных контактируемых фаз с учетом всех параметров рассматриваемого процесса.

Для определения экспериментальной равновесной зависимости процесса абсорбции используют методику, связывающую равновесную концентрацию уловленной массы CO_2 в абсорбенте – растворе моноэтаноламина в воде x^* с рабочей концентрацией диоксида углерода в воздухе y [3, 4]

$$x^* = x^*(y). \quad (1)$$

Ниже представлена методика проведения эксперимента для поглощения диоксида углерода из воздуха водным раствором моноэтаноламина [5]. При заданной постоянной температуре $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$; давлении $P = 1,033 \text{ атм}$, постоянном расходе воздуха $q_V = 0,2 \text{ м}^3/\text{час}$, подаваемого в абсорбер, и постоянной начальной концентрации CO_2 в воздухе $\bar{y}_H = 5,3 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кгА}}{\text{кг(А+В)}}$, снижают показания концентрации CO_2 в воздухе на выходе из абсорбера через 1 минуту и заносят эти результаты в табл. 1.

Таблица 1

Исходные и справочные данные и результаты расчета

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина	
1	2	3	4	5	
1	Масса водного раствора моноэтаноламина в абсорбционной колонне	кг	W	1	
2	Расход воздуха, подаваемого в абсорбционную колонну	$\text{м}^3/\text{час}$	q_V	2	
3	Концентрация CO_2 начальная в воздухе	$\frac{\text{кгА}}{\text{кг(А+В)}}$	\bar{y}_H	0,053	
4	Давление в колонне	атм	P	1,033	
5	Температура воздуха, подаваемого в колонну	$^\circ\text{C}$	t	20	
6	Плотность воздуха, подаваемого в колонну	$\text{кг}/\text{м}^3$	ρ	1,2	
7	Начальное время проскока паров CO_2 на выходе из колонны в очищаемом воздухе	с	τ_H	15	
8	Интервал времени фиксации концентрации CO_2 в очищаемом воздухе на выходе из колонны	с	$\Delta\tau$	60	
9	Концентрация CO_2 в очищаемом воздухе на выходе из колонны в фиксированные моменты времени	$\text{с}, \frac{\text{кгА}}{\text{кг(А+В)}}$	τ, \bar{y}	$\tau, \text{с}$	$\bar{y}, \frac{\text{кгА}}{\text{кг(А+В)}}$
15				0	
60				0,012	
120				0,025	
180				0,036	
240				0,044	
300				0,048	
360	0,053				
10	Масштаб 1см^2 площади на рис. 2	$\frac{\text{кгА}}{\text{кг(А+В)}} \cdot \text{с}$	ΔS_m	0,3	
11	Площадь над кинетической кривой графика $\bar{y} = \bar{y}(\tau)$	–	S	26	
12	Масса поглощенного CO_2 раствором абсорбента, рассчитанная по формуле (16)	кгА	Δm	$5,2 \cdot 10^{-3}$	
13	Равновесная концентрация в абсорбенте в относительных массовых концентрациях, рассчитанная по формуле (17)	$\frac{\text{кгА}}{\text{кгВ}}$	\bar{X}_H^*	$5,2 \cdot 10^{-3}$	

Окончание табл. 1

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4	5
14	Равновесная концентрация в абсорбенте в абсолютных мольных концентрациях, рассчитанная по формуле (14)	$\frac{\text{кгА}}{\text{кг(W+A)}}$	x_H^*	$2,22 \cdot 10^{-3}$
15	Начальная концентрация CO_2 в воздухе, рассчитанная по формуле (13)	$\frac{\text{кгА}}{\text{кг(B+A)}}$	y_H	$3,7 \cdot 10^{-2}$
16	Коэффициент распределения	$\frac{\text{кмоль(A+W)}}{\text{кмоль(B+A)}}$	m	18,7
17	Константа Генри	мм. рт. ст.	E	14200

Строят график этой зависимости (рис. 1). Опыты проводят до тех пор, пока концентрация CO_2 на выходе не станет равной концентрации на входе \bar{y}_H .

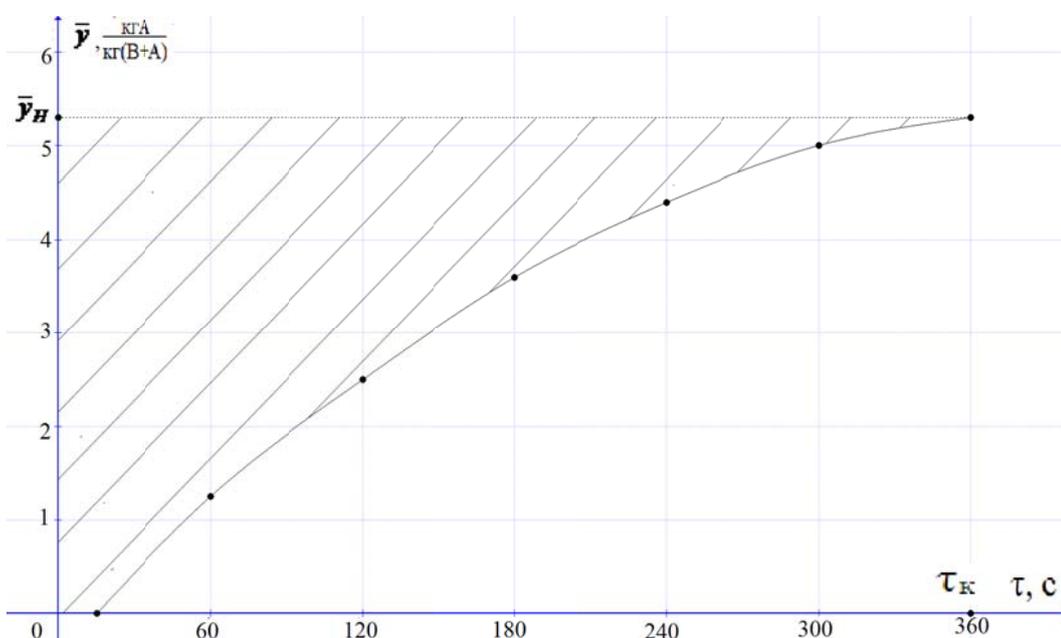


Рис. 1. Кинетическая кривая зависимости концентрации диоксида углерода в воздухе от времени на выходе из абсорбера (заштрихованная площадь пропорциональна массе уловленных паров диоксида углерода)

Массу поглощенных паров диоксида углерода за время τ_k рассчитывают по формуле:

$$\Delta m = \rho_r q_v \int_0^{\tau_k} (\bar{y}_H - \bar{y}) d\tau, \quad (2)$$

где ρ_r – плотность воздуха при рабочей температуре.

Находится полученная заштрихованная площадь криволинейной трапеции (рис. 1)

$$\int_0^{\tau_k} (\bar{y}_H - \bar{y}) d\tau = \Delta S_m \cdot S.$$

Тогда $\Delta S_m \cdot S = 0,3 \cdot 26 = 7,2$,

а $\Delta m = 1,2 (2/3600) \cdot 7,2 = 5,2 \cdot 10^{-3}$ кгА.

Относительная массовая концентрация \bar{x}_H^*

в растворе соответствующая начальной концентрации CO_2 в воздухе $\bar{y}_H = 5,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кгА}}{\text{кг(B+A)}}$

определяется по формуле

$$\bar{x}_H^* = \frac{\Delta m}{W}, \quad (3)$$

где W – масса водного раствора моноэтаноламина, кг.

$$\text{Тогда } \bar{x}_H^* = \frac{5,2 \cdot 10^{-3}}{1} = 5,2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кгА}}{\text{кгW}}.$$

Переводим относительную массовую концентрацию CO_2 в растворе по формуле (14) в абсолютную мольную концентрацию CO_2 в растворе, то есть

$$x_H^* = \frac{5,2 \cdot 10^{-3} / 44}{5,2 \cdot 10^{-3} / 44 + 1/18} = 2,22 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кмольА}}{\text{кмоль(W + A)}}$$

Переводим абсолютную массовую концентрацию CO₂ в воздухе по формуле (13) в абсолютную мольную концентрацию

$$y_H = \frac{5,3 \cdot 10^{-2} / 44}{5,3 \cdot 10^{-2} / 44 + (1 - 5,3 \cdot 10^{-3}) / 29} = 3,7 \cdot 10^{-2} \frac{\text{кмольА}}{\text{кмоль(B + A)}}$$

Исходя из закона Генри, определяем коэффициент распределения

$$m = \frac{3,7 \cdot 10^{-2}}{2,22 \cdot 10^{-3}} = 18,7..$$

Тогда константа Генри для данного раствора моноэтаноламина в воде при $t = 20$ °С и давлении 760 мм. рт. ст. равна

$$E = m \cdot p = 14200 \text{ мм. рт. ст.}$$

Для увеличения точности расчетов константы Генри E и коэффициента распределения m необходимо провести серию опытов (например 5) при разных значениях начальной концентрации CO₂ в воздухе, при одинаковых температурах t , давлениях p и одинаковой концентрации моноэтаноламина в воде, и затем методом наименьших квадратов (МНК) определить среднее значение коэффициента распределения m_c .

Формула для расчета этого коэффициента по МНК для закона Генри имеет вид:

$$U = \sum_{i=1}^n (y_i - m_i x_i)^2 \} \min.$$

Приравнявая производную $dU/dt = 0$, получаем

$$2 \sum_{i=1}^n [(y_i - m_i x_i) x_i] = 0,$$

или после алгебраических преобразований

$$\sum_{i=1}^n (y_i x_i) - m_c \sum_{i=1}^n (x_i^2) = 0.$$

Тогда среднее значение коэффициента m_c определяется по формуле

$$m_c = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i x_i)}{\sum_{i=1}^n (x_i^2)} \tag{4}$$

Для расчетов m_c по уравнению (4) формируем табл. 2.

Таблица 2

Исходные данные и расчетные параметры для определения среднего значения m_c МНК

№	Наименование параметра	Обозначение	Величина для каждого опыта					Сумма
			1	2	3	4	5	
1	Номер опыта	i	1	2	3	4	5	–
2	Значения аргумента	$x_{ni} \cdot 10^3$	2,22	0,92	1,53	3,46	2,91	–
3	Значения функции	$y_{ni} \cdot 10^2$	$3,7 \cdot 10^{-2}$	$1,13 \cdot 10^{-2}$	$2,56 \cdot 10^{-2}$	$4,85 \cdot 10^{-2}$	4,1	–
4	Значения квадратов аргумента	$x_{ni}^2 \cdot 10^6$	4,92	0,847	2,36	12	8,47	28,59
5	Значения произведения функции по аргументу	$y_{ni} \cdot x_{ni} \cdot 10^5$	8,21	1,04	3,91	16,8	11,93	41,89

Среднее значение коэффициента распределения m_c рассчитывается по формуле (4):

$$m_c = 41,89 / 28,59 = 14,65 \frac{\text{кмоль(A + W)}}{\text{кмоль(B + A)}}$$

Тогда среднее значение константы Генри:

$$E_c = 760 \cdot 14,65 = 11130 \text{ мм. рт. ст.}$$

На рис. 2 представлен график равновесной зависимости концентрации CO₂ в воздухе от концентрации CO₂ в водном растворе моноэтаноламина.



Рис. 3. Зависимость равновесной концентрации CO_2 в воздухе от концентрации CO_2 в водном растворе моноэтаноламина (1) (• – экспериментальные точки для пяти опытов)

Приведенная методика позволяет экспериментально определять равновесную зависимость и значения константы Генри для различных контактируемых фаз процесса абсорбции. Равновесные зависимости и значения константы Генри, полученные экспериментальным путем, могут быть использованы при технологических расчетах абсорбционных колонн различной конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рамм, В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.
2. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учеб. пособие для студ. вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Нос

ков; под ред. П. Г. Романкова. 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2013. – 576 с.

3. Голованчиков, А. Б. Экспериментальное определение равновесия паров этанола в воздухе и в адсорбенте / А. Б. Голованчиков, А. А. Коберник, О. А. Залипаева, А. В. Кузнецов // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 1 (154) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 8). – С. 85–89.

4. Голованчиков, А. Б. Методика расчета равновесия в процессах сорбции. Методика расчета равновесия в процессах сорбции / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, С. В. Каширин, А. Хилдайти // Смотр-конкурс научных работ студентов. V Международная конференция-школа по химической технологии ХТ'16 (г. Волгоград, 16–20 мая 2016 г.): тез. докл.; Программа развития деятельности студенческих объединений.

5. Перри, Д. Справочник инженера-химика / Д. Перри. Перевод с англ. под ред. акад. Н. М. Жаворонкова и чл.-корр. АН СССР П. Г. Романкова. – Л.: Химия, 1968. – 504 с.

УДК 66.048.3.069.833

А. Б. Голованчиков, М. В. Топилин, Н. А. Меренцов, Т. Г. Евдошенко
НАСАДКА ДЛЯ ТЕПЛО- И МАССООБМЕННЫХ ПРОЦЕССОВ
Волгоградский государственный технический университет
 e-mail: pahp@vstu.ru

Предложена новая конструкция насадки с повышенной поверхностью для интенсификации тепло и массообменных процессов. Проведено экспериментальное исследование разработанной насадки, корреляционный анализ полученных результатов.

Ключевые слова: насадка, кольца Рашига, тепломассообмен, поверхность контакта фаз.

А. В. Golovanchikov, M. V. Topilin, N. A. Merencov, T. N. Evdoshenko
PACK FOR HEAT AND MASS-EXCHANGE PROCESSES
Volgograd State Technical University

Suggested new pack construction with raised surface for intensification of heat and mass transfer processes. For new pack construction experiment research and correlation analysis of result were conduct.

Keywords: pack, Raschig rings, heat and mass exchange, contact surface of phases.

Основной проблемой большинства известных насадок тепло- и массообменных аппаратов является недостаточно развитая поверхность контакта фаз, а также неподвижность этой поверхности в процессе работы аппаратов, что приводит к образованию застойных зон, снижению скорости протекания процессов тепло- и массопереноса и, как следствие, снижению производительности в целом [1–2].

Целью предлагаемой конструкции является

увеличение производительности за счет увеличения поверхности контакта фаз при дополнительном использовании свободных объемов между внешними смежными боковыми поверхностями наружных колец насадки и интенсивности тепло- и массообменных процессов между фазами.

Это достигается тем, что насадка (рис. 1) состоит из наружного и внутреннего колец Рашига 1, 2. Дополнительного тела вращения 3 и пружины 4.

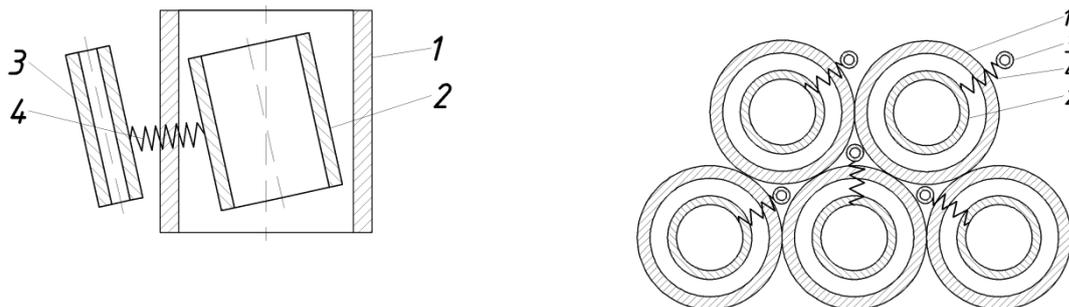


Рис. 1. Схема предлагаемой насадки:

1 – наружное кольцо Рашига; 2 – внутреннее кольцо Рашига; 3 – дополнительное тело вращения; 4 – пружина

Насадка установлена упорядоченно в ряды. В этом случае торцы внутреннего кольца Рашига 2 и трубки 3 свободно висят на пружине 4 и могут свободно колебаться внутри и снаружи наружного кольца Рашига 1. Насадка для тепло- и массообменных процессов работает следующим образом.

Элементы насадки устанавливаются упорядоченно в ряды внутри колонны. Сверху насадку орошают жидкостью, а снизу подают газ (пар). Под действием потока газа (пара) каждое внут-

реннее кольцо Рашига 2 и дополнительное тело вращения 3 совершают колебания, которые передаются стекающей по их поверхности пленке жидкости, тем самым увеличивая скорость ее течения, по насадке и поверхность раздела фаз [3].

Экспериментально исследовано гидравлическое сопротивление разработанной насадки и насадок сравнения (кольца Рашига, Палля) в сухом (пунктирная линия) и орошаемом (сплошная линия) видах (рис. 2).

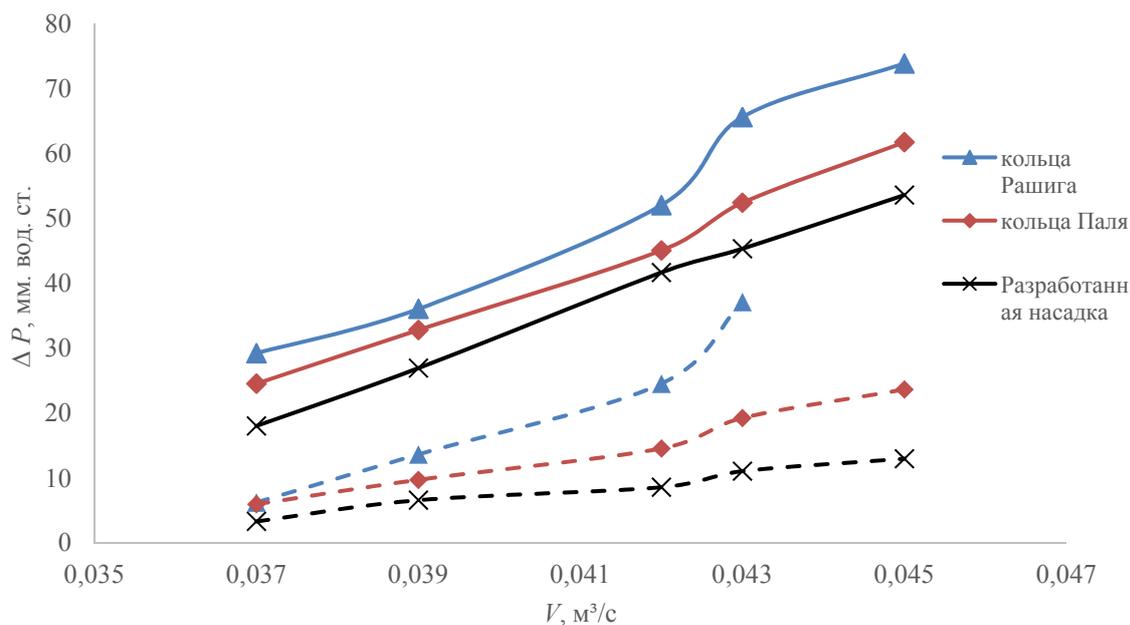


Рис. 2. График гидравлического сопротивления для сухих (пунктирная линия) и орошаемых (сплошная линия) насадок

Из рис. 2 следует, что разработанная насадка для тепло- и массообменных процессов имеет низкое гидравлическое сопротивление в сравнении с кольцами Рашига и Палля.

При технологическом оформлении процесса ректификации важную роль играет удерживающая способность насадки, которая характеризуется количеством жидкости, находящейся

на поверхности насадки в виде пленки, а также в различных пустотах и местах соприкосновения элементов насадки.

Для данной разработанной насадки и насадок сравнения была проведена серия опытов по определению удерживающей способности, результаты представлены на рис. 3.

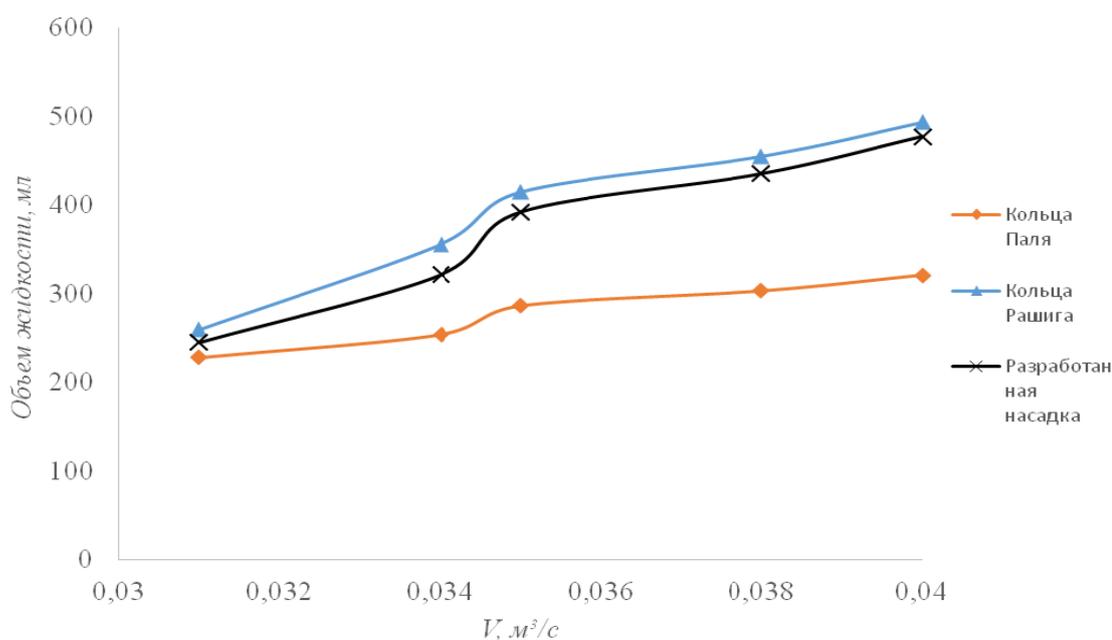


Рис. 3. Удерживающая способность насадок

Как видно из результатов эксперимента, удерживающая способность разработанной насадки выше, чем у колец Палля, но ниже колец Рашига. Такие результаты частично объясняются тем, что материалом колец Рашига является керамика, в то время как материалом насадки был ПВХ, который в отличие от керамики имеет существенно меньшую шероховатость

поверхности, что не позволяет пленки жидкости «цепляться» за поверхность.

Для проверки полученных экспериментальных данных на воспроизводимость результатов и их адекватность был проведен корреляционный анализ. Результаты представлены на рис. 4 и табл. 1, 2 [4–5].

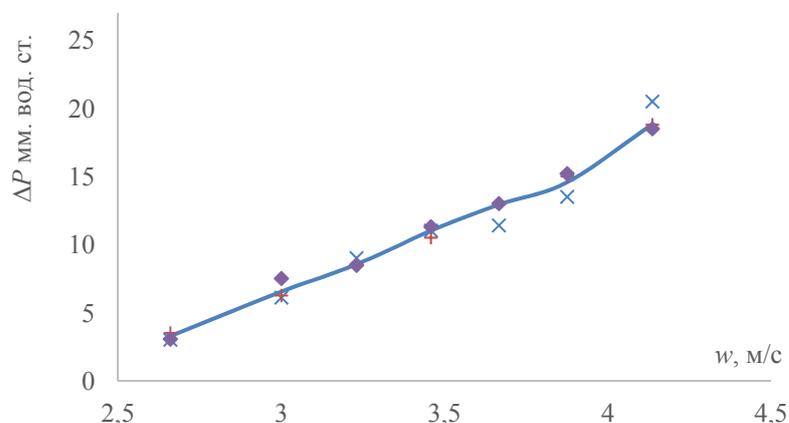


Рис. 4. Отклонение экспериментальных данных от средних значений параллельных опытов

Таблица 1

Ошибка в каждой точке в линеаризованном виде

Наименование насадки	№ точки						
	1	2	3	4	5	6	7
Сухая	0,020	0,011	0,0024	0,001	0,0068	0,0032	0,0031
Орошаемая	0,0048	0,012	0,00067	0,0014	0,0029	–	–
Удерживающая способность	0,00098	0,0011	0,00007	0,00006	0,00019	–	–

Таблица 2

Значения критериев Кохрена и Фишера, коэффициентов корреляции, МНК для экспериментальных данных

Критерий Кохрена		Критерий Фишера		Коэффициент корреляции	Коэффициенты МНК	
табличный	расчетный	табличный	расчетный		А	В
Сухая насадка						
0,4307	0,4275	2,56	1,13	0,998	2,30	0,961
Орошаемая насадка						
0,5440	0,5439	2,71	2,52	0,993	4,17	0,676
Удерживающая способность						
0,5440	0,461	2,71	0,538	0,999	5,91	0,379

Выводы

Разработанная насадка для тепло- и массообменных процессов имеет меньшее гидравлическое сопротивление, в сравнении с кольцами Рашига и Палля. Удерживающая способность разработанной насадки выше чем у колец Палля, но несколько ниже колец Рашига. Проведенный корреляционный анализ показал высокую воспроизводимость и адекватность экспериментальных исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ахметов, С. А. Технология и оборудование процессов переработки нефти и газа: учебное пособие / С. А. Ах-

метов, Т. Б. Сериков, И. Р. Кузеев, М. И. Баязитов. – СПб.: Недра, 2006. – 868 с.

2. Ратовский, Ю. Ю. Опыт эксплуатации насадочных колонн / Ю. Ю. Ратовский, Ю.Н. Лебедев // Химия и технология топлив и масел. – 2006. – № 5. – С.48.

3. Пат. 160198 Российская Федерация, МПК В01J 19/00 Насадка для тепло- и массообменных процессов / Голованчиков А. Б., Васильев П. С., Ляпков А. В., Черикова К. В., Топилин М. В., Тищенко П. О.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВолгГТУ.

4. Гайдадин, А. Н. Применение корреляционного анализа в технологических расчетах: метод указания / А. Н. Гайдадин, С. А. Ефремова, Н. Н. Бакумова ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – 16 с

5. Харченко, М. А. Корреляционный анализ / М. А. Харченко. – Воронеж: Изд-во ВГУ, 2008. – 31 с.

УДК 66.067.12

А. А. Шагарова, В. И. Горбаченко

АНАЛИЗ ВЫБОРА ПОЛУПРОНИЦАЕМЫХ МЕМБРАН В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИИ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: pahp@vstu.ru

Для теоретических исследований процесса ультрафильтрации составлена программа в Microsoft Excel для выбора оптимальной мембраны при различных условиях эксплуатации. Проведены исследования по определению селективности ацетатцеллюлозных мембран УАМ-50 – УАМ-300 в зависимости от рабочего давления и производительности исходного раствора.

Ключевые слова: ультрафильтрация, мембрана, селективность, мембранное разделение.

A. A. Shagarova, V. I. Gorbachenko

ANALYSIS OF SEMI-PROPELLED MEMBRANES SELECTION IN DEPEND OF ULTRAPHILTRATION'S TECHNOLOGICAL PARAMETERS

Volgograd State Technical University

For theoretical studies of the ultrafiltration process, a program was developed at Microsoft Excel to select the optimum membrane under different operating conditions. Studies were carried out to determine the selectivity of acetate-cellulose membranes UAM-50-UAM-300, depending on the operating pressure and the productivity of the initial solution.

Keywords: ultrafiltration, membrane, selectivity, membrane separation.

В качестве перспективного современного метода для разделения углеводов, смесей высокомолекулярных и низкомолекулярных соединений, концентрирования растворов и т. д. в различных отраслях промышленности вот уже более 20 лет используются мембранные методы разделения, в том числе ультрафильтрация (УФ) [1]. В последнее время начали широко использовать мембранные методы для решения задач очистки сточных и опреснения соленых вод.

Ультрафильтрация – процесс мембранного разделения жидких смесей под действием давления, основанный на различии молекулярных масс или молекулярных размеров компонентов разделяемой смеси.

Для ультрафильтрации используют нитроцеллюлозные, а также полиэлектролитные мембраны.

Как известно, эффективность мембранного разделения зависит от различных факторов, таких как разность давлений (рабочее давление), температура разделяемой смеси, скорость потока, концентрация разделяемой смеси и концентрация задерживаемых мембраной веществ [2].

В данной работе рассматривается процесс концентрирования растворов высокомолекулярных соединений (ВМС) с применением ультрафильтрации. Концентрирование растворов ВМС путем выпаривания обычно неэффективно вследствие разрушения ВМС (особенно биохимических препаратов). Применение ультрафильтрации позволяет довести концентрацию ВМС до уровня, при котором возможно непосредственное использование раствора в технологическом процессе или извлечение из него ВМС другими методами разделения.

В рамках представленных в данной статье исследований, лежит конкретная задача исследований зависимости характеристик мембран от технологических параметров в процессе ультрафильтрации водного раствора ацилазы.

После проведения ультрафильтрации получены следующие продукты мембранного разделения: концентрат и пермеат.

Для решения поставленной задачи необходимо было рассмотреть следующие аспекты:

1. Влияние рабочих условий проведения процесса ультрафильтрации на характеристики мембран, а именно разности давлений и производительности по исходному раствору.

2. Оценка истинной селективности мембраны в зависимости от диаметра пор.

Для теоретических исследований процесса ультрафильтрации составлена программа в Microsoft Excel для выбора оптимальной мембраны при различных условиях эксплуатации [3].

Проведены исследования по определению селективности ацетатцеллюлозных мембран UAM-50–UAM-300 в зависимости от рабочего давления и производительности исходного раствора.

Учитывая возможность деструкции ферментов органики при повышенных температурах, принимаем рабочую температуру 25 °С.

С учетом гелеобразования при высоких давлениях и уплотнения ультрафильтрационных мембран рабочий диапазон изменения перепада давления выбран 0,1÷0,5 МПа.

В ходе работы использовались следующие основные зависимости:

1. Степень концентрирования

$$K = \frac{x_k}{x_n}. \quad (1)$$

2. Концентрация ферментов ацилазы в пермеате

$$x_p \cdot K = \frac{K \cdot \varphi - K}{K \cdot \varphi - I}, \quad (2)$$

где φ – селективность мембраны, являющаяся функцией отношения диаметра молекул к диаметру пор в мембранах.

3. Удельная производительность по чистой воде

$$G_o = a \cdot \Delta p. \quad (3)$$

4. Удельная производительность по разделяемому раствору с вязкостью μ

$$G = G_o \cdot \frac{\mu_0}{\mu}. \quad (4)$$

5. Расход пермеата

$$L_p = G_n \cdot (1 - K)^{-1/\phi} \quad (5)$$

6. Расход концентрата

$$L_k = G_n - L_p \quad (6)$$

7. Рабочая поверхность мембраны

$$F_m = \frac{L_p}{G} \quad (7)$$

Рассчитаем истинную селективность мембран f по ацилазе, используя приведенные данные о размерах пор в мембранах, приведенных в таблице.

Полученные в результате расчетов зависимости представлены на рис. 1–3.

Характеристики различных типов мембран

d_p , мкм	a	f
3	0,0015	0,987
5	0,0033	0,995
10	0,017	0,998
15	0,037	0,9985
17,5	0,065	0,999
20	0,075	0,9995
30	0,134	0,9995
45	0,37	0,9995

Примечание: d_p – диаметр пор мембраны; a – константа проницаемости мембраны; f – истинная селективность мембраны.

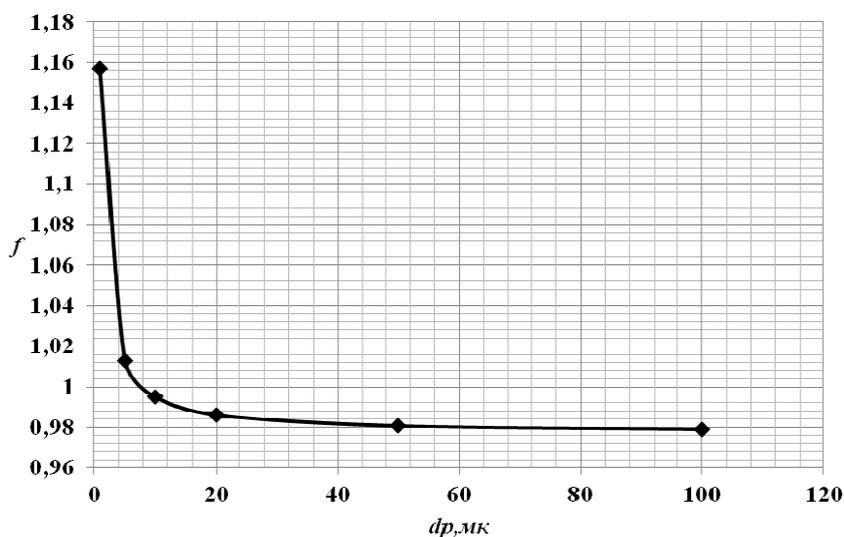


Рис. 1. График зависимости истинной селективности мембраны от диаметра пор

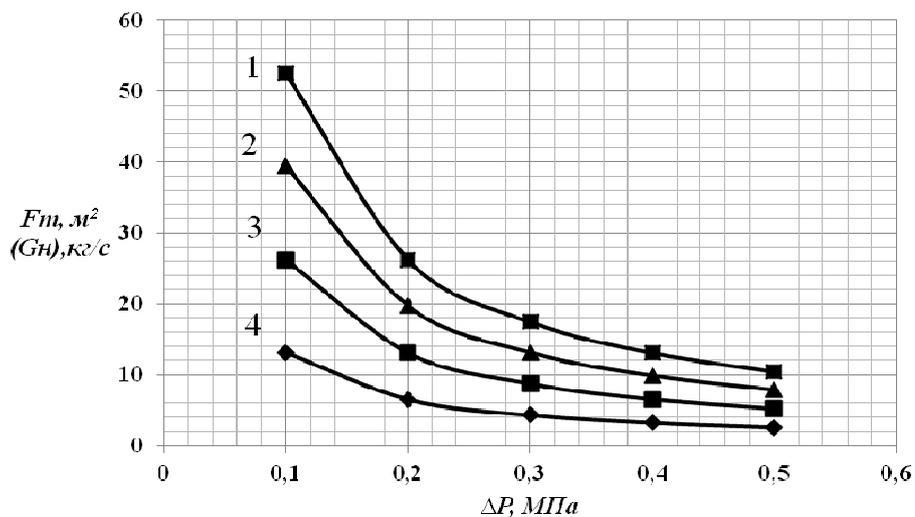


Рис. 2. График зависимости рабочей поверхности мембран от перепада давления производительности по исходному раствору:
 1 – $G = 0,4$ кг/с; 2 – $G = 0,3$ кг/с; 3 – $G = 0,2$ кг/с; 4 – $G = 0,1$ кг/с

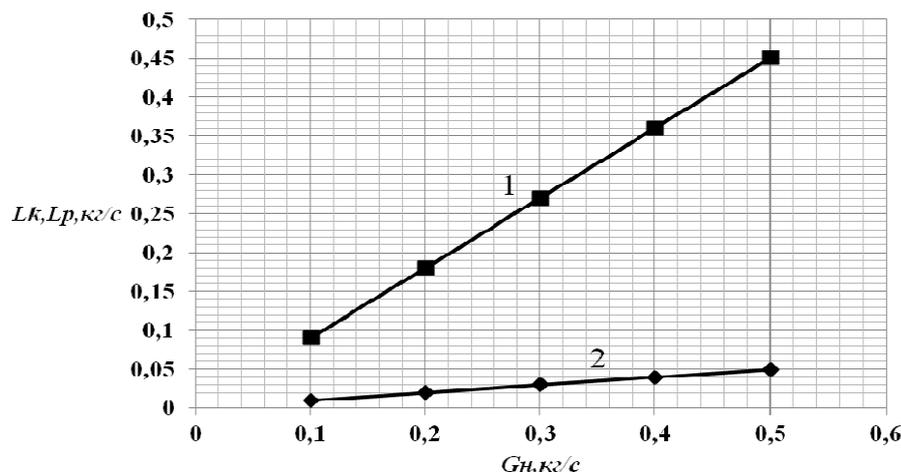


Рис. 3. График зависимости расхода пермеата и концентрата от производительности по начальному раствору:
1 – расход пермеата; 2 – расход концентрата

Анализ полученных результатов показывает:
– при увеличении диаметра пор истинная селективность мембраны уменьшается по гиперболическому закону (рис. 1).

– повышение давления может положительно влиять на эффективность мембранного разделения. В случае ультрафильтрации ВМС рис. 2 наглядно демонстрирует уменьшение рабочей поверхности мембраны при увеличении перепада давления и увеличение поверхности при росте производительности по начальному раствору;

– увеличение расхода концентрата и более выраженный рост расхода пермеата происходит при увеличении производительности по начальному раствору.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дытнерский, Ю. И. Обратный осмос и ультрафильтрация / Ю. И. Дытнерский. – М.: Химия, 1978. – 351 с.
2. Дытнерский, Ю. И. Баромембранные процессы. Теория и расчет / Ю. И. Дытнерский. – М.: Химия, 1986. – 272 с.
3. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии экологии. Часть 1: учебное пособие / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонов. – Волгоград: ВолгГТУ, 1994. – 114 с.

УДК 532.135

С. В. Лапшина, В. М. Шаповалов

КРИВАЯ ОТКЛИКА ПРИ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ ЭЛЛИСА В ТРУБЕ

Волжский политехнический институт (филиал)

Волгоградского государственного технического университета

e-mail: pahp@vstu.ru

Получено аналитическое решение задачи ламинарного изотермического течения жидкости Эллиса. Получены аналитические выражения для кривой отклика на импульсное возмущение. Представлены расчетные результаты.

Ключевые слова: температура, жидкость Эллиса, возмущение, время.

S. V. Lapshina, V. M. Shapovalov

CURVE RESPONSE TO IMPULSE DISTURBANCES IN FLUID FLOW ELLIS PIPE

Volzhsy Polytechnical Institute (Branch)

Volgograd State Technical University

An analytical solution of the problem of laminar isothermal flow Ellis fluid. We obtain the calculated expression for the pulse response curve outrage. Presents the calculated results.

Keywords: temperature, Ellis fluid, disturbance, time.

В химической технологии наиболее распространены аппараты непрерывного действия. Большинство химико-технологических процессов проводятся в потоке жидкости или газа. Характеристики потока оказывают существенное влияние на ход процессов. Существование поля скоростей обуславливает неравномерность времени пребывания частиц жидкости в аппарате, поэтому к точности описания поля скоростей предъявляются высокие требования. Рассматриваемое течение имеет место в трубчатом реакторе при переработке неньютоновской жидкости. Близкая по сущности проблема переработки неньютоновских сред в трубчатых реакторах рассмотрена профессором Голованчиковым А. Б. в работах [1–4].

Двухпараметрическая модель Оствальда-де Виля недостаточно гибкая, поэтому прогнозируемые ею расчетные результаты качественно верные, но количественно гипертрофированно преувеличены. Так, при течении в канале про-

филь скорости полностью определяется единственным параметром – индексом течения. При малых расходах псевдопластической жидкости модель предсказывает существование большого ядра с малой скоростью деформации и тонкого слоя градиентного течения. Между тем при малых расходах жидкость проявляет наибольшую ньютоновскую вязкость и профиль скорости должен быть близок к квадратичной параболе. В случае использования трехпараметрической модели Эллиса указанный недостаток снимается; модель учитывает касательное напряжение на стенке.

Гидродинамику потока в аппарате интегрально описывает кривая отклика. В поток на входе его в аппарат вводят индикатор, а на выходе потока измеряют концентрацию индикатора как функцию времени (функцию отклика). В качестве индикатора используют красители, растворы солей и кислот, изотопы и другие вещества, существенно не влияющие на свойства жидкости.

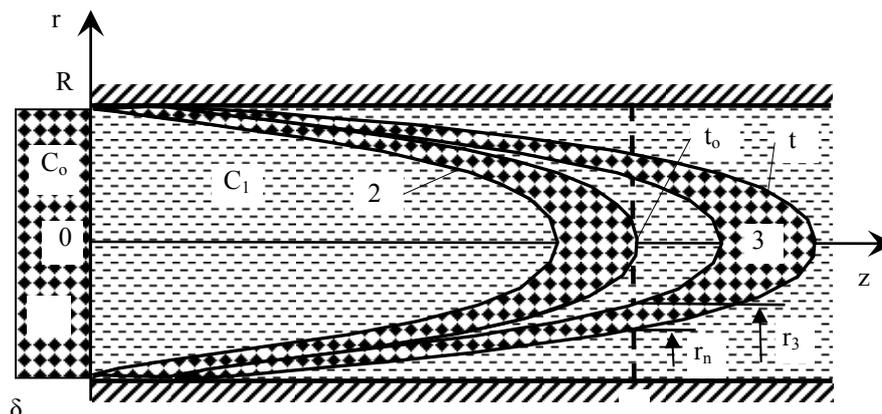


Рис. 1. Эволюция профиля индикатора:

1 – начальный профиль индикатора; 2 – начало второго периода; 3 – третий период

Расчетная схема с тремя вариантами ситуации представлена на рис. 1. Имеем установившийся поток жидкости в трубопроводе с концентрацией индикатора C_1 . В момент времени $t = 0$ на входе возникает цилиндрический объем жидкости $\pi R^2 \delta$ с концентрацией индикатора C_0 ($C_1 \neq C_0$). С течением времени цилиндрический объем индикатора трансформируется в параболоид вращения. Диффузию индикатора не учитываем.

Предварительно найдем профиль скорости для жидкости Эллиса. Схема течения и система цилиндрических декартовых координат представлена на рис. 1. Напорное стационарное течение совершается только в направлении z . Реологические свойства жидкости описываются

законом Эллиса. Течение изотермическое, ламинарное. Жидкость несжимаемая, теплофизические и реологические свойства постоянны и не зависят от температуры.

Задача стационарного течения описывается системой уравнений:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial (r \tau_{rz})}{\partial r},$$

$$-\frac{dv}{dr} = \tau_{rz} (a + b |\tau_{rz}|^{\alpha-1}), \quad (1)$$

$r = R, \quad v = 0; \quad r = 0, \quad \partial v / \partial r = 0, \quad \tau_{rz} = 0,$ где P – давление; z – осевая координата; r – радиус; $\tau_{rz}(x, y)$ – касательное напряжение; $v(r)$ – осевая компонента скорости; a, b, α – реологи-

ческие константы, $dP/dz = -\Delta P/\ell$, ℓ – длина канала, ΔP – падение давления.

Введем безразмерные переменные и параметры:

$$\theta = \frac{C_+ - C_1}{C_0 - C_1}, \quad \{\xi, \xi_0, \xi_n, \xi_3\} = \frac{\{r, r_0, r_n, r_3\}}{R},$$

$$\tau = \frac{t}{t_+} = \frac{taR\tau_w}{4\ell} \left[1 + 2K \frac{(1+\alpha)}{(3+\alpha)} \right],$$

$$K = \frac{2b\tau_w^{\alpha-1}}{a(\alpha+1)}. \quad (2)$$

Здесь $\tau_w = 0,5R\Delta P/\ell$ – напряжение на стенке, t – время, t_+ – среднее время пребывания жидкости в аппарате, C_+ – средняя концентрация на выходе, θ – средняя безразмерная концентрация индикатора на выходе, C_1 – концентрация индикатора в основной жидкости, C_0 – концентрация индикатора на входе.

В результате решения задачи (1) находим профиль скорости

$$v = 0,5a\tau_w R \left[1 - \xi^2 + K(1 - \xi^{\alpha+1}) \right]. \quad (3)$$

Условно движение индикатора можно разбить на три периода. Первый период (рис. 1) начинается в момент времени $t = 0$ и заканчивается в момент $t = t_0$, когда вершина переднего фронта индикатора касается контрольного сечения $z = \ell$. В течение всего периода концентрация индикатора на выходе $C = C_1$ (транспортное запаздывание). Для первого периода можем записать

$$t < t_0, \quad C = C_1. \quad (4)$$

Второму периоду отвечает интервал времени $t_0 < t < t_1$. Он заканчивается ($t = t_1$), когда экстремум заднего фронта индикатора достигнет контрольного сечения в точке $r = 0, z = \ell$. При этом средняя концентрация индикатора на выходе увеличивается, и достигает наибольшего значения, поскольку увеличивается радиус r_n .

Продолжительность первого периода можно найти по формуле $t_0 = \ell/v_0$ ($v_0 = v(\xi = 0)$ – максимальная скорость на оси). Соответственно, окончанию второго периода отвечает момент времени $t_1 = (\ell + \delta)/v_0$. В развернутой форме

$$t_0 = 2\ell \left[aR\tau_w(1+K) \right]^{-1},$$

$$t_1 = 2(\ell + \delta) \left[aR\tau_w(1+K) \right]^{-1}. \quad (5)$$

Учитывая выражение для скорости (3), можем записать следующую зависимость времени

пребывания от радиуса переднего фронта индикатора

$$t = \frac{2\ell}{aR\tau_w \left[1 - \xi_n^2 + K(1 - \xi_n^{\alpha+1}) \right]}, \quad t > t_0. \quad (6)$$

Соответственно, радиус сечения заднего фронта параболоида индикатора $r_3(t)$ следующим образом зависит от времени

$$t = \frac{2(\ell + \delta)}{aR\tau_w \left[1 - \xi_3^2 + K(1 - \xi_3^{\alpha+1}) \right]}, \quad t > t_1. \quad (7)$$

Для определения средней концентрации на выходе во втором периоде используем уравнение материального баланса

$$Q_+ = Q_0 + Q_1, \quad (8)$$

в котором следует положить $Q_+ = C_+ 2\pi R^2 \int_0^1 v \xi d\xi$,

$$Q_0 = C_0 2\pi R^2 \int_0^{\xi_n} v \xi d\xi, \quad Q_1 = C_1 2\pi R^2 \int_{\xi_n}^1 v \xi d\xi.$$

В результате интегрирования для безразмерной концентрации на выходе получим выражение:

$$\theta = \frac{2(K+1)\xi_n^2 - \xi_n^4 - \frac{4K}{3+\alpha}\xi_n^{\alpha+3}}{1 + 2K \left(\frac{\alpha+1}{\alpha+3} \right)},$$

$$\tau_1 > \tau > \tau_0, \quad \xi_{nm} > \xi_n > 0. \quad (9)$$

С учетом обозначений (2) выражение для времени (7) примет вид:

$$\tau = \frac{\left[1 + 2K \frac{(1+\alpha)}{(3+\alpha)} \right]}{2 \left[1 - \xi_n^2 + K(1 - \xi_n^{\alpha+1}) \right]},$$

$$\tau_1 > \tau > \tau_0, \quad \xi_{nm} > \xi_n > 0. \quad (10)$$

Выражения (9) и (10) в параметрической форме описывают безразмерную кривую отклика во втором периоде. Параметр ξ_n изменяется в пределах от 0 до ξ_{nm} . Значение ξ_{nm} находится из условия: $t = t_1, \tau = \tau_1$. Получаем уравнение

$$1 - \xi_{nm}^2 + K(1 - \xi_{nm}^{\alpha+1}) = \frac{(1+K)}{(1+\varepsilon)}. \quad (11)$$

Из сопоставления выражений (10) и (11) находим безразмерное время окончания второго периода $\tau_1 = (1+\varepsilon) \left[1 + 2K \frac{(1+\alpha)}{(3+\alpha)} \right] / \left[2(1+K) \right]$.

В третьем периоде ($t > t_1$) в контрольном сечении имеем три зоны: центральную ($r_3 > r > 0$),

среднюю ($r_3 < r < r_n$) и периферийную ($r_n < r < R$). При этом составляющие материального баланса (8) имеют вид:

$$Q_+ = C_+ 2\pi R^2 \int_0^1 v \xi d\xi,$$

$$Q_1 = C_1 2\pi R^2 \int_0^{\xi_3} v \xi d\xi + C_1 2\pi R^2 \int_{\xi_n}^1 v \xi d\xi,$$

$$Q_0 = C_o 2\pi R^2 \int_{\xi_3}^{\xi_n} v \xi d\xi.$$

В результате получаем выражение для средней безразмерной концентрации в третьем периоде

$$\theta = \frac{2(K+1)(\xi_n^2 - \xi_3^2) - \xi_n^4 + \xi_3^4 - \frac{4K}{3+\alpha}(\xi_n^{\alpha+3} - \xi_3^{\alpha+3})}{1 + 2K \left(\frac{\alpha+1}{\alpha+3} \right)}, \quad \tau > \tau_1, 1 > \xi_n > \xi_{nm}. \quad (12)$$

Из совместного рассмотрения выражений (6) и (7), получим уравнение для параметров ξ_n и ξ_3

$$1 - \xi_3^2 + K(1 - \xi_3^{\alpha+1}) = (1 + \varepsilon) \left[1 - \xi_n^2 + K(1 - \xi_n^{\alpha+1}) \right], \quad 1 > \xi_n > \xi_{nm}. \quad (13)$$

В третьем периоде имеют место следующие соотношения: $\xi_{nm} < \xi_n < 1$, $\xi_n > \xi_3 > 0$. Следует отметить, что выражение (10) остается в силе и в третьем периоде.

Последовательность расчета. Считаем величины K , ε известными. Задается значение параметра ξ_n из интервала $0 < \xi_n < 0,999$. Далее, с помощью выражения (10) находится значение безразмерного времени τ . С помощью трансцендентного уравнения (13) находится соответствующее значение параметра ξ_3 . Наконец, с помощью выражения (12) находится средняя безразмерная концентрация на выходе θ . Для получения кривой отклика на ступенчатое возмущение достаточно

в расчетных формулах положить $\varepsilon \gg 1$.

Для численного анализа воспользуемся данными реологических исследований работы [5]. Резиновая смесь на основе каучуков СКИ-ЗНТ и СКМС-30АРКПН [по 50 ч. (масс.)] и содержащей в качестве наполнителей технический углерод ПМ-15 (35 ч.) и ПГМ-33 (38 ч.). Температура смеси при испытании 120 °С. Исследован интервал касательных напряжений τ_w от 0,123 МПа до 0,203 МПа. Значения реологических констант для модели Эллиса: $\alpha = 17,893$, $a = 350,217 \text{ МПа}^{-1} \text{ с}^{-1}$, $b = 2,373 \times 10^{15} \text{ МПа}^{-\alpha} \text{ с}^{-1}$. Интервалу касательных напряжений отвечает интервал K от $3,03 \times 10^{-4}$ до 1,436.

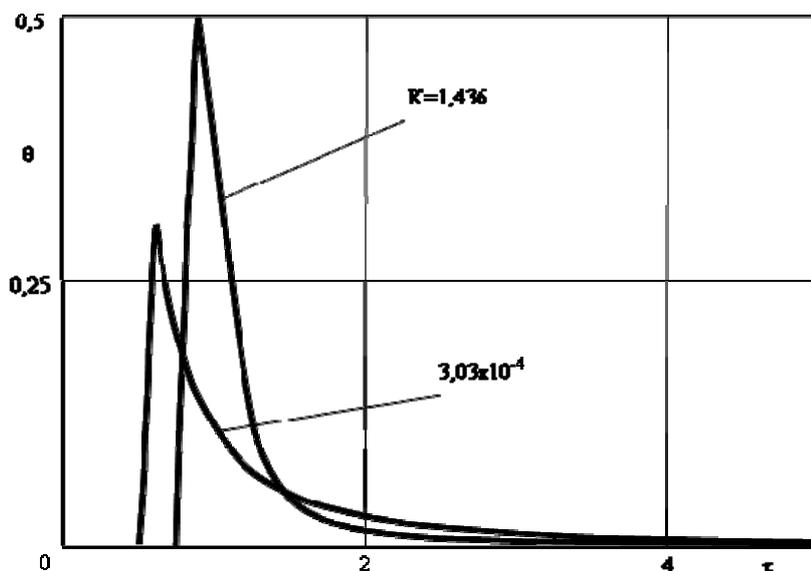


Рис. 2. Кривые отклика при течении жидкости Эллиса

Расчетные кривые отклика для двух значений K представлены на рис. 2. Значение относительной толщины индикатора составляло $\varepsilon = 0,2$. Из рисунка видно, что напряжение на

стенке (входит в комплекс K) существенно влияют на характер кривой отклика. В частности, существенно изменяется величина всплеска концентрации. С понижением псевдопла-

стических свойств снижается интенсивность вымывания индикатора. Значение $K = 3,03 \cdot 10^{-4}$ отвечает наибольшей ньютоновской вязкости, при этом профиль скорости близок к квадратичной параболе. На стыке второго и третьего периодов в точке τ_1 имеет место разрыв производной (точка излома функции).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованчиков, А. Б. Расчет реактора вытеснения по кинетическим и реологическим данным / А. Б. Голованчиков, Н. В. Тябин // Известия вузов. Химия и химическая технология. – 1988. – Т. 31. Вып. 11. – С. 119–123.
2. Голованчиков, А. Б. Расчет и проектирование политропных реакторов вытеснения с учетом реологических свойств реак-

ционной массы / А. Б. Голованчиков, Г. В. Рябчук, Н. А. Дулькина // Известия ВолгГТУ. Реология, процессы и аппараты химической технологии. Межвузовский сборник научных статей. – Волгоград, РПК «Политехник». – 2004. – № 5. – С. 23–27.

3. Голованчиков, А. Б. Расчет трубчатого реактора с ньютоновской реакционной массой и маловязким пристенным слоем / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, А. В. Ильин, Л. А. Ильина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2010. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 1). – С.16–20.

4. Пат. № 2007702 Российская Федерация, МПК: 5G 01N 11/00 А. Способ определения реологических свойств жидкостей / Голованчиков А. Б., Брифф Е. А., Тябин Н. В., Болотин Ю. О., Лаки З.; заявитель и патентообладатель Волгоградский политехнический институт. – № 4949347/25; заявл. 26.06.1991; опубл. 15.02.1994.

5. Красовский, В. Н. Примеры и задачи по технологии переработки эластомеров / В. Н. Красовский, А. М. Воскресенский, В. М. Харчевников. – Ленинград: Химия, 1984. – 240 с.

УДК 721.01:504.06

А. Б. Голованчиков, В. Ф. Каблов, Л. В. КурYLEVA

ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ОДНОВРЕМЕННОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НЕСКОЛЬКИХ ИСТОЧНИКОВ ЗАГРЯЗНЕНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: pahp@vstu.ru

Проведено сравнение интегральных оценок экологической безопасности при одновременном воздействии нескольких источников загрязнений с использованием существующей методики суммирования субъективных экспертных оценок и предлагаемой на основе сравнения ПДК и фоновой концентрации каждого загрязнителя и их суммирования.

Приведены примеры расчетов по каждой из этих методик и показаны преимущества предлагаемой методики, связанные с нивелированием субъективности и большими затратами времени на персональный подбор экспертов и сбор от них информации, а также ускорением обработки информации на ЭВМ.

Ключевые слова: экологическая безопасность, источники загрязнений, экспертная оценка, ПДК, фоновая концентрация, весовой коэффициент, субъективное и объективное ранжирование.

A. B. Golovanchikov, V. F. Kablov, L. V. Kuryleva

INTEGRATED ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACT OF SECURITY WHILE SEVERAL SOURCES OF CONTAMINATION

Volgograd State Technical University

Comparison of integrated assessments of environmental safety with simultaneous exposure to multiple contaminants sources using the existing methods of summation of subjective expert estimates and proposed on the basis of comparisons of Macs and background concentrations of each pollutant and their sum.

Examples of calculations for each of these techniques and showing the benefits of the proposed methodology, associated with nivelirovaniem subjective and time consuming for a personal selection of the experts and gather information from them, as well as accelerated information processing on a computer.

Keywords: environmental security, pollution sources, expert evaluation, MPC, background concentration, weight, subjective and objective ranking.

Существующие методики оценки экологической безопасности в одном крайнем случае предполагают при воздействии нескольких источников загрязнении их независимость друг от друга, тогда условия безопасности определяется в виде [1–6]

$$\frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1. \quad (1)$$

Другим крайним случаем является условие

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \leq 1, \quad (2)$$

то есть сумма отношений текущей концентрации каждого источника загрязнений к его ПДК должна быть меньше 1.

Однако обе формулы не учитывают весовой вклад концентрации каждого компонента в общее загрязнение.

Для нивелирования этого недостатка обычно

используют ранжирование каждого источника загрязнения весовым коэффициентом, который определяют с помощью экспертных оценок. Например, применим такое ранжирование для оценки загрязнения атмосферного воздуха под факелом от сжигания побочных нефтяных газов на ООО «Лукойл-Волгограднефтепереработка» [3].

Таблица 1

Весовой коэффициент загрязнения

№ п/п	Наименование вещества	Ученая степень эксперта и его звание							сумма баллов	Весовой коэффициент, g_i
		д-р техн. наук, профессор	д-р техн. наук, профессор	д-р хим. наук, профессор	д-р биол. наук, профессор	д-р биол. наук, профессор	канд. хим. наук, доцент	канд. хим. наук, доцент		
1.	Фенол	5	6	7	5	6	7	6	42	0,212
2.	Сероводород	8	7	8	8	7	9	8	55	0,278
3.	Диоксид серы	4	7	6	8	9	8	7	49	0,248
4.	Диоксид азота	6	8	7	8	7	8	8	52	0,262
ИТОГО		–	–	–	–	–	–	–	198	1

Весовой коэффициент каждого компонента загрязнений определялся по формуле $g_i = \frac{b_i}{\sum b_i}$,

где b_i – сумма баллов каждого эксперта по i -тому компоненту загрязнений.

Зная весовые коэффициенты g_i каждого компонента, можно получить из условий (1) и (2) модифицированную формулу с учетом вклада каж-

дого компонента в общую картину загрязнений

$$\sum_{i=1}^n \frac{g_i C_i}{ПДК_i} \leq 1. \quad (3)$$

Например, в табл. 2 приведены замеренные максимальные концентрации загрязняющих веществ, образующихся под факелом при сжигании побочных нефтяных газов на ООО «Лукойл-Волгограднефтепереработка».

Таблица 2

Максимальные концентрации загрязняющих веществ

№ п/п	Наименование вещества	C	ПДК _м	$\frac{C_i}{ПДК_i}$	$\frac{g_i C_i}{ПДК_i}$
1.	Фенол	0,0063	0,007	0,9	0,191
2.	Сероводород	0,0088	0,008	1,1	0,306
3.	Диоксид серы	0,5	0,5	1	0,248
4.	Диоксид азота	0,14	0,085	1,65	0,432
ИТОГО		–	–	$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{ПДК_i} = 4,65$	$\sum_2 = 1.18$

То есть, если не учитывать суммарного влияния загрязняющих компонентов и использовать условие 1, получаем, что пары фенола и диоксида серы находятся в пределах нормы, пары сероводорода превышают норму на 10 %, а самое большое загрязнение оказывает диоксид азота, концентрация которого превышает ПДК на 65 %. Если использовать условие (2), суммирующее превышение концентраций загрязняющих

веществ относительно их ПДК, то это превышение составляет 465 %. Используя условие (3), учитывающее весовыми коэффициентами экспертов вклад каждого загрязняющего вещества, получаем, что общее превышение суммарных допустимых концентраций составляет 18 % при этом наибольший вклад вносит диоксид азота, вторым по ранжиру является сероводород, третьим – диоксид серы и четвертым – фенол.

Целью работы является сравнение метода экспертных оценок субъективно ранжирующих влияние каждого загрязнителя в баллах и объектного метода, использующего их ПДК и фоновую концентрацию.

Попробуем избавиться от субъективных оценок экспертов, используя известные значе-

ния ПДК и фоновые концентрации (для определения объективных весовых коэффициентов для каждого загрязняющего компонента), которые можно представить в виде отношения ПДК к фоновой концентрации

$$f_i = \frac{ПДК_i}{\Phi_i}. \quad (4)$$

Таблица 3

Определения объективных весовых коэффициентов для каждого загрязняющего компонента

№ п/п	Наименование вещества	Фоновая концентрация	ПДКм	Отношение ПДК к фоновой концентрации	Весовой коэффициент f_i	$\frac{d_i C_i}{ПДК_i}$
1.	Фенол	$3 \cdot 10^{-5}$	$700 \cdot 10^{-5}$	233,3	0,3	0,27
2.	Сероводород	$2,18 \cdot 10^{-5}$	$800 \cdot 10^{-5}$	366,9	0,47	0,52
3.	Диоксид серы	$4,27 \cdot 10^{-3}$	$500 \cdot 10^{-3}$	117,1	0,15	0,15
4.	Диоксид азота	$1,33 \cdot 10^{-3}$	$85 \cdot 10^{-3}$	163,9	0,08	0,13
ИТОГО		–	–	$\sum_{i=1}^n = 781,2$	$\sum_{i=1}^n = 1$	$\sum_{i=1}^n = 1,07$

Сравнивая весовые коэффициента g_i из табл. 1, полученные на основании экспертной оценки, и весовые коэффициенты f_i из табл. 3, полученные на основе сравнения ПДК_i и фоновых концентраций видно, что эксперты занизили влияние сероводорода и фенола в пользу диоксида серы и диоксида азота. С учетом новых весовых коэффициентов f_i условие (3) может быть представлено в виде:

$$\sum_{i=1}^n = 1 \frac{f_i C_i}{ПДК_i} \leq 1. \quad (5)$$

Результаты расчетов по формуле (5) приведены в последнем столбике табл. 3.

Как видно из сравнения весовых вкладов каждого загрязняющего компонента, рассчитанных традиционно с использованием их весовых коэффициентов, полученных на основании экспертных оценок, и по предлагаемой методике с использованием соотношения ПДК и фоновых концентраций, последний метод повышает вклад паров фенола с 19 до 27 %, а сероводорода с 30,6 % до 52 %, при этом снижает вклад паров диоксида серы с 24,8 % до 15 %, а диоксида азота с сильно завышенных 43,2 % до 13 %, при этом и общее загрязнение превышает не на 18 %, а на 7 %. Это более объективная информация базируется не на субъективной оценке экспертов и в данном случае ра-

ботает в пользу предприятия, так как плата за сверхнормативные выбросы, связанные с несколькими источниками загрязнений, снижается с 18 % до 7 %, то есть в 2,5 раза.

Однако суммарная оценка должна быть больше оценки наибольшего локального источника загрязнений, а это (см. табл. 1) диоксид азота равная 1,65 тогда эта суммарная оценка может быть определена в виде произведения

$$C_{\Sigma_3} = C_{\text{наиб.}} \cdot \sum_3 = 1,65 \cdot 1,07 = 1,765.$$

Для расчета C_{Σ_2} учетом экспертных оценок (см. табл. 2).

Эта величина

$$C_{\Sigma_2} = C_{\text{наиб.}} \cdot \sum_3 = 1,65 \cdot 1,18 = 1,95.$$

Таким образом, суммарная субъективная оценка экспертов больше предлагаемой объективной оценки, опирающейся на связь фоновой концентрации каждого загрязнителя с его ПДК.

Последнее объясняется интуитивным завышением опасности загрязнителей экспертами и субъективным ранжированием ими вредных веществ в баллах по сравнению предлагаемой объективной оценкой определения весовых коэффициентов каждого загрязнителя, их ранжирования с последующим использованием общего уравнения (6).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тимонин, А. С.* Инженерно-экологический справочник Т. 1. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2003. – 917 с.
2. Государственные доклады о состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации. – М.: Государственный центр экологических программ, 2011–2016 гг.
3. Доклады о состоянии окружающей среды Волгоградской области. – Волгоград: «СМОТРИ». 2011–2016 гг.
4. Постановление Правительства РФ от 03.08.92 г. № 545 «Об утверждении порядка разработки и утверждения экологических нормативов выбросов и сбросов загрязняющих веществ в окружающую среду, лимитов использования природных ресурсов, размещение отходов. – С. 8.
5. Временные правила охраны окружающей среды от отходов производства и потребления в Российской Федерации. – М.: Минприроды, 1994. – С. 80.
6. *Ходаков, Ю. С.* Оксиды азота и теплоэнергетика, проблемы и решения / Ю. С.Ходаков. – 2-е изд., доп. – М.: ООО «ЭСТ-М», 2001. – С. 432.
7. *Швыдкий, В. С.* Очистка газов: Справочное издание / В. С. Швыдкий, М. Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – С. 640.

Редактор
В. В. Свитачева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–64543 от 22 января 2016 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 23-00-76
E-mail: rector@vstu.ru

Темплан 2017 г. Поз. № 26ж. Подписано в печать 25.12.2017 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 9,3. Уч.-изд. л. 11,45.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ №
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

В научно-техническом журнале «ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований, представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области экономики.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия сборника, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редколлегия направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на дискетах или компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Дискета должна быть вложена в отдельный конверт, на этикетке дискеты указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см, нижнее – 3,0 см, левое – 2,5 см, правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, в котором работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводится на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной–двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail), документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.