



Издается
с января 2004 г.

ISSN 2500-0586

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

Редакционная коллегия:

И. И. Артюхов – д.т.н., проф. СГТУ
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. Дарманиян – 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
О.Г. Котиев – д. т. н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов – д. т. н., проф., СГТУ
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
А. А. Ревин. – д.т.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

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.

№ 1 (13)
Июнь
2016

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) 24-81-05
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 – Corresponding
Member 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
O. G. 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
A. A. Revin – D. Sc. (Engineering), 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 », 2016

**№ 1 (13)
June
2016**

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) 24-81-05 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

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| Александрин Д. Р. 41 | Парахневич Д. В. 15 |
| Аристова Ю. В. 28 | Парахневич Е. Д. 15 |
| Балашов В. А. 7 | Поликарпов А. Д. 28 |
| Голованчиков А. Б. 7, 41 | Поляков В. А. 52 |
| Грига А. Д. 37 | Прохоренко Н. А. 28 |
| Демьянов А. В. 15 | Русакова Г. Г. 15 |
| Дудаков Д. С. 37 | Русакова М. М. 15 |
| Иваницкий М. С. 45 | Рязанов М. Г. 7 |
| Иванов В. В. 48 | Тишин О. А. 20 |
| Игнатченко О. В. 37 | Хижняков И. А. 7 |
| Канубриков Н. Н. 52 | Шадчнев Р. А. 33 |
| Кирпиченко С. В. 52 | Шаповалов В. М. 11 |
| Климова Е. В. 20 | Шибитов Н. С. 41 |
| Кравченко Н. В. 37 | Шибитова Н. В. 41 |
| Манкевич А. В. 33 | Шишлянников В. В. 52 |
| Мельникова Т. В. 33 | Юрков Н. И. 28 |
| Меренцов Н. А. 7 | Яблонский В. О. 23 |
| Олейников А. В. 48 | |

AUTHOR INDEX

Aleksandrin D. R. 41	Oleynikov A. V. 48
Aristova Yu.V. 28	Parakhnevich E. D. 15
Balashov V. A. 7	Parakhnevich D. V. 15
Demyanov A. V. 15, 56	Polikarpov A. D. 28
Dudakov D. S. 37	Polyakov V. A. 52
Ignatchenko O. V. 37	Prokhorenko N. A. 28
Ivanitskiy M. S. 45	Rusakova G. G. 15
Ivanov V. V. 48	Rusakova M. M. 15
Golovanchikov A. B. 7, 41	Ryazanov M. G. 7
Griga A. D. 37	Shadchnev R. A. 33
Kanubrikov N. N. 52	Shapovalov V. M. 11
Khizhnyakov I. A. 7	Shibitov N. S. 41
Kirpichenko S. V. 52	Shibitova N. V. 41
Klimova E. V. 20	Shishliannikov V. V. 52
Kravchenko N. V. 37	Tishin O. A. 20
Mankevich A. V. 33	Yablonskii V. O. 23
Melnikova T. V. 33	Yurkiv N. I. 28
Merentsov N. A. 7	

СОДЕРЖАНИЕ

<i>Хижняков И. А., Рязанов М. Г., Меренцов Н. А., Балашов В. А., Голованчиков А. Б.</i> Экспериментальное исследование гидродинамики теплообменников насадочных устройств.....	7
<i>Шаповалов В. М.</i> Нанесение упругой раклей вязкой жидкости на горизонтальную поверхность.....	11
<i>Русакова Г. Г., Демьянов А. В., Русакова М. М., Парахневич Е. Д., Парахневич Д. В.</i> Определение планированием эксперимента параметров процесса извлечения эфирного горчичного масла из продуктов переработки семян горчицы после гидролиза в них синигрина.....	15
<i>Тишин О. А., Климова Е. В.</i> Исследование процесса химической абсорбции с помощью компьютерной модели на лабораторных работах.....	20
<i>Яблонский В. О.</i> Моделирование влияния нелинейности реологических свойств вязкопластической жидкости на гидродинамику гидроциклона.....	23
<i>Юрков Н. И., Поликарпов А. Д., Прохоренко Н. А., Аристов Ю. В.</i> Бутовые растворы.....	28
<i>Шадченев Р. А., Манкевич А. В., Мельникова Т. В.</i> К вопросу формирования сметной стоимости строительства скважин в Волгоградской области.....	33
<i>Грига А. Д., Кравченко Н. В., Дудаков Д. С., Игнатченко О. В.</i> Экономические и экологические способы воздействия на работу предприятий энергетического комплекса с целью сокращения золоотвалов: технологии сжигания и решение организационных проблем....	37
<i>Голованчиков А. Б., Шибитова Н. В., Шибитов Н. С., Александрин Д. Р.</i> Экспериментальное исследование гидродинамики центробежно-струйной форсункой.....	41
<i>Иваницкий М. С.</i> Снижение выбросов ртути при горении угля в отопительных котлах.....	45
<i>Олейников А. В., Иванов В. В.</i> Моделирование и расчет полностью герметичного шарового крана по П. М. № 139949 РФ.....	48
<i>Шишлянников В. В., Кирпиченко С. В., Канубриков Н. Н., Поляков В. А.</i> Течение и теплообмен волокнистых бумажных суспензий в круглой трубе..	52

CONTENTS

<i>Khizhnyakov I. A., Ryazanov M. G., Merentsov N. A., Balashov V. A., Golovanchikov A. B.</i> EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON HIDRODYNAMICS OF HEAT AND MASS TRANSFER CHECKERWORK.....	7
<i>Shapovalov V. M.</i> DRAWING AN ELASTIC SQUEEGEE VISCOUS LIQUID ON A HORIZONTAL SURFACE.....	11
<i>Rusakova G. G., Demyanov A. V., Rusakova M. M., Parakhnevich E. D., Parakhnevich D. V.</i> EXPERIMENT PLANNING OF DEFINITION EXTRACTION PROCESS PARAMETERS OF ESSENTIAL MUSTARD OIL PRODUCTS OF SEEDS MUSTARD PROCESSING AFTER SINIGRIN HYDROLYSIS.....	15
<i>Tishin O. A., Klimova E. V.</i> RESEARCH OF CHEMICAL ABSORPTION PROCESS BY MEANS OF COMPUTER MODEL AT LABORATORY WORKS.....	20
<i>Yablonskii V. O.</i> MODELLING OF INFLUENCE OF NONLINEARITY OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF VISCOPLASTIC FLUID ON HYDRODYNAMICS OF HYDROCYCLONE.....	23
<i>Yurkiv N. I., Polikarpov A. D., Prokhorenko N. A., Aristova Yu. V.</i> BORING SOLUTIONS.....	28
<i>Shadchnev R. A., Mankevich A. V., Melnikova T. V.</i> TO A QUESTION OF FORMATION OF ESTIMATED COST OF CONSTRUCTION OF WELLS IN THE VOLGOGRAD REGION.....	33
<i>Griga A. D., Kravchenko N. V., Dudakov D. S., Ignatchenko O. V.</i> ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL EFFECTS ON THE OPERATION OF ENTERPRISES OF THE ENERGY COMPLEX WITH THE AIM OF REDUCING ASH DISPOSAL: INCINERATION TECHNOLOGY AND THE SOLUTION OF ORGANIZATIONAL PROBLEMS.....	37
<i>Golovanchikov A. B., Shibitova N. V., Shibitov N. S., Aleksandrin D. R.</i> EXPERIMENTAL STUDY OF THE HYDRODYNAMICS OF THE CENTRIFUGAL-JET NOZZLE.....	41
<i>Ivanitskiy M. S.</i> REDUCTION OF MERCURY EMISSIONS DURING COMBUSTION OF COAL IN HEATING BOILERS.....	45
<i>Oleynikov A. V., Ivanov V. V.</i> SIMULATION AND CALCULATION OF FULLY SEALED BALL VALVE FOR PM 139949 RUSSIAN.....	48
<i>Shishliannikov V. V., Kirichenko S. V., Kanubrikov N. N., Polyakov V. A.</i> FLOW AND HEAT TRANSFER FIBRE PAPER SUSPENSION IN THE WHOLE PIPE.....	52

И. А. Хижняков, М. Г. Рязанов, Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ
ТЕПЛОМАССОБМЕННЫХ НАСАДОЧНЫХ УСТРОЙСТВ**

Волгоградский государственный технический университет

Приводятся экспериментальные данные исследования гидродинамики тепломассообменных насадочных устройств, их комбинаций и влияния орошения на качество гидродинамических режимов работы.

Ключевые слова: насадка, гидравлическое сопротивление, удерживающая способность, гидродинамический режим, экспериментальные исследования.

I. A. Khizhnyakov, M. G. Ryazanov, N. A. Merentsov, V. A. Balashov, A. B. Golovanchikov

**EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON HIDRODYNAMICS
OF HEAT AND MASS TRANSFER CHECKERWORK**

Volgograd State Technical University

In this paper experimental investigation on hydrodynamics of heat and mass transfer packed devices, and combinations thereof influence on the quality of the hydrodynamic irrigation modes.

Keywords: nozzle, the flow resistance, retention capacity, the hydrodynamic, the experimental investigation.

В химической, нефтехимической, пищевой промышленности, экологическом оборудовании широкое применение получили массообменные аппараты, для реализации таких процессов, как абсорбция, ректификация, экстракция, скрубберные процессы, испарительное охлаждение и т. д. Основным рабочим элементом данных аппаратов являются насадочные устройства, которые служат для развития поверхности контакта фаз и реализации гидродинамических режимов в широком диапазоне [1].

Данная работа посвящена экспериментальным исследованиям гидродинамики насадочных устройств различной конфигурации и их комбинаций, а также методам интенсификации тепломассообменных процессов. Особое внимание обращаем на такую характеристику, как удерживающая способность, которая является важнейшим показателем в работе тепломассообменных аппаратов, как самостоятельная характеристика эффективности работы, так и отражение суммарной поверхности тепломассопереноса и времени пребывания жидкости в аппарате [4, 6, 8].

Экспериментальные исследования проводились на установке (рис. 1), позволяющей осуществить широкомасштабные исследования гидродинамики насадочных устройств и тепломассообмена в условиях противоточного движения газожидкостного потока. Установка доступна для визуального наблюдения, развития гидроаэродинамических режимов в широком диапазоне, определения удерживающей способности, гидравлического сопротивления, интенсивности тепло- и массообмена [2].

В установке реализована картриджная система сменных насадок, позволяющая осуществлять быструю смену насадок и обеспечивающая воспроизводимость измеряемых параметров в повторных экспериментах. Картридж представляет собой заполненный исследуемой насадкой прозрачный параллелепипед (121×121×800 мм) с опорной решеткой, помещаемый в корпус аппарата.

В эксперименте использовались следующие насадки: керамические кольца Рашига 25×25×5 (уложенные в навал), керамические кольца Рашига 15×15×3 (уложенные в навал), стальные



Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования гидродинамики и тепломассообмена в насадочных устройствах

кольца Палля (25×25) (уложенные в навал), высокопроницаемая волокнистая насадка с регулируемыми параметрами [3, 6] (рис. 2) и комбинации данных насадок.

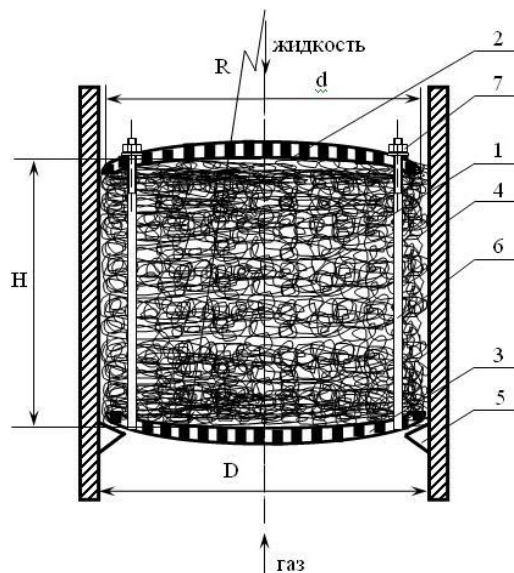


Рис. 2. Высокопроницаемая волокнистая насадка с регулируемыми параметрами:
1 – проволока, 2 и 3 – верхний и нижний перфорированные диски, 4 – корпус шпильки, 5 – опора под нижним диском, 6 – болты, 7 – гайка регулировочная

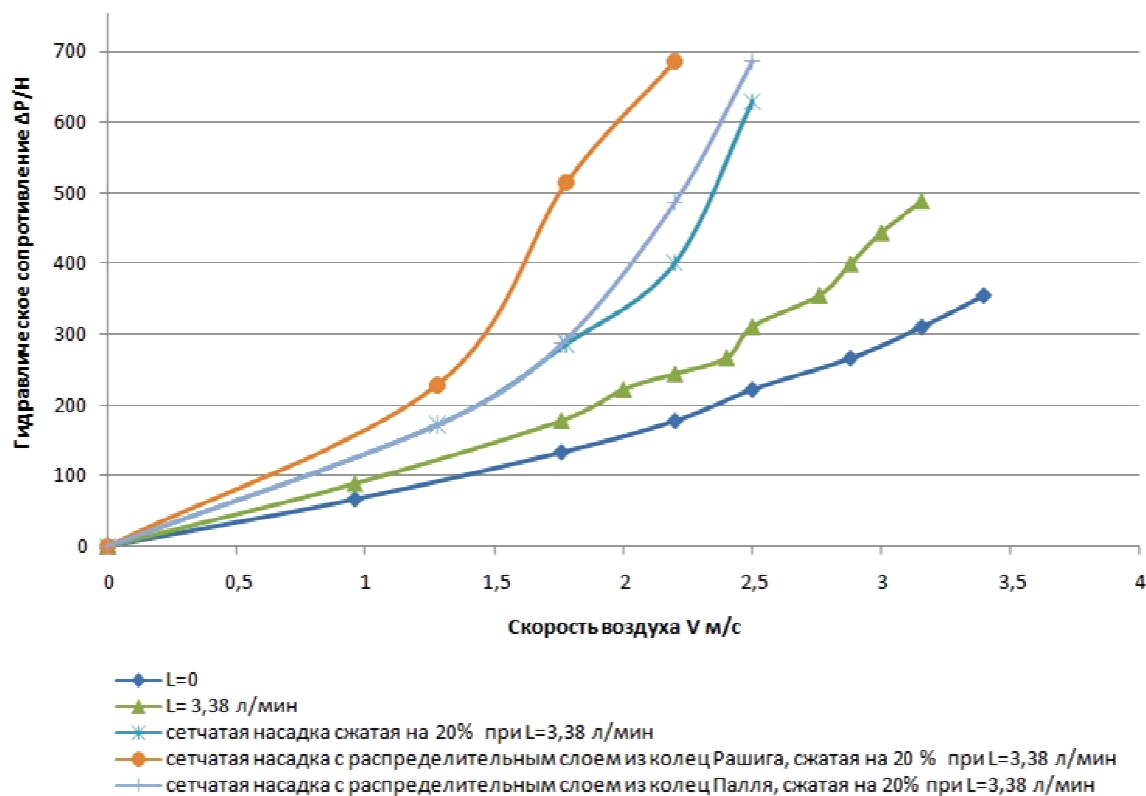


Рис. 3. График зависимости гидравлического сопротивления ($\Delta P_i/H$) сетчатой насадки от скорости газа в колонне (v)

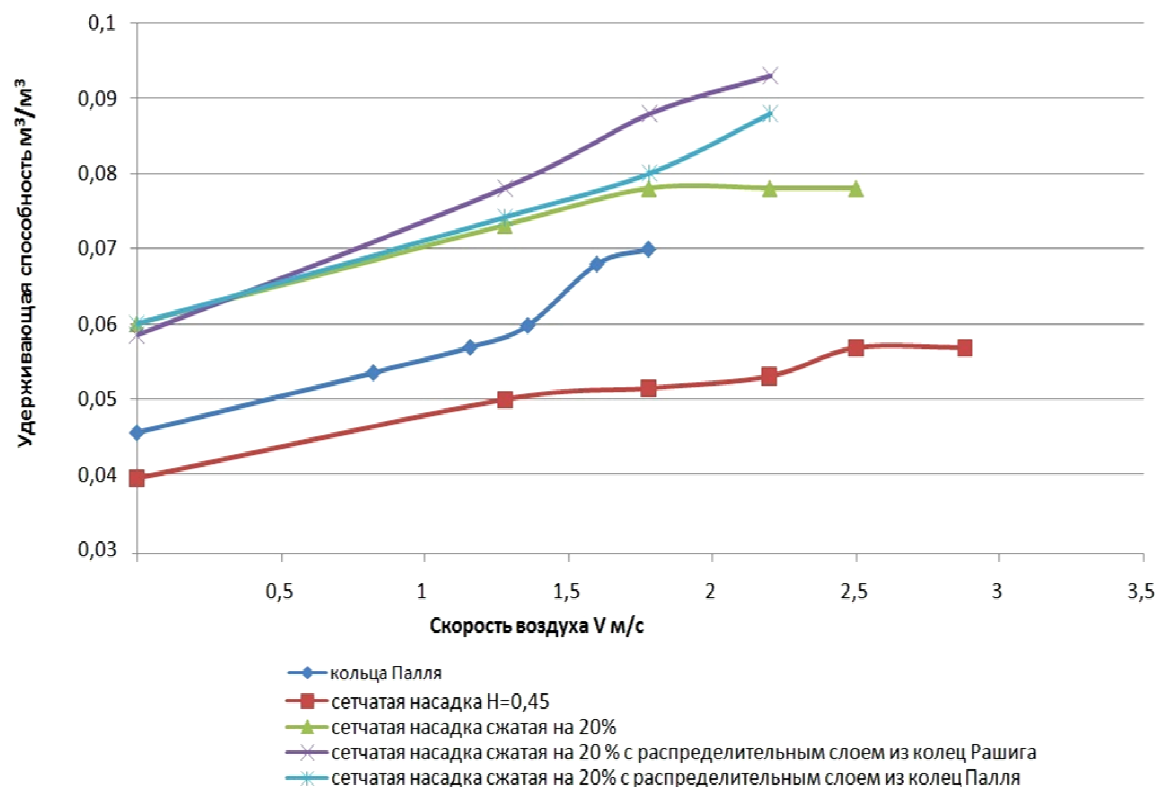


Рис. 4. График зависимости удерживающей способности (ϕ) насадок от скорости газа в колонне (v)

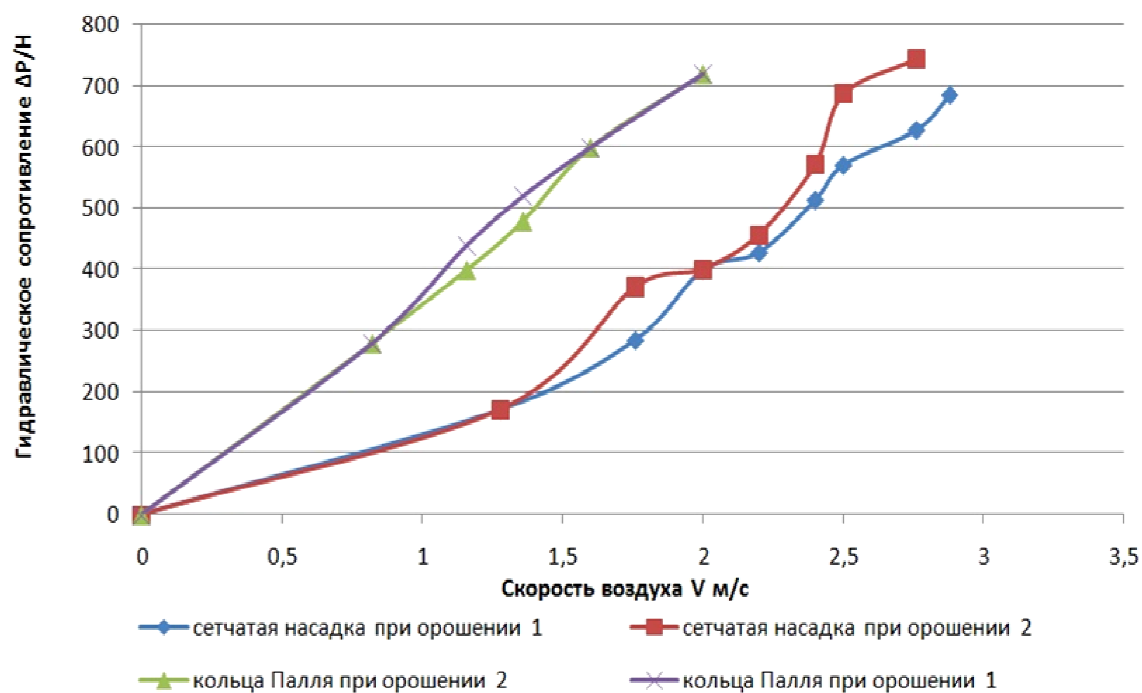


Рис. 5. График зависимости гидравлического сопротивления ($\Delta P/H$) насадок при различных способах орошения от скорости газа в колонне (v)

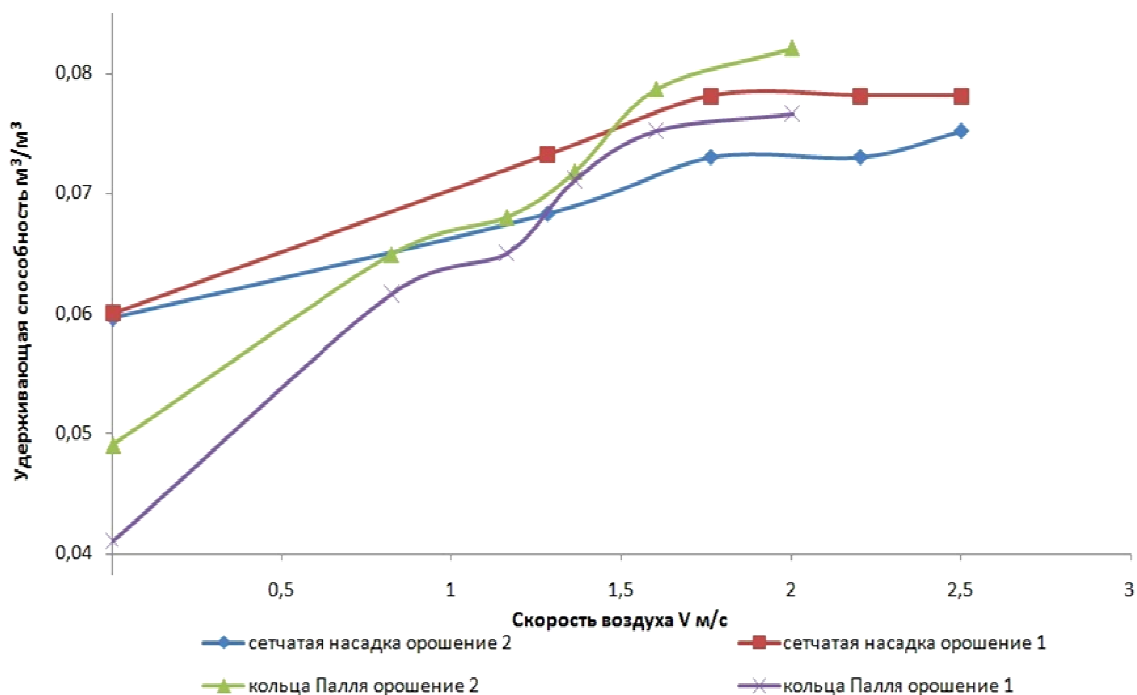


Рис. 6. График зависимости удерживающей способности (ϕ) насадок при различных способах орошения от скорости газа в колонне (v)

На основе полученных данных можно сделать вывод, что наиболее перспективной является сетчатая насадка с регулируемыми параметрами, так как она обладает наименьшим гидравлическим сопротивлением и относительно высокой удерживающей способностью. Меняя порозность сетчатой насадки, мы имеем возможность регулировать гидравлическое сопротивление и удерживающую способность, тем самым воздействовать на процесс теплообмена в различных режимных областях. Уменьшив порозность насадки на 20 %, мы получили значительное увеличение удерживающей способности при незначительном повышении гидравлического сопротивления. Тем самым можно сказать, что сетчатая насадка с легкостью способна заменить целый ряд промышленных насадок [3].

В ходе практического исследования были использованы два вида оросителя: капельный и струйный, с увеличенным количеством точек орошения. Способ орошения напрямую влияет на качество самого процесса теплообмена. При капельном орошении несколько увеличивается количество удерживаемой жидкости в сетчатой насадке и уменьшается гидравлическое сопротивление. Это можно объяснить тем, что водораспределитель орошает насадку преимущественно по центру, а воздух стремится проходить ближе к стенкам по пути наименьшего

гидравлического сопротивления. При струйном орошении количество удерживаемой жидкости в насадке уменьшается. Объясняется это тем, что тонкие струйки жидкости пробивают верхние слои сетки и, проникая в насадку на некоторую глубину, только там начинают разбиваться в капли. Капельный унос при больших скоростях гораздо меньше, чем при капельном орошении. Эксперимент показал, что сетчатая насадка является чувствительной к виду орошения и поперечное перемешивание осуществляется менее интенсивно, чем в других промышленных насадках.

Чтобы избавиться от повышенной чувствительности сетчатой насадки к виду орошения, было предложено создать поверхностный распределительный слой из нерегулярной насадки. Из опытных данных с распределительным слоем из колец Рашига $15 \times 15 \times 3$ (уложенные в навал) видно, что при низких скоростях воздуха (менее 1,5 м/с) увеличивается поперечное распределение жидкости в верхнем слое и обеспечивает равномерное распределение жидкости по сетчатой насадке. Но при скоростях более 1,5 м/с жидкость не успевает проходить через распределительный слой колец Рашига и начинает скапливаться там, повышая гидравлическое сопротивление и создавая эмульгационный слой. Данный эффект также может найти свое промышленное применение во многих процессах теплообмена.

Наивысшую эффективность показал распределительный слой колец Палля. Они имеют меньшее гидравлическое сопротивление и обладают высоким поперечным перемешиванием, что обеспечивает равномерное распределение жидкости по насадке и делает ее нечувствительной к различным видам орошения. В ходе исследования наблюдалось более равномерное распределение жидкости по насадке, увеличение удерживающей способности и небольшое увеличение гидравлического сопротивления (менее 10 %) в диапазоне скоростей воздуха больше 1,5 м/с. Это свидетельствует о том, что в этом диапазоне начинается турбулизация потоков, и за счет этого увеличивается количество удерживаемой жидкости в насадке при минимальных потерях гидравлического сопротивления. Данный метод обеспечивает равномерное распределение жидкости в насадке, интенсифицируя процесс тепло-массопередачи, и снижает чувствительность сетчатой насадки к различным видам орошения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сокол, Б. А. Насадки массообменных колонн / Б. А. Сокол, А. К. Чернышов, Д. А. Баранов ; под ред. Д. А. Баранова. – М. : ЗАО «Инфохим», 2009. – 358 с.
2. Меренцов, Н. А. Экспериментальная установка для исследования тепло – массообменных процессов в насадочных устройствах градири / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, Я. А. Орлянкина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (88) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии» ; вып. 5). – С. 78–80.
3. П. м. 117317 Российская Федерация, МПК В01J19/32. Насадка для массообменного аппарата / Голованчиков А. Б., Воротнева С. Б., Меренцов Н. А., Дулькина Н. А., Залипаева О. А., Шамьянова А. П. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – 2012106991/05 ; заяв. 27.02.2012 ; опубл. 27.06.2012 , Бюл. № 18 (IV ч.).
4. Меренцов, Н. А. Испарительное охлаждение капель жидкости в воздушном потоке / Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков, Я. А. Орлянкина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (88) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии» ; вып. 5). – С. 62–65.
5. Меренцов, Н. А. Автономные системы оборотного водоснабжения для малотоннажных химических производств / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии» ; вып. 4). – С. 102–104.
6. Голованчиков, А. Б. Моделирование гидромеханических и тепло- и массообменных процессов в вентиляторной градире с капельным орошением и проволоочной насадкой / А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, В. А. Балашов, Я. А. Орлянкина // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 10 (97) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 14). – С. 22–28.
7. Рябчук, Г. В. Гидродинамика пленочных абсорберов с регулярной насадкой / Г. В. Рябчук [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (49) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии» ; вып. 2). – С. 54–56.
8. Голованчиков, А. Б. Моделирование нестационарного падения сферической капли в поле сил тяжести / А. Б. Голованчиков, В. А. Балашов, Н. А. Меренцов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4 (91) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2012. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах» ; вып. 13). – С. 8–12.

УДК 532.135

В. М. Шаповалов

НАНЕСЕНИЕ УПРУГОЙ РАКЛЕЙ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ НА ГОРИЗОНТАЛЬНУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

Волжский политехнический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета

Поставлена гидроупругая задача динамического взаимодействия сходящегося течения и упругой пластины. Течение стационарное, изотермическое. Силы собственного веса и инерции не учитываются. Решение получено в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка. Представлены результаты численного анализа решения.

Ключевые слова: изгибная жесткость, скорость, вязкость, давление, момент, поперечная сила.

V. M. Shapovalov

DRAWING AN ELASTIC SQUEEGEE VISCOUS LIQUID ON A HORIZONTAL SURFACE

Volgograd Polytechnic Institute (branch)
Volgograd State Technical University

Posed the problem of dynamic interaction hydroelasticity convergent flow and elastic plate. For stationary, isothermal. Force of its own weight and inertia are not counted. The solution is obtained in the form of a system of differential equations of the first order. The results of numerical analysis solutions.

Keywords: flexural stiffness, speed, viscosity, pressure, torque, transverse force.

Течение имеет место при нанесении составов способом втирания [1]. Одной из стенок канала является обрабатываемый материал, а другой – рабочий орган наносящего устройства в виде ножа (ракли), пластины или вала. Канал имеет сужающееся сечение.

Если для каландров из-за больших распорных усилий и потребляемых мощностей определяющими являются энергосиловые и механические расчеты, то для процессов нанесения составов типа клеев или паст возникающие усилия относительно невелики, и при проектировании можно ограничиться их приближенной оценкой. Более значимыми параметрами становятся толщина наносимого покрытия и давление в зоне течения.

Случай клинообразного зазора с жесткими стенками рассмотрен в работе [1]. В работе [2] рассмотрено течение в клинообразном зазоре, с подпружиненной стенкой, имеющей возможность перемещаться, сохраняя угол своего наклона.

В настоящей работе рассмотрен случай гиб-

кой упругой ракли (типа кисти), закрепленной консольно и имеющей возможность изгибаться под действием давления со стороны жидкости. Насколько известно автору, подобное течение до настоящего времени не рассматривалось. Близкий по смыслу случай вала из упругого материала рассмотрен в работе [3].

Схема течения представлена на рис. 1. Декартова система координат привязана к точке заделки ракли (слева, сверху, заштрихована). Ракля представляет гибкую пластину, длиной ℓ . Нижняя горизонтальная плоскость движется в направлении оси x со скоростью V . Ось y направлена вертикально вверх. Величина начального зазора – h_0 , конечного – h_1 , наносимого покрытия – h_∞ . Ширина ракли (перпендикулярна плоскости рисунка) – B . Требуется найти форму ракли, толщину наносимого покрытия, давление в зазоре. Представлена стационарная задача силового взаимодействия вязкой жидкости с упругой деформируемой стенкой, то есть задача гидроупругости.

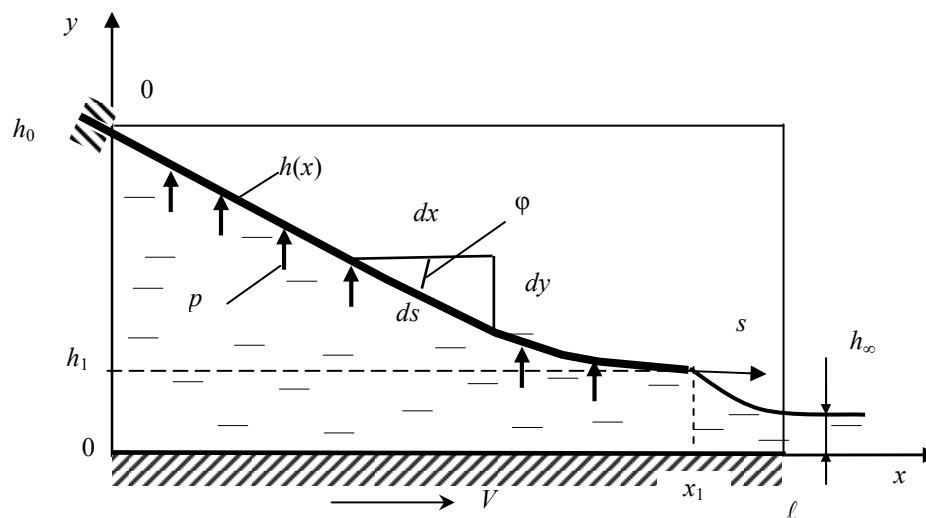


Рис. 1. Расчетная схема

Считаем наносимый состав несжимаемой ньютоновской жидкостью. Течение изотермическое, плоскопараллельное. Силы тяжести и инерции не учитываем. Протяженность зоны течения больше высоты зазора ($\ell > h_0$) так, что выполняется условие $\partial p / \partial x > \partial p / \partial y$. Поэтому полагаем $p(x)$, $\partial p / \partial y = 0$.

Течение в зазоре описывается уравнением Навье – Стокса и интегральным условием неразрывности [2]

$$\frac{dp}{dx} = \mu \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2}, \quad Q = B \int_0^h v_x dy = \text{const}, \quad (1)$$

где x, y – декартовы координаты, p – давление, v_x – осевая компонента скорости, Q – объемный расход, μ – вязкость жидкости.

Граничные условия для скорости – условие прилипания жидкости к ограничивающим поверхностям:

$$y = 0, \quad v_x = V; \quad y = h(x), \quad v_x = 0, \quad (2)$$

где $h(x)$ – уравнение поверхности ракли.

Согласно уравнению движения (1), давление определено с точностью до постоянной составляющей. Поэтому без снижения общности можно положить атмосферное давление равным нулю:

$$x = 0, \quad p = 0; \quad x = x_1, \quad p = 0. \quad (3)$$

Здесь величина x_1 характеризует положение конца ракли; пока нам не известна. Рассматриваем течение в области $0 \leq x \leq x_1$, $0 \leq y \leq h(x)$.

Проинтегрировав уравнение движения в (1) по y , с учетом граничных условий (2), получим выражение для осевой скорости жидкости:

$$v_x = \frac{1}{2\mu} \frac{dp}{dx} (y^2 - hy) + V \left(1 - \frac{y}{h} \right). \quad (4)$$

Проинтегрировав выражение (4) согласно второму уравнению в (1), получим уравнение для давления:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{6\mu V}{h^2} - \frac{12Q\mu V}{Bh^3}. \quad (5)$$

Рассматриваем раклю как упругую консольную балку, зашпеленную на левом конце (рис. 1) и нагруженную распределенной нагрузкой со стороны жидкости. Поскольку на верхнюю поверхность ракли действует атмосферное давление, под распределенной нагрузкой будем понимать избыточное гидродинамическое давление в зоне течения $p(x)$. Растяжение упругой оси не учитываем, поскольку соответствующие продольные деформации растяжения значительно меньше изгибных перемещений. Для упругой оси справедливы геометрические соотношения (рис. 1)

$$\frac{ds}{dx} = \sqrt{1 + \left(\frac{dh}{dx} \right)^2}, \quad \operatorname{tg}(\varphi) = dh/dx, \quad (6)$$

где s – линия упругой оси (в точке закрепления значения параметров: $x = 0$, $y = h_0$, $s = 0$, а на свободном конце ракли: $x = x_1$, $y = h_1$, $s = \ell$), φ – угол наклона.

Имеет место чистый изгиб ракли. Пренебрегаем влиянием поперечной силы на деформацию ракли. Дифференциальное уравнение изогнутой оси ракли имеет вид [4]:

$$\frac{d^2 h}{dx^2} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{dh}{dx} \right)^2} \right\}^{-1} = \frac{M}{EJ}, \quad (7)$$

где $M(x)$ – изгибающий момент, EJ – жесткость ракли, E – модуль упругости, $J = B\delta_1^3/12$ – момент инерции, δ_1 – толщина ракли.

Левая часть уравнения (7) характеризует локальную кривизну ракли. Перед моментом (в правой части) принят знак плюс, поскольку вогнутость кривой обращена в сторону положительного направления оси y . Изгибные деформации ракли значительны, поэтому в выражении для кривизны сохраняем иррациональность.

Жидкость в зазоре создает распределенную нагрузку, приложенную к нижней поверхности ракли, в то же время уравнение (7) описывает упругую ось ракли ($h(x)$). Нейтральный слой совпадает с упругой осью, поскольку эти линии эквидистантны и расстояние между ними $\delta_1/2$. Согласно уравнению (7), важна изгибная жесткость ракли, которая может быть идентична для различных сочетаний модуля упругости и момента инерции. Далее считается, что момент инерции мал, а модуль упругости велик. При этом упругая ось будет весьма близка к нижней поверхности ракли. Практически $h(x)$ характеризует изогнутую ось, что и отражено в записи уравнения (7).

Уравнение (7) необходимо дополнить дифференциальными зависимостями [4]:

$$\frac{dM}{dx} = q(x), \quad \frac{dq}{dx} = Bp, \quad (8)$$

где $q(x)$ – поперечная сила.

Уравнения (6)–(8) необходимо дополнить граничными условиями

$$\begin{aligned} x = 0: \quad h = h_0, \quad s = 0, \quad q = q_0, \quad M = M_0, \\ x = x_1: \quad h = h_1, \quad s = \ell, \quad q = 0, \quad M = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

На свободном конце ракли поперечная сила и момент равны нулю.

Следует перейти к безразмерным переменным:

$$\begin{aligned} \{\delta, \delta_1\} &= \frac{\{h, h_1\}}{h_0}, \quad \{X, X_1, \varepsilon, \xi\} = \frac{\{x, x_1, h_0, s\}}{\ell}, \\ P &= \frac{ph_0^2}{6\ell\mu V}, \quad Q_1 = \frac{2Q}{h_0VB}, \quad \{m, m_0\} = \frac{\{M, M_0\}}{6\mu V B \ell}, \\ \{q_1, q_{10}\} &= \frac{\{q, q_0\}}{6\mu VB}, \quad k = \frac{6\ell^2\mu VB}{EJ}. \end{aligned} \quad (10)$$

Параметр k характеризует безразмерную «гибкость» ракли. При $k \rightarrow 0$ ракля абсолютно жесткая (толстая стальная пластина), а при $k \rightarrow \infty$ бесконечно гибкая (ткань, тонкая резина). В последнем случае задача теряет смысл, поскольку ракля принимает горизонтальное положение.

Считается длина ракли фиксированной (ℓ). При этом удобно перейти от переменной x к ξ . С учетом обозначений (10) уравнения (3), (5)–(9) примут вид

$$\begin{aligned} \frac{dX}{d\xi} &= \cos \varphi, \quad \frac{d\delta}{d\xi} = \frac{\sin \varphi}{\varepsilon}, \quad \frac{dP}{d\xi} = \frac{(\delta - Q_1) \cos \varphi}{\delta^3}, \\ \frac{d\varphi}{d\xi} &= km, \quad \frac{dq_1}{d\xi} = \frac{P}{\varepsilon^2} \cos \varphi, \quad \frac{dm}{d\xi} = q_1 \cos \varphi; \end{aligned} \quad (11)$$

$$\xi = 0: \quad X = 0, \quad \delta = 1, \quad P = 0, \quad \varphi = \varphi_0, \\ q_1 = q_{10}, \quad m = m_0; \quad (12)$$

$$\xi = 1: \quad X = X_1, \quad \delta = \delta_1, \quad P = 0, \\ \varphi = \varphi_1, \quad q_1 = 0, \quad m = 0. \quad (13)$$

Имеется задача Коши для шести дифференциальных уравнений. Величины Q_1 , q_{10} , m_0 неизвестны и их надо подбирать (метод стрельбы) так, чтобы с заданной точностью выполнялись условия на конце зоны течения ($\xi = 1 : P = 0$, $q_1 = 0$, $m = 0$). Параметр φ_0 , характеризующий начальный наклон ракля (угол заделки), задается априорно. При отладке программы можно использовать тест (начальное приближение): $\varphi_0 = 0$, $\delta_1 = 1$, $q_{10} = 0$, $m_0 = 0$, $P = 0$.

Используя условия (3) и уравнение (5), находится расход жидкости. Разделив переменные в уравнении (5) и проинтегрировав с учетом условий (3), получается выражение для объемного расхода:

$$Q = \frac{BV}{2} \int_0^{x_1} \frac{dx}{h^2} \left(\int_0^{x_1} \frac{dx}{h^3} \right)^{-1}.$$

С другой стороны для расхода жидкости на покрытии (на движущейся подложке), можем записать $Q = BV h_\infty$. После несложных преобразований с учетом обозначений (10) получим выражение для толщины покрытия

$$\frac{h_\infty}{h_0} = \frac{1}{2} Q_1.$$

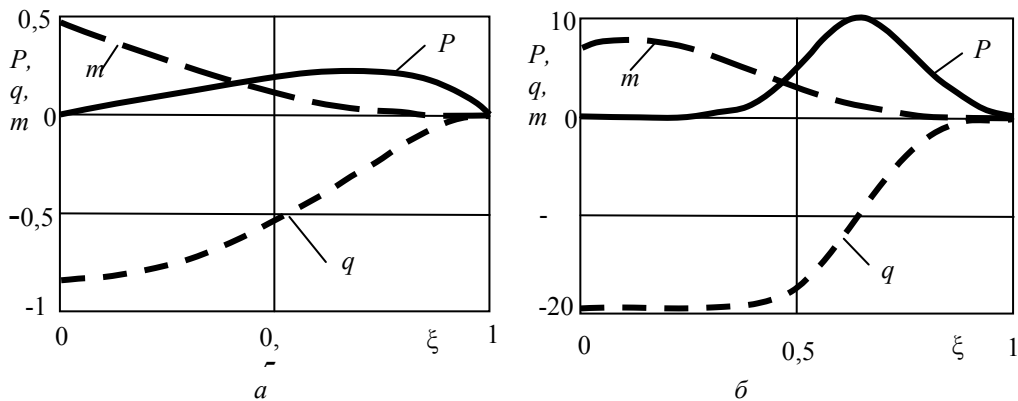


Рис. 2. Распределение давления, момента и поперечной силы по длине ракля при $\varphi_0 = -0,3$ (а) и $\varphi_0 = -2,1$ (б)

Анализ задачи выполнен для следующих условий: $\varepsilon = 0,4$; $\ell = 0,1$ м; $\mu = 10$ Па·с; $V = 0,5$ м/с; $E = 0,5 \times 10^7$ Па; $B = 1$ м; $\delta_1 = 10^{-2}$ м; $k = 0,6$; $-0,3 \geq \varphi_0 \geq -2,1$. Модуль упругости отвечает резине [5]. Расчеты выполнены в среде Mathcad. Программа включала алгоритм: решение системы шести дифференциальных уравнений и поиск минимума функции $f(Q_1, q_{10}, m_0) = \sqrt{m(\xi=1)^2 + q(\xi=1)^2 + P(\xi=1)^2}$. Для поиска минимума использовался алгоритм «Квази-Ньютон». Время расчета одного варианта поиска экстремума не превышало две минуты. Погрешность вычислений не превышала 10^{-3} . С увеличением начального угла наклона сходимость схемы поиска минимума ухудшалась, особенно при $|\varphi_0| > 1,5$.

С увеличением начального угла наклона ракля (φ_0), толщина покрытия (Q_1) монотонно уменьшается, но поперечная сила (q_{10}) и момент в заделке (m_0) увеличиваются.

На рис. 2 представлены эпюры продольного распределения давления, момента и поперечной силы для двух углов наклона ракля. С увеличением абсолютной величины наклона ракля изменяется характер эпюры моментов. Появляется экстремум в окрестности заделки. Эпюра давления качественно не изменяется, но экстремум давления становится более ярко выраженным. Из рис. 2 видно, что в области $0 < \xi < 0,3$ течение отсутствует. Интересно отметить, что на указанном участке поперечная сила сохраняет постоянное значение, а момент – имеет максимум.

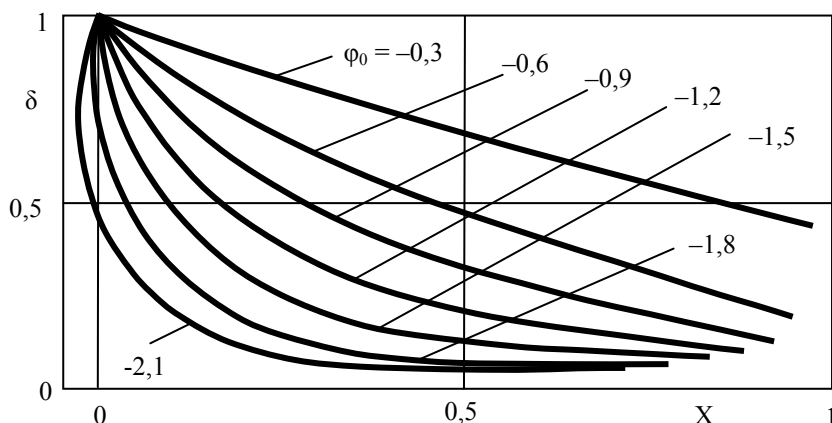


Рис. 3. Конфигурации ракли при различных начальных углах ее наклона при $\varepsilon = 0,4$

На рис. 3 представлены конфигурации ракли при различных углах заделки. Для получения геометрического соответствия высота графика относится к его длине как 4:10, что отвечает заданному значению параметра ε . Если при $\varphi_0 = -0,3$ прогиб ракли почти не заметен, то при больших углах начального наклона ракли изгибается существенно. При этом толщина зоны течения уменьшается, соответственно уменьшается и толщина наносимого покрытия. В предельном случае «встречного выпучивания» $\varphi_0 = -2,1$ угол наклона свободного конца ракли $\xi = 1$, $\varphi_1 = 0,00752$. То есть имеет место поднятие свободного конца ракли. Это является существенным научным результатом исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коновалов, В. И. Пропиточно-сушильное и клеепромазочное оборудование / В. И. Коновалов, А. М. Коваль. — М.: Химия, 1989. — 224 с.
2. Шаповалов, В. М. Течение аномально вязкой жидкости в клинообразном зазоре с упругой стенкой / В. М. Шаповалов // Известия ВолГТУ : межвуз. сб. науч. тр. / ВолГТУ. — Волгоград, 2010. — (Серия «Реология процессы и аппараты химической технологии»). — С. 74–77.
3. Беспорточный, А. И. Асимптотические режимы гидродинамического контакта упругого цилиндра и жесткого полупространства / А. И. Беспорточный // Труды МФТИ. — 2013. — Т. 5, № 2. — С. 4–12.
4. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. — М.: Наука, 1976. — 608 с.
5. Кошкин, Н. И. Справочник по элементарной физике / Н. И. Кошкин, М. Г. Ширкевич. — М.: Наука, 1965. — 248 с.

УДК 628.004.8

Г. Г. Русакова, А. В. Демьянов, М. М. Русакова, Е. Д. Парахневич, Д. В. Парахневич

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛАНИРОВАНИЕМ ЭКСПЕРИМЕНТА ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ИЗВЛЕЧЕНИЯ ЭФИРНОГО ГОРЧИЧНОГО МАСЛА ИЗ ПРОДУКТОВ ПЕРЕРАБОТКИ СЕМЯН ГОРЧИЦЫ ПОСЛЕ ГИДРОЛИЗА В НИХ СИНИГРИНА

Волгоградский государственный технический университет

В статье рассматриваются параметры извлечения эфирного горчичного масла из отходов горчично-маслобойного производства.

Ключевые слова: отходы горчично-маслобойного производства, эфирное горчичное масло, параметры извлечения

G. G. Rusakova, A. V. Demyanov, M. M. Rusakova, E. D. Parakhnevich, D. V. Parakhnevich

EXPERIMENT PLANNING OF DEFINITION EXTRACTION PROCESS PARAMETERS OF ESSENTIAL MUSTARD OIL PRODUCTS OF SEEDS MUSTARD PROCESSING AFTER SINIGRIN HYDROLYSIS

Volgograd State Technical University

This paper presents the parameters sinigrin extraction from the by-products of mustard oil seeds processing process.

Keywords: waste of mustard and oil milling production, essential mustard oil, extraction parameters

Анализ результатов проведенных экспериментальных исследований говорит о том, что на степень извлечения эфирного горчичного масла после гидролиза синигрина в отходах, образующихся при переработке семян горчицы, влияет температура, количество воды, подаваемой на смачивание очищаемых продуктов, время извлечения эфирного горчичного масла и другие факторы. В связи с этим представляется целесообразным детальное изучение влияния ряда факторов на процесс очистки отходов, образующихся при переработке семян горчицы от эфирного горчичного масла. При этом ставилась задача определения условий, обеспечивающих наибольшую степень их очистки [1–4].

Определение параметров режима извлечения эфирного горчичного масла из отходов, образующихся при переработке семян горчицы, проводилось планированием эксперимента методом крутого восхождения [5], который заключается в нахождении условий, при которых параметр оптимизации – функция отклика (остаточное содержание эфирного горчичного масла) может быть оптимальным.

Между параметром оптимизации и факторами (температура, соотношение фаз, время контакта фаз и др.) существует функциональная зависимость:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_n), \quad (1)$$

где Y – функция отклика; $X_1, X_2, \dots, X_n$ – факторы.

Для большинства практических задач по отысканию области экстремального значения функции, достаточно линейного приближения или неполного квадратичного.

Неполная квадратичная модель или уравнение регрессии:

$$Y = b_0X_0 + b_1X_1 + \dots + b_{12}X_1X_2 + \dots + b_{123}X_1X_2X_3, \quad (2)$$

где $b_0, b_1, \dots, b_n$ – коэффициенты уравнения регрессии; b_{12}, b_{13}, b_{123} – коэффициенты при взаимодействии факторов.

Для представления результатов эксперимента в виде линейной модели каждый фактор испытывается в двух уровнях – верхнем и нижнем.

Если для проведения эксперимента перебираются все возможные сочетания всех n факторов, при этом каждый из них испытывается на обоих уровнях, то число опытов полного факторного эксперимента равно 2^n .

Эксперимент начинается с составления матрицы планирования. Значения факторов на верхнем уровне обозначается (+), на нижнем (–).

Для удобства математической обработки данных эксперимента все факторы кодируются.

Матрица планирования обладает ортогональностью и, соответственно планирование является ортогональным. При таком планировании все коэффициенты уравнения регрессии находятся независимо друг от друга по формуле:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^n X_i Y_i}{N}, \quad (3)$$

где N – число опытов; Y_i – значение параметров оптимизации в i -том опыте; X_i – кодированное значение i -той переменной для i -той строки, равное ± 1 .

Найденным коэффициентам регрессии дается статистическая оценка их значимости, а затем статистически оценивается уравнение регрессии в целом.

Если оно соответствует статистическим критериям, то оно отвечает на вопрос: при каких значениях факторов параметр оптимизации может принимать наилучшее значение. Следовательно, поставленная задача решена.

Задачей проводимого нами эксперимента была очистка продуктов переработки семян горчицы от эфирного горчичного масла до его остаточного содержания не более 0,12 %.

Выбор основных факторов, влияющих на эксперимент, центра плана и интервала варьирования, основывался на предварительных экспериментальных данных. Переменные кодировались следующим образом:

X_1 – содержание сухого вещества в гидролизате, %;

X_2 – температура отпаривания эфирного горчичного масла, °C;

X_3 – время отпаривания эфирного горчичного масла, мин.

Параметр оптимизации Y – остаточное содержание эфирного горчичного масла в продуктах переработки семян горчицы

Для определения ошибки (дисперсии) опытов необходимо проводить несколько параллельных опытов для каждой строки матрицы планирования (обычно – 3).

Согласно данным [6], полный факторный эксперимент типа 2^n можно проводить с параллельными опытами в одной точке факторного пространства (на нулевом уровне), что и было сделано.

С целью определения параметров режима извлечения эфирного масла из продуктов переработки семян горчицы, их подвергали очистке

при условиях, указанных в соответствующей строке матрицы. Очищенные продукты переработки семян горчицы анализировали на содержание эфирного масла по методике [ГОСТ 13979.7 – Жмыхи, шроты и горчичный порошок. Метод определения аллилизотиоцианатов (аллилового масла)]. Результаты экспериментов и матрица их планирования приведены в табл. 1.

На основании полученных данных рассчитано среднее значение функции отклика $\hat{Y}_i = 67,45$.

Коэффициенты регрессии определялись по формуле (4.3):

$$\begin{aligned} b_0 &= 38,68; & b_1 &= -18,62; \\ b_2 &= -14,62; & b_3 &= -5,41; \\ b_{12} &= 7,1; & b_{23} &= 0,033; \\ b_{13} &= 1,33; & b_{123} &= -0,345. \end{aligned}$$

Таблица 1

Матрица планирования и результаты эксперимента

Наименование		X ₁ Содержание сухого вещества, %	X ₂ Темпера- тура, °С	X ₃ Время, мин	Параметры оптимизации	
Нулевой уровень		40	90	25		
Интервал варьирования		30	10	5		
Верхний уровень		10	80	20		
Нижний уровень		70	100	30		
Номер опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	Y	$\hat{Y}$
1	2	3	4	5	6	7
1	+	+	+	+	8,10	7,13
2	+	–	+	+	29,25	30,17
3	+	+	–	+	23,80	22,17
4	+	–	–	+	71,87	73,61
5	+	+	+	–	16,9	17,95
6	+	–	+	–	41,99	40,99
7	+	+	–	–	31,38	32,99
8	+	–	–	–	86,10	84,43
9	+	0	0	0	67,94	–
10	+	0	0	0	66,10	–
11	+	0	0	0	66,31	–

Дисперсия воспроизводимости рассчитывается по формуле:

$$S^2_m = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{m-1}, \quad (4)$$

где m – число параллельных опытов; Y_i – отклик i -того компонента; $\bar{Y}$ – среднее значение отклика.

Дисперсию коэффициентов регрессии рассчитывали по формуле:

$$S_i^2 = \frac{S_{i0}^2}{n}, \quad (5)$$

где n – число опытов.

Ошибка опыта равна:

$$S_i = \sqrt{S_i^2}. \quad (6)$$

Расчетные данные:

дисперсия воспроизводимости $S_{i0}^2 = 0,98$;

дисперсия коэффициентов регрессии $S_i^2 = 0,349$;

ошибка воспроизводимости $S_i = 0,99$.

Значимость коэффициентов регрессии оценивалась по критерию Стьюдента:

$$t = \frac{b_i}{S_i}. \quad (7)$$

t -критерии Стьюдента:

$$t_0 = 110,8; \quad t_1 = 53,3; \quad t_2 = 41,9; \quad t_3 = 15,5;$$

$$t_{12} = 20,3; \quad t_{23} = 0,09; \quad t_{13} = 3,81;$$

$$t_{123} = 0,99; \quad t \text{ табл.} = 4,3 [1].$$

В результате обработки экспериментальных данных и отбора значимых коэффициентов получено математическое описание процесса очистки отходов горчично-маслобойного производства от эфирного горчичного масла:

$$Y = 38,68 - 18,62 X_1 - 14,62 X_2 - 5,41 X_3 + 7,1 X_2 X_1.$$

Адекватность уравнения определяли по критерию Фишера:

$$F = \frac{S_{\text{ост}}^2}{S_i^2}, \quad (8)$$

где $S_{\text{ост}}^2$ – остаточная дисперсия.

$$S_{\text{ост}}^2 = \frac{m \left[\sum (y_i - Y_i)^2 \right]}{n - \ell}, \quad (9)$$

где n – число опытов; ℓ – число значимых коэффициентов в уравнении регрессии; m – число повторений; Y_i – значение параметров оптимизации, предсказанное уравнением для условий i -того опыта.

Для проверки адекватности уравнения были найдены критерии Фишера и остаточная дисперсия:

$$S_{\text{ост}}^2 = 5,04; \quad F_{\text{расч}} = 5,14; \quad (10)$$

$$F_{\text{табл}} = 19,2; \quad (f_0 = 2; \quad f_{\text{ад}} = 5).$$

Полученное уравнение адекватно описывает модель, поскольку выполняется требование

$$F_{\text{расч}} < F_{\text{табл}}.$$

На основании расчетных данных уравнения для параметра оптимизации Y адекватно описывают модель.

Адекватное уравнение позволяет перейти

к нахождению оптимума путем последовательного движения по градиенту.

Получив адекватное уравнение, переходим к «крутому восхождению». Крутое восхождение – движение по градиенту. Расчет его проводили по следующей методике:

1. Находили для каждого фактора произведение интервала варьирования на коэффициент регрессии $b_i \cdot \Delta x_i$;

2. Выбирали фактор, у которого наибольшее по абсолютному значению коэффициент регрессии и задавали для него величину шага;

3. Рассчитывали величину шагов для других переменных.

Для движения по градиенту необходимо, чтобы шаг одного фактора был строго пропорционален шагам остальных факторов. Поэтому, если величина шага для одного компонента выбирается произвольно, то для других шаги должны быть соизмеримы с этим числом. Коэффициент пропорциональности равен:

$$C = \frac{\text{шаг}}{b_i \cdot \Delta x_i}. \quad (11)$$

4. Рассчитывали значение каждого фактора. Результаты расчета приведены в табл. 4.2.

Таблица 2

Расчет «крутого восхождения»

Наименование		X ₁	X ₂	X ₃
Нулевой уровень		40	90	25
Интервал варьирования		30	10	5
Коэффициент регрессии		– 18,62	– 14,62	– 5,41
Произведение $b_i \cdot \Delta x_i$		– 372,4	– 146,2	– 27,5
Пропорциональный расчет шагов		– 9,99	– 3,81	– 0,73
Округление		– 10	– 4	– 1
Перемена знака (поиск минимума)		10	4	1
Шаги	X1	X2	X3	Y
1	30	86	24	18,1
2	50	94	26	10,1

За новый центр плана приняты условия шага 2 (табл. 3).

Для второй серии опытов рассчитаны следующие показатели:

$$Y = 10,33; \quad S_{\text{ивостр}}^2 = 0,032; \quad S_{\text{ивостр}} = 0,18; \quad S_{\text{востр}} = 0,064; \quad (12)$$

$$b_0 = 9,85; \quad b_1 = -3,74; \quad b_2 = -3,59; \quad b_3 = -1,26$$

$$b_{12} = 0,278; \quad b_{23} = -0,154; \quad b_{13} = -0,178; \quad b_{123} = 0,231;$$

$$t_0 = 153,9; \quad t_1 = 58,43; \quad t_2 = 56,09; \quad t_3 = 19,68$$

$$t_{12} = 4,34; \quad t_{23} = 2,4; \quad t_{13} = 2,78; \quad t_{123} = 3,61;$$

$$S_{\text{ост}}^2 = 0,255; \quad F_{\text{табл}} = 19,2; \quad F_{\text{расч}} = 7,97; \quad (f_0 = 2; f_{\text{ад}} = 1).$$

Таблица 3

Матрица планирования и результаты эксперимента

Наименование		X ₁ Содержание сухого вещества, %	X ₂ Темпера- тура, °С	X ₃ Время, мин	$Y = 9,85 - 3,74 X_1 - 3,59 X_2 - 1,26 X_3 + 0,278 X_1 X_2$	
Нулевой уровень		50	90	25		
Интервал варьирования		10	5	10		
Верхний уровень		60	95	15		
Нижний уровень		40	90	35		
Номер опыта	X ₀	X ₁	X ₂	X ₃	Y	Ŷ
1	2	3	4	5	6	7
1	+	+	+	+	1,2	1,538
2	+	–	+	+	7,96	8,462
3	+	+	–	+	8,23	8,162
4	+	–	–	+	16,4	16,198
5	+	+	+	–	3,8	4,058
6	+	–	+	–	11,5	10,982
7	+	+	–	–	10,58	10,682
8	+	–	–	–	18,5	18,718
9	+	0	0	0	10,13	–
10	+	0	0	0	10,37	–
11	+	0	0	0	10,48	–

Полученное уравнение

$$Y = 9,85 - 3,74 X_1 - 3,59 X_2 - 1,26 X_3 + 0,278 X_1 X_2 \quad (13)$$

адекватно описывает модель, что позволяет продолжать варьировать параметрами и проводить повторение экспериментов. Поскольку, из анализа результатов второй серии проведенных экспериментов видно, что в одном из опытов (опыт 1) достигается нормируемый показатель по остаточному содержанию эфирного горчичного масла 1,2 г/кг (0,12 %) в продуктах переработки семян горчицы, условия проведения которого можно считать оптимальными для их очистки, а именно: содержание сухого вещества в гидролизате – 60 %, температура – 95 °С, время отпаривания – 15 минут.

Данные с применением теории планирования эксперимента подтвердили результаты исследований, полученных по двухфакторной модели [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. М. 149461 Российская Федерация, МПК C11B13/00. Установка для перегонки эфирного горчичного масла из гидролизата / Русакова Г. Г. [и др.]. – № : 2014112404/13, 31.03.2014; опубл. 10.01.15 г. – 5 с.
2. Русакова, Г. Г. Технологические процессы выделения изотиоцианатов из растительного сырья: монография / Г. Г. Русакова, М. М. Русакова, В. А. Хомутов. – Волгоград: ИПК «Нива» ФГОУ ВПО ВГСХА, 2010. – 320 с.
3. Русакова, Г. Г. Технологические процессы утилизации токсичных отходов горчично-маслобойного производства: монография / Г. Г. Русакова [и др.]. – Волгоград, 2008. – 178 с.
4. 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.
5. Ахназарова, С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической промышленности / С. Л. Ахназарова, В. В. Кафаров. – М.: Высшая школа, 1978. – 319 с.
6. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – Киев: Высшая школа, 1976. – 123 с.

УДК 661.7:66.03

*О. А. Тишин, Е. В. Климова***ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ХИМИЧЕСКОЙ АБСОРБЦИИ
С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ НА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТАХ****Волжский политехнический институт (филиал)
Волгоградского государственного технического университета**

Представлена математическая модель стационарного режима работы насадочного хемосорбера. Изложена методика проведения лабораторной работы на компьютерной модели. Представлены результаты компьютерных экспериментов.

Ключевые слова: хемосорбция, лабораторная работа, модель.

*O. A. Tishin, E. V. Klimova***RESEARCH OF CHEMICAL ABSORPTION PROCESS BY MEANS
OF COMPUTER MODEL AT LABORATORY WORKS****Volgograd Polytechnic Institute (branch)
Volgograd State Technical University**

The mathematical model of a stationary mode of operating of a packed chemical absorber is presented. The technique of carrying out laboratory experiments on computer model is stated. Results of computer experiments are presented.

Keywords: chemisorption, laboratory work, model.

Математическое моделирование давно является основой для проведения научных исследований и не ограничивает исследователя в экспериментах. Благодаря техническому прогрессу компьютерное моделирование позволяет за время, отведенное на лабораторную работу, провести множество вычислительных экспериментов, проанализировать результаты и принять решение.

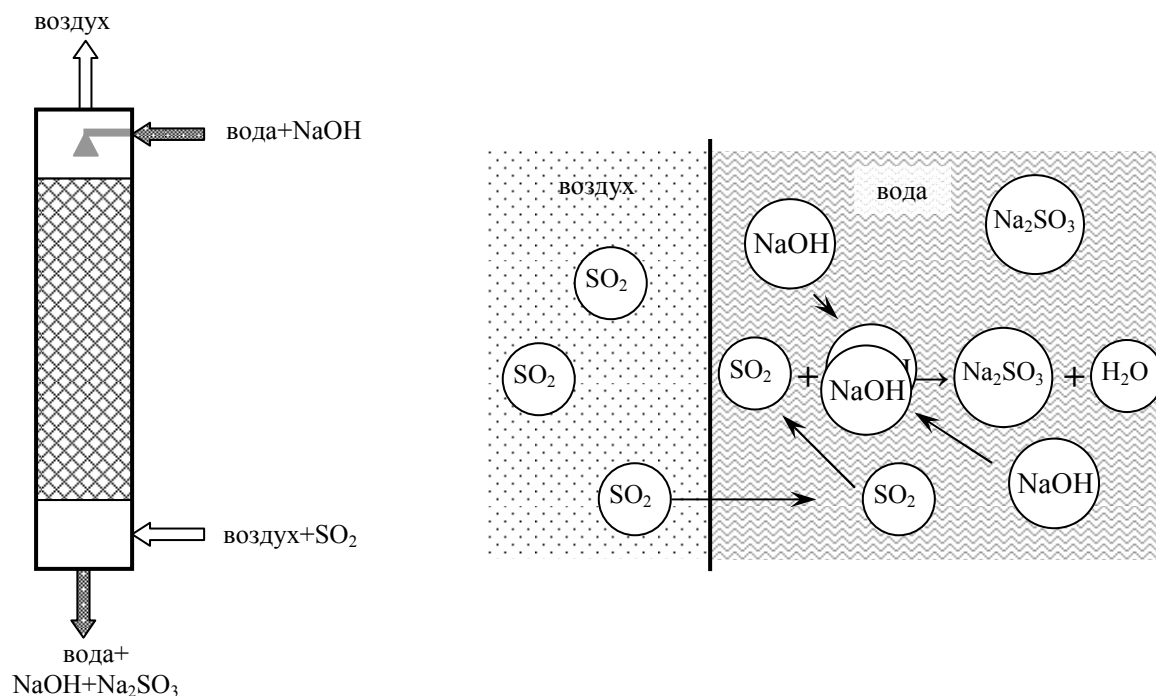
Использование компьютерных моделей также позволяет сократить затраты на приобретение дорогостоящего лабораторного оборудования, снижается уровень безопасности работ в учебных лабораториях, появляется возможность исследования объектов, процессов или явлений, непосредственное изучение которых по тем или иным причинам невозможно в стенах учебного заведения [1].

Лабораторная работа выполняется в рамках изучения дисциплины «Процессы и аппараты защиты окружающей среды». Химическая абсорбция или хемосорбция – один из способов очистки газовых выбросов промышленных предприятий применяется в том случае, когда концентрация улавливаемых примесей мала. Одной из проблем является удержание уловленных компонентов (абсорбат) в абсорбенте. Благодаря химической реакции вместо абсорбата в жидкой фазе остаются нелетучие компоненты, при этом поглощающая способность не падает.

Для хемосорбции газовых загрязнителей наиболее подходящими считаются насадочные (используются при небольшом количестве газовых выбросов) и тарельчатые колонны (при большом количестве газовых выбросов). В насадочных колоннах обеспечивается лучший контакт обрабатываемых газов с абсорбентом, чем в полых распылителях, благодаря чему интенсифицируется процесс массопереноса и уменьшаются габариты очистных устройств [2]. Насадочные и тарельчатые колонны наиболее распространены в промышленности.

В лабораторной работе моделируемым объектом является насадочный абсорбер очистки воздуха от диоксида серы (рис. 1). В нижнюю часть колонны подается для отчистки воздух с диоксидом серы, в верхнюю часть колонны – водный раствор NaOH. Диоксид серы абсорбируется водой на поверхности насадки и в жидкой фазе реагирует с гидроксидом натрия, образуя соль и воду. Из нижней части колонны отводят водный раствор NaOH и Na₂SO₃, из верхней – очищенный воздух.

Компьютерная модель разработана в среде Mathcad. При моделировании приняты следующие допущения: жидкая и газовая фазы движутся в режиме идеального вытеснения; насадка хорошо смачивается во всем объеме; газ распределяется равномерно по всему сечению колонны. Рассматривается стационарный режим работы хемосорбера.

Рис. 1. Насадочный абсорбер для отчистки воздуха от SO₂

Математическая модель, используемая в лабораторной работе, представлена дифференциальными уравнениями изменения концентрации поглощаемого компонента в газовой фазе, изменения концентрации реагента в жидкой фазе [3]:

$$\frac{dC_A}{dh} = -\frac{\beta_{xF} E_i C_A^*}{v_z} \cdot a;$$

$$\frac{dC_B}{dh} = -z \frac{\beta_{xF} E_i C_A^*}{v_{жс}} \cdot a.$$

Местный коэффициент ускорения процесса сорбции представлен формулой [3]:

$$E_i = 1 + \frac{D_B C_{Bo}}{z D_A C_{Ai}^*}.$$

Равновесная концентрация поглощаемого вещества в жидкой фазе [4]:

$$x_{Ai}^* = \frac{P}{E} y_{Ai}.$$

Значения концентраций необходимо выразить в нужной размерности по следующей схеме [4]: $C_{Ai} \rightarrow y_{Ai} \rightarrow x_{Ai}^* \rightarrow C_{Ai}^*$.

Скорость движения жидкой фазы определяется из условия смачивания всей поверхности насадки (коэффициент смачиваемости насадки равен единице). Минимальная плотность орошения, при которой обеспечивается полная смачиваемость поверхности насадки, равна [5]:

$$U_{\Psi_{a=1}} = \frac{a \cdot p}{3600 \cdot (1 - q \cdot a)} = v_{жс}.$$

Скорость движения газовой фазы в колонне определяется из уравнения [5]:

$$\lg \left[\frac{v_r^2 \cdot \rho_r}{g \cdot d_3 \cdot \varepsilon^2 \cdot \rho_{жс}} \left(\frac{\mu_{жс}}{\mu_r} \right)^{0,16} \right] = A - B \cdot \left(\frac{v_r}{v_{жс}} \right)^{1/4} \left(\frac{\rho_r}{\rho_{жс}} \right)^{0,375}.$$

Коэффициент массоотдачи в жидкой фазе и средний коэффициент диффузии вещества в растворах рассчитывались по формулам, приведенным в литературных источниках [5]. Характеристики насадки A , B , a , p и q взяты из справочных данных [5, 6].

Гидравлическое сопротивление насадки определяется по уравнению [6]:

$$\Delta P_{ор} = \Delta P_{сух} \cdot 10^{b \cdot U}.$$

Сопротивление сухой насадки равно:

$$\Delta P_{сух} = \lambda_c \frac{H}{d_3} \cdot \frac{\rho_r v^2}{2}.$$

Коэффициент λ_c учитывает не только потери на трение, но и дополнительные потери давления в местных сопротивлениях, возникающие в потоке газа при движении по искривленным каналам реального слоя насадки.

Установлено, например, что для слоя насадки, состоящего из беспорядочно засыпанных колец Рашига при ламинарном режиме движения газа в слое, когда $Re < 40$ [6]:

$$\lambda_c = \frac{140}{Re},$$

при турбулентном режиме движения газа, когда $Re > 40$:

$$\lambda_c = \frac{16}{Re^{0,2}}.$$

Лабораторная работа состоит из двух этапов: знакомство с математической моделью; выбор насадки по результатам вычислительных экспериментов.

На первом этапе обучающимся выдаются исходные данные (по вариантам): тип насадки, температура очищаемых газов и абсорбента, объемный расход воздуха, конечная концентрация реагента в абсорбенте, начальная молярная концентрация загрязнителя в очищаемых газах, которые необходимо задать в математическую модель. Далее в зависимости от исходных данных и результатов промежуточных расчетов по данным из табл. 5, 6, 7, 8, 9 задаются следующие параметры: характеристика насадки, плотность и динамический коэффициент вязкости воздуха и воды, процентная массовая доля SO_2 в воде соответственная парциальному давлению

SO_2 в воздухе, диаметр колонны. В результате по окончанию расчетов определяются характеристики хемосорбера, при которых очищенный газ на выходе будет содержать не более $0,05 \text{ мг/м}^3$ загрязняющего вещества: высота насадочной части колонны, диаметр колонны, скорость абсорбента, гидравлическое сопротивление абсорбера, мощность, затрачиваемая на транспорт газа через колонну, которая рассчитывается по формуле:

$$N = G_r \cdot \Delta P_{op}.$$

На втором этапе промежуточные расчеты в математической модели выполняются автоматически. Обучающемуся необходимо при одних и тех же исходных параметрах очищаемых газов выбрать тип насадки, основываясь на мощности, затрачиваемая на транспорт газа через колонну, и объеме, заполняемым насадкой. При этом концентрация загрязняющего вещества на выходе не должна превышать $0,05 \text{ мг/м}^3$.

На рис. 2 представлены результаты расчета модели хемосорбера для трех видов насадок: кольца Рашига 50 мм внавал (1), кольца Рашига 25 мм (2), Кольца Палля 50 мм (3).

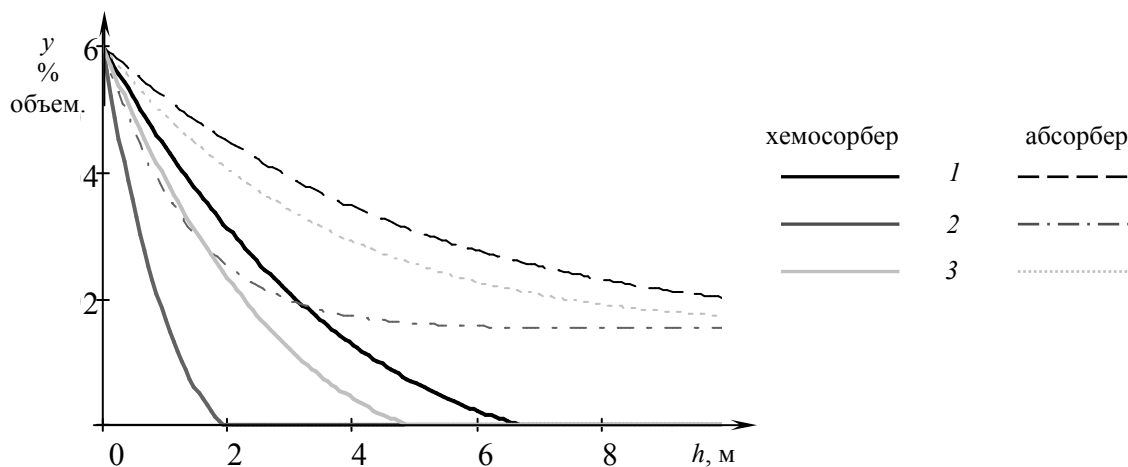


Рис. 2. Изменение концентрации SO_2 в очищаемых газах по высоте абсорбера и хемосорбера

На лабораторной работе обучающийся приобретает навыки: расчета процесса очистки газовых выбросов с помощью вычислительной техники; работы с математической моделью объекта химической промышленности; принятия решений на основе результатов расчета математической модели.

Процесс информатизации образования повышает уровень активности и реактивности обучаемого, развивает способности альтернативного мышления, формирования умений разрабатывать стратегию поиска решений как учебных, так и практических задач, позволяет прогнозировать

результаты реализации принятых решений на основе моделирования изучаемых объектов, явлений, процессов и взаимосвязей между ними [1].

ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

A, B – характеристики насадки для определения скорости газового потока; a – удельная поверхность насадки, $\text{м}^2/\text{м}^3$; C, C^* – концентрация вещества в газовой фазе и в абсорбенте соответственно, моль/м^3 ; D – средний коэффициент диффузии вещества в растворах, $\text{м}^2/\text{с}$; d_s – эквивалентный диаметр насадки, м ; E – коэффициент Генри, мм. рт. ст. ; g – ускорение свободного па-

дения, м/с^2 ; G – массовый расход, кг/с ; H – высота слоя насадки, м ; p, q – характеристики насадки для определения минимальной плотности орошения; P – давление газовой фазы, мм. рт. ст. ; z – молекулярность реакции; β – параметр, учитывающий ассоциацию молекул (для воды $\beta = 2, 6$); β_{XF} – коэффициент массоотдачи в жидкой фазе, м/с ; ε – порозность слоя насадки, $\text{м}^3/\text{м}^3$; μ – динамический коэффициент вязкости, $\text{Па}\cdot\text{с}$; ρ – плотность, кг/м^3 ; v – скорость потока, м/с ; $\delta_{\text{пр}}$ – приведенная толщина стекающей пленки жидкости, м ;

индексы: A – поглощаемый газ (SO_2), B – реагент (NaOH), 0 – начальное значение, i – текущее значение, $г$ – очищаемый газ, $ж$ – абсорбент.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Григорьев, С. Г. Информатизация образования. Фундаментальные основы: учебник / С. Г. Григорьев, В. В. Гриншкун. – Москва, 2005. – 231 с.

2. Проектирование аппаратов пылегазоочистки / М. Г. Зиганшин, А. А. Колесник, В. Н. Посохин: пособие по проектированию. – М.: Экопресс - ЗМ, 1998. – 505 с.

3. Данквертс, П. В. Газожидкостные реакции / П. В. Данквертс; пер. с англ. – М.: Химия, 1973. – 296 с.

4. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – Стер. изд. – М.: Альянс, 2014. – 750 с.

5. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Г. С. Борисов, В. П. Брыков, Ю. И. Дытнерский и др. под ред. Ю. И. Дытнерского, 2-е изд., перераб. и дополн. – М.: Химия, 1991. – 496 с.

6. Рамм, В. М. Абсорбция газов / В. М. Рамм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1976. – 656 с.

7. Рабинович, В. А. Краткий химический справочник / В. А. Рабинович, З. Я. Хавин. – Изд. 3-е, перераб. и доп. – СПб.: Химия, 1991. – 432 с.

8. Швыдский, В. С. Очистка газов: справочное пособие / В. С. Швыдский, М. Г. Ладыгичев. – М.: Теплоэнергетик, 2002. – 640 с.

9. Лащинский, А. А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры: справочник / А. А. Лащинский, А. Р. Толчинский. – 4-е изд., стер. – М.: Альянс, 2013. – 752 с.

УДК 621.928.37

В. О. Яблонский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ ЖИДКОСТИ НА ГИДРОДИНАМИКУ ГИДРОЦИКЛОНА

Волгоградский государственный технический университет

На основании результатов численного моделирования проанализировано влияние нелинейности реологических свойств вязкопластической разделяемой среды на гидродинамику цилиндрикоконического гидроциклона. Выполнен сравнительный анализ влияния пластических свойств на гидродинамику вязкопластической и псевдопластической жидкостей.

Ключевые слова: гидродинамика, цилиндрикоконический гидроциклон, фактор разделения, нелинейновязкопластическая жидкость, псевдопластическая жидкость, предельное напряжение сдвига, показатель нелинейности.

V. O. Yablonskii

MODELLING OF INFLUENCE OF NONLINEARITY OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF VISCOPLASTIC FLUID ON HYDRODYNAMICS OF HYDROCYCLONE

Volgograd State Technical University

On the base of the analysis of results of numerical modelling of hydrodynamics of nonlinear viscoplastic fluid in cylindroconical hydrocyclone the influence of nonlinearity of rheological properties is established. The comparative analysis of influence of plastic properties of separated media on the hydrodynamics of fluids with bound shear stress and pseudoplastic fluids is carried out.

Keywords: hydrodynamics, cylindroconical hydrocyclone, separation factor, nonlinear viscoplastic fluid, pseudoplastic fluid, bound shear stress, nonlinearity index.

В качестве буровых растворов, очищаемых от выбуренной породы в цилиндрикоконических гидроциклонах, обычно используются суспензии, обладающие нелинейновязкопластическими свойствами, в частности, водные растворы

бентонита. Ввиду того, что вязкопластические среды широко применяются в горнообогатительной и минералогической промышленности, в системах очистки буровых растворов от выбуренной породы при добыче нефти и газа, а так-

же в химической и нефтеперерабатывающих отраслях промышленности, возникает задача анализа влияния нелинейности реологических свойств вязкопластической разделяемой среды на гидродинамику цилиндрикоконического гидроциклона.

В работах [1, 2] выполнено математическое исследование течения в гидроциклоне неньютоновских жидкостей, реологические свойства которых описываются моделями Шведова–Бингама и Оствальда де Вилля.

Однако примененные в данных работах реологические модели не могут с достаточной точностью описать течение нелинейновязкопластической жидкости, что вносит существенные погрешности в результаты моделирования.

Так как вопрос о влиянии нелинейности реологических свойств вязкопластической разделяемой среды на гидродинамику цилиндрикоконического гидроциклона до настоящего времени не изучен, целью данной работы является выявление влияния нелинейности реологических свойств вязкопластической жидкости на гидродинамику цилиндрикоконического гидроциклона, что является теоретически важной и практически значимой задачей.

Математическая модель вращательного течения пленки нелинейновязкопластической жидкости в цилиндрикоконическом гидроциклоне представляет собой совокупность системы уравнений реодинамики, уравнения неразрывности потока, граничных условий и условий сопряжения для цилиндрической и конической частей корпуса гидроциклона и интегрального уравнения, выражающего условие постоянства расхода жидкости в направлении оси гидроциклона.

Гидроциклон (рис. 1) состоит из цилиндрической камеры 1 и конической части корпуса 2, имеющей угол конусности α . Поступившая в цилиндрическую камеру гидроциклона тангенциально через входной патрубок 3 жидкость движется по сужающейся спиральной траектории по стенкам конической части корпуса вниз, образуя вращающуюся пленку со свободной поверхностью 5, обладающую окружной V_ϕ , осевой V_z и радиальной V_r составляющими скорости. Образующаяся в процессе разделения осветленная фракция удаляется через верхний отводящий патрубок 4, сгущенная фракция отводится через нижний песочный патрубок 5.

Как правило, течение является осесимметричным и распределение скоростей не зависит от угловой координаты. В цилиндрических центробежных аппаратах согласно [3] это допущение

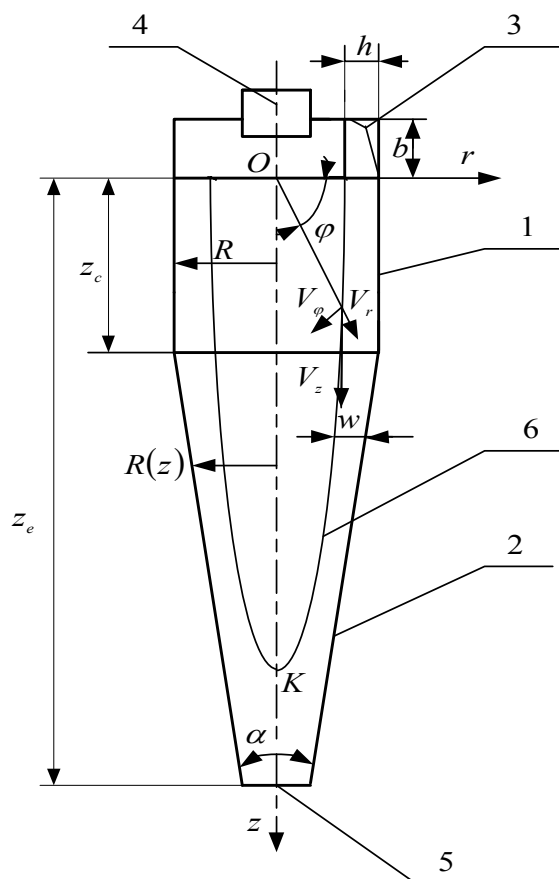


Рис. 1. Схема течения нелинейновязкопластической жидкости в цилиндрикоконическом гидроциклоне:

1 – цилиндрическая камера корпуса; 2 – коническая часть корпуса; 3 – входной патрубок; 4 – верхний отводящий патрубок; 5 – свободная поверхность пленки жидкости

хорошо реализуется на практике, когда центробежное ускорение значительно превосходит гравитационное, что является характерным для гидроциклонов, осуществляющих очистку буровых растворов. Ввиду того, что вязкопластические жидкости обладают значительной эффективной вязкостью, автор полагает, что режим течения ламинарный [2], силы поверхностного натяжения и трения жидкости о газовую среду исчезающе малы, жидкость несжимаема, течение безволновое, давление воздуха в корпусе гидроциклона P_0 постоянно и равно атмосферному.

Известно, что реологические свойства нелинейновязкопластической жидкости описываются законом Гершеля–Балкли [4].

Система уравнений реодинамики и неразрывности нелинейновязкопластической жидкости в компонентах скорости, полученная на основе системы уравнений в напряжениях в цилиндрической системе координат (r, ϕ, z) [6] будет иметь вид:

$$f \frac{\partial f}{\partial r} + H \frac{\partial f}{\partial z} - \frac{\Theta^2}{r} = -\frac{\partial F}{\partial r} + \frac{1}{\text{Re}_n} \left[2 \frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial r} \frac{\partial f}{\partial r} + 2 A_0^{n-1} \frac{\partial^2 f}{\partial r^2} + \frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial z} \left(\frac{\partial H}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial z} \right) + A_0^{n-1} \frac{\partial^2 H}{\partial z \partial r} + A_0^{n-1} \frac{\partial^2 f}{\partial z^2} + 2 A_0^{n-1} \frac{1}{r} \frac{\partial f}{\partial r} - 2 A_0^{n-1} \frac{f}{r^2} \right], \quad (1)$$

$$f \frac{\partial \Theta}{\partial r} + \frac{\Theta f}{r} + H \frac{\partial \Theta}{\partial z} = 2 Pl + \frac{1}{\text{Re}_n} \left[\frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial r} \left(\frac{\partial \Theta}{\partial r} - \frac{\Theta}{r} \right) + A_0^{n-1} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \Theta}{\partial r} - \frac{\Theta}{r^2} + \frac{\partial^2 \Theta}{\partial r^2} \right) + \frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial z} \frac{\partial \Theta}{\partial z} + A_0^{n-1} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial z^2} \right], \quad (2)$$

$$f \frac{\partial H}{\partial r} + H \frac{\partial H}{\partial z} = -\frac{\partial F}{\partial z} + Pl + \frac{1}{\text{Re}_n} \left[\frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial r} \left(\frac{\partial H}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial z} \right) + A_0^{n-1} \left(\frac{\partial^2 H}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial r \partial z} \right) + 2 A_0^{n-1} \frac{\partial^2 H}{\partial z^2} + 2 \frac{\partial A_0^{n-1}}{\partial z} \frac{\partial H}{\partial z} \right] + \frac{1}{Fr}, \quad (3)$$

$$\frac{\partial f}{\partial r} + \frac{\partial H}{\partial z} + \frac{f}{r} = 0. \quad (4)$$

Граничные условия в безразмерной форме записи для зон цилиндрической камеры гидроциклона ($\bar{z} \leq \bar{z}_c$) и конической части корпуса ($\bar{z} > \bar{z}_c$) соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} \bar{z} &\leq \bar{z}_c \\ \bar{r} &= \bar{R}, \quad f = 0, \quad \Theta = 0, \quad H = 0, \\ \bar{r} &= \bar{R} - \bar{\delta}, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial r} - \frac{\Theta}{r} = 0, \quad \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial z} = 0, \\ f &= H \frac{\partial \bar{\delta}}{\partial z}, \quad F = -\frac{2kU_0^{n-2}}{\rho R^n} \frac{A_0^{n-1} \partial f}{\partial r}, \\ \bar{z} &> \bar{z}_c \\ \bar{R} &= 1 - (\bar{z} - \bar{z}_c) \operatorname{tg}(\alpha/2), \quad f = 0, \quad \Theta = 0, \quad H = 0, \\ \bar{R} &= 1 - (\bar{z} - \bar{z}_c) \operatorname{tg}(\alpha/2) - \bar{\delta}, \quad \frac{\partial \Theta}{\partial r} - \frac{\Theta}{R} = 0, \quad \frac{\partial H}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial z} = 0, \\ f &= H \left[\frac{\partial \bar{\delta}}{\partial z} + \operatorname{tg}(\alpha/2) \right], \quad F = -\frac{2kU_0^{n-2}}{\rho r_k^n} \frac{A_0^{n-1} \partial f}{\partial r}, \\ \bar{z} &= 0, \quad \Theta = \frac{2}{b}(1 - \bar{r}), \quad H = \frac{2h(1 - \bar{r})}{\pi b(2 - b)}, \quad f = 0, \quad F = F_n(\bar{r}), \\ \bar{z} &= \bar{z}_c, \quad \frac{\partial H}{\partial z} = \frac{\partial \Theta}{\partial z} = \frac{\partial f}{\partial z}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $\text{Fr} = \frac{U_0^2}{gR}$, $\text{Re}_n = \frac{\rho R^n U_0^{2-n}}{k}$, Fr – число Фруда (фактор разделения), Re_n – аналог числа Рейнольдса для степенных жидкостей, $\text{Pl} = \frac{\tau_0}{\rho U_0^2}$ – число пластичности, характеризующее отношение сил пластичности к силам инерции,

$$A_0 = \sqrt{2 \left(\frac{\partial f}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{f}{r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial H}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial r} - \frac{\Theta}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial \Theta}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial r} + \frac{\partial f}{\partial z} \right)^2},$$

A_0 – безразмерная интенсивность скоростей деформаций, P – давление в жидкости, Па, ρ – средняя плотность жидкости, кг/м³, g – ускорение силы тяжести, м/с², $\bar{z}_c$ – осевая координата нижней границы цилиндрической ка-

меры гидроциклона, $\bar{z}_c$ – осевая координата нижней границы конической части корпуса гидроциклона.

Соотношения между безразмерными и размерными переменными следующие:

$$\bar{z} = \frac{z}{R}, \quad \bar{r} = \frac{r}{R}, \quad H(\bar{r}, \bar{z}) = \frac{V_z}{U_0}, \quad f(\bar{r}, \bar{z}) = \frac{V_r}{U_0}, \quad \Theta(\bar{r}, \bar{z}) = \frac{V_\phi}{U_0}, \quad F(\bar{r}, \bar{z}) = \frac{P - P_0}{\rho U_0^2},$$

$$\bar{\delta} = \frac{\delta}{R}, \quad \bar{h} = \frac{h}{R}, \quad \bar{b} = \frac{b}{R}, \quad U_0 = \frac{Q}{bh},$$

$\bar{z}$, $\bar{r}$ – безразмерные осевая и радиальная координаты соответственно, $H(\bar{r}, \bar{z})$, $f(\bar{r}, \bar{z})$, $\Theta(\bar{r}, \bar{z})$ – безразмерные осевая, радиальная и окружная составляющие скорости потока, $F(\bar{r}, \bar{z})$ – безразмерное давление, $F_n(\bar{r})$ – функция распределения безразмерного давления в радиальном сечении при $\bar{z} = 0$, $\bar{R}$ – безразмерный радиус корпуса гидроциклона, $\bar{\delta}$ – безразмерная толщина пленки жидкости, $\bar{b}$, $\bar{h}$ – безразмерные ширина и высота входного патрубка, Q – расход жидкости, подаваемой в гидроциклон, м³/с, P_0 – атмосферное давление, Па, g – ускорение силы тяжести, м/с², R – радиус цилиндрической камеры корпуса гидроциклона, м, U_0 – средняя скорость во входном патрубке гидроциклона, м·с⁻¹, δ – толщина пленки жидкости, м, b , h – ширина и высота входного патрубка гидроциклона, м, τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па, γ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций, с⁻¹, n – показатель нелинейности кривой течения, k – индекс консистентности, Па·сⁿ, r , ϕ , z – радиальная, окружная и осевая координаты соответственно, z_c – высота цилиндрической камеры гидроциклона, м.

В выходном сечении потока используем «мягкие» граничные условия, накладывающие наименьшие ограничения на разностную схему.

Для определения гидродинамических параметров течения необходимо численно проинтегрировать систему дифференциальных уравнений реодинамики при соответствующих граничных условиях и условиях сопряжения с учетом геометрии рабочего пространства гидроциклона. Интегрирование системы дифференциальных уравнений в частных производных осуществлялось по методу конечных разностей с использованием схемы Зейделя.

Течение нелинейновязкопластической жидкости в цилиндрикоконическом гидроциклоне ха-

рактеризуется показателем нелинейности кривой течения n , числом пластичности Pl, числом Фруда Fr (фактором разделения), аналогом числа Рейнольдса для неньютоновских жидкостей Re_n , а также параметром безразмерного расхода $\bar{Q}$ [5] и углом конусности конической части корпуса гидроциклона α .

Численное моделирование было выполнено для различных значений угла конусности конической части корпуса гидроциклона $\alpha = 0 \dots 15^\circ$ и различных значений показателя нелинейности кривой течения $n = 0,6 \dots 1,3$ при значениях предельного напряжения сдвига $\tau_0 = 0 \dots 4,5$ кПа. Изменение значений показателя нелинейности кривой течения n от 0,6 до 1,3 соответствует изменению реологических свойств от псевдопластической ($n < 1$) до ньютоновской ($n = 1$) и дилатантной ($n > 1$) жидкостей.

Из анализа полученных расчетных данных следует, что с ростом показателя нелинейности кривой течения n и изменением реологических свойств от псевдопластической до ньютоновской и дилатантной жидкостей затухание максимальной окружной составляющей скорости на поверхности пленки Θ_s в направлении осевой координаты становится более выраженным, что сопровождается увеличением толщины пленки жидкости и связано с уменьшением коэффициента наполненности L [5] радиального распределения окружной составляющей скорости Θ при сохранении первоначального момента количества движения.

С увеличением значений n от $n = 0,6$ (псевдопластическая жидкость) до $n = 1,3$ (дилатантная жидкость) наличие у разделяемой среды предельного напряжения сдвига τ_0 сильнее воздействует на изменение толщины пленки и снижение затухания окружной составляющей скорости на поверхности пленки Θ_s в направле-

нии оси гидроциклона вследствие более выраженного возрастания аномалии неньютоновских свойств жидкости.

Из полученных распределений окружной составляющей скорости Θ_s (рис. 2, 3) на поверхности пленки жидкости вдоль осевой координаты $\bar{z}$ следует, что при разделении нелинейновязкопластических сред, обладающих предельным напряжением сдвига τ_0 (что соответствует случаю $Pl > 0$), затухание окружной со-

ставляющей скорости Θ_s в направлении осевой координаты $\bar{z}$ снижается с уменьшением значений n как следствие повышения коэффициента наполненности L ее радиального распределения, снижения эффективной вязкости вблизи стенки корпуса и образования зон квазитвердого ядра, примыкающих к свободной поверхности пленки жидкости. Повышение максимальной окружной составляющей скорости Θ_s на поверхности пленки жидкости приводит к повы-

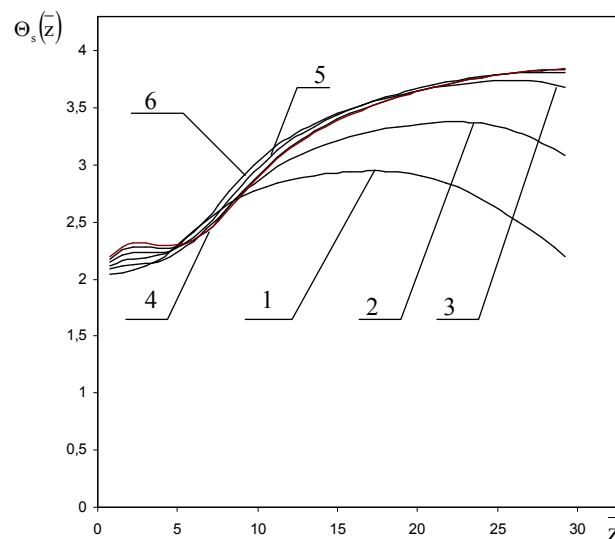


Рис. 2. Зависимость максимальной окружной составляющей скорости на поверхности пленки Θ_s

в цилиндрикоконическом гидроциклоне от осевой координаты $\bar{z}$;

$Fr = 50,0$; $Re_n = 4 \cdot 10^3$; $Q = 0,04$; $n = 0,6$; $h = 0,05$; $b = 0,1$; $\alpha = 5^\circ$; $n = 0,6$;

1 – $\tau_0 = 0$ кПа; 2 – $\tau_0 = 1000$ кПа; 3 – $\tau_0 = 2000$ кПа; 4 – $\tau_0 = 3000$ кПа; 5 – $\tau_0 = 4000$ кПа; 6 – $\tau_0 = 4500$ кПа

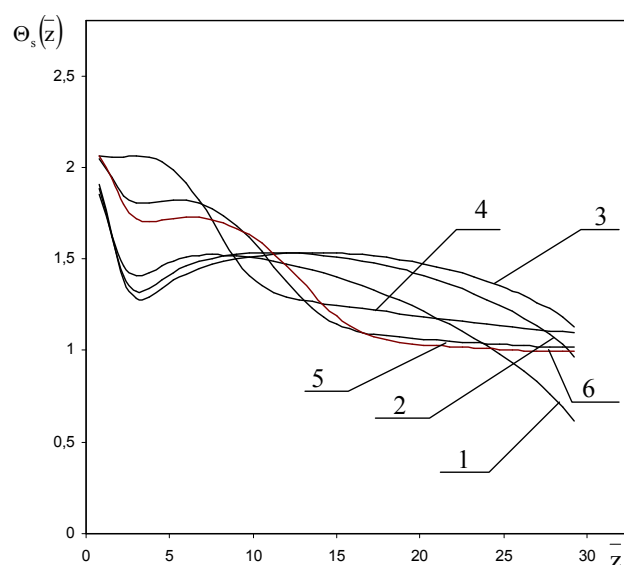


Рис. 3. Зависимость максимальной окружной составляющей скорости на поверхности пленки Θ_s

в цилиндрикоконическом гидроциклоне от осевой координаты $\bar{z}$ для $n = 1,0$

шению разделительной способности гидроциклона, так как сопровождается увеличением центробежной силы, действующей на частицы твердой фазы.

Из полученных зависимостей следует, что при разделении в гидроциклонах вязкопластических сред, обладающих нелинейностью реологических свойств ($n < 1$), в режиме пленочного течения разделение должно протекать более эффективно вследствие уменьшения толщины пленки жидкости и снижения затухания окружающей составляющей скорости в направлении оси гидроциклона.

Таким образом, на основе разработанной математической модели выявлено влияние нелинейности реологических свойств вязкопластической среды на поле скоростей в гидроциклоне, что позволяет судить о ее влиянии на разделительную способность гидроциклона. Разработанный алгоритм служит основой для математического моделирования разделительных процессов, протекающих при очистке в гидроциклонах не-

линейновязкопластических сред и создания методики инженерного расчета таких аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матвиенко, О. В. Математическое исследование сепарации дисперсной фазы в гидроциклоне при очистке вязкопластических буровых растворов / О. В. Матвиенко, Е. В. Евтюшкин // Инж.-физ. журн. – 2011. – Т. 84. – № 2. – С. 230–238.
2. Dyakowski T., Hornung G. Simulation of non – newtonian flow in a hydrocyclone // Chem. Eng. Res. and Des. A., 1994. – V. 72. – No. 4. – P. 513–520.
3. Радин, С. И. Анализ распределения тангенциальных скоростей жидкостного потока в осадительных центрифугах / С. И. Радин, В. В. Будкин, Г. С. Черкез // Теорет. основы хим. технол. – 1978. – Т. 12. – № 4. – С. 571–575.
4. Herschel, W. H., Bulkley R. Measurement of consistency as applied to rubber-benzene solutions // Proc. Amer. Soc. Test. Mat, 1926. – V. 26. – P. 621–633.
5. Яблонский, В. О. Расчет разделения суспензий с неньютоновской дисперсионной средой в прямоточном цилиндрическом гидроциклоне / В. О. Яблонский // Химическая промышленность. – 2005. – Т. 82. – № 1. – С. 40–48.
6. Роуч, П. Вычислительная гидродинамика / П. Роуч. – М.: Мир, 1980. – 616 с.

УДК 541

Н. И. Юркив, А. Д. Поликарпов, Н. А. Прохоренко, Ю. В. Аристова

БУРОВЫЕ РАСТВОРЫ

ООО «Нефтегаз-мониторинг»

В статье рассмотрены вопросы вскрытия продуктивных отложений с помощью буровых растворов различных рецептур. Показаны основные процессы влияющие на сохранение коллекторских свойств пласта для разнообразных рецептур: безглинистых растворов с использованием крахмала, высокомолекулярных гетероорганических соединений, минералов с различной степенью дисперсности.

Ключевые слова: нефть, буровые растворы, скважина, отложения.

N. I. Yurkiv, A. D. Polikarpov, N. A. Prokhorenko, Yu. V. Aristova

BORING SOLUTIONS

JSC «Neftegaz-monitoring»

In the article the questions of the opening of productive deposits using drilling fluids of various formulations. Shows the main processes affecting the preservation of reservoir properties for a variety of formulations: non-clay mortars using starch, heterogeneously high-molecular compounds, minerals with different degrees of dispersion.

Keywords: oil, boring solutions, well, deposits.

В настоящее время определенные успехи в решении проблемы качественного вскрытия продуктивных пластов достигнуты благодаря широкому применению разнообразных рецептур буровых растворов: например, безглинистых растворов с использованием крахмала, высокомолекулярных гетероорганических соединений, минералов с различной степенью дисперсности, например, мраморной крошки, различных по составу и свойствам жидкостей.

Применение новых реагентов не снижает актуальности проблемы. Геолого-технические условия вскрытия год от года становятся сложнее: вскрытие пластов в условиях низких пластовых давлений, освоение месторождений со сложными геологическими условиями залегания продуктивных пластов, а также пластов с низкими коллекторскими свойствами, считавшимися ранее малоперспективными.

Для изучения влияния некоторых буровых растворов, имеющих в своем составе как глинистые, так и безглинистые минералы, нами были приведены экспериментальные исследования по влиянию твердой фазы и фильтрата буровых растворов на фильтрационные характеристики пласта – коллектора [1].

Так, к снижению продуктивности скважин приводит набухание глин в пласте под действием буровых растворов, которые вызывают осложнения, связанные с осыпями и обвалами неустойчивых пород. Этот вид осложнений приводит к наибольшим потерям, которые нередко заканчиваются ликвидацией скважин. Это объясняется тем, что неустойчивые породы, в состав которых входят глины, гидратируются под воздействием фильтрата бурового раствора и набухают в микротрещинах. Расклинивающее давление кристаллического набухания проявляется на расстоянии, соизмеримом с толщиной гидратной оболочки и чем ближе к поверхности, тем выше давление набухания, величина которого достигает тысяч атмосфер. Физически противостоять таким силам практически нереально, что и приводит к осложнениям [2].

Для борьбы с такими осложнениями применяются ингибирующие растворы. Среди них наиболее эффективен калиевый раствор на основе гуматов. Этот раствор обладает следующими действиями.

Во-первых, ион калия подавляет процесс набухания глин и полностью нейтрализует заряд на поверхности. Ион калия практически является негидратированным катионом, за счет чего достигается надежная коагуляция плоскостей глины. Кроме того, малый размер негидратированного катиона калия позволяет проникать в кристаллическую решетку, меняя природу глин, делая их водонепроницаемыми. Этот эффект достигается при концентрации хлорида калия более двух процентов.

Во-вторых, эффект ингибирования хлористым калием многократно усиливается ингибирующим действием гуматов, растворимость которых зависит от кислотности среды.

Механизм ингибирования глин гуматами проходит следующим образом. Фильтрат калиевого раствора, содержащий гуматы, проникает в микротрещины глинистой породы и она гидратируется. Гидратация сопровождается поглощением каустической соды, величина pH снижается до 7,0–7,4, что значительно ниже критического значения, в результате чего гуматы вы-

саливаются из фильтрата и тем самым существенно повышают прочность сформированных структурных контактов между активными плоскостями в микротрещинах глин. В результате такого действия гуматов устойчивость глин существенно повышается.

Основным недостатком системы ингибирующего калиевого раствора на продуктивные пласты является то, что гуматы высаливаются из фильтрата за счет снижения pH, вследствие адсорбционных и ионообменных реакций. Осажденные гуматы кольматируют продуктивный пласт со снижением проницаемости в 2–4 раза.

Для восстановления проницаемости пористой среды в результате применения калиевого раствора на основе гуматов при бурении скважин разработан метод повышения продуктивности скважин.

Следующим фактором, оказывающим сильное влияние на проникновение дисперсной фазы и фильтрата бурового раствора в пористую среду, является репрессия. Репрессия влияет на степень деформации пород и на изменение величины естественного раскрытия трещин. С увеличением репрессии увеличивается скорость поступления фильтрата бурового раствора в пласт. Негативные последствия репрессии усугубляются при значительных колебаниях гидродинамического давления в стволе скважин.

Максимально допустимая репрессия ограничена условиями возникновения поглощения жидкости. Следовательно, плотность бурового раствора должна быть достаточно высокой, чтобы уравнивать пластовое давление и сохранить устойчивость стенок скважины, и в то же время достаточно низкой, чтобы не возникло поглощение или гидроразрыв пласта.

Другим фактором снижения проницаемости пористой среды является образование на поверхности породы корки, которая резко снижает фильтрационные способности коллектора и проникновение твердых частиц и фильтрата бурового раствора в пласт. Поэтому контроль свойств фильтрационной корки (толщина, проницаемость, структура), скорость и образование являются одним из основных решений при выборе бурового раствора для вскрытия продуктивного пласта.

В настоящее время буровые растворы для первичного вскрытия продуктивных пластов разрабатывают таким образом, чтобы образовывающаяся на поверхности пористой среды, а также дисперсная фаза и фильтрат бурового раствора,

проникшие в пористую среду на какую-то глубину, наиболее полно можно было бы удалить и тем самым максимально восстановить проницаемость коллектора.

Продуктивность скважины при наличии загрязнения пласта можно определить двумя путями: расчета эффективности притока флюидов к скважине и при расчете общего скин-эффекта.

Эффективность работы скважины определяют с помощью коэффициента продуктивности W следующим образом:

$$Q = W(P_{\text{пл}} - P_{\text{раб}}),$$

где Q – дебит скважины; $P_{\text{пл}}$, $P_{\text{раб}}$ – пластовое и рабочее давление.

Используя индекс «з» для загрязненного пласта и индекс «н» для незагрязненного, эффективность работы скважины вследствие наличия загрязненной прискважинной зоны можно описать с помощью следующего отношения:

$$\text{ОП} = (W_z / W_n) \cdot 100 \%$$

Параметр ОП широко применяют на практике для оценки качества заканчивания скважин [3, 4]. Однако эффективность притока флюидов к скважине зависит от различных параметров: геометрии пласта, свойств породы (неоднородность, пористость, трещиноватость и т. д.), конфигурации скважины и др. Но все эти параметры относятся к загрязнению призабойной зоны пласта.

Поэтому наиболее распространенным обозначением эффективности оценки загрязнения пласта является скин-эффект. Скин-эффект является обобщенным параметром, представляющим степень загрязнения скважины как с однородным, так и неоднородным пластом.

Исходя из вышерассмотренных факторов, основным воздействием на пласт является буровой раствор. Но, к сожалению, ни один буровой раствор не является идеальным для вскрытия продуктивных отложений.

При исследовании буровых растворов на линейных моделях было получено, что независимо от перепада давления и исходной проницаемости в течение 3–7 мин. происходила закупорка пористой среды, то есть за это время формировалась корка из твердой фазы бурового раствора на торце образца.

Для улучшения качества буровых растворов на водной основе к ним добавляют минеральные и органические добавки с целью замедления гидратационных процессов, а также используют смазочные добавки снижающие внутри-

скважинные сопротивления, придают им псевдореологические характеристики, которые обеспечивают как эффективный транспорт шлама, так и снятие избыточных гидравлических сопротивлений.

В случае с глинистыми растворами через образовавшуюся корку, при перепаде давления больше или равным 2,0 МПа в пористую среду поступает фильтрат бурового раствора. Для растворов на органической основе с мраморной крошкой, после сформирования корки фильтрат бурового раствора не поступал в пористую среду, даже при превышении давления более чем на 5,0 МПа.

Следовательно, наиболее полно кольматируется пористая среда, когда в растворе присутствуют твердые частицы разных размеров. По-видимому, в глинистых растворах дисперсная фаза более однородна. Например, при спускоподъемных операциях изменение давления приводит как к уплотнению, так и разрушению образовавшейся глинистой корки и тем самым стимулирует увеличение поступления фильтрата в пористую среду. В то же время при различных размерах дисперсной фазы, например, мраморной крошки, закупорка каналов пористой среды практически идет полностью. При спуско-подъемных операциях она намного устойчивее чем корка глинистого раствора при высоких перепадах, которая обнаруживает некоторую проницаемость в отличие от мраморной крошки.

По данным термо- и дебитометрии, толщина работающих интервалов в скважинах пробуренных на глинистом растворе, составляет в среднем 20 % от вскрытой толщины. По данным нейтронного гамма-метода, часть интервалов с пористостью 10–25,5 % и проницаемостью до 0,1 мкм² в работу не включились.

После освоения максимальный вынос фильтрата, даже из высокопроницаемых пород больше 0,5 мкм², не превышает 80 %.

По данным М. Л. Сургучева, на месторождениях Сибири и Мангышлака после 1–5 месяцев воздействия глинистого раствора на пласт глубина проникновения достигла 8 м. Объем фильтрата внедрившегося в пласт за тот же период превышает 5 м³/м эффективной толщины. Показано, что за двое суток контакта глинистого раствора, имеющего водоотдачу 8–10 см³/30мин, фильтрат проникает в продуктивный пласт на глубину 2–3 м в количестве 1,5–2,5 м³ на эффективной толщине. В результате этого проницае-

мость призабойной зоны пласта добывающих скважин от 1,6 до 22,4 раза ниже, чем в удаленной зоне. Радиус зоны ухудшения проницаемости коллектора изменяется от 6,5 м до 13,6 м.

Установлено, что глубина проникновения глинистого материала в порово-кавернозном карбонатном коллекторе в зависимости от проницаемости пород составляет от 2 до 15 м. При этом мощность работающих интервалов уменьшается до 20,5 % от вскрытой мощности, гидропроницаемость для карбонатных коллекторов до 90 % от первоначальной [6].

Причиной снижения продуктивности скважин является закупорка наиболее трещиноватой части пласта дисперсной фазой глинистых растворов и их фильтратов.

Образовавшаяся плотная, устойчивая корка бурового раствора на органической основе с мраморной крошкой после формирования корки не разрушается при различных работах, предотвращает глубокую кольматацию коллектора при цементировании скважин и тем самым предупреждает загрязнение коллектора намного сильнее, чем тогда, когда корка неустойчива. В результате она предохраняет контакт нефтеносных отложений с тампонажным раствором и увеличивает продуктивность скважин в 1,5–3,0 раза.

Глубокая кольматация коллектора буровыми растворами на органической основе с мраморной крошкой может наблюдаться в том случае, когда коллектор трещиноватый и трещины по своим размерам превосходят размеры дисперсной фазы.

Кроме того, после освоения скважины пористую среду можно освободить от мраморной крошки с помощью солянокислотной обработки. От глинистых частиц избавиться таким же способом затруднительно. При взаимодействии глины с глиноукслотой ($\text{HCl} + \text{HF}$) в результате реакции раствора с общей формулой $x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$ образовавшийся коллоидный раствор приводит к увеличению фильтрационных сопротивлений при извлечении его из пористой среды.

Плотная закупорка пористой среды мраморной крошкой предотвращает попадание фильтрата бурового раствора вглубь пласта и кольматирует естественную пористую среду коллектора.

Модель пласта отличается от реального пласта тем, что в скважине фильтрация осуществляется радиально, в трехмерном пространстве, а в модели линейно.

Поэтому, если в линейных моделях пласта фильтрат раствора с мраморной крошкой про-

никает на несколько миллиметров, то в скважине при тех же параметрах и составе раствора, как было показано промысловыми работами, фильтрат проникает на глубину 50–70 см. В промысловых условиях это расстояние преодолевается с помощью перфорации, где глубина перфорационных отверстий составляет 80–100 см. Следовательно, чистый незагрязненный пласт соединяется со скважиной своей естественной проницаемостью.

Наиболее интенсивная кольматация наблюдается при проницаемости равной или более $0,1 \text{ мкм}^2$, что объясняется зависимостью степени кольматации от соотношения размеров пор и твердых частиц [5].

Как известно, все растворы, которыми воздействуют на пласт, делятся на две группы: фильные и фобные. В первую группу входят растворы на водной основе, во вторую, – на углеводородной основе, например, известково-битумные, эмульсии и т. п. Ко второй группе относятся растворы, оказывающие положительное воздействие на пористую среду, а именно: после контакта можно в короткое время восстановить проницаемость пласта, так как несущей фазой этих растворов являются углеводороды, которые по физико-химическим свойствам родственны углеводородному флюиду, насыщающему продуктивный пласт. Гидрофобный раствор при контакте с пористой средой, насыщенной нефтью, не образует с углеводородами осадков, эмульсий, которые бы в дальнейшем оказывали негативное воздействие, и при освоении вытесняются из пласта. В то время как при контакте с фильной зоной, в результате гидрофобных взаимодействий, фильтрационные сопротивления могут возрасти до 500 раз, и тем самым препятствуют поступлению бурового раствора и его фильтрата в низкопроницаемые зоны и каналы, сохраняя в неприкосновенности пористую среду.

В зависимости от состава промывочного раствора при первичном вскрытии пласта дебит скважины может существенно различаться. Так, например, в объединении «Пермнефть» на Кокуйском месторождении, на трех скважинах был выполнен следующий эксперимент [6]. Все три скважины были пробурены на разных растворах. По промысловым и геофизическим данным, оценка максимально возможных дебитов составила 18–20 т/сут.

Дебит 0,9 т/сут получен в скважине, вскрытой глинистым раствором. В скважине пробуренной полимерным раствором пониженной плотно-

сти с КМЦ и КССБ, дебит составил 10 т/сут. В скважине вскрытой на углеводородной основе с добавкой химических реагентов получен дебит в 21 т/сут.

Из приведенных данных видно, что на начальный дебит скважины сильное влияние оказывает состав применяемого раствора при вскрытии продуктивного пласта. Кольматация пласта при первичном вскрытии приводит к понижению текущего и конечного коэффициента нефтеотдачи.

Широкое применение получили «чистые» (не содержащие твердой фазы) растворы [7, 8]. Отличием «чистых» буровых растворов от глинистых, является возможность увеличения их плотности без соответствующего повышения концентрации твердой фазы. В качестве таких промывочных жидкостей используют водные растворы солей хлорида кальция, цинка, бромида кальция.

Данные растворы относятся к фильным растворам и оказывают отрицательное влияние на пористую среду – образуют гидрозатворы, увеличивают толщину граничных слоев, образуют осадки и закупоривают пористую среду твердыми частицами, могут приводить к набуханию глинистых минералов.

Для предотвращения снижения продуктивности скважин были использованы в промысловых условиях полимерные загустители, а также высоковязкие полианионные целлюлозы, оксигетилированные эфиры целлюлозы. Такие системы обладают кроме тиксотропных и уникальными фильтрационными характеристиками, образуя нефилтрующие в пласт системы растворов.

Представляют интерес буровые растворы на основе реагентов, полученных путем переработки крахмалсодержащего сырья. Они обеспечивают повышение качества вскрытия продуктивных горизонтов с высоковязкими нефтями за счет того, что наряду с полимерсахаридами различной полимерной массы содержат в своем составе продукты каталитически модифицированных сложных полимермолекулярных органических соединений (гидролизированный белок, окисленные жирные кислоты и другие вещества), действующие как высокоэффективные ПАВ [1, 8].

Наиболее перспективными и теоретически отвечающими требованиям промывки скважин являются системы растворов, стабилизированные биополимерами или гидрогелями полимеров. Такие буровые растворы на этой основе обладают псевдопластичными свойствами. Это

обеспечивает энергетически выгодные условия разрушения породы и выноса шлама, поскольку создается турбулентный режим намывания частиц и высокая «мгновенная» фильтрация, способствующая эффективному разрушению породы [9]. Буровой раствор на основе биополимеров характеризуется естественной смазывающей способностью. Как биополимеры, так и гидрогелевые растворы на основе подшитых оксигетилированных эфиров целлюлозы допускают применение различных утяжеленных материалов: барита, гематита, мраморной крошки, бромидов кальция и других.

Таким образом, определенные успехи в решении проблемы качественного вскрытия продуктивных пластов достигнуты благодаря широкому применению разнообразных рецептур буровых растворов в соответствующих условиях: безглинистых с применением оксигетилированных эфиров целлюлозы, крахмалсодержащего сырья сложных полимерсодержащих органических соединений, биополимеров, минералов, гидрогелей полимеров, минералов с различной степенью дисперсности, например, мраморной крошки, различных по составу и свойствам жидкости.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юркин, Н. И. Повышение эффективности разработки обводнившихся месторождений / Н. И. Юркин, А. Д. Поликарпов, Т. В. Мельникова // Нефтепромысловое дело. – 2009. – № 7. – С. 33–36.
2. Ананьев, А. Н. Буровые растворы: краткий курс учебного пособия для инженеров по буровым растворам / А. Н. Ананьев. – Волгоград, 2007. – 185 с.
3. Щуров, В. И. Технология и техника добычи нефти: учеб. / В. И. Щуров. – М.: ООО ТНД «Альянс», 2003.
4. Крылов, В. И. Выбор жидкостей для закачивания и капитального ремонта скважины / В. И. Крылов, В. В. Крецул. – М.: РГУ нефти и газа им. Губкина, 2005.
5. Волков, Э. Я. Геолого-физические признаки проникновения фильтрата бурового раствора в коллектор / Э. Я. Волков // Проблемы нефти и газа Тюмени: тр. Зап-СибНИГНИ. – Тюмень, 1977. – Вып. 33.
6. Сургучев, М. Л. Методы извлечения остаточной нефти / М. Л. Сургучев, А. Т. Горбунов, Д. П. Забродин. – М.: Недра, 1991.
7. Использование чистых промывочных жидкостей при бурении и закачивании скважин // Экспресс информация. – М.: ВНИИОЭНГ, 1985. – № 4. – С. 12–18. (Серия «Бурение. Зарубежный опыт»).
8. Бикчурин, Т. Н. Опыт применения «защитных» полимеров в качестве кольматантов при бурении скважин / Т. Н. Бикчурин, Р. Р. Бикбулатов, А. А. Кондратьев // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. – 2005. – № 6. – С. 22–24.
9. Федосов, Р. И. Разработка и совершенствование гидрогелевых буровых растворов с целью повышения скорости бурения, качества вскрытия продуктивных пластов и снижения стоимости строительства скважин: дис...канд. техн. наук / Р. И. Федосов. – Краснодар, 1996.

УДК 338.45:622.276

*Р. А. Шадчнев, А. В. Манкевич, Т. В. Мельникова***К ВОПРОСУ ФОРМИРОВАНИЯ СМЕТНОЙ СТОИМОСТИ
СТРОИТЕЛЬСТВА СКВАЖИН В ВОЛГОГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ****Филиал ООО «ЛУКОЙЛ-Инжиниринг»,
«ВолгоградНИПИморнефть», г. Волгоград**

В статье проводится исследование формирования сметной стоимости строительства скважин в Волгоградской области, с целью выявления путей ее снижения и повышения технико-экономических показателей.

Ключевые слова: планирование, сметная стоимость, скважина, затраты, бурение, крепление, испытание.

*R. A. Shadchnev, A. V. Mankevich, T. V. Melnikova***TO A QUESTION OF FORMATION OF ESTIMATED COST OF CONSTRUCTION
OF WELLS IN THE VOLGOGRAD REGION****Volgograd NPI morneft Branch of LUKOIL-Engineering LLS in Volgograd**

In article research of formation of estimated cost of construction of wells in the Volgograd region, for the purpose of identification of ways of its decrease and increase of technical and economic indicators of drilling is conducted.

Keywords: planning, estimated cost, well, expenses, drilling, fastening, test.

Нефтедобывающая промышленность – одна из важнейших отраслей экономики Волгоградской области.

Область относится к регионам, где нефтегазовые месторождения находятся на стадии истощения. Выработанность запасов углеводородов, особенно в старых нефтедобывающих районах по Арчединскому, Бахметьевскому, Жирновскому, и Коробковскому месторождениям, составляет от 79 до 97 %. Тем не менее, в 2012 г. область вошла в число крупнейших нефтедобывающих районов России.

Объем добычи нефти в 2014 г. составил свыше 4 млн. тонн (в 2013 г. – 3,5 млн. тонн). На таком же примерно уровне прогнозируется добыча в 2015 г. На сегодняшний день в Волгоградской области, по данным территориального управления по недропользованию, насчитывается 79 нефтяных месторождений, из которых 64 находится в разработке, одно готовится для промышленного освоения, два законсервированы и 12 – в разведке. По состоянию на 01.01.2014 г. текущие извлекаемые запасы углеводородов составили: по категориям В+С₁ – 18,8 млн. тонн, а С₂ – 4,9 млн. тонн.

В настоящее время в Волгоградской области ведется разработка и освоение таких перспективных площадей и месторождений, как Алексеевское, Антиповско-Балыклейское, Верхне-Романовское, Журавское, Ковалевское, Ново-Дмитриевское, Ольгинское и др. Глубина залегания углеводородов составляет от 2,5 до 4,5 тыс. м. Месторождения преимущественно мелкие.

Строительство геолого-разведочных и эксплуатационных скважин на этих месторождениях – сложный технологический процесс, качество выполнения которого зависит от следующих основных факторов:

1) геологических (предполагаемой и фактической стратиграфии и тектоники разреза, толщины пород различной проницаемости, прочности, пористости, наличия флюидосодержащих пород, пластовых давлений и др.);

2) технологических (механической скорости бурения, состава и свойств буровых растворов и др.);

3) экономических (динамики цен на химические реагенты, материалы, сервисные услуги и др.).

Планирование проведения буровых работ, их финансирование принято осуществлять исходя из смет на бурение скважин, которые определяют общую сумму затрат, необходимых для строительства. Они рассчитываются на основании проектной документации – проекта на строительство скважин, с использованием сметных норм, суточных ставок, тарифов, договоров сервисных компаний и др.

В соответствии с [1] для составления сметной документации используются следующие методы: ресурсный, ресурсно-индексный, базисно-индексный, базисно-компенсационный, а также метод, основанный на базе данных о стоимости объектов-аналогов. Уровень сметной стоимости и ее достоверность будут зависеть от выбранной сметно-нормативной базы (ЭСН-84 и др.).

Однако только использование ресурсного метода позволяет применять текущие цены к нормативному расходу ресурсов: трудовых, материальных, машин и механизмов, топливно-энергетических, оборудования и др. Не мало важную роль при составлении смет играет также метод использования банка данных о полной стоимости уже построенных или еще только запроектированных аналогичных объектов, откорректированный с использованием коэффициента удорожания.

Согласно [2], сметная стоимость строительства скважин на нефть и газ, представляет собой сумму затрат: на подготовительные работы к строительству скважины; монтаж и демонтаж буровой установки и оборудования; бурение и крепление скважины; испытание скважины на продуктивность; промыслово-геофизические работы; дополнительные затраты при строительстве скважины в зимнее время; накладные расходы; плановые накопления; прочие работы и затраты; авторский надзор; проектные и изыскательские работы.

Сметная стоимость является основой для определения размера капитальных вложений, финансирования строительства, формирования договорных цен на выполнение подрядными организациями строительно-монтажных работ, бурения, крепления, испытания скважин, оплаты расходов по эксплуатации оборудования и доставке его на буровую, а также возмещения многих других затрат за счет средств, предусмотренных сводным сметным расчетом.

Следует отметить, что бурение разведочных, поисково-оценочных и эксплуатационных скважин в Волгоградской области проводится в сложных горно-геологических условиях, характеризующихся совокупностью таких факторов, как значительная глубина залегания продуктивных пластов, высокие значения пластовых температур и давлений, наличия зон аномально высоких и низких пластовых давлений, невыдержанность по площади коллекторских свойств, низкая проницаемость пластов $0,0001-0,4 \text{ мкм}^2$ и др.

Данные условия диктуют повышенные требования к разработке и освоению месторождений, касающиеся обеспечения безаварийной проводки скважин, за счет проектирования конструкций и рационального способа бурения, подбора технологических жидкостей, обеспечивающих максимальное сохранение (восстановление) коллекторских свойств продуктивных пла-

стов, качественное строительство и безопасную эксплуатацию скважин. Ведь качественно спроектированная конструкция скважины, ее соответствие геологическим условиям в значительной степени обеспечивают надежность, технологичность, долговечность, производительность и снижают ее сметную стоимость, в связи с отсутствием дополнительных затрат на ликвидацию и предотвращение всех возможных осложнений (потеря устойчивости стенок скважин в терригенных отложениях; проявления и поглощения при наличии зон аномально высоких и низких пластовых давлений; течение солей; поглощений буровых растворов, прихватов бурового инструмента и др.).

Анализ сметной стоимости строительства скважин в Волгоградской области показал, что большую сумму затрат сводного сметного расчета составляют работы по бурению, креплению и испытанию скважин.

Так, на строительство эксплуатационной скважины глубиной от 2,5 до 4,5 тыс. м, в среднем затрачивается 153,4 сут., а разведочной – 255 сут.

Проектная скорость бурения для эксплуатационной скважины, в среднем составляет 1302 м/ст. мес., а для разведочной – 990 м/ст. мес.

Учитывая, что в основном продуктивными в регионе являются карбонатные отложения, испытание скважин на продуктивность, а также ее восстановление проводится с использованием одной или нескольких соляно-кислотных обработок пласта и призабойной зоны, при продолжительности в среднем для эксплуатационной скважины 20,6 сут., а для разведочной – 36,0 сут.

Сметная стоимость строительства эксплуатационной скважины в среднем, составляет более 250 тыс. руб., а разведочной – более 600 тыс. руб., из них на бурение, крепление и испытание приходится от 60 до 75% затрат.

Поэтому основными направлениями в снижении сметной стоимости и повышении эффективности буровых работ являются:

1. Проектирование рациональной конструкции скважин, обеспечивающей изоляцию всех возможных осложнений и качественный подбор технологических жидкостей, максимально сохраняющих (восстанавливающих) коллекторские свойства продуктивного пласта, качественное строительство и в дальнейшем безопасную их эксплуатацию.

Сокращение сроков строительства скважин, снижение стоимости метра проходки, получение достоверной геолого-геофизической инфор-

мации, сохранение естественной проницаемости продуктивных пластов стало возможным за счет подбора составов буровых растворов и их технологических свойств.

Так при выборе состава и технологических свойств бурового раствора, необходимо учитывать следующие общие требования: а) буровые растворы должны обеспечивать безаварийную проводку скважин в сложных геологических условиях и создавать удовлетворительные условия для работы бурового оборудования и бурильного инструмента; б) буровой раствор должен способствовать максимальному сохранению проницаемости пласта и призабойной зоны при вскрытии продуктивных отложений; в) буровой раствор должен повышать или, по крайней мере, не снижать показатели работы долот; г) состав бурового раствора не должен оказывать техногенного воздействия на окружающую среду и быть пожаро-взрывобезопасным;

Исследования, проведенные в нашей стране и за рубежом, однозначно доказали отрицательное воздействие на пласты водных буровых растворов. Глинистые частицы таких растворов, проникая в продуктивный пласт колыматируют поры пласта, затрудняя движение флюида, раствор и его фильтрат оттесняют флюид вглубь пласта и снижают его естественную проницаемость. При взаимодействии фильтратов глинистого или полимерного раствора с пластовыми водами в поровом пространстве и его каналах образуются нерастворимые или плохо растворимые осадки типа гидроксида железа (II), гидроксида магния (II), гидроксида кальция и др. Кроме того, они вызывают коррозию промышленного оборудования. При их применении в перерывах между циркуляциями не удерживается шлам в скважине во взвешенном состоянии, глинистые отложения набухают, разупрочняются, снижается устойчивость стенок скважин, особенно сложенных из глинистых пород, что приводит к образованию каверн, и при незначительных репрессиях поглощению промывочных жидкостей и другим осложнениям.

Для улучшения качества буровых растворов на водной основе к ним добавляют минеральные и органические добавки с целью замедления гидратационных процессов, используют смазочные добавки, снижающие трение, придают им псевдопластические реологические характеристики, которые обеспечивают как эффективный транспорт шлама, так и снятие избыточных гидравлических сопротивлений.

На больших глубинах, где зачастую требуется более высокая плотность бурового раствора или в случае, когда бурение осуществляется в сложных геологических условиях, используют диспергированные буровые растворы с добавлением лигносульфатов, лигнитов и танинов. Эти составы являются эффективными дефлокулянтами и используются для уменьшения фильтрации, результатом которой становится закупорка поровых каналов и невозможность прохождения флюидов по пласту.

Широкое применение получили «чистые», не содержащие твердой фазы буровые растворы. Отличием «чистых» буровых растворов, по сравнению с глинистыми, является возможность увеличения их плотности без соответствующего повышения концентрации твердой фазы. В качестве таких жидкостей используют водные растворы солей хлорида кальция, цинка, бромида кальция.

В случае обрушения пласта и, как следствие, расширение ствола скважины, применяют составы с высоким содержанием растворимого кальция, в состав которых входит гидроокись кальция, сульфат кальция и хлорид кальция, активируемые кальцием. Буровые растворы, активируемые кальцием, образуют кислотоустойчивый слой и отталкивают ангидридные примеси, они чувствительны к высоким температурам, при которых затвердевают, образуя гидрозатворы, увеличивают толщину граничных слоев, образуют осадки и закупоривают пористую среду твердыми частицами, а также могут приводить к набуханию глинистых минералов.

Для предотвращения различного рода осложнений в промысловых условиях используют полимерные загустители – растворы полиакриламида и частично гидролизованного полиакриламида, а также высоковязкие полианионные целлюлозы, оксиэтилированные эфиры целлюлозы. Для приготовления безглинистых полимерных буровых растворов используются гидролизованный полиакриламид (ГПАА), оксиэтилированная целлюлоза (ОЭЦ) и карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), биополимеры и другие соединения. Комплексообразователями служат хромовые и алюминиевые соли. В малоглинистых полимерных буровых растворах используются полимеры двойного действия, являющиеся стабилизаторами бентонитовых суспензий и коагуляторами высокодисперсных частиц. Для приготовления малоглинистых полимерных буровых растворов применяются в основ-

ном акриловые полимеры (ГПАА, метас, гидролиз, полиакрилонитрил – гипан и др.), сочетающиеся с КМЦ-600, КМЦ-700 и подобными полимерами, обеспечивающими дополнительные снижения фильтрации. Для утяжеления полимерных буровых растворов применяются водорастворимые соли тяжелых металлов. Такие системы эффективно снижают интенсивность диспергирования частиц глины в воде, что сводит к минимуму проникновение воды в слои и горизонты скважины, препятствуют возникновению поглощений буровых растворов и укрепляют стенки скважины.

Представляют также интерес буровые растворы на основе реагентов, полученных путем переработки крахмалсодержащего сырья, которые обеспечивают повышение качества вскрытия продуктивных горизонтов, за счет того, что они, наряду с полисахаридами различной молекулярной массы, содержат в своем составе продукты каталитического модифицирования сложных полимолекулярных органических соединений, действующие как высокоэффективные поверхностно-активные вещества. Они эффективно снижают водоотдачу буровых растворов, не ухудшают проницаемость продуктивных пластов и не мешают ее восстановлению.

Наиболее перспективными и теоретически отвечающими требованиям промывки скважин являются системы растворов, стабилизированные биополимерами или гидрогелями полимеров, обладающие псевдопластичными свойствами. Это обеспечивает энергетически выгодные условия разрушения породы и выноса шлама, поскольку образуется турбулентный режим вымывания частиц и высокая «мгновенная» фильтрация, способствующая эффективному разрушению породы. Буровой раствор на основе биополимеров характеризуется естественной смазывающей способностью. Как биополимеры, так и гидрогелевые растворы на основе подшитых оксигетероциклических эфиров целлюлозы допускают применение различных утяжеляющих материалов: барита, гематита, мраморной крошки, бромидов кальция. Применение биополимерного раствора за счет эффекта ранней турбулизации, позволяет снизить устьевые давления на 3,5–5,5 МПа по сравнению с глинистым раствором. При его использовании повышается устойчивость стенок скважин, отсутствуют поглощения промывочной жидкости и другие осложнения.

Попытки решить проблемы осложнений, использованием дополнительных промежуточных

колонн иногда приводит к удорожанию бурения более чем в 1,5 раза и двухкратному увеличению сроков строительства глубоких скважин.

2. Сокращение продолжительности цикла строительства во многом зависит от того, насколько успешно будут устранены недостатки в организации и технологии работ на заключительном этапе – испытании разведочных и эксплуатационных скважин на продуктивность.

Здесь в настоящее время находят применение соляно-кислотные растворы различных модификаций, обеспечивающие очистку продуктивных пластов и максимальное восстановление проницаемости в призабойной зоне.

3. Увеличение скорости бурения и, следовательно, сокращение затрат, зависящих от времени, и экономия материалов.

Проведение такого мероприятия стало возможным за счет оптимизации режимов бурения, применения новых типов долот и забойных двигателей, которые позволили повысить механическую скорость бурения в 1,9 раза, проходку на долото и сократить количество спуско-подъемных операций при бурении, тем самым, снизив цикл строительства скважины в два раза, а сметную стоимость строительства в 1,6 раза. Разработанные мероприятия были внедрены при строительстве скважин на Речном месторождении [3].

Выводы:

1. Ресурсный метод и метод банка данных о полной стоимости уже построенных или еще только запроектированных аналогичных объектов позволяют грамотно составить и рассчитать сметы на бурение (строительство) геолого-разведочных и эксплуатационных скважин в Волгоградской области.

2. Основными проблемами, с которыми приходится сталкиваться при бурении скважин, – сохранение устойчивости стенок в терригенных отложениях, наличие зон аномально высоких и низких пластовых давлений, больших солевых толщ каменной соли, поглощений буровых растворов, прихватов бурового инструмента и др.

3. Снижение стоимости было достигнуто за счет проведения следующих мероприятий при строительстве скважин:

а) проектирование рациональной конструкции скважин, обеспечивающей изоляцию зон всех возможных осложнений и качественный подбор технологических жидкостей, обеспечивающих максимальное сохранение (восстановление) коллекторских свойств продуктивного

пласта, качественное строительство и безопасную эксплуатацию скважин.

б) применение новейшего бурового оборудования с большей грузоподъемностью;

в) сокращение на 25–30 % сроков строительства скважин, за счет увеличения механических скоростей бурения и проходки на долото;

г) совершенствование организации работ и внедрение прогрессивных методов бурения и освоения скважин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. МДС 81-35.2004. Методика определения стоимости строительной продукции на территории Российской Федерации.

2. ВСН 39-86. Инструкция о составе, порядке разработки, согласования и утверждения проектно-сметной документации на строительство скважин на нефть и газ.

3. Шадчиев, Р.А. Повышение качества строительства наклонно-направленных скважин в сложных горно-геологических условиях Речного месторождения / Р. А. Шадчиев, А. В. Манкевич, Т. В. Мельникова, В. А. Морозов // Нефтяное хозяйство. – 2014. – № 3. – С. 18–21.

УДК 621.311.22

А. Д. Грига, Н. В. Кравченко, Д. С. Дудаков, О. В. Игнатченко

ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА РАБОТУ ПРЕДПРИЯТИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА С ЦЕЛЮ СОКРАЩЕНИЯ ЗОЛОТВАЛОВ: ТЕХНОЛОГИИ СЖИГАНИЯ И РЕШЕНИЕ ОРГАНИЗАЦИОННЫХ ПРОБЛЕМ

Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал) в г. Волжском

В статье рассмотрены технологии, пути развития и применения золошлаковых материалов, освещен зарубежный и отечественный опыт внедрения в различные сферы деятельности. Проанализирована необходимость развития технологий переработки золошлаков ввиду экономической и экологической целесообразности проектов. Выполнен анализ технологий сжигания низкосортного топлива для эффективного снижения золошлаков.

Ключевые слова: золошлаковые материалы, зола, композиционные цементы, технологии.

A. D. Griga, N. V. Kravchenko, D. S. Dudakov, O. V. Ignatchenko

ECONOMIC AND ENVIRONMENTAL EFFECTS ON THE OPERATION OF ENTERPRISES OF THE ENERGY COMPLEX WITH THE AIM OF REDUCING ASH DISPOSAL: INCINERATION TECHNOLOGY AND THE SOLUTION OF ORGANIZATIONAL PROBLEMS

Branch of the National Research University «MPEI», Volzhsky

The article describes the technology and the development and application of ash and slag materials discussed foreign and domestic experience of implementation in different spheres of activity. Analyze the need for development of technologies for processing ash and slag, given the economic and environmental feasibility of the projects. The analysis of technologies of burning low-grade fuel to effectively reduce ash and slag.

Keywords: ash materials, ash, composite cements, technologies.

В России около 70 % всей электроэнергии вырабатывается при сжигании твердого топлива – углей, сланцев, торфа, в результате чего образуется около 50 млн. тонн в год отходов золошлаковых смесей. К концу 2001 г. в отвалах ТЭС находилось свыше 1,2 млрд. тонн таких отходов, а уровень их утилизации составляет только около 10 %. Утилизируется и используется не более 1,5–2,1 млн. т годового выхода ЗШО. Если такая тенденция сохранится, то к 2020 г. объем накопленных ЗШО превысит 1,8 млрд. т. По экспертной оценке, затраты на содержание 1 т ЗШО составляют от 400 до 700 руб. или 5–7 % себестоимости производства электроэнергии и тепла

угольной ТЭС. Инвестиции в реконструкцию одного золошлакоотвала могут достигать до 1 млрд. руб. Стоимость строительства нового золошлакоотвала 2–4 млрд. руб. В ближайшие годы (по экспертной оценке через 3–5 лет) переполнение золошлакоотвалов приобретет массовый характер (сейчас процесс уже начался). Это создает риск ограничения мощности угольных генераций и вывода их из энергетического баланса в ближайшие годы [1–3].

Уголь – один из старейших видов топлива. Несмотря на повсеместное использование нефти, газа, урана, процентная доля угля в мировой энергетике составляет около 40 %. Но в процес-

се сжигания угля образуется не только энергия, но и побочные продукты сгорания – золошлаковая смесь. Свойства золошлаковых смесей ТЭЦ зависят, в первую очередь, от характеристик минеральной части исходного топлива и способов его сжигания. В последние годы произошло расширение перечня углей, поставляемых на ТЭЦ: жеронский, головинский каменный, ирбейский, переясловский, каннский бурый и т. д. Однако в нашей стране по-прежнему крайне низкий уровень использования золошлаков. В СССР годовой выход золошлакоотвалов в конце 1980-х гг. был около 100 млн. т, уровень утилизации (переработки) – 15 %. В России годовой выход золошлакоотвалов (в среднем) – 25 млн. т, уровень утилизации (переработки) – 8 % [2].

Существует, по крайней мере, два подхода к утилизации золошлаковых смесей.

1. Законсервировать отработанные золошлакоотвалы для дальнейшего их использования в качестве источника сырья.

Недостатками этого подхода являются:

- отрицательное воздействие на окружающую среду (фильтрация, пыление);
- дефицит новых территорий для новых хранилищ золошлакоотвалов, так как старые хранилища заполнены.

2. Добиваться реализации существующих золошлакоотвалов.

Преимуществами этого подхода являются:

- сохранение природной среды (экономия природных ресурсов, сокращение площадей под золошлакоотвалы, снижение рисков негативного воздействия на окружающую среду);
- сокращение эксплуатационных и инвестиционных издержек на отбор, транспортировку и хранение ЗШО;
- снижение себестоимости производства энергоносителей.

Научные исследования и практика дорожного строительства показали, что золы и шлаки от сжигания твердых видов топлива представляют собой материалы, пригодные для применения во многих отраслях народного хозяйства:

- в сельском хозяйстве: как удобрение;
- в металлургии: как шихта для получения алюминия и концентрат для получения железа;
- в строительной индустрии: золошлаковые смеси и золы сухого улавливания как сырье для цементов и бесклнкерных вяжущих, бетонов (тяжелых, легких, ячеистых), пористых заполнителей, силикатных, керамических, теплоизоляционных и других материалов.

Но использованию золошлаковых материалов присущ ряд проблем, связанных как и с технологиями переработки, так и с отсутствием видимых перспектив использования таких материалов.

Проблемы угольных ТЭС в области обращения с золошлакоотвалами (ЗШО):

- золошлакоотвалы – это балласт для угольных ТЭС;
- работа по утилизации – непрофильная деятельность энергетиков;
- требуются значительные инвестиции для золошлакоотвалов;
- потребителями реализуются слишком малый процент от произведенных продуктов;
- ухудшение экологической ситуации в области расположения золошлакоотвала.

Существуют и проблемы реализации зольных остатков:

- проблема заключается в сбыте продукции;
- отсутствие независимой профессиональной экспертизы проектов утилизации ЗШО и их эффективности после внедрения;
- сомнителен юридический аспект продажи ЗШО стороннему потребителю, так как они уже были оплачены потребителями при покупке электроэнергии и тепла.

Несмотря на многочисленные проблемы, связанные с использованием и реализацией ЗШМ, существует практика применения таких материалов в различных отраслях сельского хозяйства и промышленности.

В частности, в Японии предлагалось использовать ЗШМ для производства искусственных почв. Было установлено, что зола, вносимая в подпахотный слой на глубину 20–25 см, не влияет на минералогический состав почвы, а, следовательно, экологический баланс, но позволяет улучшить ее водно-физические свойства.

В 2005 г. в ОКБ СибНИИСХоза было создано сельскохозяйственное орудие – глубокорыхлитель РН-4. Через два года за его успешное внедрение в производство на Всероссийской выставке, проходившей в Ростове-на-Дону, Омский экспериментальный завод Россельхозакадемии был награжден Золотой медалью. Модифицированная модель этого агрегата позволяет проводить глубокую обработку почвы с одновременным внесением гранул ЗШМ в подпахотный слой

В области строительства введение золы в цемент в количестве до 20 % несколько снижает его прочность в начальные сроки твердения, на 28 сутки снижение прочности минимально, а при длительных сроках твердения прочность

цементов с золой становится часто более высокой, чем без золы. При производстве силикатного кирпича на основе ЗШМ улучшаются водо- и морозостойкие свойства, уменьшаются значения водопоглощения и водопроницаемости.

Одним из основных потребителей топливных зол и шлаков является дорожное строительство, где они используются для устройства подстилающих и нижних слоев оснований, частичной замены вяжущих при стабилизации грунтов цементом и известью, как минеральный порошок в асфальтовых бетонах и растворах, как добавки в дорожных цементных бетонах. Золы, полученные при сжигании углей и горючих сланцев, широко применяются в качестве наполнителей кровельных и гидроизоляционных мастик.

Наряду с отрицательными аспектами применения и реализации ЗШМ существует и ряд положительных, которые, очевидно, имеют существенные перспективы и выгоды:

- производитель энергии получает прибыль с продажи отходов;
- предприятия малого и среднего бизнеса снижают себестоимость продукции за счет использования ЗШМ;
- переработка и использование ЗШО снижает себестоимость производства энергии и строительных материалов и как следствие, уменьшает стоимость конечного продукта;
- улучшение экологической обстановки в районах золошлакоотвалов, следовательно, оздоровление населения.

Следует определить основные пути развития и направления для работы с ЗШМ:

- отделить переработку и использование ЗШМ от основной деятельности станций;
- повышение конкурентоспособности угольных ТЭС за счет сокращения объемов отходов;
- создание и работа с рынком реализации ЗШМ;
- расширение номенклатуры реализуемого продукта за счет классификации и дополнительной переработки;
- сокращение издержек на содержание золошлакоотвалов и систему гидрозолоудаления;
- установка систем отбора сухой золы;
- строительство силосов сухой золы;
- внедрение новых способов складирования невостребованных золошлаков;
- полный отказ от золошлакоотвалов.

Эффективное использование низкосортного твердого топлива (НСТ) в энергетике с минимальным воздействием на окружающую среду и снижением выхода ЗШМ возможно лишь на

основе новых технологий сжигания или методов подготовки топлива к сжиганию в энергетических котлах. Эффективными технологиями сжигания НСТ в настоящее время считаются циркулирующий кипящий слой (ЦКС) и низкотемпературное вихревое сжигание (НТВ).

Преимущества и недостатки технологии ЦКС.

За последние два десятилетия технология котлов с ЦКС быстро развивалась и стала одной из самых экономически оправданных угольных технологий во всем мире, благодаря возможности сжигать топлива с широким диапазоном характеристик, отличной способностью контролировать эмиссию вредных выбросов и хорошими маневренными характеристиками. Технология ЦКС обладает рядом достоинств, однако при эксплуатации возникают проблемы, которые негативно влияют на общие параметры эффективности и безопасности [5–7].

Следующий ряд проблем является типичным для всех котлов ЦКС.

1. Распределение первичного воздуха и опыт эксплуатации колпачковых решеток. Основными проблемами воздушных колпачков является закупорка, шлакование, эрозия, отрыв колпачков и протечка шлака. Как показывает практика, использование того или иного типа колпачков в воздухораспределительной решетке весьма значительно влияет на эксплуатационные показатели.

2. Проблемы с системой улавливания и возврата материала. Система состоит из циклона, опускающего стояка и затвора.

3. Эрозия поверхностей нагрева и футеровочных материалов.

Для исключения или снижения процессов эрозии применяют:

- выбор соответствующих марок стали. Обычно для поверхностей нагрева, работающих в окислительной среде, применяют низкоуглеродистую и легированную сталь. Для коррозионно-агрессивных и восстановительных сред необходимо применять защитную футеровку;
- применение противозерозионных конструкций и компоновок. Взаимное расположение точек систем подачи топлива, циркуляции и распределения материала, воздуха, геометрия топki и ее элементов выбирается с учетом возможного эрозионного износа.

Необходимо смонтировать элементы защиты труб поверхностей нагрева от абразивного и эрозионного износа;

- металлические поверхности, которые могут подвергаться эрозии, требуют обработки для

повышения их противозерозионных свойств, включая термонапыления, гальванопокрытия, термической обработки, азотирования, нанесение коррозионно-стойкого слоя погружением;

– необходимо уделять особое внимание качеству изготовления и монтажа, постоянно обучать эксплуатирующий персонал, контролировать качество поступающего угля, контролировать скорость роста температуры слоя.

4. Потребление энергии на собственные нужды, как главный недостаток технологии ЦКС. По этой причине сдерживается развитие внедрения котлов большой паропроизводительности.

Снижение эксплуатационных затрат за счет технологии сжигания с малым перепадом в слое предложено в Tsinghua University. Положив в основу традиционный расчет котлов с ЦКС, разработана новая методика расчета с переработанной моделью ожигения в топке, которая включает в себя сниженный перепад давления в слое и учет материала слоя [6]. Данная методика отработана на котле с паропроизводительностью 75 т/ч и блоке 300 МВт, результаты работы которых наглядно продемонстрировали существенное снижение эрозионного износа и снижение затрат на собственные нужды.

Применение НТВ-технологии позволяет:

– упростить систему подготовки топлива, увеличить ее производительность, обеспечить взрывобезопасность, снизить затраты на подготовку топлива к сжиганию, увеличить срок службы размольного оборудования;

– стабилизировать воспламенение и горение и отказаться от «подсветки» факела газом или мазутом даже при сжигании низкосортных топлив;

– обеспечить устойчивый процесс горения вне зависимости от колебаний нагрузки котла и технических характеристик топлива, что унифицирует топку по топливу;

– повысить коэффициент тепловой эффективности топки, что дает возможность увеличить паропроизводительность котла на 15–20 %;

– исключить шлакование и загрязнение топочных и конвективных поверхностей нагрева;

– обеспечить снижение выбросов оксидов азота NO_x на 30–50 %;

– обеспечить снижение выбросов оксидов серы SO_x на 20–40 % за счет их связывания с основными оксидами золы (CaO и MgO) при благоприятных внутритопочных условиях;

– обеспечить более глубокое связывание оксидов серы за счет ввода в вихревую топку CaO содержащих добавок.

Кроме того, отработка систем подготовки топлива (в отсутствие надежных методов рас-

чета пылеприготовительных систем с угрубленным помолом) базировалась в основном на интуиции и приближенных расчетных оценках, что в ряде случаев не давало ожидаемого результата, осложняло внедрение технологии и приводило к материальным издержкам.

Указанные сложности затрудняют выбор и обоснование технических решений при реконструкции действующих и создании новых котельных установок на основе НТВ-технологии, сдерживают ее широкое внедрение.

В ы в о д ы :

Для решения организационных задач, необходимых для повсеместного внедрения и использования ЗШМ необходимо:

1. Не прекращая текущей деятельности по утилизации ЗШО, сосредоточиться на институциональных проектах в области обращения ЗШО;

2. Развивать на федеральном и региональном уровнях деловое взаимовыгодное сотрудничество с зарубежными странами, имеющими богатый опыт в области обращения ЗШО;

3. Подключать бизнес-структуры, обладающие инновационными технологиями и производящие оборудование для переработки ЗШО, к разработке проектов, направленных на сокращение выхода ЗШО;

4. Привлекать бюджетные (федеральные и территориальные) источники, средства энергокомпаний, владеющих угольными генерациями, и иные источники к финансированию проектов, направленных на увеличение уровня потребления ЗШО.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шишелова, Т. И. Направления использования золошлаковых материалов (ЗШМ) ТЭС Иркутской области в качестве вторичного сырья / Т. И. Шишелова, М. Н. Самусева // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 8 – С. 41–43.
2. Кожуховский, И. С. Совершенствование обращения с золошлаковыми отходами / И. С. Кожуховский // Экология производства. – 2012. – № 10. – С. 48–51.
3. Самусева, М. Н. Золошлаковые материалы – альтернатива природным материалам / М. Н. Самусева, Т. И. Шишелова // Фундаментальные исследования. – 2009. – № 2 – С. 75–76.
4. Использование отходов тепловой энергетики и угольной промышленности для производства строительных материалов в странах СЭВ // Экспресс-информация ВНИИЭСМ. 1981. – (Серия 20 «Зарубежный опыт»; вып. 5).
5. Рябов, Г. А. Опыт эксплуатации котлов ЦКС в Китае / Г. А. Рябов, К. В. Ханеев // Современная наука: сб. науч. ст. – 2012. – № 3. – С. 23–26.
6. Su, J., Zhao, X., and Zhang, J.: Design and Operation of Circulating Fluidized Bed Boiler with Low Bed Inventory, in: Y. Yue (Eds). 20th International Fluidized Bed Combustion Conference, May 21–23, 2009, Xian China.
7. Li, J., Mi, J., Hao, J. et al.: Operational Status of 300 MWE CFB Boiler in China, In: G. Yue (eds.), 20th International Conference on Fluidized Bed Combustion. Xi'an, 2009, China.

УДК 532.525.3

*А. Б. Голованчиков, Н. В. Шибитова, Н. С. Шибитов, Д. Р. Александрин***ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИКИ
ЦЕНТРОБЕЖНО-СТРУЙНОЙ ФОРСУНКИ****Волгоградский государственный технический университет**

Выполнено экспериментальное исследование процесса распыливания струи жидкости с помощью разработанной промышленной центробежно-струйной форсунки, защищенной патентом на полезную модель РФ. Проведен корреляционный анализ результатов исследования по распыливанию струи жидкости, подтверждающий воспроизводимость экспериментальных данных в параллельных опытах по критерию Кохрена, адекватность полученной теоретической зависимости по критерию Фишера и значимость коэффициентов по критерию Стъдента. Определены оптимальные технологические параметры центробежно-струйной форсунки, обеспечивающие максимальный вылет струи по высоте и длине градири.

Ключевые слова: обратное водоснабжение, струя, эжекционная градири, форсунка, корреляция.

*A. B. Golovanchikov, N. V. Shibitova, N. S. Shibitov, D. R. Aleksandrin***EXPERIMENTAL STUDY OF THE HYDRODYNAMICS
OF THE CENTRIFUGAL-JET NOZZLE****Volgograd State Technical University**

The experimental research of the process of spraying a jet of liquid on the developed industrial centrifugal-jet nozzle is executed, protected by the patent for useful model of the Russian Federation. Conducted a correlation analysis of the results of the research on the spray a jet of liquid, confirming the reproducibility of experimental data in the para-parallel experiments according to the criterion of Cochran, the adequacy of the obtained theoretical dependence according to the Fisher test, and the significance of coefficients according to the criterion of Student. The optimal technological parameters of centrifugal-jet nozzle providing maximum departure of the jet on height and length of the cooling tower are determined.

Keywords: reverse water supply, jet, ejection cooling tower, nozzle, correlation.

Неотъемлемой частью любого производства является система водоснабжения, которая призвана обеспечить отвод тепла от оборудования в окружающую среду.

В последние десятилетия в химической, нефтехимической и других отраслях промышленности на предприятиях используют систему оборотного водоснабжения для охлаждения, как основного, так и вспомогательного оборудования. Повторное использование воды позволяет сократить до 96 % от общего водопотребления, однако ее необходимо охлаждать чаще всего в градирнях [1, 2].

В настоящее время для охлаждения воды в системе оборотного водоснабжения все более широкое применение находят безнасадочные градирни эжекционного типа, которые отличаются от других видов градирен низкими капитальными и эксплуатационными затратами, простотой конструкции и снижением энергозатрат, по сравнению с вентиляторными градирнями.

Основным элементом эжекционной градирни является гидравлическая форсунка. Среди существующих видов форсунок наиболее эффективной по созданию поверхности контакта фаз является центробежно-струйная форсунка, так как она позволяет получить сплошной фа-

кел, который полностью заполнен мелкодисперсными каплями [3].

Целью данной работы является исследование процесса распыливания струи жидкости с помощью промышленной центробежно-струйной форсунки, обработка полученных результатов с помощью корреляционного анализа.

Выбор промышленной центробежно-струйной форсунки обусловлен тем, что при проведении исследований на лабораторной установке можно получить только качественную картину влияния различных параметров на длину и угол факела, но использовать эти результаты для практического применения затруднительно из-за проблемы масштабирования.

Исследование процесса распыливания струи жидкости с помощью промышленной центробежно-струйной форсунки проводилось на экспериментальной установке, показанной на рис. 1.

Данная установка состоит из открытого бака 2 объемом 0,156 м³, в который подается вода из трубопровода через проходной кран 4. Центробежным насосом 3, подсоединенным к открытому баку 2 с помощью шланга, вода поступает на центробежно-струйную форсунку 5, которая устанавливается на подставку 6 под разным углом наклона к площадке.

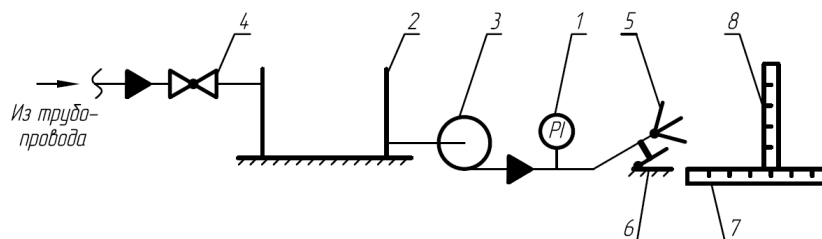


Рис. 1. Экспериментальная установка:

1 – манометр; 2 – открытый бак; 3 – центробежный насос; 4 – проходной кран; 5 – центробежно-струйная форсунка; 6 – подставка; 7, 8 – соответственно горизонтальная и вертикальная планки

Распыливание воды проводится на площадке размером 6х4 м, где данные размеры соответствуют 1/12 части промышленной эжекционной градири площадью 288 м². На площадке расположена горизонтальная 7 планка с ценой деления 0,1 м, к которой крепится вертикальная 8 планка также с ценой деления 0,1 м. Перед центробежно-струйной форсункой 5 установлен манометр 1.

На центробежно-струйную форсунку, используемую в эксперименте, получен патент РФ на полезную модель № 145896 [4].

При проведении экспериментального исследования в промышленной центробежно-струйной форсунке устанавливаются вкладыши, име-

ющие разные диаметры центрального цилиндрического и периферийных наклонных отверстий с разными углами наклона. Параметры вкладышей представлены в таблице.

Так как одной из особенностей разработанной форсунки является наличие упругих элементов, благодаря которым изменяется длина распыливаемого факела, то первой задачей является экспериментально определить высоту данных элементов, при которой достигается наибольшая длина распыла.

На рис. 2 изображен график зависимости длины факела L жидкости от высоты H упругих элементов для трех различных вкладышей форсунки.

Параметры вкладышей в центробежно-струйной форсунке

№ вкладыша	Диаметр центрального отверстия $d_{\text{отв}}$, мм	Диаметр периферийных наклонных отверстий $d_{\text{пер}}$, мм	Угол наклона периферийных отверстий α , °
№ 1	5	5	30
№ 2	6	6	30
№ 3	7,5	6	25

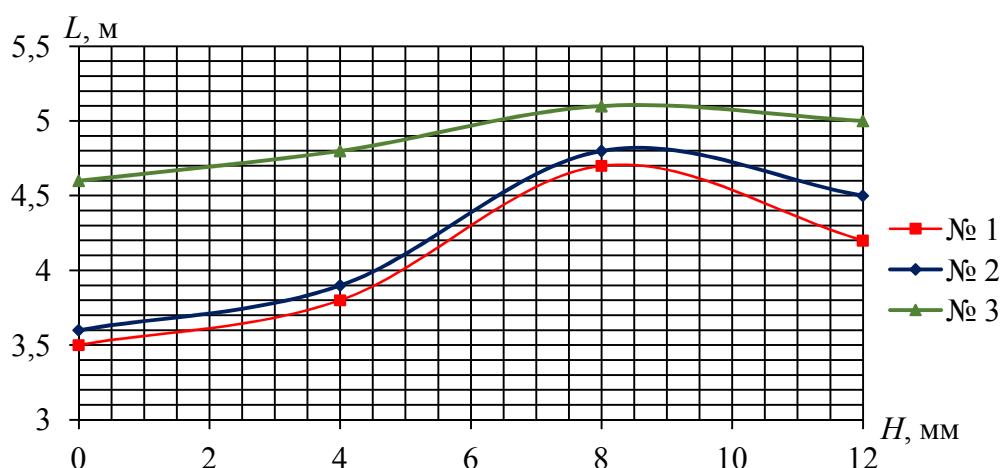


Рис. 2. График зависимости длины факела жидкости от высоты упругих элементов

Из графика видно, что с увеличением диаметра отверстий во вкладыше длина факела увеличивается. Это связано с тем, что с увеличением диаметра отверстий сопротивление,

оказываемое на поток, будет меньшим, соответственно и длина распыла у него будет больше. Наибольшая длина факела образуется при высоте упругих элементов $H = 8$ мм, однако

в дальнейшем длина уменьшается. Связано это с тем, что при распыливании происходит срыв осевого факела и его частичное торможение о периферийный факел. Таким образом, дальнейшее экспериментальное исследование про-

водилось на центробежно-струйной форсунке с высотой упругих элементов $H = 8$ мм.

На рис. 3–5 представлены графики зависимостей факела, распыливаемого из форсунки.

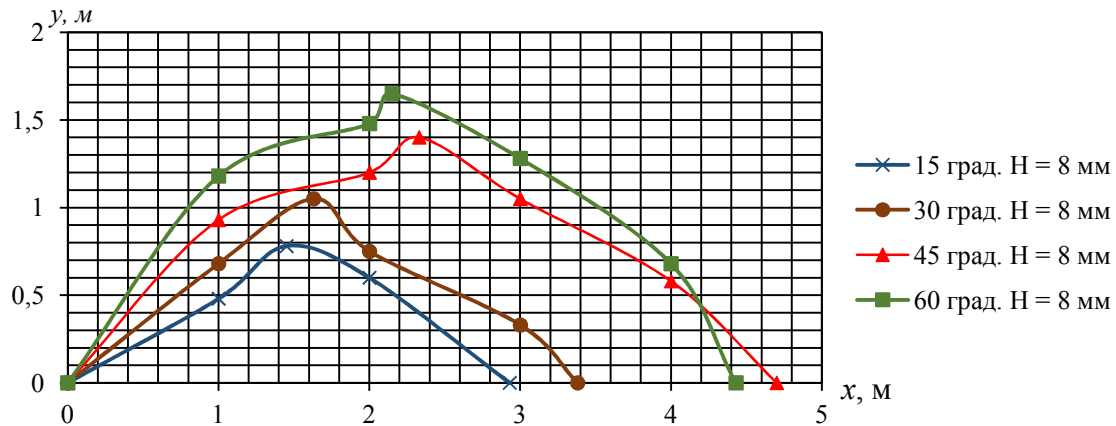


Рис. 3. График зависимости факела, распыливаемого из форсунки с вкладышем № 1

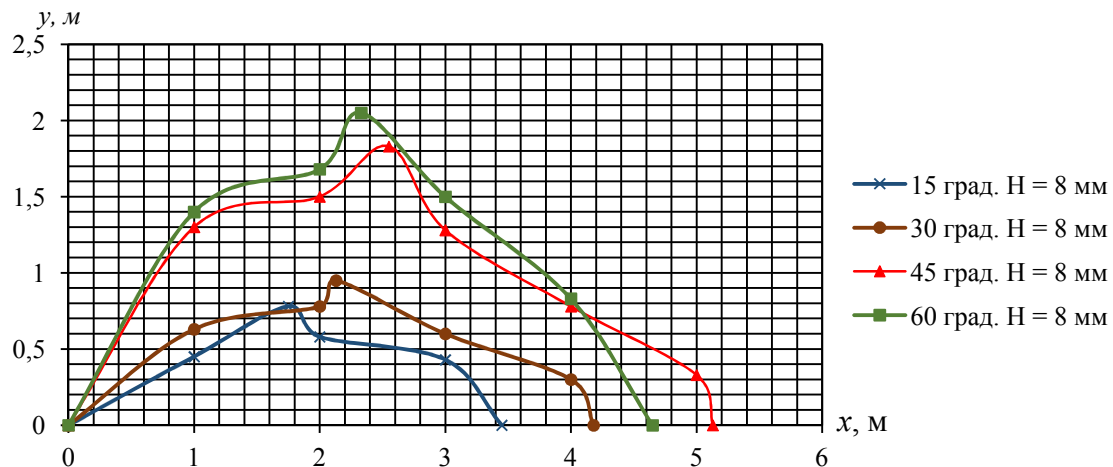


Рис. 4. График зависимости факела, распыливаемого из форсунки с вкладышем № 2

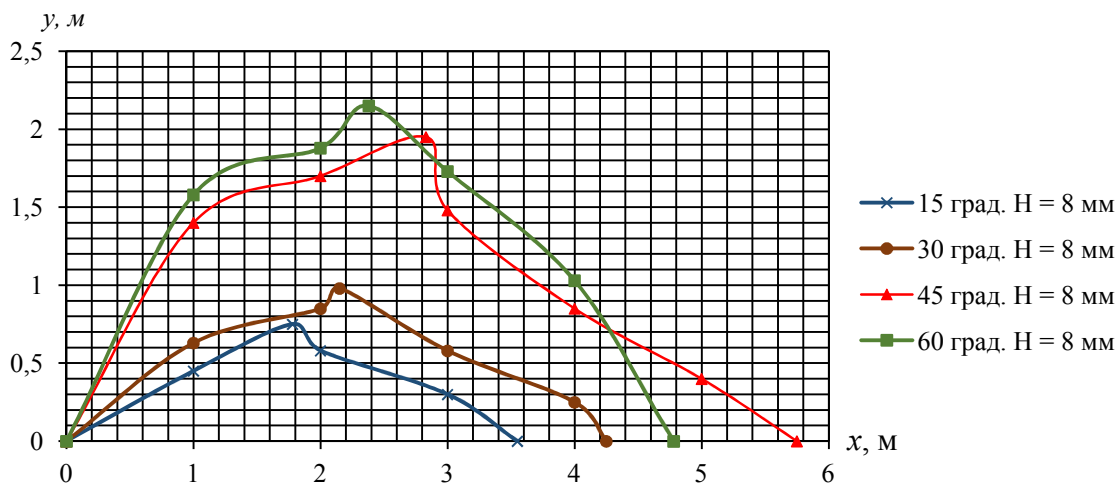


Рис. 5. График зависимости факела, распыливаемого из форсунки с вкладышем № 3

Из рис. 3–5 видно, что наибольшая длина факела образуется при расположении форсунки

под углом $\gamma = 45^\circ$. При угле наклона форсунки $\gamma = 60^\circ$ достигается наибольшая высота распы-

ливаемого факела. Также с увеличением диаметров отверстий во вкладыше, то есть с увеличением номера вкладыша, длина распыливаемого факела возрастает. Это также подтверждается в предыдущей части исследования по определению высоты упругих элементов.

Так как экспериментальное исследование гидродинамики центробежно-струйной форсунки проводилось при одинаковых условиях с соблюдением методики эксперимента, то корреляционный анализ результатов данного исследования проводился для центробежно-струйной форсунки с упругими элементами высотой $H = 8$ мм, с вкладышем № 3 и расположением форсунки под углом 60° .

В работе [5] траектория струи, распыливаемой из форсунки, описывается уравнением (1), график которого представляет собой параболу. Полученные графики отображают результаты экспериментального исследования этой зависимости.

$$y = x \cdot \operatorname{tg} \gamma - \frac{g \cdot x^2}{2 \cdot v_d^2 \cdot \cos^2 \gamma}, \quad (1)$$

где y, x – соответственно высота и длина распыливаемой струи, м; γ – угол наклона оси отверстия к горизонту, град.; g – ускорение свободного падения, м/с^2 ; v_d – действительная скорость истечения струи, м/с .

Корреляционный анализ выполнен на языке Fortran по программе Aleksandrin1, в основе которой лежит метод наименьших квадратов [6].

Для проведения корреляционного анализа уравнение (1) удобно представить в следующем виде:

$$y = a \cdot x + b \cdot x^2, \quad (2)$$

где a, b – искомые коэффициенты.

После линеаризации уравнения (2), оно выглядит следующим образом:

$$Y = a + b \cdot X, \quad (3)$$

где $Y = y / x$, а $X = x$.

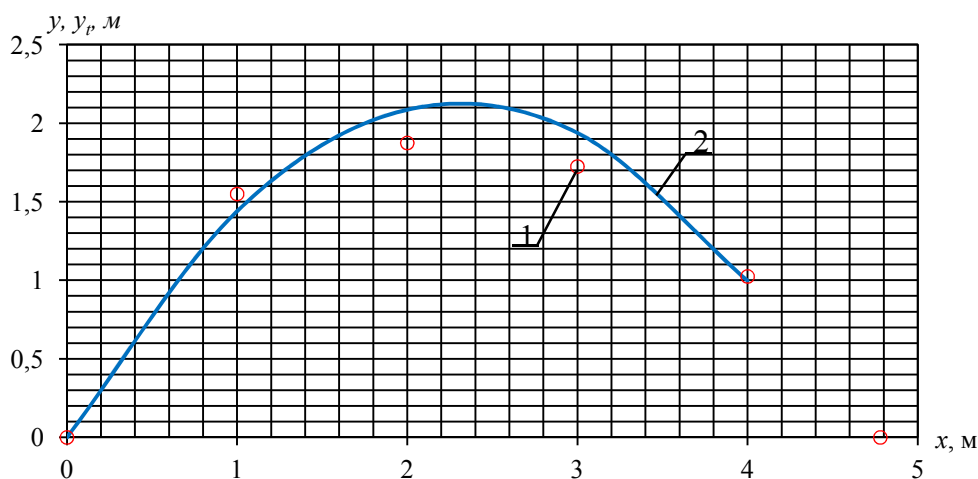


Рис. 6. График зависимости траектории факела, распыливаемого из форсунки:
1 – эксперимент; 2 – теория по уравнению (4)

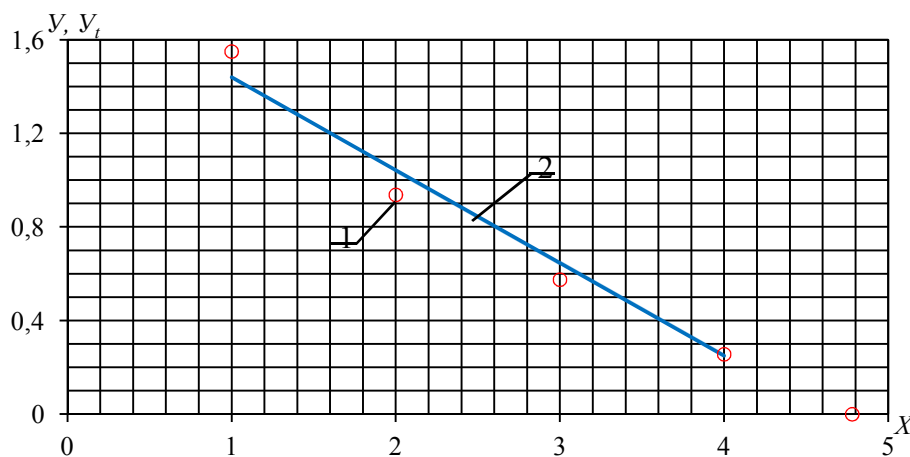


Рис. 7. График зависимости траектории факела, распыливаемого из форсунки:
1 – эксперимент; 2 – теория по линеаризованному уравнению (3)

Как видно, зависимость (3) является уравнением прямой линии. После выполнения корреляционного анализа уравнение (2) выглядит:

$$y = 1,837028 \cdot x - 0,3969141 \cdot x^2. \quad (4)$$

По результатам выполнения корреляционного анализа построены графики зависимостей $y, y_i = f(x)$ (рис. 6) и $Y, Y_i = f(X)$ (рис. 7).

В результате экспериментального исследования были изучены траектории струй, распыливаемых под разным углом наклона форсунки и из трех вкладышей. Для обработки экспериментальных данных было рассмотрено уравнение (1).

Корреляционный анализ результатов эксперимента показал:

1. Расчет коэффициентов уравнения: $a = 1,837028$; $b = -0,3969141$ (число основных опытов – 5, число параллельных опытов – 4).

2. Дисперсия опытов однородна и воспроизводимость в параллельных опытах выполняется, так как расчетный критерий Кохрена меньше табличного $G_p \leq G_t$ и $G_{pl} \leq G_t$ ($G_p = 0,5789476$; $G_{pl} = 0,5303$; $G_t = 0,5981$) [7].

3. Гипотеза об адекватности линейного уравнения опытным данным отвергается, значит, линейное уравнение регрессии неадекватно и модель неадекватная, потому что расчетный критерий Фишера больше табличного $F_p > F_t$ ($F_p = 60,20181$; $F_t = 3,29$). На наш взгляд, это объясняется недостаточной точностью измерительных приборов.

4. Полученные коэффициенты уравнения (2) значимы, потому что расчетный критерий Стьюдента для искомых коэффициентов больше таб-

личного $t_p > t_t$ ($t_{ap} = 163,8543$; $t_{bp} = 35,40287$; $t_t = 2,13$).

5. Ошибка между теоретическими (расчетными) и экспериментально найденными значениями высоты факела не превышает |13|%.

6. Так как коэффициент корреляции $r = -0,9890911$, то зависимость высоты факела от его длины высокая и обратная для линеаризованного уравнения (3).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономаренко, В. С. Градирни промышленных и энергетических предприятий : справ. пособие / В. С. Пономаренко, Ю. И. Арефьев ; под ред. В. С. Пономаренко. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
2. Маринюк, Б. Т. Расчет процесса вакуумно-испарительного охлаждения воды в безнасадочной градирне / Б. Т. Маринюк, С. В. Спритнюк // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 3. – С. 26–27.
3. Пажи, Д. Г. Распылители жидкостей / Д. Г. Пажи, В. С. Галустов. – М.: Химия, 1979. – 216 с.
4. Пат. М. 145896 Российская Федерация, МПК В 05 В 1/34. Центробежно-струйная форсунка / Шибитов Н. С., Шибитова Н. В., Голованчиков А. Б., Александрин Д. Р.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «Волгоградский государственный технический университет». – №2014116302/05; заяв. 22.04.14; опубл. 27.09.14, Бюл. № 27.
5. Головачевский, Ю. А. Оросители и форсунки скрубберов химической промышленности / Ю. А. Головачевский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1974. – 271 с.
6. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. В 2 ч. Ч. 1 : учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонов. – Волгоград : ВолГТУ, 1994. – 114 с.
7. Бондарь, А. Г. Планирование эксперимента в химической технологии. Основные положения. Примеры и задачи / А. Г. Бондарь, Г. А. Статюха. – Киев: Вища школа, 1976. – 184 с.

УДК 621.311.22

М. С. Иваницкий

СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ РТУТИ ПРИ ГОРЕНИИ УГЛЯ В ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЛАХ

«Национальный исследовательский университет «МЭИ» (филиал) в г. Волжском

Приведен анализ необходимости сокращения эмиссии ртути при сжигании угольного топлива в энергетических отопительных котлах. В зависимости от рабочих характеристик исходного топлива приведено оценочное содержание ртути в компонентах сгорания угля. Рассмотрены мероприятия по совершенствованию топочного процесса для ведения малотоксичных режимов горения угольного топлива посредством использования газоочистных установок при внедрении в производство наилучших доступных технологий.

Ключевые слова: ртуть, уголь, токсичность продуктов сгорания.

M. S. Ivanitskiy

REDUCTION OF MERCURY EMISSIONS DURING COMBUSTION OF COAL IN HEATING BOILERS

Branch of the National Research University «MPEI», Volzhsky

The analysis of the need to reduce mercury emissions during combustion of coal fuel in power boiler. Depending on operating characteristics of the fuel shows the estimated mercury content in the components of coal combustion. Consider measures to improve the combustion process for the reference low-emission modes of combustion of coal fuels, through the use of gas cleaning systems with the introduction in the production of the best available technologies.

Keywords: mercury, coal, toxicity of combustion products.

При горении угольного топлива в топках энергетических котлов в воздушный бассейн выбрасывается значительное количество вредных компонентов дымовых газов (оксиды азота, серы, углерода, сажа, зола, монооксид углерода, бенз(а)пирен (БП), пентаоксид ванадия, ртуть (Hg, HgO)). Неполнота окисления топлива способствует генерации в продуктах сгорания полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), относящихся к 1 классу опасности. При этом массовый выброс компонентов не характеризует показатель суммарной токсичности дымовых газов. При расчетах общей токсичности уходящих газов необходимо использовать показатели частной агрессивности конкретных компонентов уходящих газов. Например, несмотря на относительно малый выход БП (микропримесь), показатель его токсичности значительно превышает уровни других компонентов сгорания. Следует отметить, что суммарная токсичность уходящих газов усиливается при взаимном влиянии отдельных компонентов сгорания, особый интерес представляет влияние серо-, азот-, ртутьсодержащих веществ (Hg, HgO) [1–13].

Экологическая пара «оксиды ртути – монооксид углерода» по уровню токсичности в эксплуатационном диапазоне избытка воздуха сравнима с системной парой «бенз(а)пирен–оксиды ртути». Коэффициенты парной корреляции для рассмотренных экологических систем положительны, что указывает на непосредственную тесную связь БП и монооксида углерода, оксидов ртути в условиях генерации токсичных соединений и формирования суммарной токсичности выбросов при сжигании угольного топлива. Следовательно, исследование взаимного влияния компонентов уходящих газов на суммарную токсичность выбросов при горении углеводородного топлива позволяет определить оптимальные нагрузочные режимы работы твердотопливного котлоагрегата при условии необходимости обеспечения требуемой экологической безопасности. Исследования влияния частной токсичности ртути на суммарную агрессивность пылегазовых выбросов требует отдельного моделирования химической кинетики процесса горения. В данной работе выполнен анализ эмиссии ртутьсодержащих компонентов дымовых газов при сжигании угля в топках отопительных котлов [9–11].

Согласно Программе ООН по защите окружающей среды (UNEP), пылеугольные котлы

относятся к глобальным антропогенным источникам эмиссии ртути. В соответствии с Энергетической стратегией развития России до 2030 г. доля угля в формировании суммарного топливопотребления увеличится до 32–36 %. Уровень использования угольного топлива в производстве тепла и электроэнергии в настоящее время находится в пределах 25–27 % [13]. При этом необходимо отметить, что в России до сих пор очистка дымовых газов от твердых продуктов сгорания и газообразных токсичных компонентов носит локальный масштаб. Нормирование удельных выбросов вредных компонентов сгорания производится в соответствии с устаревшими лимитами, не учитывает специфики производства и введение новых генерирующих мощностей. Благоприятный вариант развития российской электроэнергетики определяет массовую эмиссию ртути к 2030 г. в пределах 17 т/год, при неблагоприятном прогнозе до 45 т/год. Россия в соответствии с международным соглашением UNEP должна принимать меры по защите окружающей среды в отношении выбросов ртути. Необходимо отметить, что глобальная эмиссия ртути на 46 % обусловлена сжиганием угля на тепловых электростанциях. Для эффективной реализации данных обязательств необходимо обладать современными технологиями аналитического определения, расчета и снижения содержания ртути в продуктах сгорания угольного топлива [12].

В США и Канаде используется способ очистки продуктов сгорания от соединений ртути, заключающийся в инъекции активированного угля в дымовые газы с последующим улавливанием сорбента в установках газоочистки. Эффективность способа очистки составляет 92 %, при этом концентрация активированного угля, дозируемого в уходящие газы, равна 150 мг/м³. Содержание ртути в дымовых газах в среднем на 80 % обусловлено наличием металлической ртути Hg и на 20 % двухвалентной HgO, для кузнечного угля концентрация ртути составляет более 84 мг/т [12]. При этом предельно допустимая концентрация ртути в воздухе атмосферы $3 \cdot 10^{-4}$ мг/м³. Рассеивание пылегазовых выбросов, содержащих ртуть, дымовой трубой не обеспечивает ПДК. Для широкомасштабного внедрения в российских условиях технологии сокращения ртути, инъекцией активированного угля, необходимо предварительно обеспечить пылеугольные энергоблоки высокоэффективными электро- и рукавными фильтрами, что в совре-

менных экономических условиях достаточно сложно реализовать.

Обеспечение экологической безопасности пылеугольных энергоблоков в отношении выбросов ртути необходимо проводить в соответствии с изменениями в экологическом законодательстве, вступившими в действие с начала 2015 г., согласно которым государство будет стимулировать теплогенерирующие предприятия к внедрению природоохранных мероприятий на основе наилучших доступных технологий (НДТ). При этом для качественной реализации мероприятий требуются доступные аналитические методы определения содержания ртути в продуктах сгорания угля и новые эффективные технологии очистки пылегазовых выбросов.

Выводы:

1. Проведен анализ влияния компонентов сгорания угольных отопительных котлов на суммарную токсичность пылегазовых выбросов, в том числе, обусловленную наличием ртутьсодержащих веществ в дымовых газах.

2. Приведены данные для организации малотоксичных режимов работы пылеугольных котлов с учетом взаимного влияния ртутьсодержащих компонентов уходящих газов, продуктов полного и неполного горения, позволяющие в значительной степени обеспечить экологическую безопасность окружающей среды.

3. Усиление токсичности выбросов при взаимном влиянии компонентов сгорания ограничено максимальной степенью выгорания топлива и продуктов недожога.

4. Обеспечение нормативных выбросов ртутьсодержащих компонентов требует внедрения на объектах электроэнергетики современных высокоэффективных газоочистных систем.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Росляков, П. В. Методы защиты окружающей среды: учебник для вузов / П. В. Росляков. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 336 с., ил.
2. Иваницкий, М. С. Физико-химические процессы механизмов образования бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива / А. Д. Грига, В. М. Фокин, С. А. Грига // Вестник ВолгГАСУ. – 2012. – № 27(46). – С. 28–33.
3. Иваницкий, М. С. Построение модели для определения концентрации бенз(а)пирена при сжигании углеводородного топлива в котельных установках систем теплоснабжения / А. Д. Грига, В. М. Фокин, С. А. Грига // Вестник ВолгГАСУ. – 2012. – № 28(47). – С. 143–150.
4. Иваницкий, М. С. Определение концентрации бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок и способ автоматического регулирования процесса горения / М. С. Иваницкий, А. Д. Грига // Энергосбережение и водоподготовка. – 2013. – № 3(83). – С. 52–56.
5. Грига, А. Д. Определение содержания бенз(а)пирена в дымовых газах котельных установок малой мощности / А. Д. Грига, М. С. Иваницкий // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 14(136). – С. 67–70.
6. Грига, А. Д. Определение содержания бенз(а)пирена в уходящих газах камеры сгорания газовой турбины / А. Д. Грига, М. С. Иваницкий // Вестник ВГТУ. (Серия «Энергетика»). – 2014. – № 10. Т. 5. – С. 86–88.
7. Грига, А. Д. Очистка уходящих газов котельных установок от выбросов бенз(а)пирена / А. Д. Грига, М. С. Иваницкий // Энергосбережение и водоподготовка. – 2015. – № 2(94). – С. 75–78.
8. Иваницкий, М. С. Перевод пылеугольных котлов на сжигание природного газа для сокращения выбросов бенз(а)пирена в воздушный бассейн / М. С. Иваницкий, А. Д. Грига // Вестник Московского энергетического института. – 2015. – № 2. – С. 79–82.
9. Иваницкий, М. С. Корреляционный анализ взаимного влияния оксидов азота, углерода и бенз(а)пирена на суммарную токсичность уходящих газов котлов. Часть 1 Энергетические котлы большой мощности / М. С. Иваницкий // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 17–18(181–182). – С. 138–142.
10. Иваницкий, М. С. Корреляционный анализ взаимного влияния оксидов азота, углерода и бенз(а)пирена на суммарную токсичность уходящих газов котлов. Часть 2 Котлы малой тепловой мощности / М. С. Иваницкий // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 17–18(181–182). – С. 143–147.
11. Грига, А. Д. Суммарная токсичность продуктов сгорания при работе пылеугольных котлов ТЭЦ / А. Д. Грига, М. С. Иваницкий // Альтернативная энергетика и экология. – 2015. – № 17–18(181–182). – С. 148–152.
12. Зыков, А. М. Проблема снижения выбросов ртути при сжигании угля на ТЭС / А. М. Зыков, С. Н. Аничков, К. И. Колчин, Г. В. Гончаренко, Л. Г. Менчиков, И. К. Коршевец, Е. Д. Стрельцова, М. Ю. Леонова // Энергетик. – 2014. – № 3. – С. 69–70.
13. Сценарные условия развития электроэнергетики Российской Федерации на период до 2030 года. – М.: АПБЭ, 2009.

УДК 621.646.986

*А. В. Олейников, В. В. Иванов***МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ПОЛНОСТЬЮ
ГЕРМЕТИЧНОГО ШАРОВОГО КРАНА ПО П. М. 139949 РФ****Волгоградский государственный технический университет**

Разработан шаровой кран, обеспечивающий абсолютную герметизацию рабочего тела от внешней среды. Выполнены моделирование и расчеты на прочность и долговечность деталей корпуса и запорного устройства с сильфоном, чем подтверждена работоспособность технического решения и самой конструкции.

Ключевые слова: запорная арматура, сильфон, прочность, надежность, долговечность, храповой механизм.

*A. V. Oleynikov, V. V. Ivanov***SIMULATION AND CALCULATION OF FULLY SEALED
BALL VALVE FOR PM 139949 RUSSIAN****Volgograd State Technical University**

Designed ball valve that provides absolute sealing of the working fluid from the external environment. Modeling and calculations on the strength and durability of the housing parts and the locking device with bellows than the confirmed operation of the technical solution and the structure itself.

Keywords: fittings, bellows, durability, reliability, durability, the ratchet mechanism.

В современной запорной арматуре, используемой на магистральных трубопроводах для транспортировки нефтяных продуктов, газа и системах холодного или горячего водоснабжения, работающих под высоким давлением, для герметизации проходного канала, уплотнения фланцевых соединений и привода запорного органа используются манжеты и прокладки из неметаллических материалов. При этом уплотнения между рабочим телом и внешней средой, в процессе эксплуатации подвергаясь агрессивному воздействию рабочего тела, внешней среды и перепадам температуры, теряют свои первоначальные свойства и становятся причиной протечек, а гуммирование уплотнения привода запорного органа приводит к его заклиниванию и, следовательно, к отказам [1].

Указанные причины требуют проведение систематических осмотров, проведения регламентных работ и при необходимости выполнения ремонта, причем как на территории предприятия, так и на магистралях, под землей или иных труднодоступных местах.

Во всех отраслях современной промышленности наблюдается тенденция к разработке машин и аппаратов, исключающих их обслуживание в течение всего срока их эксплуатации. В этой связи авторами были заявлены технические решения необслуживаемой запорной арматуры, в которой полностью исключены неметаллические элементы и уплотнения, привод за-

порного органа осуществляется через сильфон, а все детали соединены посредством сварки, что обеспечивает абсолютную герметизацию рабочего тела от внешней среды и исключает возможность отказа после длительного неиспользования. На отмеченные технические решения получены патенты на полезные модели:

№ 107836 «Задвижка» 29.03.2011 [2];

№ 123877 РФ «Задвижка» с храповым механизмом привода 10.01.2013 [3];

№ 139949 РФ «Шаровой кран» с храповым механизмом привода 27.03.2014 [8].

Цель работы – теоретическое исследование нового метода решения проблемы полной герметизации шарового крана, обеспечивающего надежное открытие и закрытие проходного канала, с использованием упругой оболочки (сильфона) в качестве герметизирующего элемента, для повышения надежности конструкции.

Здесь был произведен сравнительный анализ конструкции, выполненной по патенту № 139949 РФ «Шаровой кран» с храповым механизмом привода 27.03.2014, с конструкциями компании «Werner Boehmer GmbH» Германия. За основу расчета был взят диаметр проходного сечения – 400 мм, по стандарту ANSI Class 150 PN 16. Выполнены расчеты элементов привода запорного механизма, корпуса, крышки и сильфона.

Расчет механизма привода шарового крана (рис. 1) проводился на программе Ansys 15 Academic version и с использованием CAD систем.

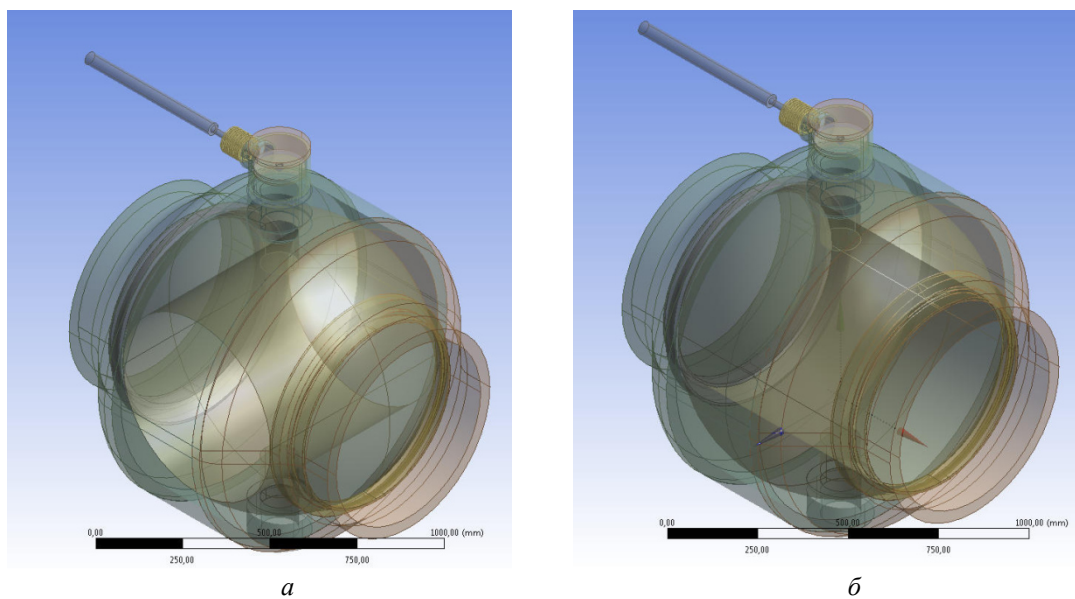


Рис. 1. Шаровой кран по патенту № 139949 РФ «Шаровой кран» с храповым механизмом привода 27.03.2014 [8]:
а – закрытое положение шарового крана; *б* – открытое положение шарового крана

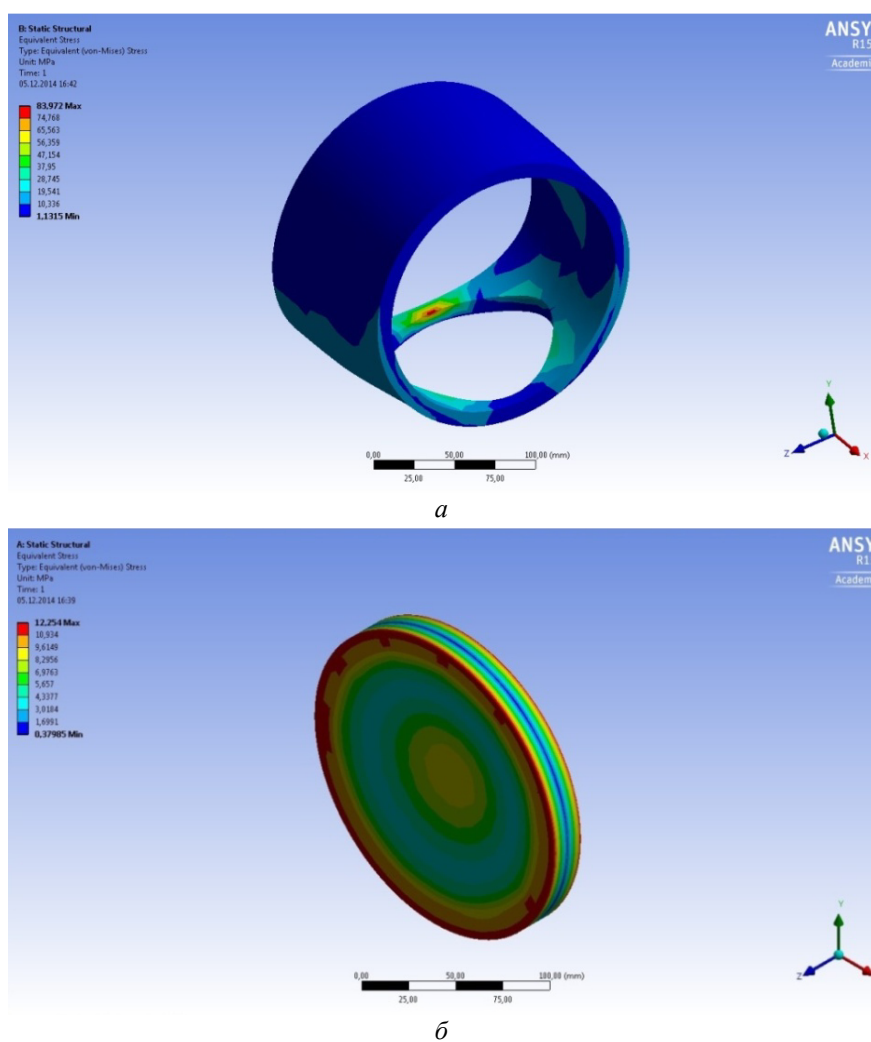


Рис. 2. Картина напряжений в элементах конструкции от давления рабочего тела:
а – расчет корпуса запорного механизма шарового крана при действии внутреннего давления в 1,6 МПа;
б – расчет крышки запорного механизма шарового крана при действии внутреннего давления в 1,6 МПа

Из моделирования деталей корпуса запорного механизма Шарового крана п. м. № 139949 РФ (рис. 2), следует, что максимальные напряжения, возникающие в конструкции, при внутреннем давлении в 1,6 МПа, составляют 83 МПа в корпусе и 12,5 МПа в крышке запорного механизма. Это обеспечивает работоспособность и надежность, а сталь 12X18H10T[1] и покрытие с антикоррозийными свойствами обеспечат долгий срок службы.

Расчет сальфона как герметизирующего элемента был проведен по стандарту Евросоюза под номером DIN EN 13445-3:2011-12, EN 13445-3:2009 (D), Ausgabe 3 (2011-07) [9], с габ-

ритными характеристиками сальфона такими, как внешний диаметр – 50 мм; толщина стенки – 1 мм; количество гофр – 9.

Моделирование показало, что напряжения, возникающие в сальфоне от действия внутреннего давления в 1,6 МПа, составляют 200–250 МПа, а максимальная деформация – 1,8 мм по оси Z. Напряжения, возникающие в сальфоне при действии изгибающего момента, поворачивающего сальфон на 10°, равняются в среднем около 200 МПа, а максимальная деформация составляет 6 мм, что не превышает допустимых пределов. При этом количество циклов, определяющих долговечность сальфона составляет 23000 (рис. 3, 4).

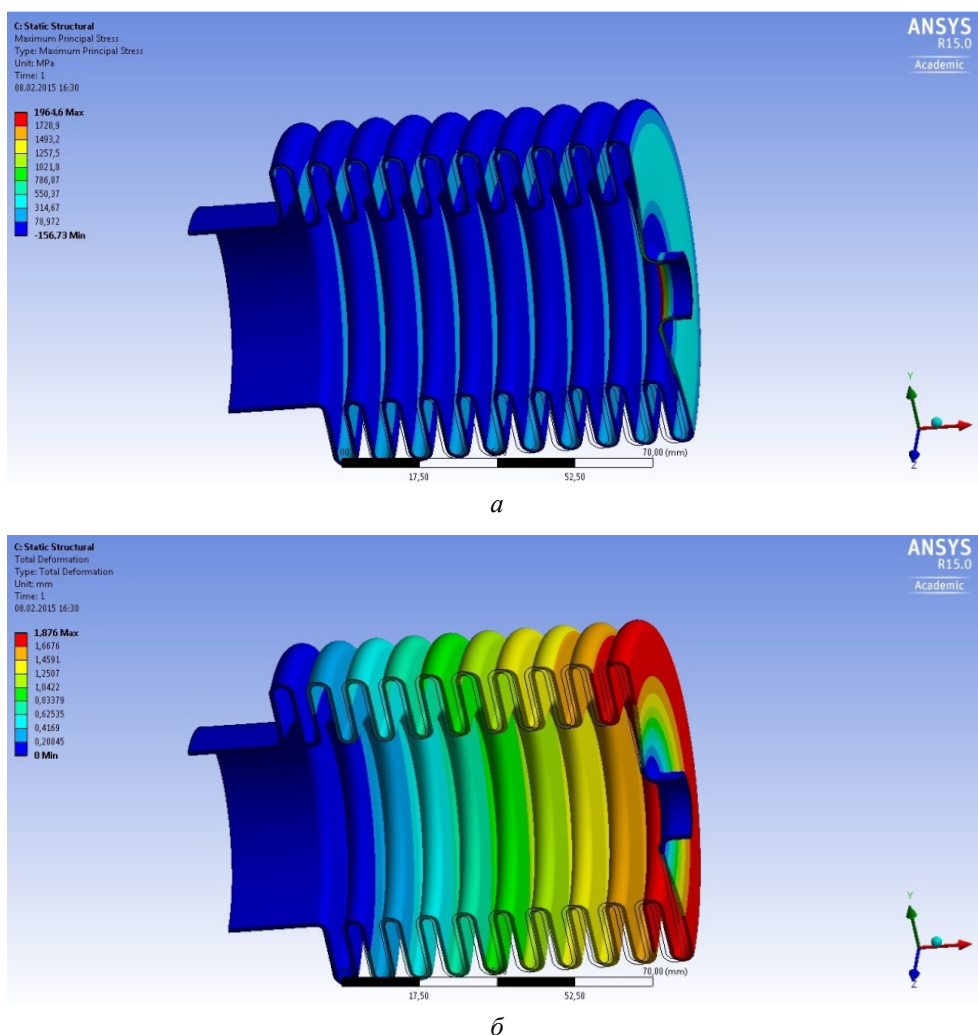


Рис. 3. Моделирование сальфона на программе Ansys 15 Academic version при 20 °С и при внутреннем давлении 1,6 МПа:

а – напряжения в МПа, возникающие в сальфоне при действии внутреннего давления в 1,6 МПа;

б – деформации в мм, по оси Z, возникающие в сальфоне при действии внутреннего давления в 1,6 МПа

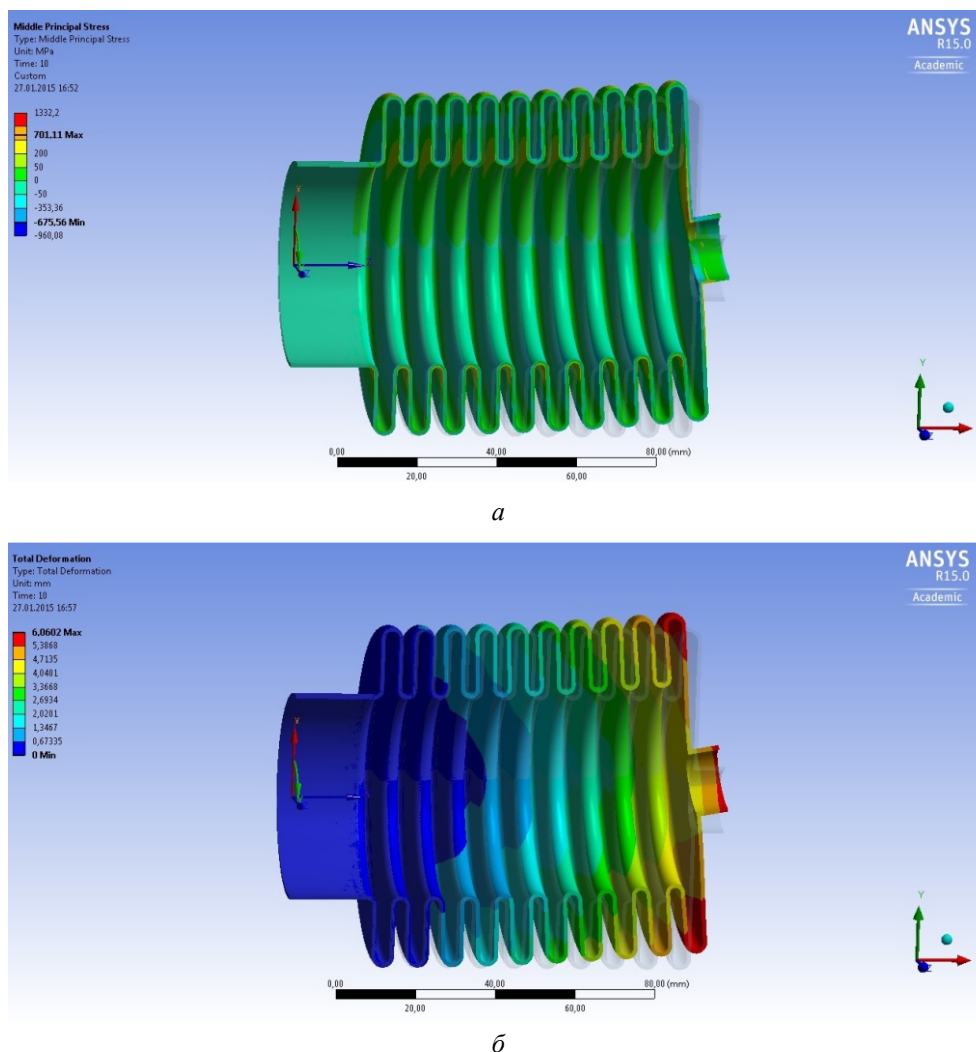


Рис. 4. Моделирование сильфона на программе Ansys 15 Academic version при 20 °С и при действии изгибающего момента поворачивающего сильфон на 10°:

а – напряжения в МПа, возникающие в сильфоне при действии изгибающего момента поворачивающего сильфон на 10°;
б – деформации в мм, по оси Z, возникающие в сильфоне при действии изгибающего момента поворачивающего сильфон на 10°

Следовательно, расчет и моделирование запорного механизма шарового крана, выполненного по патенту № 139949 РФ («Шаровой кран» с храповым механизмом привода 27.03.2014), подтверждают работоспособность шарового крана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Emergency Shut-Off Valve for Pipelines / Иванов В. В., Олейников А. В., Денисевич Д. С., Пектемиров Б. Г. // Chemical and Petroleum Engineering. – 2013. – Vol. 49, Issue 5–6 (September). – С. 400–402.
2. Пат. м. 123877 РФ, МПК F16K3/02. Задвижка / Иванов В. В., Олейников А. В.; ВолгГТУ. Бюл. № 1 – 2013.
3. Пат. м. 107836 РФ, МПК F 16 K 3/02, 31/44. Задвижка / Иванов В. В., Олейников А. В.; ВолгГТУ. Бюл. № 24. – 2011.
4. Олейников, А. В. Задвижка аварийного назначения для магистральных трубопроводов / А. В. Олейников, В. В. Иванов // Технические науки – от теории к практике : материалы XVIII Междунар. заоч. науч.-практ. конф. (г. Новосибирск, 20 февр. 2013 г.) / НП «Сибирская ассоциация консультантов (СибАК)». – Новосибирск, 2013. – С. 39–45.
5. Олейников, А. В. Запорное устройство аварийного назначения для трубопроводов / А. В. Олейников, Д. С. Денисевич, В. В. Иванов // Тезисы докладов юбилейного смотр-конкурса научных, конструкторских и технологических работ студентов ВолгГТУ, Волгоград, 11–14 мая 2010 г. / ВолгГТУ, Совет СНО. – Волгоград, 2010. – С. 147–148.
6. Олейников, А. В. Шибберная задвижка аварийного назначения для трубопроводов / А. В. Олейников, В. В. Иванов // Машиностроитель. – 2014. – № 3. – С. 24–27.
7. Олейников, А. В. Шибберная задвижка для магистральных трубопроводов / А. В. Олейников, В. В. Иванов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 1 (128) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 7). – С. 66–69.
8. Пат. м. № 139949 РФ, «Шаровой кран» / Олейников А. В., Иванов В. В. Бюл. №12. – 2014.
9. DIN EN 13445-3:2011-12, EN 13445-3:2009 (D), Ausgabe 3 (2011-07).

УДК 536.242:532.135

*В. В. Шишлянников, С. В. Кирпиченко, Н. Н. Канубриков, В. А. Поляков***ТЕЧЕНИЕ И ТЕПЛООБМЕН ВОЛОКНИСТЫХ БУМАЖНЫХ СУСПЕНЗИЙ В КРУГЛОЙ ТРУБЕ****Волгоградский государственный технический университет**

Рассматривается сопряженная задача теплообмена при течении волокнистых суспензий в круглой трубе. Получены формулы для расчета основных параметров теплообмена.

Ключевые слова: течение, теплообмен, суспензия, труба, волокнистая.

*V. V. Shishliannikov, S. V. Kirichenko, N. N. Kanubrikov, V. A. Polyakov***FLOW AND HEAT TRANSFER FIBRE PAPER SUSPENSION IN THE WHOLE PIPE****Volgograd State Technical University**

We consider the problem of conjugate heat transfer during flow fiber suspensions in a circular pipe. The formulas for the calculation of the basic parameters of heat transfer.

Keywords: flow, heat transfer, suspension tube fiber.

Характерной особенностью волокнистых суспензий целлюлозно-бумажной промышленности (ЦБП) является отчетливо выраженная аномалия вязкости уже при очень малых концентрациях. Величина минимальной концентрации зависит от физико-механических свойств волокон и может сильно отличаться для различных суспензий. Волокнистая суспензия является структурированной системой, свойства которой в настоящее время изучены недостаточно. Имеются многочисленные экспериментальные исследования по движению волокнистых суспензий (бумажных масс) для различных композиций и концентраций, однако отсутствует систематический анализ полученных экспериментальных данных, что серьезно тормозит проектирование оборудования ЦБП.

В работе [1] делается попытка решения вопроса получения реологических характеристик волокнистой суспензии. Из экспериментальных

данных известно, что волокнистая суспензия при наращивании скоростей движения (начиная от состояния покоя) проходит через несколько стадий внутреннего структурообразования: статическое состояние суспензии ($\vartheta = 0$); динамическое состояние суспензии: структурированный поток, диспергированный поток, структурированный слой (стержень), диспергированный слой и слой чистой воды [1]. Для дисперсных систем, состоящих из асимметричных частиц, характерным является коагуляционное структурообразование. Естественные волокна имеют длину 0,05–0,5 мм при ширине 0,001–0,070 мм, поэтому силы сцепления механического переплетения следует считать преобладающими. Таким образом переплетенные волокна образуют своеобразный внутренний каркас в суспензии, сцепленный со стенками канала. Реологическая модель бумажной массы показана на рис. 1.

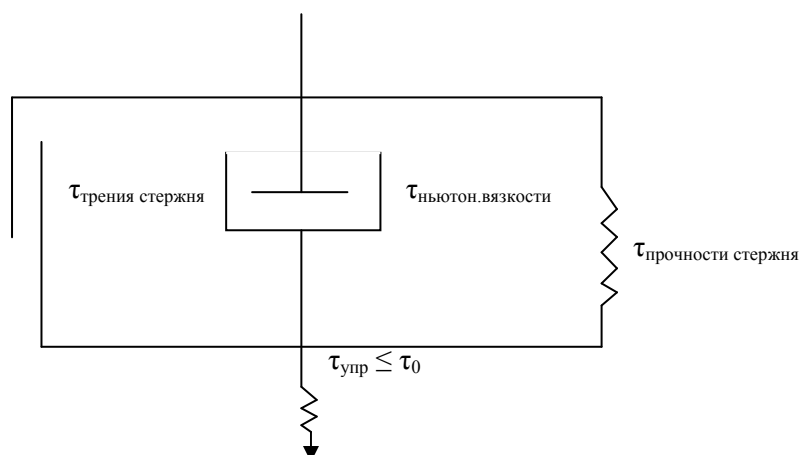


Рис. 1. Реологическая модель бумажной массы

При малых скоростях сдвига в суспензии возникает напряжение, состоящее из трех компонентов:

$$\tau = \tau_{\text{трения стержня}} + \tau_{\text{прочности стержня}} + \tau_{\text{ньютоновской вязкости}}, \quad (1)$$

где τ – напряжение.

Ввиду тиксотропности системы можно полагать, что напряжения трения стержня об окружающую среду и напряжения, характеризующие внутреннюю прочность стержня, должны с увеличением градиента скорости исчезнуть в системе. Следовательно, напряжения $\tau_{\text{трения стержня}}$ и $\tau_{\text{прочности стержня}}$ будут характеризоваться экспоненциальной зависимостью от скорости сдвига, то есть

$$\tau_{\text{тр}} = A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}}, \quad (2)$$

$$\tau_{\text{прочн.ст}} = A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}}. \quad (3)$$

Для ньютоновских жидкостей подобные рассуждения в [1] привели к формуле

$$\tau_{\text{ньют.тр.}} = \mu_T \dot{\gamma}, \quad \dot{\gamma} = \frac{d\vartheta_z}{dr}. \quad (4)$$

Подставляя эти выражения в формулу (1), получим

$$\tau = A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \mu_T \dot{\gamma}, \quad (5)$$

где μ_T – коэффициент динамической вязкости диспергированной суспензии.

Полученное выражение (5) определяет напряжение сдвига внутри волокнистой суспензии в зависимости от градиента скорости сдвига. Оно может рассматриваться как реологическое управление волокнистой суспензией.

При отсутствии движения суспензии, когда $\dot{\gamma} = 0$, то $\tau \leq \tau_0$ то есть из уравнения (5) следует, если $\dot{\gamma} = 0$, то $\tau = A_1 + A_2 = \tau_0$. Следовательно, в состоянии покоя $\tau = \tau_0$. При увеличении $\dot{\gamma}$ два члена формулы (5) должны стремиться к 0 и уравнение (5) должно приближаться к прямой линии $\tau = \mu_T \dot{\gamma}$. Доказательство данного положения приведено в работе [1].

Для установившегося течения суспензии в круглой трубе, считая, что поток движется только в направлении продольной оси и пренебрегая массовыми силами, было получено распределение скоростей в виде [1].

$$\vartheta_z = \frac{\Delta p \cdot R^2}{4l(\mu_T - A_1 \alpha_1 - A_2 \alpha_2)} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right), \quad (6)$$

где Δp – перепад давления; l – длина трубы; R – радиус трубы; A_1 и A_2 – напряжения первоначального трения волокнистого стержня о стенку канала; α_1 и α_2 – отрезки времени.

Картина течения и теплообмена в круглой трубе волокнистой суспензии приведена на рис. 2.

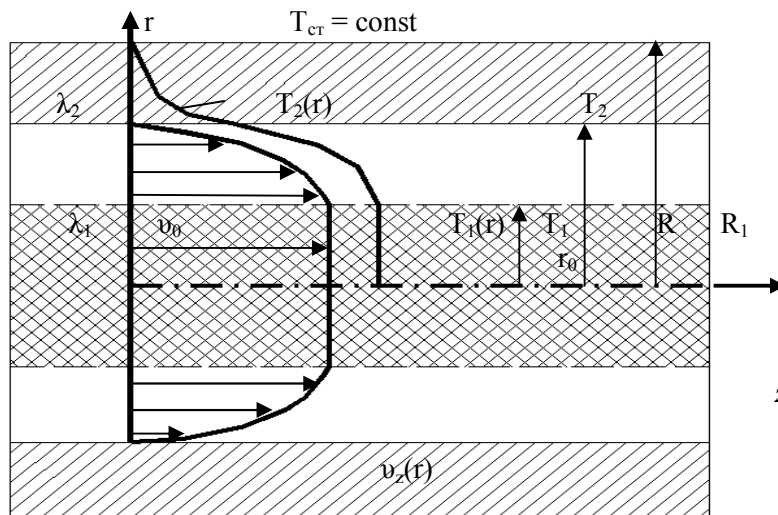


Рис. 2. Картина течения и теплообмена волокнистой суспензии в круглой трубе

Запишем уравнения для сопряженной задачи согласно рис. 2, при этом считая, что течение и теплообмен стационарные и установившиеся, то есть вдали от входа в трубу и вдоль оси Z , теплообмен обусловлен диссипацией энергии, а течение подчиняется закону по формуле (5).

С учетом профиля скорости (6) задача запишется следующей системой уравнений:

I. Уравнение энергии для суспензии

$$\frac{\lambda_1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT_1}{dr} \right) + \Phi_\theta(r) = 0, \quad r_0 \leq r \leq R \quad (7)$$

Граничные условия

$$\left. \begin{aligned} &\text{при } r = r_0, \quad \frac{dT_1}{dr} = 0 \\ &\text{при } r = R, \quad T_1 = T_2; \end{aligned} \right\}; \quad (8)$$

II. Уравнение теплопроводности в стенке

$$\frac{d^2 T_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_2}{dr} = 0, R \leq r \leq R_1 \quad (9)$$

Граничные условия

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } r = R, \quad \frac{dT_1}{dr} = K_\lambda \frac{dT_2}{dr} \\ \text{при } r = R_1, \quad T_2 = T_{\text{CT}} = \text{const}; \end{array} \right\}; \quad (10)$$

III. Уравнение теплопроводности в квазитвердом ядре

$$\frac{\lambda_1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT_3}{dr} \right) = 0, \quad 0 \leq r \leq r_0. \quad (11)$$

Граничные условия

$$\text{при } r = r_0, \quad T_1 = T_3 \text{ и } \frac{dT_1}{dr} = \frac{dT_3}{dr}. \quad (12)$$

I. Температурное поле в жидкости

$$\frac{\lambda_1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT_1}{dr} \right) + \Phi_d(r) = 0, \quad (7a)$$

где $\Phi_d(r)$ – диссипативная функция;

$$\Phi_d(r) = \tau \frac{d\vartheta}{dr}. \quad (13)$$

С учетом профиля скорости (6) имеем

$$\begin{aligned} \Phi_d(\rho) = \tau \frac{d\vartheta}{d\rho} &= (A_1 e^{-\alpha_1 \dot{\gamma}} + A_2 e^{-\alpha_2 \dot{\gamma}} + \mu_T \dot{\gamma}) \cdot \frac{\Delta p \cdot R^2 \rho}{-2l(\mu_T - A_1 \alpha_1 - A_2 \alpha_2)} = \\ &= -(A_1 e^{\alpha_1 \vartheta_{\max} 2\rho} + A_2 e^{\alpha_2 \vartheta_{\max} 2\rho} - \mu_T 2\vartheta_{\max} \rho) \cdot 2\vartheta_{\max} \rho, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\text{где } \vartheta_{\max} = \frac{\Delta p \cdot R^2}{4l(\mu_T - A_1 \alpha_1 - A_2 \alpha_2)}, \quad \rho = \frac{r}{R}.$$

Тогда температурное поле в суспензии можно записать следующим образом:

$$\frac{\lambda_1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dT_1}{d\rho} \right) - (A_1 e^{\alpha_1 \vartheta_{\max} 2\rho} + A_2 e^{\alpha_2 \vartheta_{\max} 2\rho} - \mu_T 2\vartheta_{\max} \rho) \cdot 2\vartheta_{\max} \rho = 0. \quad (15)$$

Граничные условия

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \rho = a, \quad \frac{dT_1}{d\rho} = 0 \\ \text{при } \rho = 1, \quad T_1 = T_2, \end{array} \right\}, \quad (8a)$$

$$\text{где } a = \frac{r_0}{R}.$$

$$\frac{\lambda_1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dT_1}{d\rho} \right) - (2A_1 \vartheta_{\max} \rho e^{2\alpha_1 \vartheta_{\max} \rho} + 2A_2 \vartheta_{\max} \rho e^{2\alpha_2 \vartheta_{\max} \rho} - 4\mu_T \vartheta_{\max}^2 \rho^2) = 0. \quad (16)$$

Дифференциальное уравнение (16) имеет громоздкое решение, поэтому упростим это выражение разложив экспоненциальные функции в

ряд Тейлора, и, ограничиваясь двумя членами ряда, запишем уравнение (16) в виде:

$$I \frac{\lambda_1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dT_1}{d\rho} \right) - [2A_1 \vartheta_{\max} \rho (1 + 2\alpha_1 \vartheta_{\max} \rho) + 2A_2 \vartheta_{\max} \rho (1 + 2\alpha_2 \vartheta_{\max} \rho) - 4\mu_T \vartheta_{\max}^2 \rho^2] = 0. \quad (17)$$

II. Уравнение теплопроводности в стенке трубы

$$\frac{d^2 T_2}{d\rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{dT_2}{d\rho} = 0. \quad (9a)$$

Граничные условия

$$\left. \begin{array}{l} \text{при } \rho = 1, \quad \frac{dT_1}{d\rho} = K_\lambda \frac{dT_2}{d\rho} \\ \text{при } \rho = \delta, \quad T_2 = T_{\text{CT}} = \text{const}, \end{array} \right\}, \quad (10a)$$

$$\text{где } \delta = \frac{R_1}{R}.$$

III. Уравнение теплопроводности в квазитвердом ядре.

$$\frac{\lambda_1}{R^2 \rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho \frac{dT_3}{d\rho} \right) = 0. \quad (11a)$$

Граничные условия

$$\text{при } \rho = a, \quad T_1 = T_3, \text{ и } \frac{dT_1}{d\rho} = \frac{dT_3}{d\rho} \quad (12a)$$

Решая уравнения (17), (9a), (11a) при граничных условиях (8a), (10a) и (12a), получим распределение температуры в жидкости, стенке и ядре в следующем виде:

$$\begin{aligned} \theta_1 = \frac{(T_1 - T_{\text{CT}})\lambda_1}{\vartheta_{\max}^2 \mu_T} &= \left[\frac{2B_1}{9} (\rho^3 - 1) + \frac{B - 1}{4} (\rho^4 - 1) \right] - \left[\frac{2B}{3} a^3 + (B - 1) \frac{a^4}{4} \right] \ln \rho + \\ &+ \left[\frac{2B}{3} (a^3 - 1) + (a^4 - 1) \left(\frac{B}{4} - 1 \right) \right] \frac{\ln \delta}{K_\lambda}, \end{aligned} \quad (18)$$

$$\theta_2 = \frac{(T_2 - T_{\text{CT}})\lambda_1}{\vartheta_{\max}^2 \mu_T} = \frac{1}{K_\lambda} (\ln \rho - \ln \delta) \left[\frac{2B_1}{3} (1 - a^3) + (1 - a^4) \left(\frac{B}{4} - 1 \right) \right]; \quad (19)$$

$$\theta_3 = \frac{(T_3 - T_{ct})\lambda_1}{\vartheta_m^2 \mu_T} = \left[\frac{2B_0}{9}(a^3 - 1) + \frac{B-1}{4}(a^4 - 1) \right] - \left[\frac{2B}{3}a^3 + (B-1)\frac{a^4}{4} \right] \ln a +$$

$$+ \left[\frac{2B_0}{3}(a^3 - 1) + (a^4 - 1)\left(\frac{B}{4} - 1\right) \right] \frac{\ln \delta}{K_\lambda}, \quad (20)$$

$$\text{где } B = \frac{\alpha_1 A_1 + \alpha_2 A_2}{\mu_T}, B_0 = \frac{R}{\vartheta_m \mu_T} (A_1 + A_2), B_1 = \frac{R_1}{\vartheta_m \mu_T} (A_1 + A_2), B_0 = \frac{r_0}{\vartheta_m \mu_T} (A_1 + A_2), K_\lambda = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}.$$

По формулам (18)–(20) были рассчитаны температурные поля в суспензии, стенке и ядре потока при следующих значениях параметров:

$$\alpha_1 = 0,1 \text{ с}; \alpha_2 = 0,2 \text{ с}; A_1 = 0,2 \frac{\text{Н}}{\text{М}^2}; A_2 = 0,4 \frac{\text{Н}}{\text{М}^2};$$

$$\mu_T = 1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}^2}; V_m = 0,2 \frac{\text{М}}{\text{с}}; R = 0,025;$$

$$R_1 = 0,05 \text{ м}; r_0 = 0,0125 \text{ м}; a = \frac{r_0}{R} = 0,5;$$

$$\delta = 2; \rho = 0 \div 2.$$

На рис. 3 представлены графики изменения температуры.

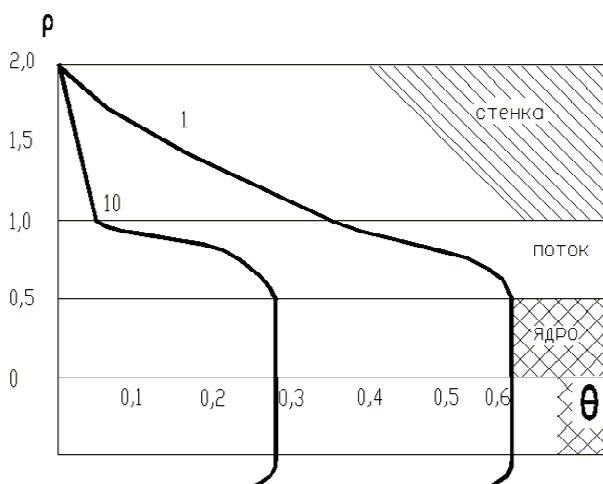


Рис. 3. Графики изменения температуры в стенке трубы, потока суспензии и в ядре потока. Цифры на кривых — значения K_λ

Определив температурные поля, можно рассчитать среднюю температуру в потоке и критерий Нуссельта.

Средняя температура суспензии в потоке рассчитывается по формуле:

$$\bar{\theta} = \frac{\int_0^1 \theta_1(\rho) \vartheta(\rho) d\rho}{\int_0^1 \vartheta(\rho) d\rho}. \quad (21)$$

Критерий Нуссельта равен

$$Nu = -\frac{1}{\theta} \left(\frac{d\theta_1}{d\rho} \right)_{\rho=1}. \quad (22)$$

Графическая интерпретация выражений (21) и (22) представлена на рис. 4.

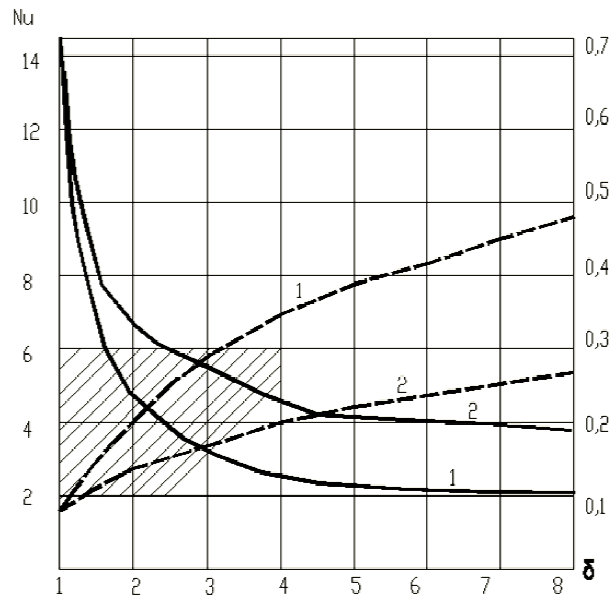


Рис. 4. Изменение среднemasовой температуры и критерия Нуссельта в зависимости от δ : цифры на кривых — значения K_λ ; — Nu ; - - - $\bar{\theta}$

Выводы:

Таким образом, в результате теоретического исследования получено решение задачи теплообмена вязкопластической бумажной суспензии в круглой трубе. Приведены формулы распределения температуры, среднemasовой температуры, критерия Нуссельта. Дана графическая интерпретация расчетов. Все рассчитанные параметры θ , $\bar{\theta}$, Nu зависят от толщины стенки, отношения теплопроводностей K_λ и диссипации энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терентьев, О. А. Гидродинамика волокнистых суспензий: конспект лекций / О. А. Терентьев ; под общ. ред. И. Д. Кугушева. — Ленинград: ЛТИ ЦБП, 1974.
2. Смольский, Б. М. Реодинамика и теплообмен нелинейно вязкопластичных материалов / Б. М. Смольский, З. П. Шульман, В. М. Гориславец. — Минск: Наука и техника, 1970.
3. Шишлянников, В. В. Экспериментальное исследование течения порошково-волокнистых суспензий в круглой трубе / В. В. Шишлянников, Н. В. Тябин [и др.]. — Черкассы, ДЕП. N345ХП-D81 ОНИИТЭК.

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 (ВолгГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 23-00-76
E-mail: rector@vstu.ru

Темплан 2016 г. Поз. № 22ж. Подписано в печать 30.06.2016 г. Формат 60 х 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 6,73.
Тираж 100 экз. Заказ №
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолгГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.