

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 3 (44)
2023



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ





Издается
с января 2004 г.

ISSN 2500-0586

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

Редакционная коллегия:

Е. В. Балакина — д.т.н., проф. ВолгГТУ
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. В. Дмитриев — д.т.н., проф. КГЭУ,
г. Казань
А. Ю. Дунин — д.т.н., проф. МГТУ
(МАДИ), г. Москва
В. Ф. Желтобрюхов — д.т.н., проф.
ВолгГТУ, г. Волгоград
А. В. Келлер — д.т.н., проф. Московского
политехнического университета, г. Москва
И. А. Коняхин — д.т.н., проф. ИТМО,
г. Санкт-Петербург
В. В. Коротаев — д.т.н., проф. ИТМО,
г. Санкт-Петербург
Г. О. Котиев — д.т.н., проф. МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов — д.т.н., проф. СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
В. А. Марков — д.т.н., проф. МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
Е. Р. Мошев — д.т.н., проф. ПНИПУ,
г. Пермь
А. Е. Новиков — чл.-корр. РАН, д.т.н., проф.
ВолгГТУ
Е. А. Федянов — д.т.н., проф. ВолгГТУ
Н. М. Филькин — д.т.н., проф. ИжГТУ
им. М. Т. Калашникова, г. Ижевск
А. Н. Шилин — д.т.н., проф. ВолгГТУ

Ответственный секретарь
П. С. Васильев — к.т.н., доц., ВолгГТУ
Тел. 8-(8442)24-84-31

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала
по объединенному каталогу
«Пресса России» — 94193
https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/

Тел. издательства ВолгГТУ:
+7 (8442) 24-84-08
+7 (8442) 24-84-05
e-mail: zavrio@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.

№ 3 (44)
Сентябрь
2023

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: +7 (8442) 23-00-76
e-mail: rector@vstu.ru

Отв. секретарь: телефон: +7 (8442) 24-84-31
e-mail: pahp@vstu.ru

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

ISSN 2500-0586

Editor-in-chief

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

Editorial Board:

E. V. Balakina – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
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. V. Dmitriev – D. Sc. (Engineering), Prof.
KSPEU, Kazan
A. Yu. Dunin – D. Sc. (Engineering), Prof.
MADI, Moscow
V. F. Zheltobryukhov – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering), Prof.
Prof. Moscow Poly, Moscow
I. A. Konyakhin – D. Sc. (Engineering), Prof.
ITMO University, St. Petersburg
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof.
ITMO University, St. Petersburg
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.
SSTU, Saratov
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.
BMSTU, Moscow
E. R. Moshev – D. Sc. (Engineering), Prof.
PNRPU, Perm
A. E. Novikov – Corresponding Member
of RAS, D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU,
Volgograd
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.
VSTU, Volgograd
B. T. Filkin – D. Sc. (Engineering), Prof.
ISTU, Izhevsk
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSTU, Volgograd

Executive Secretary
P. S. Vasilyev – PhD, Associate Prof.
Тел. 8-(8442)24-84-31

The journal is distributed by subscription.
Index of the magazine according to the unit-
ed catalog «Press of Russia» – 94193.
[https://www.pressa-
rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/](https://www.pressa-rf.ru/cat/1/edition/y_e94193/)

VSTU Publisher tel.:

+7 (8442) 24-84-08

+7 (8442) 24-84-05

e-mail: zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,

«Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport», 2023

Energo- i resursosberezhenie:

Promyshlennost' i transport

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

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

№ 3 (44)
September
2023

FOUNDER:

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

Periodicity: four times per year

Editorial office address:

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

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

Official website: www.vstu.ru

Published by the decision of editorial review board of Volgograd State
Technical University

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

*Reprint from the journal «Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost'
i transport » is strongly forbidden -without conclusion of an agreement in accord-
ance 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

Агеев Е. С. 38	Рева Л. С. 15
Богданова Ю. В. 19	Родин Д. А. 25
Васильев П. С. 15	Салыкин Е. А. 38
Голованчиков А. Б. 11, 19	Федянов Е. А. 38
Дугин Е. А. 6	Филимонов М. И. 6
Илюшин Д. Н. 38	Шибитова Н. В. 25
Кузьменко В. С. 25	Шурак А. А. 11, 25
Ламскова М. И. 6	Яблонский В. О. 29
Новиков А. Е. 6	

AUTHOR INDEX

Ageev E. S. 38	Novikov A. E. 6
Bogdanova Yu. V. 19	Reva L. S. 15
Dugin E. A. 6	Rodin D. A. 25
Fedyanov E. A. 38	Salykin E. A. 38
Filimonov M. I. 6	Shibitova N. V. 25
Golovanchikov A. B. 11, 19	Shurak A. A. 11, 25
Ilyushin D. N. 38	Vasilyev P. S. 15
Kuzmenko V. S. 25	Yablonskii V. O. 29
Lamskova M. I. 6	

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Новиков А. Е., Филимонов М. И., Ламскова М. И., Дугин Е. А.</i> Технология монтажных работ малогабаритных биостанций на основе септических систем.....	6
<i>Голованчиков А. Б., Шурак А. А.</i> Сравнение степени очистки вентиляционных выбросов от пыли технического углерода в батарее циклонов и центриклонов.....	11
<i>Васильев П. С., Рева Л. С.</i> Кратковременный контакт фаз при капельном кипении жидкостей.....	15
<i>Голованчиков А. Б., Богданова Ю. В.</i> Совершенствование метода исследования структуры потока в аппаратах вытеснения и смешения.....	19
<i>Шибитова Н. В., Родин Д. А., Кузьменко В. С., Шурак А. А.</i> Оптимизация работы колонны отгонки на стадии выделения винилхлорида.....	25
<i>Яблонский В. О.</i> Моделирование разделения вязкопластических сред напорной флотацией в гидроциклонах различных конструкций.....	29

Часть 2. ТРАНСПОРТ

<i>Агеев Е. С., Илюшин Д. Н., Салыкин Е. А., Федянов Е. А.</i> Совершенствование топливных систем малоразмерных дизельных двигателей.....	38
К сведению авторов.....	44

CONTENTS

Part I. INDUSTRY

<i>Novikov A. E., Filimonov M. I., Lamskova M. I., Dugin E. A.</i> Technology of installation works of small-sized biological stations based on septic systems.....	6
<i>Golovanchikov A. B., Shurak A. A.</i> Comparison of the degree of ventilation emissions from carbon black dust in a cyclone and cyclone battery.....	11
<i>Vasilyev P. S., Reva L. S.</i> Short-term phases contact at liquid droplet boiling.....	15
<i>Golovanchikov A. B., Bogdanova Yu. V.</i> Improvement of the studying method the flow structure in displacement and mixing apparatus.....	19
<i>Shibitova N. V., Rodin D. A., Kuzmenko V. S., Shurak A. A.</i> Optimization of the operation of a stripping column at the stage of vinyl chloride separation.....	25
<i>Yablonskii V. O.</i> Modeling of separation of viscoplastic media by pressure flotation in hydrocyclones of various designs.....	29

Part II. TRANSPORT

<i>Ageev E. S., Ilyushin D. N., Salykin E. A., Fedyanov E. A.</i> Improving the fuel systems of small diesel engines.....	38
--	----

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 628.315

А. Е. Новиков^{1,2}, М. И. Филимонов¹, М. И. Ламскова¹, Е. А. Дугин²

ТЕХНОЛОГИЯ МОНТАЖНЫХ РАБОТ МАЛОГАБАРИТНЫХ БИОСТАНЦИЙ НА ОСНОВЕ СЕПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

¹ Волгоградский государственный технический университет
² ФГБНУ «Всероссийский научно-исследовательский институт
орошаемого земледелия»
e-mail: ae_novikov@mail.ru

Современные биотехнологические процессы очистки коммунальных сточных вод централизованных систем водоотведения обладают высокой технологичностью, однако не решают проблемы создания малогабаритных биостанций на основе автономных септических систем для жилых объектов на загородных и сельских территориях, обеспечивающих глубокую обработку образуемых отходов и их рециклинг. В настоящей статье, являющейся продолжением исследований по усовершенствованию технологии и разработке автономной малогабаритной биостанции, рассмотрены вопросы организации монтажных работ, эксплуатации и обслуживания данного типа локальных очистных сооружений. Приведен порядок компоновки биостанции, регламент пуско-наладочных работ, а также виды и периодичность проведения осмотров и обслуживаний биостанции и ее вспомогательного оборудования для поддержания их работоспособности.

Ключевые слова: технология монтажных работ, биостанция, сточные воды, биотехнологический процесс, автономные септические системы.

A. E. Novikov^{1,2}, M. I. Filimonov¹, M. I. Lamskova¹, E. A. Dugin²

TECHNOLOGY OF INSTALLATION WORKS OF SMALL-SIZED BIOLOGICAL STATIONS BASED ON SEPTIC SYSTEMS

¹ Volgograd State Technical University
² Federal State Budget Scientific Institution the All-Russian research institute
of irrigated agriculture

Modern biotechnological processes of municipal wastewater treatment of centralized wastewater disposal systems are highly technologically advanced, however, they do not solve the problems of creating small-sized biological stations based on autonomous septic systems for residential facilities in suburban and rural areas, providing deep processing of waste generated and their recycling. This article, which is a continuation of research on the improvement of technology and the development of an autonomous small-sized biostation, discusses the organization of installation work, operation and maintenance of this type of local treatment facilities. The order of the biostation layout, the regulations for commissioning, as well as the types and frequency of inspections and maintenance of the biostation and its auxiliary equipment to maintain their operability are given.

Keywords: installation technology, biostation, wastewater, biotechnological process, autonomous septic systems.

Коммунальное хозяйство – значимый потребитель воды и производитель экологически неблагополучных отходов – сточных вод и иловых осадков, переработка которых реализуется на централизованных очистных сооружениях при их наличии [1; 2]. На загородных и сельских территориях из-за отсутствия систем водоотведения проблема утилизации подобных отходов стоит более остро и требует разработки малогабаритных биостанций, обеспечивающих

их сбор, обработку и рециклинг по месту образования с соблюдением санитарных и экологических ограничений, в целях создания комфортных условий проживания населения [3; 4].

Современный уровень малогабаритных биостанций очистки сточных вод свидетельствует о широком использовании аэротенков-отстойников с реализацией процесса илоотделения во взвешенном слое. Такое конструктивное исполнение позволяет не только уменьшить

габариты станции, но и интенсифицировать биотехнологический процесс за счет увеличения концентрации активного ила, повышения устойчивости к переменным режимам эксплуатации и к пагубному воздействию синтетических ингредиентов [5–7]. Однако процесс илоотделения под действием осаждения зачастую нестабилен, что обусловлено нестационарностью жидкостного потока и турбулентными зонами, провоцирующие его взрыхление, подъем и унос ила с осветленной водой.

В целях решения этой проблемы авторами в работах [8; 9] была усовершенствована техно-

логия и разработана автономная малогабаритная биостанция очистки сточных вод, в которой классические процессы нитрификации и денитрификации в аэротенке и осаждения частиц во вторичном отстойнике дополнены флокулообразованием во взвешенном слое в канальном илоотделителе. Оптимальная компоновка элементов биостанции (рис. 1) позволяет снизить гидравлическую нагрузку на вторичный отстойник, а биотехнологический процесс почти на 27 % более устойчив к изменению режима эксплуатации в сравнении с существующими типовыми станциями (например, «ЕВРОБИОН»).

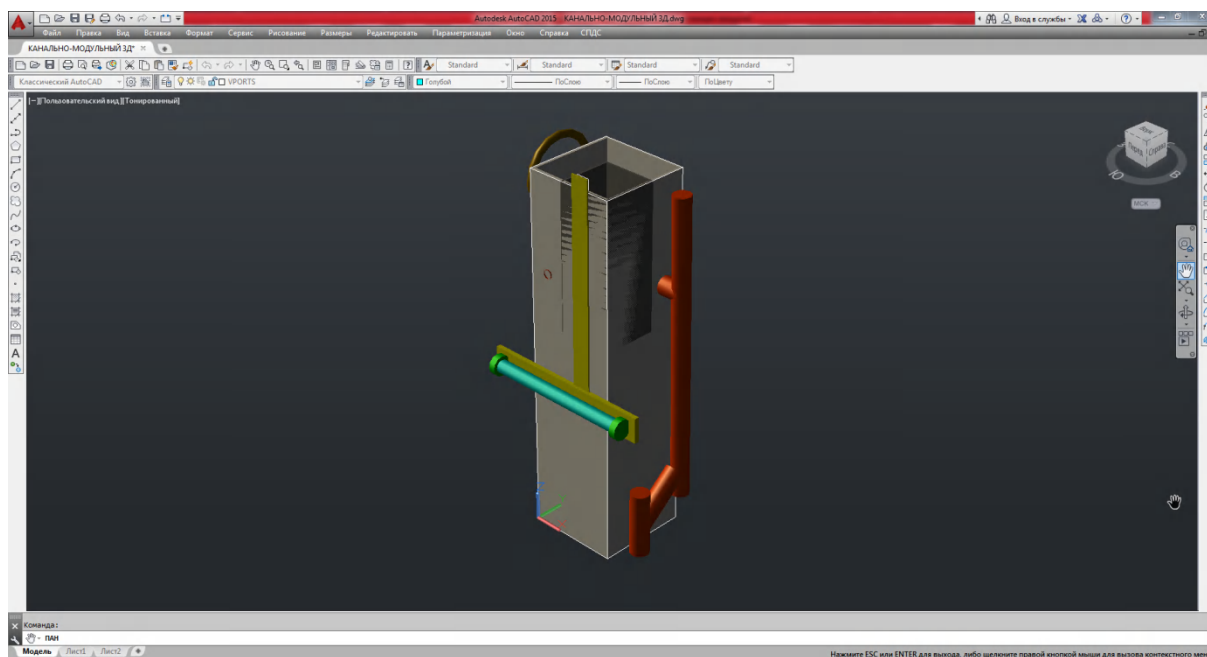


Рис. 1. Модель корпуса вторичного отстойника малогабаритной биостанции, укомплектованного системой транспорта, аэраторами и канальным илоотделителем

Настоящая работа посвящена цели разработки технологии монтажных работ, в том числе регламента технического обслуживания, малогабаритной биостанции на основе существующих децентрализованных (автономных) септических систем.

Согласно требованиям СНиП 2.04.01.-85 (СП 13330.2020) и 2.04.03-85 (СП 32.13330.2018), а также СанПиН 2.1.3684-21 монтажные работы включают проведение проектно-изыскательских, земляных, компоновочных, гидроизоляционных и пуско-наладочных мероприятий.

Проектно-изыскательские работы при строительстве автономных биостанций направлены на обеспечение экологической устойчивости природных систем путем соблюдения санитарных зон, учитывающих наличие водоисточни-

ков, карстовых пород и защищенность подземного водоносного горизонта. Эти мероприятия зачастую включают определение гранулометрического состава и фильтрационных свойств грунта, уровня грунтовых вод с учетом сезонных атмосферных осадков.

При выборе места для строительства биостанции необходимо придерживаться следующих рекомендаций:

- размещение на расстоянии 3–5 м от жилого объекта в направлении естественного уклона местности (при наличии), а при расстоянии свыше 15 метров предусматривать ревизионные колодцы;

- организация прямой трассы для отведения сточных вод, а при наличии перегибов предусматривать поворотные колодцы;

– организация обслуживающей площадки, в том числе для работы ассенизационной машины, на расстоянии не менее 3 м от древесных насаждений, 5 м от границы дороги, 10–30 м от непитьевого и 50 м от питьевого естественного водоисточника.

Земляные работы включают выемку грунта под котлован (рис. 2, *а*) и траншею для прокладки канализационной трубы, по которой будет осуществляться подвод сточных вод от жилого объекта в биостанцию. Длина и ширина (или эквивалентный диаметр) котлована при-

нимаются на ~0,5 м больше по каждому измерению, чем габариты корпуса самой биостанции.

Глубину котлована рассчитывают исходя из высотных размеров песчаной подсыпки (~0,20–0,30 м – в утрамбованном после увлажнения состоянии), основания и крышки (каждая ~0,15–0,20 м), вторичного отстойника (принимается по результатам проектного расчета) и приборного отсека (принимается с учетом комплектации). Отклонение от горизонтальности дна котлована более чем на 1 % не допускается.

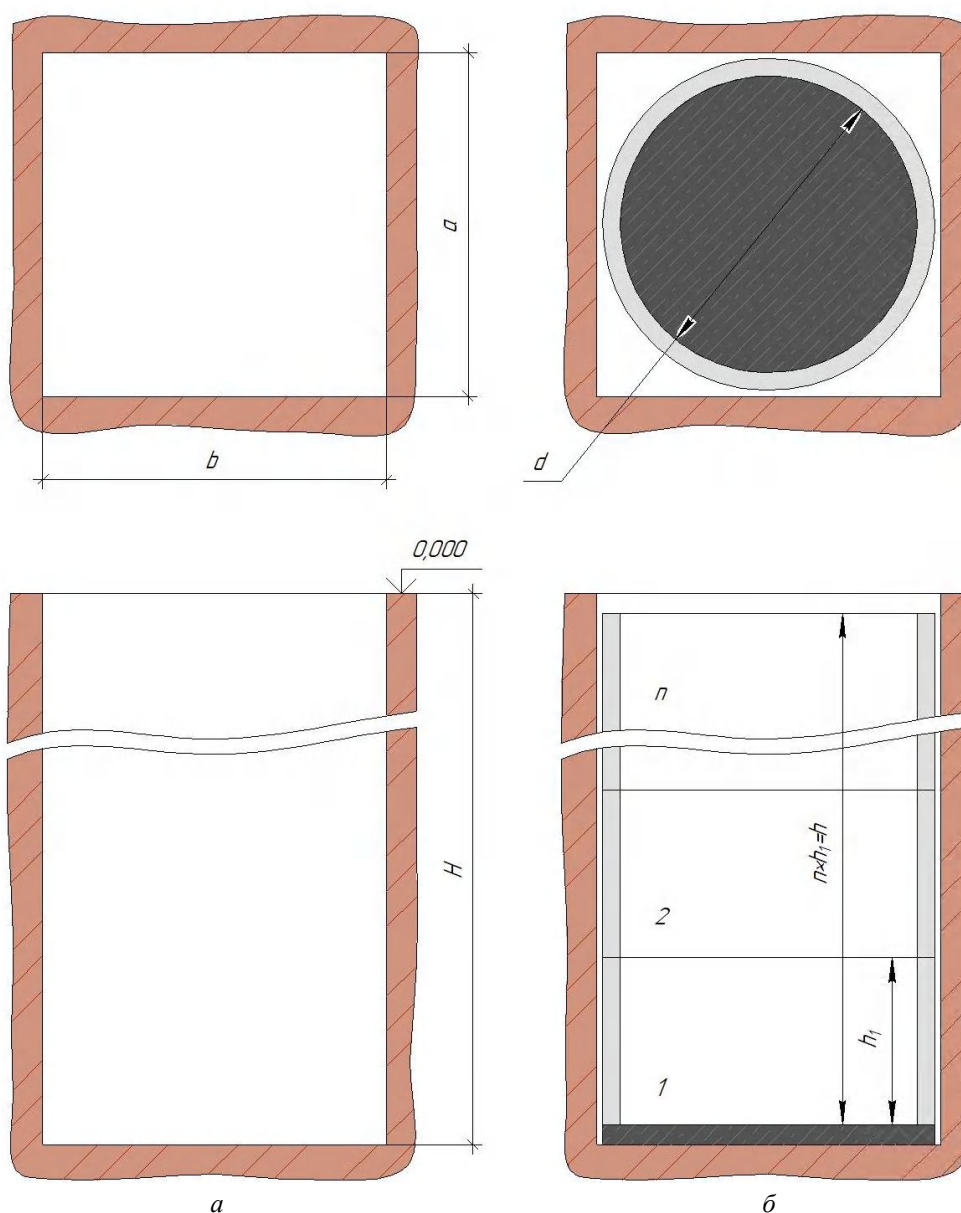


Рис. 2. Схема подготовки корпуса биостанции:
а – выемка грунта под котлован; *б* – монтаж колец; H , a , b – глубина, длина и ширина котлована;
 h_1 , d_1 – высота и диаметр кольца; n – количество колец; h – общая высота котлована

Траншею делают с уклоном 2 % (20 мм на 1 п. м.), а для выравнивания и уплотнения дна также применяют песчаную подсыпку.

Компоновочные мероприятия включают со-

здание корпуса биостанции (рис. 2, б), подвод сточных вод, монтаж вторичного отстойника, элементов конструкции биостанции и приборного оборудования (рис. 3).

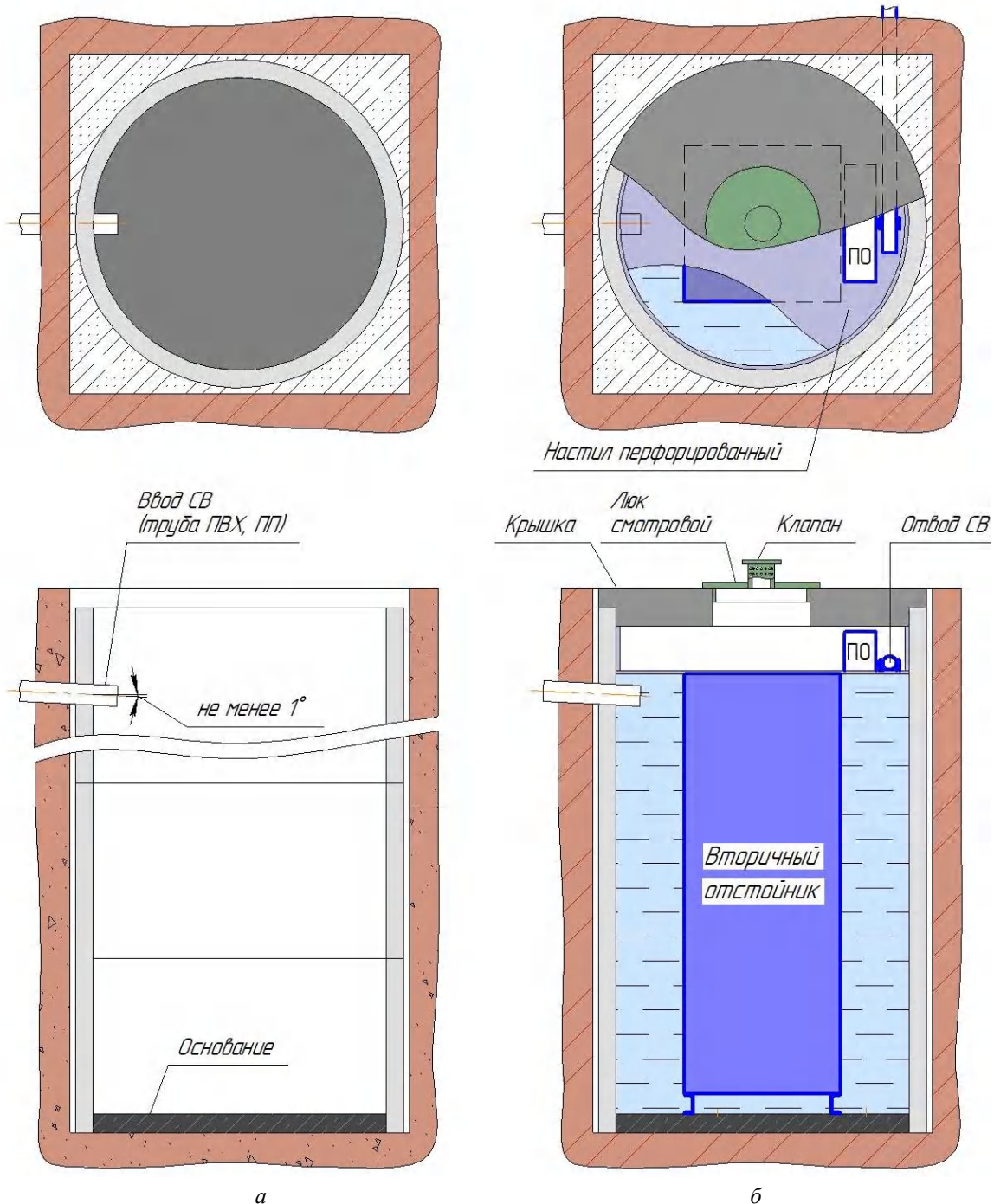


Рис. 3. Схема компоновки биостанции:

а – подвод сточных вод и гидроизоляционные работы;

б – монтаж вторичного отстойника, элементов конструкции и приборного оборудования (ПО)

Для создания корпуса биостанции используют железобетонные элементы классического канализационного колодца – кольца, днище глу-

хое (основание) и днище со сквозным отверстием (крышка), которые стандартизованы и выпускаются заводами ЖБИ. Количество ко-

лец определяется отношением высоты котлована к высоте одного кольца. На подготовленную песчаную подсыпку манипулятором опускается глухое днище, далее на него строго вертикально для обеспечения устойчивости и прочности конструкции опускаются поочередно кольца (рис. 2).

Для подвода сточных вод используют канализационную трубу диаметром 110 мм с толщиной стенки 2,7–3,2 мм, изготовленную из поливинилхлорида или полипропилена. Укладку трубы в траншее проводят под уклоном 1–2 % в теплоизолированном рукаве из вспененного или экструдированного пенополистирола с толщиной стенки 9–13 мм. Ввод канализационной трубы в корпус биостанции устраивают на глубине 0,6–0,7 м от нулевой отметки (дневной поверхности). В траншею может быть уложен в пластиковой гофрированной трубе и электрический провод (ПВС 3×1,5 мм²) для подключения приборного оборудования (насоса, компрессора, воздухоудовки).

В целях снижения агрессивного действия окружающей среды, предотвращения коррозионных процессов и исключения возможности попадания сточных вод в грунт и, наоборот, естественных осадков и подземных вод через швы и пробоины в корпус биостанции внутренняя и наружная стенки, стыки между днищем и кольцами, места ввода канализационной трубы гидроизолируют защитными водоотталкивающими материалами.

Перед вводом биостанции в эксплуатацию проводят пуско-наладочные работы. Вторичный отстойник наполняют водой до рабочего уровня, запускают систему транспорта и аэраторы. Выход на стабилизированный биотехнологический процесс в среднем протекает от 20 до 60 дней (при количестве пользователей 3–5 человек и среднесуточном объеме водоотведения 150–200 л/чел.). Формирование активного ила наблюдается уже спустя 10 дней устойчивой работы. Со временем ил сгущается, а качество очистки сточных вод улучшается, что характеризуется отсутствием дурно пахнущего запаха и визуально чистым стоком. В течение следующих 20 дней работы биостанции масса молодого активного ила нарастает, что сопровождается пенообразованием. С повышением концентрации активного ила пена постепенно исчезает. В этот период рекомендуется сократить использование бытовой химии до 1 раза в неделю.

Окончание пуско-наладочного периода работы биостанции определяют по объемной доле активного ила. Для этого из приемного аэротенка отбирают пробу в стеклянную литровую емкость и на протяжении 30 минут отстаивают. По истечении этого времени примерно 1/4 пробы должен занимать активный ил с четким визуальным разделением границы фаз.

При внесении в приемный аэротенк активного ила (с действующих очистных сооружений) в дозах от 20 до 400 литров сроки вывода биостанции на режим нормальной эксплуатации могут быть сокращены до 2–3 дней. В исключительных случаях возможно частичное отмирание ила из-за невозможности адаптироваться к новому составу сточных вод и более длительное время ввода биостанции в эксплуатацию.

Также для сокращения сроков пуско-наладочных работ и прироста активного ила при незначительном поступлении органических загрязнений со сточными водами допускается производить его «кормление» (до прироста!) биогенными добавками или пищевыми отходами, содержащих глюкозу, карбамид и фосфат калия [1; 10].

Гибель активного ила и вследствие этого нарушение работоспособности биостанции могут быть вызваны сбросами строительного мусора и шерсти животных, стоков, содержащих KMnO_4 , соединения хлора, лекарственные препараты, нефтепродукты, антифризы, кислоты и щелочи.

Для поддержания работоспособности биостанции и вспомогательного оборудования проводят ежедневный контрольный осмотр (ЕКО), ежемесячный технический осмотр (ЕТО), сезонное техническое обслуживание (СТО) с периодичностью 6 месяцев и годовое техническое обслуживание (ГТО) с периодичностью в 3, 5 и 10 лет.

При ЕКО проводят визуальный контроль индикации аварийно-охранной сигнализации, а при ЕТО – визуальный контроль органолептических свойств воды во вторичном отстойнике и работоспособность технологического оборудования. При выявлении на поверхности плавающих нерастворимых взвесей они подлежат удалению.

СТО предназначено для чистки стенок, шлангов и других технологических деталей биостанции. Для этого отключают компрессор и прекращают подачу воздуха на аэрационные

элементы. По истечении 15 минут осевший ил откачивают насос-эрлифтом со дна аэротенка до понижения уровня воды во всех камерах станции примерно на 0,2 м. При пониженном уровне воды проводят СТО.

ГТО проводят в целях замены мембран компрессора (раз в 3 года) и аэрационных элементов (раз в 10 лет), сервисного обслуживания (раз в 5 лет).

Работоспособность вспомогательного оборудования контролируют по следующим параметрам:

- насос-эрлифт рециркуляции активного ила из аэротенка в окислительный канал – малоинтенсивное волнообразование на поверхности воды в аэротенке;

- мелкопузырчатый аэратор аэротенка – мелкозернистая игристость пузырьков воздуха на поверхности аэротенка;

- дегазатор вторичного отстойника – интенсивный барботаж в канальном трубопроводе дегазатора;

- крупнопузырчатый аэратор денитрификатора – по выходу на поверхность воды волнообразных пузырей.

При безаварийном режиме эксплуатации вспомогательного оборудования в центральном воздушном коллекторе давление должно соответствовать 16–21 кПа.

Таким образом, разработана технология монтажных работ, включающая правила эксплуатации и регламент обслуживания малогабаритной биостанции очистки сточных вод на основе автономных септических систем для жилых объектов загородных и сельских территорий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жмур, Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками / Н. С. Жмур. – М.: АКВАРОС, 2003. – 315 с.
2. Ламскова, М. И. Возможности и перспективы очистки сточных, оборотных и хозяйственно-бытовых вод природными алюмосиликатами / М. И. Ламскова, А. Е. Новиков // Известия ВолгГТУ. – 2014. – № 1. – С. 77–80.
3. Пындак, В. И. Оптимизация систем очистки органосодержащих сточных вод и обработки иловых осадков / В. И. Пындак, А. Е. Новиков, В. Н. Штепа // Проблемы машиностроения и надежности машин. – 2017. – № 5. – С. 103–107.
4. Пындак, В. И. Проблемы и перспективы биоинженерного машиностроения (на примере развития методов переработки стоков) / В. И. Пындак, Ю. А. Степкина // Проблемы машиностроения и автоматизации. – 2013. – № 4. – С. 44–47.
5. Кель, Л. С. Биологическая очистка сточных вод – перспективные направления развития / Л. С. Кель, М. В. Середя, В. Л. Макаров // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. – 2019. – № 11 (143). – С. 20–25.
6. Кетов, К. Д. Сравнительный анализ установок очистки сточных вод на территориях загородных участков / К. Д. Кетов // Modern Science. – 2019. – № 4–1. – С. 55–67.
7. Нездойминов, В. И. Аэротенк-отстойник с обновляющимся взвешенным слоем / В. И. Нездойминов, Д. В. Заворотный // Вестник донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2016. – № 5 (121). – С. 15–19.
8. Оценка работоспособности малогабаритных станций биологической очистки коммунальных стоков при переменных нагрузках / А. Е. Новиков, Е. А. Дугин, П. С. Васильев [и др.] // Известия НВ АУК. – 2021. – № 3. – С. 344–355.
9. Новиков, А. Е. Проектирование и компоновка био-реактора очистки бытовых сточных вод / А. Е. Новиков, Е. А. Дугин, М. И. Филимонов // Известия НВ АУК. – 2022. – № 2. – С. 379–387.
10. Рекомендации по проведению гидробиологического контроля на сооружениях биологической очистки с аэротенками: метод. пособие / М. В. Демина, Н. В. Ионина; ОГУ «Аналитический центр». – Пермь: Пермский ГТУ, 2004. – 52 с.

УДК 66.074.2

А. Б. Голованчиков, А. А. Шурак

СРАВНЕНИЕ СТЕПЕНИ ОЧИСТКИ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ ВЫБРОСОВ ОТ ПЫЛИ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В БАТАРЕЕ ЦИКЛОНОВ И ЦЕНТРИКЛОНОВ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: a-shurak2@mail.ru

Представлена конструкция центриклона с узлом вращения отводящего патрубка. Показано, что вращение отводящего патрубка приводит к увеличению кольцевого фактора разделения, центробежной силы осаждения частиц в кольцевом зазоре между патрубком и внутренней стенкой цилиндрического корпуса. Проведено сравнение интегральной степени очистки и фактора разделения от пыли технического углерода в батарее. Для достижения заданной степени очистки от пыли технического углерода достаточно в два раза меньше центриклов в батарее, чем циклонов.

Ключевые слова: циклон, центриклон, интегральная степень очистки, батарея циклонов, батарея центриклов.

A. B. Golovanchikov, A. A. Shurak

COMPARISON OF THE DEGREE OF VENTILATION EMISSIONS FROM CARBON BLACK DUST IN A CYCLONE AND CYCLONE BATTERY

Volgograd State Technical University

The design of a centriclon with a rotation unit of the discharge pipe is presented. It is shown that the rotation of the discharge pipe leads to an increase in the annular separation factor, the centrifugal force of particle deposition in the annular gap between the pipe and the inner wall of the cylindrical body. The integral degree of purification and the separation factor from the number of cyclones and centriclones in the battery are compared. It is determined that in order to achieve a given degree of purification from carbon black dust, two times fewer centriclones in the battery than cyclones are sufficient.

Keywords: cyclone, centriclon, integral degree of purification, cyclone battery, centriclones battery.

Обычно дымовые газы и вентиляционные выбросы производственных помещений очищают в рукавных фильтрах, электрофильтрах, пылевых камерах, пенных аппаратах и скрубберах. Но наибольшее применение находят циклоны и батареи циклонов из-за простоты конструкции, обслуживания, отсутствия подвижных узлов и деталей, небольшого гидравлического сопротивления, высокой производительности и степени очистки.

К основным недостаткам циклонного процесса очистки пыли относятся снижение эффективности очистки от частиц и капель дисперсной фазы менее 10 мкм [1].

Для нивелирования этого недостатка разработаны конструкции циклонов и гидроциклонов с вращающимся выхлопным патрубком [2]. Однако здесь сразу появляется проблема, свя-

занная с уплотнением узла вращения выхлопного патрубка в крышке циклона.

Целью работы является усовершенствование конструкции центриклона в этом узле вращения и сравнение эффективности очистки вентиляционных выбросов в циклонах и центриклонах, установленных в батарею на примере улавливания частиц технического углерода.

На рис. 1, *a* изображена схема центриклона с предлагаемой конструкцией узла вращения патрубка 5 отвода очищенного газа в виде гидрозатвора, состоящего из кольцевого кармана *б*, установленного на крышке центриклона и тора 8 с положительной плавучестью, прикрепленного осесимметрично к патрубку 5 спицами 7. Тор 8 может быть выполнен из пенопласта или трубы, свернутой в кольцо.

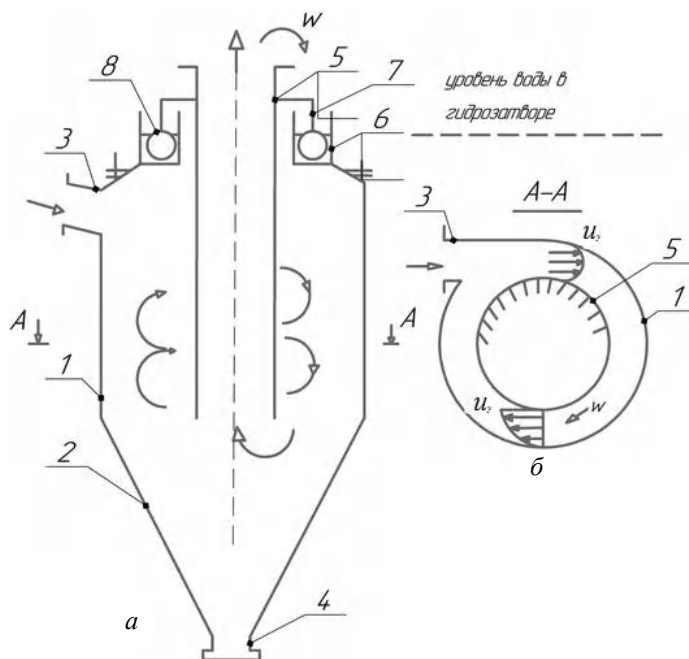


Рис. 1. Схема центриклона с гидрозатвором в узле вращения выхлопного патрубка (*a*) и поперечный разрез циклона с профилями окружных скоростей (*б*):

1 – цилиндрический корпус; 2 – коническое днище; 3 – патрубок подачи запыленного газа; 4 – патрубок сбора шлама; 5 – патрубок отвода очищенного газа; 6 – кольцевой карман гидрозатвора; 7 – опорные спицы тора; 8 – тор с положительной плавучестью

На рис. 1, б показаны окружные профили скорости очищаемого газа: сверху – в обычном циклоне с неподвижным патрубком 5; снизу – в центриклоне с вращающимся патрубком 5.

В представленной на рис. 1 конструкции центриклона наличие окружной скорости вращения у внешней стенки патрубка 5 увеличивает центробежную силу и фактор разделения, что приводит к росту локальных степеней очистки, в том числе от частиц тонкодисперсных

фракций, а значит, и общей интегральной степени очистки.

В табл. 1 и 2 представлены исходные, справочные данные и результаты ситового анализа частиц технического углерода соответственно для выполнения сравнительного расчета локальных и интегральных степеней очистки вентиляционных выбросов от частиц технического углерода в батарее циклонов и центриклонов.

Таблица 1

Исходные и справочные данные для расчета батареи циклонов

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4	5
1	Производительность по очищаемому воздуху	м ³ /с	q_v	50
2	Плотность воздуха	кг/м ³	ρ	1,28
3	Плотность частиц технического углерода	кг/м ³	ρ_m	1300
4	Вязкость воздуха	Па·с	μ	$2,9 \cdot 10^{-5}$
5	Необходимая степень очистки	–	χ	0,95

Таблица 2

Фракционный состав пыли технического углерода

№ фракции	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Диаметр частиц, мкм	1,5	3,5	5,5	7,5	9,5	11,5	13,5	15,5	17,5	19,5	21,5	23,5	25,5
Масса фракции, г	2	25	57	73	83	88	89	81	68	52	34	7	2
Доля фракции, %	0,3	3,8	8,6	11	12,5	13,3	13,3	12,5	10,3	7,9	5,1	1,1	0,3

На рис. 2 приведены графики плотности распределения частиц технического углерода по фракциям на входе (кривая 1) и выходе (кривая 2) в батарее из 28 циклонов и 14 центриклонов, обеспечивающие интегральную степень очистки $\chi = 95$ %. Номинальный диа-

метр гарантированно уловленных частиц составляет $d_0 = 7$ мкм, частицы меньшего размера улавливаются не полностью. То есть часть из оставшихся 5 % частиц наиболее тонких фракций размером от 1 до 7 мкм выбрасывается через патрубок 5.

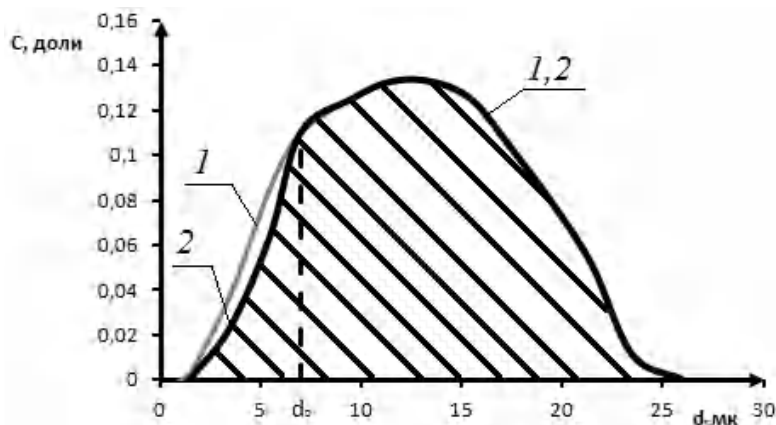


Рис. 2. График плотности распределения частиц технического углерода по фракциям на входе (кривая 1) и выходе (кривая 2) из батареи из 28 циклонов и 14 центриклонов

На графиках рис. 3 показано изменение интегральной степени очистки в батареях циклонов и центриклонов в зависимости от числа аппаратов в батарее. Из рис. 3 видно, что для обеспечения заданной степени очистки в 95 %

число параллельно установленных циклонов в батарее должно быть 28, а центриклонов в два раза меньше – всего 14. Это объясняется ростом локальных центробежных сил в кольцевой секции центриклона по сравнению с циклоном.

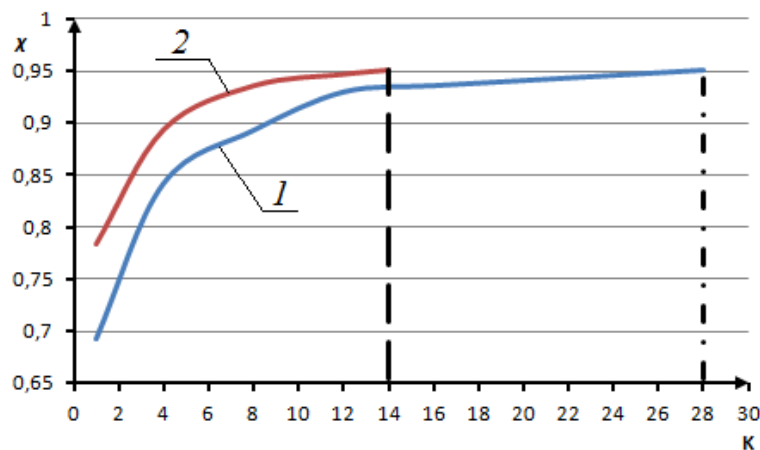


Рис. 3. Зависимость интегральной степени очистки от числа аппаратов в батарее:
1 – циклонов; 2 – центриклонов

Как видно из профиля окружной скорости u_y (рис. 1, б), она стремится к нулю по мере приближения к наружной стенке неподвижного патрубка 5, при этом уменьшается локальный фактор разделения Fr и, соответственно, скорость центробежного осаждения частиц.

В центриклоне наоборот по мере приближения к наружной вращающейся стенке патрубка 5 окружная скорость u_y возрастает, при этом возрастает центробежная сила, так как уменьшается еще и диаметр локальной линии тока D_y , что увеличивает локальный фактор разделения Fr и интегральную степень очистки в целом.

На рис. 4 приведены графики изменения интегральных значений фактора разделения Fr от числа циклонов (кривая 1) и числа центри-

клонов (кривая 2) в батарее. Из рис. 4 видно, что при достижении в каждом аппарате батареи фактор разделения $Fr = 400$ достигается необходимая интегральная степень очистки $\chi = 95 \%$. При этом в батарее циклонов число аппаратов составляет $K = 28$, а в батарее центриклонов – $K = 14$, то есть в два раза меньше. График изменения диаметра аппаратов в батареях циклонов и центриклонов (кривая 3) также представлен на рис. 4.

Из рис. 4 видно, что для обеспечения необходимой интегральной степени очистки $\chi = 95 \%$ диаметр каждого из 28 аппаратов в батарее циклонов составляет $D = 780$ мм, а диаметр каждого из 14 аппаратов в батарее центриклонов – $D = 1100$ мм.

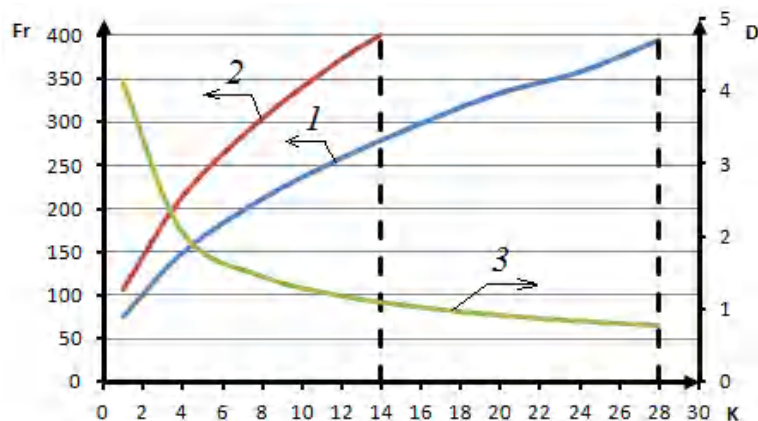


Рис. 4. Зависимость фактора разделения от числа циклонов (1) и центриклонов (2) в батарее; зависимость диаметра (3) циклонов и центриклонов от их числа в батарее

Таким образом, замена подшипникового узла вращения патрубка 5 для выхода очищенного газа из центриклона на гидрозатвор предлагаемой конструкции позволяет предотвратить засорение подшипника частицами пыли, уменьшить затраты времени на остановку и очистку узла вращения, что способствует увеличению основного времени работы и производительности. На разработанную конструкцию центриклона получен патент [4].

Вращение патрубка 5 приводит к увеличению их кольцевых факторов разделения, центробежной силы осаждения частиц в кольцевом зазоре между этим патрубком и внутренней стенкой цилиндрического корпуса 1, локальных

степеней очистки по фракциям и общей интегральной степени очистки. Поэтому для достижения заданной степени очистки потребуются установка батареи центриклонов в два раза меньшей по сравнению с батареей циклонов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Машины и аппараты химических производств: учеб. пособ. для вузов / под общей редакцией А. С. Тимонина. – Калуга: Издательство Н. Ф. Бочкаревой, 2008. – 872 с.
2. Романков, П. Г. Гидромеханические процессы химической технологии / П. Г. Романков, М. И. Курочкина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Химия, 1974. – 288 с.
3. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. Ч. 2: учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонов; ВолгГТУ. – Волгоград, 1995. – 121 с.
4. П. м. 208935 Российская Федерация, МПК В04С5/103 [и др.] Циклон / А.Б. Голованчиков [и др.]; ВолгГТУ. – 2022.

УДК 536.423.1

П. С. Васильев, Л. С. Рева

КРАТКОВРЕМЕННЫЙ КОНТАКТ ФАЗ ПРИ КАПЕЛЬНОМ КИПЕНИИ ЖИДКОСТИ*

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: nestorvv@mail.ru, leonidreva46@mail.ru

Обоснована актуальность исследования закономерностей протекания теплообмена между поверхностью нагрева и каплями жидкости. Изложены основные положения модели кратковременного контакта фаз при капельном кипении жидкости. Приведен подробный вывод уравнений для определения границ диапазона температурного напора при одинарном кратковременном контакте капель жидкости с поверхностью нагрева. На основе детального графического анализа полученных уравнений сформулированы практические рекомендации для инженерного проектирования технологических аппаратов.

Ключевые слова: капля, поверхность нагрева, температурный напор, контакт, проектирование.

P. S. Vasilyev, L. S. Reva

SHORT-TERM PHASES CONTACT AT LIQUID DROPLET BOILING*

Volgograd State Technical University

The urgency of the study of heat exchange regularities between the heating surface and liquid droplets is substantiated. The basic provisions of the short-term phases contact model at liquid droplet boiling are stated. A detailed derivation of equations for determining the boundaries of the temperature head range at a single short-term contact of liquid droplets with the heating surface is given. On the basis of detailed graphical analysis of the obtained equations practical recommendations for engineering design of technological apparatuses are formulated.

Keywords: droplet, heating surface, temperature drop, contact, design.

Исследование закономерностей протекания теплообмена между поверхностью нагрева и каплями жидкости актуально для целого ряда технологических процессов, применяемых в технике водовоздушных и спрейерных методов охлаждения, с точки зрения совершенствования методов их расчета [1].

Экспериментально установлено, что при контакте капель жидкости с сильно перегретой поверхностью величина отводимого от нее теп-

лового потока имеет порядок $q \sim 10^7$ Вт/м² [2; 3]. Такие аномально высокие значения снимаемого теплового потока могут быть объяснены с помощью модели кратковременного контакта капель жидкости с поверхностью нагрева. При этом возможен как одинарный, так и множественный их кратковременный контакт [1; 2].

Одинарный кратковременный контакт указанных фаз осуществляется при температурном напоре, величина которого меньше его крити-

© Васильев П. С., Рева Л. С., 2023.

* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ МК-1603.2022.4 «Разработка энергоресурсоэффективного оборудования для реализации тепломассообменных процессов с использованием множественного капельного кипения и высокопористых материалов на основе экспериментально-теоретических исследований».

This research was supported by the grant of the President of the Russian Federation МК-1603.2022.4 «Development of energy and resource efficient equipment for the implementation of heat and mass transfer processes using multiple drop boiling and highly porous materials based on experimental and theoretical studies».

ческого значения. В этом случае имеет место быть равновесный (устойчивый) фазовый переход жидкости, определяющий наибольшую интенсивность теплообмена. В свою очередь, это обстоятельство обуславливает наибольшую эффективность работы технологического оборудования, его наименьшие габариты и металлоемкость.

Множественный кратковременный контакт капель с поверхностью нагрева осуществляется при температурном напоре, величина которого лежит вблизи его критического значения. В этом случае жидкость начинает переходить в сфероидальное состояние, и имеет место быть ее неравновесный (неустойчивый) фазовый переход, при котором интенсивность теплообмена резко снижается. В свою очередь, данное обстоятельство приводит к снижению эффективности работы технологического оборудования, увеличению его габаритов и металлоемкости [3–6].

Модель кратковременного контакта фаз применяется при выполнении следующего условия [7]:

$$Fo = \frac{\tau_K \cdot \lambda_{cm}}{\delta_{cm}^2 \cdot \rho_{cm} \cdot c_{p,cm}} < 0,106, \quad (1)$$

где Fo – число подобия Фурье; τ_K – время фазового контакта, с; δ_{cm} – толщина поверхности нагрева, м; теплофизические свойства поверхно-

сти нагрева: ρ_{cm} – плотность, кг/м³; $c_{p,cm}$ – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·К); λ_{cm} – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

Основная суть модели заключается в следующем. Пусть t_0 – начальная температура поверхности нагрева. В течение всего времени фазового контакта τ_K на одной ее стороне поддерживается температура $t_{cm} \neq t_0$. Условие (1) гарантирует, что изменение температуры на другой стороне поверхности нагрева не превышает 3 % от $|t_{cm} - t_0|$ [7].

Необходимо отметить, что количественные характеристики процесса капельного кипения зависят от следующих факторов: теплофизических свойств жидкости, размера капель, скорости движения капель в момент их соударения с поверхностью нагрева, начальной температуры жидкости в каплях, температуры поверхности нагрева и ее состояния, определяемого шероховатостью и адгезионными свойствами [3; 4; 8].

В связи с этим цель работы заключается в определении зависимости для расчета значения температурного напора при капельном кипении жидкости в режиме кратковременного контакта фаз.

Время полного испарения одиночной капли жидкости с поверхности нагрева можно определить из уравнения [4]:

$$Ho_v = 2,256 \cdot 10^{-29} \cdot Ra^{-1,933} \cdot Oh^{-11,572} \cdot Re^{-0,231} \cdot \left(\frac{t_{kun} - t_n}{\Delta t} \right)^{0,243} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a} \right)^{1,025} \cdot \left(\frac{W_a}{W_\kappa} \right)^{-2,370}, \quad (2)$$

где $Ho_v = \frac{\tau \cdot \mu}{d_\kappa^2 \cdot \rho}$ – приведенное число подобия

гомохронности; τ – время испарения капли, с;

d_κ – диаметр капли, м; $Ra = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot c_p \cdot \beta \cdot d_\kappa^3}{\mu \cdot \lambda} \cdot \Delta t$ –

число подобия Рэлея; $Oh = \frac{\mu}{\sqrt{\rho \cdot \sigma \cdot d_\kappa}}$ – число

подобия Онезорге; $Re = \frac{w \cdot d_\kappa \cdot \rho}{\mu}$ – число по-

добия Рейнольдса; $\frac{t_{kun} - t_n}{\Delta t}$ – симплекс подо-

бия, учитывающий влияние температурных факторов; $\frac{S_m}{R_a}$ – симплекс подобия, учитываю-

щий влияние шероховатости поверхности нагрева; $\frac{W_a}{W_\kappa}$ – симплекс подобия, учитывающий

влияние адгезионных свойств поверхности на-

грева; w – скорость движения капли в момент ее соударения с поверхностью нагрева, м/с; t_n – начальная температура жидкости в капле, °С;

$\Delta t = t_{cm} - t_{kun}$ – температурный напор, К; t_{cm} –

температура поверхности нагрева, °С; R_a –

среднее арифметическое отклонение профиля поверхности нагрева, мкм; S_m – средний шаг

неровностей профиля поверхности нагрева по средней линии, мкм; $W_a = \sigma \cdot (1 + \cos \theta)$ – работа

адгезии, Дж/м²; $W_\kappa = 2 \cdot \sigma$ – работа когезии, Дж/м²; θ – краевой угол смачивания поверхно-

сти нагрева при натекании жидкости, град.; теплофизические свойства жидкости, взятые при температуре ее кипения t_{kun} : ρ – плотность, кг/м³; μ – динамический коэффициент вязкости, Па·с; β – коэффициент объемного расширения, К⁻¹; c_p – удельная массовая теплоемкость, Дж/(кг·К); λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); σ – коэффициент поверхностного натяжения, Дж/м².

Выразим уравнение (2) в следующем виде:

$$\Delta t = 6,842 \cdot 10^{-14} \cdot Ra_*^{-0,888} \cdot Oh^{-5,318} \cdot Re^{-0,106} \cdot (t_{kun} - t_n) \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{0,471} \cdot \left(\frac{W_a}{W_\kappa}\right)^{-1,089} \cdot Ho_v^{-0,460}, \quad (3)$$

где $Ra_* = \frac{g \cdot \rho^2 \cdot c_p \cdot \beta \cdot d_\kappa^3}{\mu \cdot \lambda} \cdot (t_{kun} - t_n)$ – модифицированное число подобия Рэлея.

Максимально возможное время кратковременного контакта капле жидкости с поверхностью нагрева получим из условия (1):

$$\tau_K = 0,106 \cdot \frac{\delta_{cm}^2 \cdot \rho_{cm} \cdot c_{p,cm}}{\lambda_{cm}}.$$

$$\Delta t_K = 1,921 \cdot 10^{-13} \cdot Ra_*^{-0,888} \cdot Oh^{-5,318} \cdot Re^{-0,106} \cdot (t_{kun} - t_n) \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{0,471} \cdot \left(\frac{W_a}{W_\kappa}\right)^{-1,089} \times \left(\frac{d_\kappa^2}{\delta_{cm}^2} \cdot \frac{\rho}{\rho_{cm}} \cdot \frac{\lambda_{cm}}{\mu \cdot c_{p,cm}}\right)^{0,460}. \quad (4)$$

Выражая уравнение для определения температуры поверхности нагрева, при которой одиночная капля жидкости начинает переходить в сфероидальное состояние, называемой еще температурой Лейденфроста $t_{cm,L}$, [3] в ви-

Подставляя τ_K в уравнение (3), получим зависимость для определения минимального значения температурного напора при капельном кипении жидкости в режиме кратковременного контакта:

де, аналогичном уравнению (3), получим зависимость для определения максимального значения температурного напора при капельном кипении жидкости в режиме кратковременного контакта:

$$\Delta t_L = 1,017 \cdot 10^{-7} \cdot Ra_*^{-0,500} \cdot Oh^{-3,050} \cdot Re^{-0,159} \cdot (t_{kun} - t_n) \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{0,583} \cdot \left(\frac{W_a}{W_\kappa}\right)^{1,099}, \quad (5)$$

где $\Delta t_L = t_{cm,L} - t_{kun}$.

Таким образом, одинарный кратковременный контакт капле жидкости с поверхностью нагрева, соответствующий наибольшей интенсивности теплообмена, осуществляется в диапа-

зоне значений температурного напора от Δt_K до Δt_L , определяемых зависимостями (4) и (5). При этом необходимо отметить, что полученные выражения учитывают все основные факторы, влияющие на процесс капельного кипения.

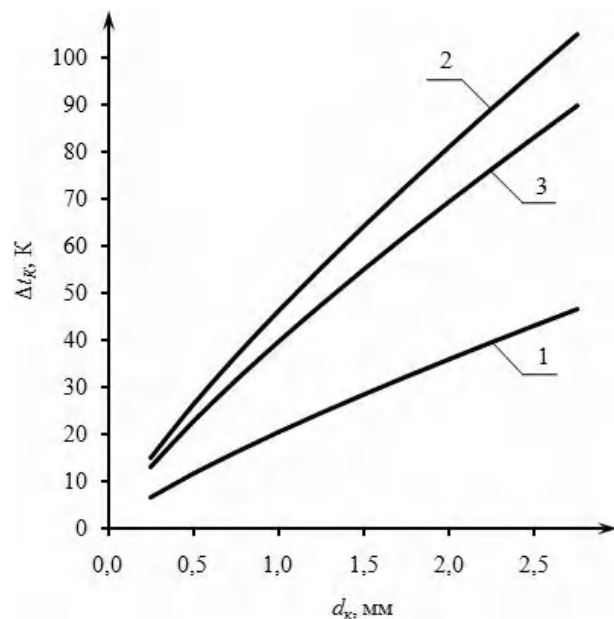


Рис. 1. Графики зависимости $\Delta t_K = f(d_K)$ для кипения капле воды при $t_{kun} = 100^\circ\text{C}$, $t_n = 20^\circ\text{C}$, $w = 2$ м/с на поверхностях нагрева толщиной $\delta_{cm} = 16$ мм, изготовленных из: 1 – углеродистой стали ($R_a = 2,269$ мкм, $S_m = 170,4$ мкм, $\theta = 46^\circ$); 2 – алюминиевого сплава ($R_a = 6,603$ мкм, $S_m = 359,3$ мкм, $\theta = 54^\circ$); 3 – латуни ($R_a = 6,312$ мкм, $S_m = 409,5$ мкм, $\theta = 76^\circ$)

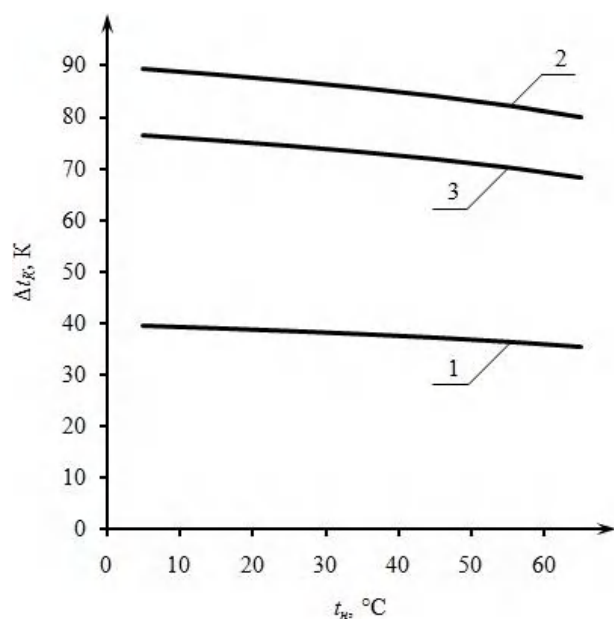


Рис. 2. Графики зависимости $\Delta t_K = f(t_n)$ для кипения капле воды при $t_{kun} = 100^\circ\text{C}$, $d_K = 1$ мм, $w = 2$ м/с на поверхностях нагрева толщиной $\delta_{cm} = 8$ мм, изготовленных из: 1 – углеродистой стали ($R_a = 2,269$ мкм, $S_m = 170,4$ мкм, $\theta = 46^\circ$); 2 – алюминиевого сплава ($R_a = 6,603$ мкм, $S_m = 359,3$ мкм, $\theta = 54^\circ$); 3 – латуни ($R_a = 6,312$ мкм, $S_m = 409,5$ мкм, $\theta = 76^\circ$)

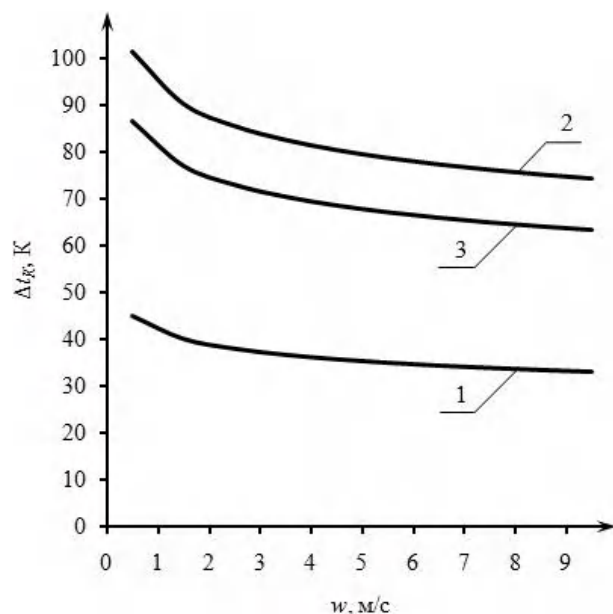


Рис. 3. Графики зависимости $\Delta t_K = f(w)$ для кипения капель воды при $t_{кип} = 100^\circ\text{C}$, $d_K = 1$ мм, $t_n = 20^\circ\text{C}$ на поверхностях нагрева толщиной $\delta_{cm} = 8$ мм, изготовленных из: 1 – углеродистой стали ($R_a = 2,269$ мкм, $S_m = 170,4$ мкм, $\theta = 46^\circ$); 2 – алюминиевого сплава ($R_a = 6,603$ мкм, $S_m = 359,3$ мкм, $\theta = 54^\circ$); 3 – латуни ($R_a = 6,312$ мкм, $S_m = 409,5$ мкм, $\theta = 76^\circ$)

На рис. 1–3 показаны построенные с помощью уравнения (4) графики зависимости минимального значения температурного напора при капельном кипении воды в режиме кратковременного контакта фаз от соответственно размера капель, начальной температуры воды в каплях и скорости движения капель в момент их соударения с поверхностями нагрева из углеродистой стали, алюминиевого сплава и латуни. При этом для всех представленных графических зависимостей в диапазонах изменения их параметров выполняется условие $\Delta t_K < \Delta t_L$.

Анализ рис. 1 показывает, что с увеличением размера капель жидкости d_K величина Δt_K возрастает практически по линейному закону. С точки зрения реализации технологии капельного кипения на практике, это обстоятельство позволяет в режиме реального времени изменять в широком диапазоне величину отводимого от поверхности нагрева теплового потока, например за счет корректировки гидродинамического режима работы распыливающего устройства.

Из рис. 2 и 3 видно, что начальная температура жидкости в каплях t_n и скорость их движения в момент соударения с поверхностью нагрева w практически не влияют на величину Δt_K , что обуславливает широкий диапазон режимных параметров работы технологических аппара-

тов, в которых осуществляется процесс капельного кипения. Кроме того, это обстоятельство расширяет количество вариантов конструктивного исполнения таких аппаратов.

На рис. 4 показаны построенные с помощью уравнений (4) и (5) графики зависимости отношения $\Delta t_K / \Delta t_L$ от толщины поверхностей нагрева из углеродистой стали, алюминиевого сплава и латуни.

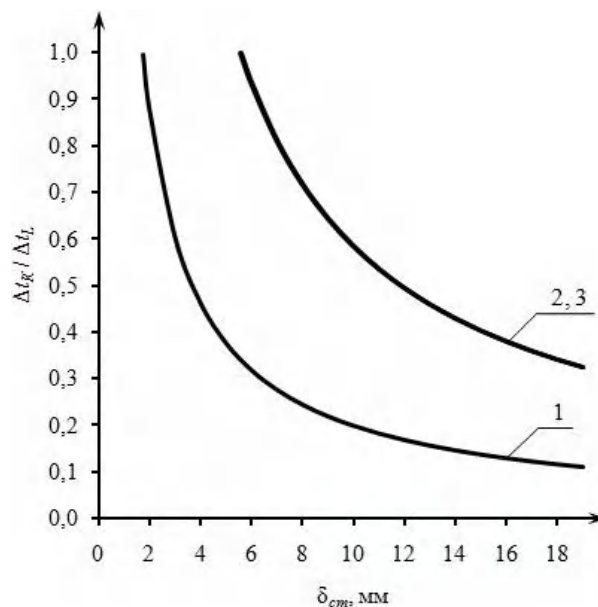


Рис. 4. Графики зависимости $\Delta t_K / \Delta t_L = f(\delta_{cm})$ для кипения капель воды при $t_{кип} = 100^\circ\text{C}$, $d_K = 1$ мм, $t_n = 20^\circ\text{C}$, $w = 2$ м/с на поверхностях нагрева, изготовленных из: 1 – углеродистой стали ($R_a = 2,269$ мкм, $S_m = 170,4$ мкм, $\theta = 46^\circ$, $\lambda_{cm} = 46,5$ Вт/(м·К)); 2 – алюминиевого сплава ($R_a = 6,603$ мкм, $S_m = 359,3$ мкм, $\theta = 54^\circ$, $\lambda_{cm} = 203,5$ Вт/(м·К)); 3 – латуни ($R_a = 6,312$ мкм, $S_m = 409,5$ мкм, $\theta = 76^\circ$, $\lambda_{cm} = 93,0$ Вт/(м·К))

Анализ рис. 4 показывает, что наиболее широкий диапазон значений температурного напора, при котором процесс капельного кипения жидкости осуществляется в режиме кратковременного контакта фаз, соответствует поверхности нагрева из наименее теплопроводного материала с минимальными параметрами шероховатости, которая при этом хорошо смачивается испаряемой жидкостью. Аналогичная тенденция имеет место быть и на рис. 1–3. С практической точки зрения, данное обстоятельство позволяет наиболее рационально выбрать конструкционный материал для изготовления поверхности нагрева, вид и режим ее механической обработки.

Таким образом, в результате проведенных исследований предложены расчетные зависимости (4) и (5), позволяющие определять граничные значения диапазона температурного

напора Δt_K и Δt_L для кипения капель жидкости при их одинарном кратковременном контакте с поверхностью нагрева. Данный режим протекания процесса капельного кипения соответствует наибольшей интенсивности теплообмена. Анализ влияния на величины Δt_K и Δt_L основных факторов позволил сформулировать практические рекомендации, которые могут быть востребованы при инженерном проектировании высокоэффективных аппаратов, работающих по технологии капельного кипения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Стырикович, М. А.* Тепломассообмен при кратковременном контакте капли жидкости с сильно перегретой поверхностью / М. А. Стырикович, Д. И. Ламден, М. Е. Костановская // Теплофизика высоких температур. – 1984. – Т. 22, № 6. – С. 1158–1165.
2. *Стырикович, М. А.* О пространственно-временной структуре теплового взаимодействия при кратковременном контакте капли жидкости с сильно перегретой поверхностью / М. А. Стырикович, Д. И. Ламден, М. Е. Костановская // Теплофизика высоких температур. – 1986. – Т. 24, № 4. – С. 753–761.
3. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении капли жидкости на поверхности нагрева / П. С. Васильев, Л. С. Рева, С. Л. Рева, А. Б. Голованчиков // Вестник технологического университета. – 2017. – Т. 20, № 22. – С. 28–33.
4. Определение времени испарения кипящей на поверхности нагрева капли / П. С. Васильев, Л. С. Рева, С. Л. Рева, А. Е. Новиков, А. Б. Голованчиков // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 5. – С. 121–126.
5. *Скоков, В. Н.* Самоорганизованная критичность и 1/f-флуктуации при неравновесных фазовых переходах / В. Н. Скоков, В. П. Коверда, А. В. Решетников // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2001. – Т. 119, № 3. – С. 613–620.
6. Капля на горячей плите: появление 1/f-шума при переходе к сфероидальной форме / В. П. Скрипов, А. В. Виноградов, В. Н. Скоков, А. В. Решетников, В. П. Коверда // Журнал технической физики. – 2003. – Т. 73, № 6. – С. 21–23.
7. *Мигунов, В. В.* Задача о тепломассопереносе при кратковременном контакте фаз / В. В. Мигунов // Инженерно-физический журнал. – 1991. – Т. 60, № 6. – С. 955–963.
8. *Vasilyev, P. S.* Assessing the impact of the state of the heat-exchange surface on the heat transfer intensity during droplet boiling / P. S. Vasilyev, L. S. Reva, A. A. Shurak // International Research Journal. – 2022. – Vol. 120, № 6. – P. 18–25.

УДК 66.02.001.57

А. Б. Голованчиков, Ю. В. Богданова

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПОТОКА В АППАРАТАХ ВЫТЕСНЕНИЯ И СМЕШЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: arisjulia@yandex.ru

Авторами был запатентован способ определения структуры потоков двумя различными индикаторами [1]. В статье представлена установка по определению структуры потока в аппаратах смешения и вытеснения с различными по молекулярной диффузии индикаторами, а также представлена блок-схема для расчета на ЭВМ химического реактора с учетом влияния компонентов реакции на продольную диффузию.

Ключевые слова: диффузионная модель, структура потока, аппарат идеального смешения, аппарат идеального вытеснения, коэффициенты молекулярной диффузии, дисперсия отклика на входное возмущение, критерий Пекле.

A. B. Golovanchikov, Yu. V. Bogdanova

IMPROVEMENT OF THE STUDYING METHOD THE FLOW STRUCTURE IN DISPLACEMENT AND MIXING APPARATUS

Volgograd State Technical University

The authors patented a method for determining the structure of flows using two different indicators [1]. The article presents an installation for determining the flow structure in mixing and displacement apparatuses with indicators of different molecular diffusion, as well as a block diagram for calculating a chemical reactor on a computer, taking into account the influence of reaction components on longitudinal diffusion.

Keywords: diffusion model, flow structure, perfect mixing apparatus, perfect displacement apparatus, molecular diffusion coefficients, dispersion of response to an input disturbance, Peclet criterion.

Введение

Сущность экспериментального метода исследования структуры потоков в реальном аппарате заключается в том, что в поток на входе в аппарат каким-либо способом вводят индикатор, а на выходе потока из аппарата регистрируют изменение концентрации индикатора в зависимости от времени.

Полученную таким образом функцию отклика аппарата на ввод индикатора (типовое возмущение по составу потока) обрабатывают по специальной методике и получают нормированную функцию распределения частиц (элементов, долей) потока по их времени пребывания в технологическом аппарате, которую в дальнейшем используют в расчетах технологических процессов и аппаратов или для построения близкой к реальной гидродинамической модели, составленной из комбинации типовых моделей гидродинамики (идеального смешения и вытеснения, диффузионной модели, ячеечной модели и т. п.) [2–4].

Если принятая модель соответствует реальной структуре потоков, то экспериментальная функция отклика может рассматриваться как график решения уравнений модели при соответствующих начальных и граничных условиях. Сравнивая решение уравнений модели с экспериментальной функцией отклика на типовые (например, импульсные) возмущения, можно определить неизвестные параметры модели [4–5].

Таким образом, целью настоящей работы является разработка экспериментальной лабораторной установки и методики проведения исследования структуры потоков, позволяющей повышать точности физического и математического моделирования гидромеханического процесса в различных аппаратах и реакторах непрерывного действия за счет использования дополнительного индикатора, имеющего диффузию молекул, отличающуюся от диффузии молекул основного индикатора.

Описание экспериментальной лабораторной установки

Сущность экспериментальной работы заключается в том, что в аппарат подают основной индикатор, электропроводность которого отличается от электропроводности потока, регистрируют на выходе из аппарата функцию распределения частиц потока во времени и осуществляют дополнительную регистрацию концентрации индикатора на выходе из аппарата после регистрации функции распределения частиц потока во времени путем ввода дополнительного индикатора,

при этом в качестве дополнительного индикатора используют вещество, коэффициент диффузии которого в потоке жидкости отличается от коэффициента диффузии основного индикатора, и по зависимости концентрации дополнительного индикатора от времени и функции распределения частиц в потоке во времени определяют дисперсии и числа Пекле, характеризующие структуру потока жидкости (табл. 1).

Использование в качестве дополнительного индикатора вещества, коэффициент диффузии которого в потоке отличается от коэффициента диффузии основного индикатора, позволяет получить две разные функции распределения частиц во времени, зависящее от коэффициентов диффузии основного и дополнительного индикаторов в потоке жидкости, и рассчитать влияние коэффициентов диффузии на параметры структуры потоков: дисперсию и число Пекле диффузионной модели, так как в реакторах в реакцию обычно вступают молекулы исходных веществ, коэффициенты диффузии которых в потоке жидкости значительно отличаются друг от друга. Например, это реакции полимеризации, когда к фрагменту полимерной цепочки с малым коэффициентом диффузии последовательно присоединяются молекулы мономера с большим коэффициентом диффузии [6–8].

При исследовании структуры потоков к индикатору предъявляется ряд требований: во-первых, его масса (объем) не должны влиять на структуру потока основной жидкости; во-вторых, он должен достаточно просто регистрироваться на выходе основной жидкости; в-третьих, его масса (объем) остаются неизменными в течение всего времени регистрации индикатора на выходе. Эти требования связаны с тем, что структура потока индикатора должна совпадать со структурой потока основной жидкости [2–4].

На входе потока вводят по определенному закону (импульсному, ступенчатому и др.) индикатор, а на выходе регистрируют отклик – изменение концентрации индикатора во времени (метод трассера). Обработка отклика методами статистики позволяет оценить закон распределения времени пребывания и найти параметры модели.

В качестве основного и дополнительного индикаторов могут быть использованы органические и неорганические вещества, красители, магнитные частицы и радиоактивные изотопы [2–4].

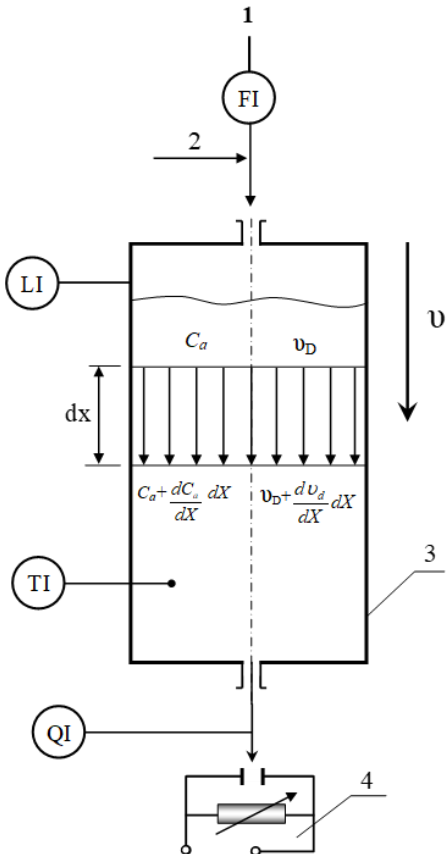
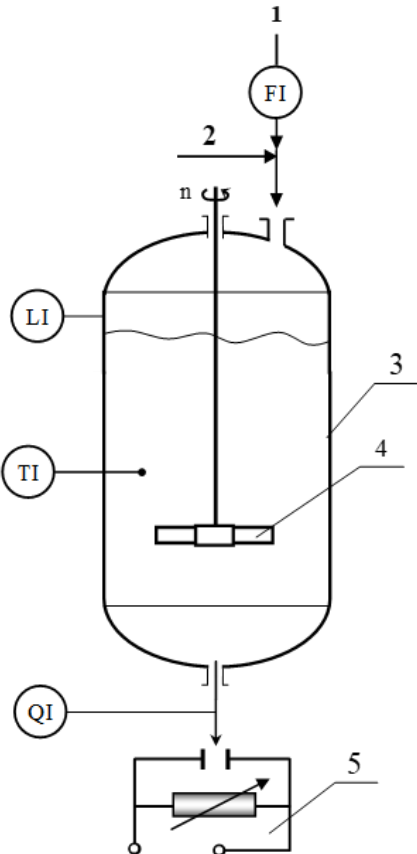
Объект представляет собой аппарат, на вход которого для экспериментального определения

структуры потока водно-глицеринового раствора подавались в момент времени $\tau_0 = 0$ импульсным методом поочередно индикаторы – растворы солей концентрацией 7 г/л и объемом 10 мл: сначала хлорида калия (KCl), у которого коэффициент диффузии ионов калия $D_I = 19,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$,

затем хлорида кальция (CaCl_2), коэффициент диффузии ионов кальция $D_2 = 7,92 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ [9]. Водно-глицериновый раствор хлорида кальция той же концентрации и объема, как и основной индикатор, брался для дополнительной регистрации концентрации индикатора.

Таблица 1

Исходные данные для проведения исследования в аппарате перемешивания и вытеснения [8]

Проточный трубчатый аппарат	Аппарат с двухлопастной мешалкой непрерывного действия
	
<i>Параметры процесса:</i> $V_{mp} = 3,6 \text{ л};$ $d_{mp} = 0,08 \text{ м};$ $l = 1 \text{ м};$ $\mu = 14 \text{ сПз};$ $q_v = 20 \text{ мл/с};$ $\tau_{cp} = V/q_v = 180 \text{ с};$ 1) $v_\phi = 0,01 \text{ м/с};$ 2) $v_\phi = 0,1 \text{ м/с}.$	<i>Параметры процесса:</i> I. $V_{an} = 5 \text{ л};$ $D_{an} = 0,2 \text{ м};$ $d_m = 0,04 \text{ м};$ $d_m/D_{an} = 0,2;$ $q_v = 10 \text{ мл/с};$ $\tau_{cp} = V_{an}/q_v = 500 \text{ с};$ $V_{ин} = 10 \text{ мл};$ 1) $n = 1 \text{ об/с};$ 2) $n = 4 \text{ об/с}.$ II. $V_{an} = 0,6 \text{ л};$ $D_{an} = 0,09 \text{ м};$ $d_m = 0,018 \text{ м};$ $V_{ин} = 10 \text{ мл};$ $\mu = 0,014 \text{ Па·с};$ $q_v = 1 \text{ мл/с};$ 1) $n = 0,25 \text{ об/с};$ 2) $n = 1 \text{ об/с}.$

Чувствительным элементом при измерении электропроводности является кондуктометрическая ячейка, свойства которой характеризуются константной или постоянной ячейки. Конструкция ячейки представляет собой два параллельных измерительных электрода, погруженных в раствор. Для регистрации концентрации индикатора в выходном патрубке аппарата установлены с зазором 8 мм два электрода кондуктометрической ячейки WTW inoLabCond 740, представляющим собой записывающее устройство, которое регистрировало функции распределения частиц

индикатора во времени в размерных координатах.

Схема экспериментальной установки представлена в табл. 1 (1 – вход основного потока жидкости; 2 – импульсный ввод индикатора; 3 – аппарат непрерывного действия; 4 – кондуктометрическая ячейка WTW inoLabCond 740).

Результаты экспериментальных определений структуры потока индикаторами с разными коэффициентами молекулярной диффузии

Полученные результаты экспериментальных исследований сведены в табл. 2–4.

Таблица 2

Результаты экспериментальных данных для аппарата с мешалкой при следующих параметрах:

$V_{an} = 5$ л; $D_{an} = 0,2$ м; $d_m = 0,04$ м; $V_{ин} = 10$ мл; $\tau = 500$ с; $C_{ин} = 7$ г/л; $q_v = 10$ мл/с

Индикатор	Коэффициент диффузии катионов соли, D_i , м ² /с	Дисперсия кривой отклика, σ_I^2	Значение критерия Пекле продольной диффузии, Pe
1	2	3	4
Хлорид калия KCl	$19,6 \cdot 10^{-10}$	$n = 1$ об/с	
		0,420	3,40
Хлорид кальция CaCl ₂	$7,92 \cdot 10^{-10}$	0,240	7,17
Хлорид калия KCl	$19,6 \cdot 10^{-10}$	$n = 4$ об/с	
		0,586	1,87
Хлорид кальция CaCl ₂	$7,92 \cdot 10^{-10}$	0,584	1,88

Таблица 3

Результаты экспериментальных данных в аппарате с мешалкой при следующих параметрах:

$V_{an} = 0,6$ л; $D_{an} = 0,09$ м; $d_m = 0,018$ м; $V_{ин} = 10$ мл; $\tau = 600$ с; $C_{ин} = 7$ г/л; $q_v = 1$ мл/с

Индикатор	Коэффициент диффузии катионов соли, D_i , м ² /с	Дисперсия кривой отклика, σ_I^2	Значение критерия Пекле продольной диффузии, Pe
1	2	3	4
Хлорид калия KCl	$19,6 \cdot 10^{-10}$	$n = 0,25$ об/с	
		0,275	6,07
Хлорид кальция CaCl ₂	$7,92 \cdot 10^{-10}$	0,179	10,40
Хлорид калия KCl	$19,6 \cdot 10^{-10}$	$n = 1$ об/с	
		0,836	0,015
Хлорид кальция CaCl ₂	$7,92 \cdot 10^{-10}$	0,836	0,015

Таблица 4

Результаты экспериментальных данных в аппарате вытеснения при следующих параметрах:

$d_{mp} = 0,08$ м; $l_{mp} = 1$ м; $V_{ин} = 10$ мл; $C_{ин} = 7$ г/л; $q_v = 20$ мл/с; $\tau = 180$ с

Индикатор	Коэффициент молекулярной диффузии катионов соли D_i , м ² /с	Дисперсия кривой отклика, σ_I^2	Число Пекле продольной диффузии, Pe
1	2	3	4
Хлорид калия KCl	$19,6 \cdot 10^{-10}$	$v = 0,01$ м/с	
		0,0714	27
Хлорид кальция CaCl ₂	$7,92 \cdot 10^{-10}$	0,0380	51
Хлорид калия KCl	$19,6 \cdot 10^{-10}$	$v = 0,1$ м/с	
		0,036	55
Хлорид кальция CaCl ₂	$7,92 \cdot 10^{-10}$	0,034	57

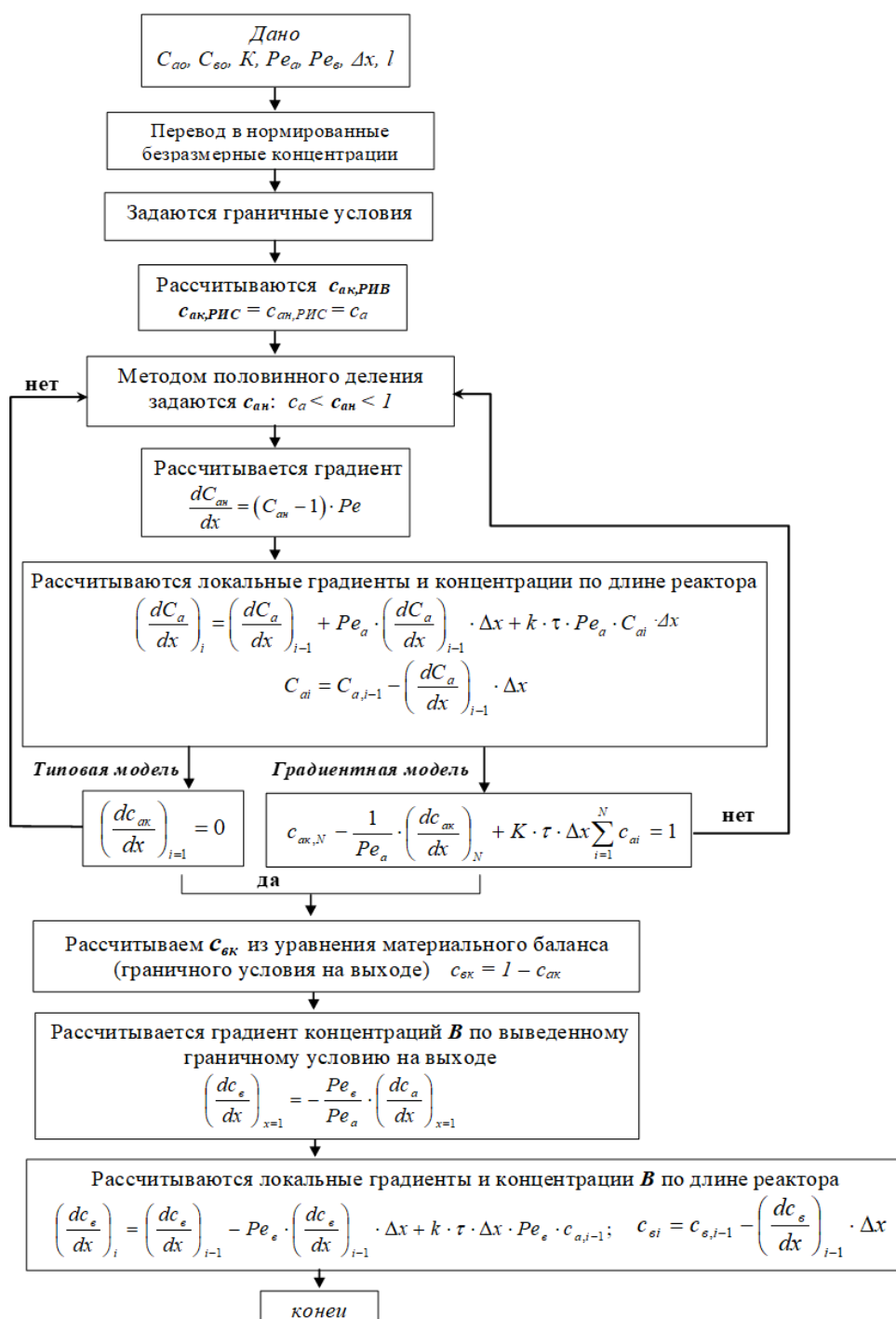
Таким образом, при высоких скоростях движения реакционной массы разным значениям дисперсии кривой отклика σ_1^2 и σ_2^2 соответствуют разные расчетные критерии Пекле Pe , являющиеся основными параметрами диффузионной модели для расчета химических реакторов и характеризующие в них структуру потоков реакционной массы [1; 8].

Значит, когда мощности мешалки не хватает для интенсивного перемешивания всего объема жидкости в аппарате, собственные коэффи-

циенты диффузии молекул могут существенно влиять на структуру потоков.

Блок-схема расчета на ЭВМ реактора для простой реакции первого порядка с учетом влияния коэффициентов молекулярной диффузии

Ниже представлена блок-схема расчета химического реактора с учетом различия в коэффициентах молекулярной диффузии на примере простой реакции первого порядка.



Введем следующие обозначения:

A – исходный компонента;

B – продукт реакции;

K – константа скорости реакции;

τ – среднее время пребывания;

C_A, C_B – соответственно концентрации компонентов A и B в размерных координатах, кмоль/м³;

C_{A0} – начальная концентрация исходного компонента A , кмоль/м³;

c_a, c_b – соответственно безразмерные концентрации компонентов A и B в безразмерных координатах (нормированные относительно C_{A0});

X – координата длины реактора, м;

x – безразмерная координата длины реактора;

l – длина реактора, м;

D_l – коэффициент продольной диффузии, м²/с;

Pe – число Пекле для диффузионной модели структуры потоков;

v – скорость реакционной массы в реакторе, м/с;

d – диаметр реактора, м.

Выводы

Для проверки влияния коэффициентов диффузии на структуру потоков были проведены экспериментальные исследования по снятию кривых отклика двумя разными индикаторами в насадочной колонне непрерывного действия, которые были продублированы аналогичными исследованиями в аппарате с двухлопастной пропеллерной мешалкой.

Установлено, что дополнительная функция распределения структуры потока во времени, полученная путем регистрации концентрации дополнительного индикатора хлорида кальция на выходе из аппарата и имеющего коэффициент диффузии в потоке, значительно больший, чем коэффициент диффузии основного индикатора, позволяет получить дополнительную информацию о влиянии диффузии молекул потока на его структуру, в частности на дисперсию и число Пекле, а значит, более точно учитывать

влияние коэффициентов диффузии реагирующих молекул в потоке жидкости на степень конверсии, профили температур и концентраций исходных веществ и продуктов реакции.

Разработана блок-схема расчета реактора на ЭВМ с учетом влияния продольной диффузии, которая поможет повысить точность физического и математического моделирования, упростить выбор индикатора для дополнительной регистрации концентрации на выходе из аппарата и расширить возможности применения описанного способа на все типы аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2463585 РФ, МПК G01N27/06. Способ определения структуры потока жидкости в аппарате / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова, Е. В. Васильева, А. В. Павлов; ВолгГТУ. – 2012.
2. Гельперин, Н. И. Структура потоков и эффективность колонных аппаратов химической промышленности / Н. И. Гельперин, В. Л. Пибалк, А. Е. Костянян. – Москва: Химия, 1977. – 540 с.
3. Гильденблат, И. А. Структура потоков / И. А. Гильденблат, А. Ю. Закгейм. – Москва, 1985. – 365 с.
4. Левеншпиль, О. Инженерное оформление химических процессов / О. Левеншпиль; под ред. М. Г. Слинько. – Москва: Химия, 1969. – 624 с.
5. Белоусов, А. С. Диффузионная модель перемешивания в технологических аппаратах при малых числах Пекле / А. С. Белоусов, Б. С. Сажин // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2005. – № 2. – С. 96–100.
6. Голованчиков, А. Б. Влияние молекулярной диффузии индикатора на параметры структуры потоков / А. Б. Голованчиков, Ю. В. Аристова, К. В. Черикова // Нефтепереработка и нефтехимия. – 2019. – № 1. – С. 42–44.
7. Голованчиков, А. Б. Двухкомпонентная диффузионная модель структуры потока для реакции II порядка и градиентными граничными условиями / А. Б. Голованчиков, Ю. В. Аристова // Вестник технологического университета. – 2018. – Т. 21, № 10. – С. 83–87.
8. Голованчиков, А. Б. Экспериментальное определение структуры потока методом двух индикаторов / А. Б. Голованчиков, Ю. В. Аристова, Н. А. Дулькина // Известия ВолгГТУ: межвуз. сб. науч. ст. № 1 (128) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Реология, процессы и аппараты химической технологии»; вып. 7). – С. 98–100.
9. Зайцев, И. Д. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных растворов неорганических веществ: справ. изд. / И. Д. Зайцев, Г. Г. Асеев. – Москва: Химия, 1988. – 366 с.

УДК 66.048.3-986

*Н. В. Шибитова, Д. А. Родин, В. С. Кузьменко, А. А. Шурак***ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОТЫ КОЛОННЫ ОТГОНКИ
НА СТАДИИ ВЫДЕЛЕНИЯ ВИНИЛХЛОРИДА****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: novnv27@mail.ru

Работа посвящена актуальной проблеме повышения энергоэффективности отечественного оборудования для получения качественной продукции в производстве поливинилхлорида, являющейся основой производства труб различного назначения. Поставленная задача решается за счет оптимизации процесса выделения винилхлорида с использованием программы PRO-II. Проведенное моделирование позволяет установить взаимосвязь между различными параметрами работы колонны отгонки винилхлорида с предлагаемой конструкцией массообменной струйной тарелки, разработанной авторами, выбрать оптимальный режим процесса и снизить энергозатраты.

Ключевые слова: винилхлорид, колонна отгонки, энергозатраты, моделирование, оптимальный режим, тарелка.

*N. V. Shibitova, D. A. Rodin, V. S. Kuzmenko, A. A. Shurak***OPTIMIZATION OF THE OPERATION OF A STRIPPING COLUMN
AT THE STAGE OF VINYL CHLORIDE SEPARATION****Volgograd State Technical University**

The work is devoted to the actual problem of increasing the energy efficiency of domestic equipment to obtain high-quality products in the production of polyvinyl chloride, which is the basis for the production of pipes for various purposes. The problem is solved by optimizing the process of isolation of vinyl chloride using the PRO-II program. The simulation performed allows establishing the relationship between various operating parameters of the vinyl chloride stripping column with the proposed design of the mass-transfer jet tray developed by the authors, choosing the optimal process mode and reducing energy costs, plate.

Keywords: vinyl chloride, stripping column, energy consumption, modeling, optimal regime.

Винилхлорид (ВХ) является основным продуктом хлорорганического синтеза, на его получение в различных странах расходуется до 20–35 % хлора. Основным потребителем ВХ является производство поливинилхлорида (ПВХ), который по объему выпуска занимает второе место после полиэтилена. ПВХ находит применение в различных отраслях промышленности. Самым крупным потребителем ПВХ является производство труб для газо- и водопроводов, на которое расходуется до 20–55 % полимера. Суммарный объем производства ПВХ в России составляет – 550 тыс. т/год [1].

Известно несколько методов получения ВХ [2; 3]. По рассматриваемому методу [2] производство ВХ состоит из нескольких стадий: гидрохлорирование ацетилена (синтез ВХ); выделение ВХ; хлорирование этилена (синтез дихлорэтана); очистка горючего газа; ректификация ВХ; ректификация дихлорэтана; крекинг дихлорэтана; очистка сточных вод и газовых выбросов. По данной технологии производится ВХ, соответствующий требованиям ТУ 6-01-14-90 с изменениями 1, 2 [4].

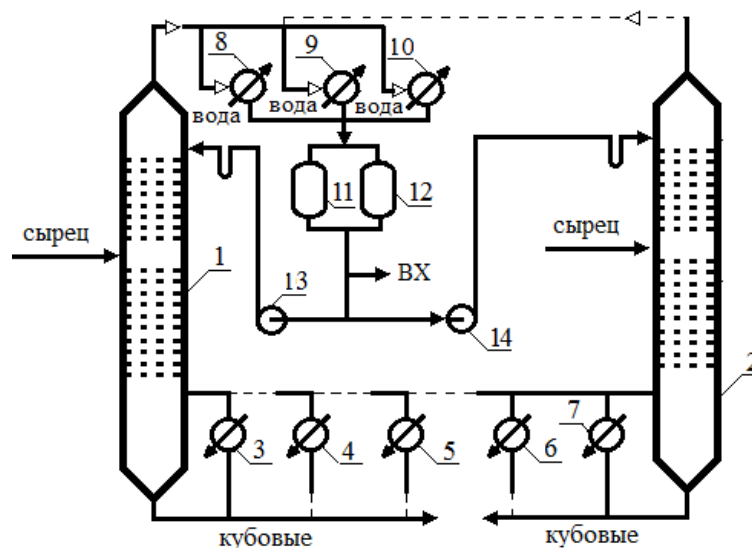
Одной из наиболее ответственных стадий является выделение ВХ. Принцип работы сис-

темы выделения ВХ основан на селективном поглощении ВХ захоложенным 1,2-дихлорэтаном (колонна абсорбции) с последующим удалением из смеси ВХ + 1,2-дихлорэтан инертных (колонна стабилизации) и отбором ВХ на колонне отгонки для того, чтобы на стадии ректификации получить продукт высшего сорта с массовой долей примесей не более 0,02 %.

Целью работы является снижение энергозатрат при проведении массообменного процесса за счет оптимизации режима работы и совершенствования конструкции тарельчатой колонны выделения винилхлорида.

На существующей стадии (рис. 1) установлены две тарельчатые колонны отгонки ВХ 1, 2 (35 колпачковых тарелок), снабженные пятью кипятильниками 3–7, из них, работающих одновременно, – два.

В процессе эксплуатации кипятильников 3–7 забивается трубное пространство продуктами осмола. В результате этого они периодически останавливаются для чистки трубного пучка, а в работу включаются резервные кипятильники. Кипятильники 3–7 взаимозаменяемы и могут работать на обе колонны 1, 2).



Стадия выделения винилхлорида

Пары ВХ из верхней части колонны 1, 2 поступают в конденсаторы 8–10. ВХ, сконденсировавшийся в конденсаторах 8–10, сливается в сборники флегмы 11, 12. Из нижней части сборников флегмы 11, 12 ВХ подается насосами 13, 14 на флегмирование колонн 1, 2. Температура верха колонн 1, 2 регулируется изменением подачи оборотной воды в конденсаторы 8–10.

Для предотвращения полимеризации ВХ в верхней части колонн 1, 2 в линию всаса насосов 13, 14 подается раствор агидола в дихлорэтане.

На колонны 1, 2 подается кубовая жидкость из колонны стабилизации, содержащая в основном 1,2-дихлорэтан (1,2-ДХЭ), насыщенный ВХ, а также в небольшом количестве метилхлорид (МХ), этилхлорид (ЭХ), изопропилхлорид (ИПХ), 1,1-дихлорэтан (1,1-ДХЭ), хлороформ, 1,3-бутадиен, моновинилацетилен (МВА), пропилен и воду.

Для оценки влияния давления в колонне на энергетические затраты и с целью выбора оптимального режима [5] для процесса отгонки проведено моделирование по программе PRO-II. При выборе давления решающую роль оказывает температура конденсации паров в конденсаторах 8–10 массообменных аппаратов 1, 2 при использовании оборотной воды и температура кипения кубовой жидкости в кипятыльниках 3–7.

При моделировании основными исходными данными являются:

1. Производительность потока на тарелку питания – 15000 кг/час.
2. Концентрация компонентов во входящем потоке, % масс.:
 - МХ – 0,70;

- ВХ – 66,71;
- ЭХ – 0,05;
- ИПХ – 0,003;
- 1,1-ДХЭ – 0,009;
- хлороформ – 0,0018;
- 1,2-ДХЭ – 32,27;
- 1,3-бутадиен – 0,02;
- МВА – 0,002;
- пропилен – 0,20;
- вода – 0,034.

3. Концентрация компонентов, % масс.:

- ВХ в дистилляте – не менее 92,00;
- 1,2-ДХЭ в кубовом остатке – не менее 99,00.

4. Давление – 5,0 и 6,0 кгс/см².

В первую очередь по программе [6] были рассчитаны температуры кипения всех компонентов исходной смеси для выбранного диапазона давлений (табл. 1). Количество отгоняемых низкокипящих компонентов в дистилляте определяет температуру конденсации в конденсаторах колонн и влияет на выбор оптимального давления.

Так как в колоннах 1, 2 установлены колпачковые тарелки, для повышения эффективности работы и снижения перепада давления, проведен литературно-патентный обзор по контактным устройствам для выбора более эффективной конструкции.

В монографии [7] проанализированы современные конструкции контактных элементов, применяемых в процессах массообмена. Показаны основные направления для интенсификации массообменного процесса за счет усовершенствования существующих конструкций и разработки новых типов тарелок.

Таблица 1

Температуры кипения компонентов $T_{кип}$ в исходной смеси

Давление, кгс/см ²	$T_{кип}$ КОМПОНЕНТОВ										
	МХ	ВХ	ЭХ	ИПХ	1,1-ДХЭ	Хлороформ	1,2-ДХЭ	1,3-бутадиен	МВА	Пропилен	Вода
1,0	минус 24,22	минус 13,70	12,27	35,74	57,28	61,73	83,50	минус 4,40	5,50	минус 47,70	100,00
5,0	19,83	32,22	62,75	88,97	115,22	119,13	145,94	44,37	55,76	минус 5,80	151,12
6,0	26,06	38,76	69,92	96,48	123,42	127,32	154,76	51,31	63,21	0,20	158,09

Рассмотрена возможность замены колпачковых тарелок на клапанные с разными конструктивными особенностями [8–10]. Но из-за того, что есть вероятность осмоления в нижней части колонн 1, 2, возможно «залипание» клапанов и нарушение режимов работы тарелок, поэтому для установки в колоннах отгонки ВХ рекомендуется струйная тарелка с переливным

устройством подвешного типа [11; 12]. Достоинствами тарелки являются увеличение КПД тарелки и производительности, а также уменьшение сопротивления.

В табл. 2 представлены расчетные значения по тепловой нагрузке на кипятильник при давлении в колонне 6 кгс/см² для двух типов тарелок.

Таблица 2

Влияние температуры исходной смеси и флегмового числа на энергозатраты

Флегмовое число	Тепловая нагрузка на кипятильник, Вт	Расход пара, кг/ч (кгс/см ²)	Давление в колонне, кгс/см ²	Перепад давления в кубовой части, кгс/см ²
Температура исходной смеси, 50 °С				
Колпачковые тарелки				
1,00	1841029,00	3229,92	6,00	0,50
1,20	2010827,00	3526,69	6,00	0,52
1,40	2179462,00	3823,51	6,00	0,54
1,60	2349260,00	4120,38	6,00	0,56
Струйные тарелки с переливным устройством подвешного типа				
1,00	1839866,00	3227,18	6,00	0,40
1,20	2008501,00	3523,95	6,00	0,42
1,40	2178299,00	3820,79	6,00	0,44
1,60	2346934,00	4117,68	6,00	0,46
Температура исходной смеси, 60 °С				
Колпачковые тарелки				
1,00	1368851,00	2401,43	6,00	0,50
1,20	1538649,00	2698,20	6,00	0,52
1,40	1707284,00	2995,04	6,00	0,54
1,60	1877082,00	3291,91	6,00	0,56
Струйные тарелки с переливным устройством подвешного типа				
1,00	1367688,00	2398,72	6,00	0,40
1,20	1536323,00	2695,48	6,00	0,42
1,40	1706121,00	2992,30	6,00	0,44
1,60	1874756,00	3289,19	6,00	0,46

Окончание табл. 2

Флегмовое число	Тепловая нагрузка на кипятильник, Вт	Расход пара, кг/ч (кгс/см ²)	Давление в колонне, кгс/см ²	Перепад давления в кубовой части, кгс/см ²
Температура исходной смеси, 80 °С				
Колпачковые тарелки				
1,00	925748,00	1624,91	6,00	0,50
1,20	1095546,00	1921,68	6,00	0,52
1,40	1264181,00	2218,52	6,00	0,54
1,60	1433979,00	2515,39	6,00	0,56
Струйные тарелки с переливным устройством подвешного типа				
1,00	924585,00	1622,18	6,00	0,40
1,20	1094383,00	1918,94	6,00	0,42
1,40	1263018,00	2215,78	6,00	0,44
1,60	1432816,00	2512,67	6,00	0,46

В результате проведенного моделирования было установлено, что для качественного выделения ВХ на колонне по приведенным исходным данным необходимо 17 теоретических тарелок при давлении в аппарате 6,0 кгс/см². При подаче исходного потока на 6 теоретическую тарелку с температурой 80,0 °С температура конденсации в дефлегматоре составляет 38,6 °С, а флегмовое число 1,2. При этом режиме в дистилляте содержание ВХ составит 97,6 % масс., а содержание 1,2-ДХЭ в кубовой

жидкости – 99,99 % масс. Расход водяного насыщенного пара при давлении 8 кгс/см², подаваемого на испарение кубового остатка – 1918,94 кг/ч, а количество оборотной воды 160167,20 кг/ч. Сравнительный расчет, проведенный при давлении в системе 5,0 кгс/см², показал, что расход водяного насыщенного пара снижается до 1908,94 кг/ч, но расход оборотной воды увеличивается до 163851,30 кг/ч.

В табл. 3 приводится оптимальный режим работы колонны отгонки винилхлорида.

Таблица 3

Оптимальный режим работы колонны отгонки ВХ

Наименование параметров	Исходная смесь	Дистиллят	Кубовый остаток
1. Давление, кгс/см ²	6,50	6,00	6,42
2. Температура, °С	80,00	38,60	158,10
3. Расход, кг/ч	15000,00	10253,20	4746,80
4. Содержание компонентов, % масс.:			
МХ	0,70	1,02	–
ВХ	66,71	97,60	–
ЭХ	0,05	0,07	–
ИПХ	0,003	0,004	–
1,1-ДХЭ	0,009	0,01	0,007
хлороформ	0,0018	0,001	0,003
1,2-ДХЭ	32,27	0,92	99,99
1,3-бутадиен	0,02	0,03	–
МВА	0,002	0,003	–
пропилен	0,20	0,30	–
вода	0,034	0,05	–
5. Флегмовое число	1,2		
6. Число тарелок	31		
7. Тарелка питания	11 (сверху вниз)		

По результатам моделирования определены габаритные размеры колонного аппарата: диаметр колонны – 1,0 м; число тарелок в укрепляющей части – 10 шт., в исчерпывающей части – 21 шт.; высота тарельчатой части аппарата – 12,0 м при расстоянии между тарелками 400 мм.

Таким образом, на основании проведенного анализа конструкций массообменных тарелок предлагается заменить колпачковые тарелки, установленные в колоннах 1, 2, на струйные с переливным устройством подвешенного типа. Замена в колоннах отгонки ВХ колпачковых тарелок на струйные позволяет уменьшить число тарелок, снизить гидравлическое сопротивление колонн на 15–20 %. Установка струйных тарелок увеличивает межремонтный пробег оборудования, за счет уменьшения отложений от продуктов осмола в кипятильниках и в контактных устройствах аппаратов. Оптимизация параметров процесса на стадии выделения ВХ снижает энергозатраты на 10–12 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Производство дихлорэтана и винилхлорида. – Режим доступа: URL: <https://base.garant.ru/71569804/c74d6d7c95e27021146be056ebac8f37/> (дата обращения: 12.07.23 г.).
2. Промышленные хлорорганические продукты: справочник / Под ред. Л. А. Ошина. – М.: Химия, 1978. – 656 с.
3. Технология производства винилхлорида и поливинилхлорида. – Режим доступа: https://web.archive.org/web/20140716054952/http://www.uhde-russia.com/files/09_vinylchlorid.pdf/ (дата обращения: 15.07.23 г.).
4. Каталог продукции АО «Башкирской содовой компании». – Режим доступа: URL: https://www.rstradehouse.com/pr_img/1002410047/20170817/77778000/katalog_bsk-2017.pdf/ (дата обращения: 15.07.23 г.).
5. Леонтьев, В. С. Оптимизация одноколонных ректификационных аппаратов для химических технологий и процессов нефтепереработки / В. С. Леонтьев // Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». – 2012. – № 2. – С. 255–262. – Режим доступа: URL : http://ogbus.ru/files/ogbus/authors/Leontiev/Leontiev_4.pdf.
6. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2020616533 от 18 июня 2020 г. Российская Федерация. Программа для расчета тарельчатой ректификационной колонны непрерывного действия / А. Б. Голованчиков, Н. В. Шибитова, Н. С. Шибитов, Н. А. Прохоренко, М. В. Окольников; ВолгГТУ. – 2020.
7. Шибитов, Н. С. Моделирование гидродинамических и массообменных процессов и применение современных контактных устройств в колонных аппаратах: монография / Н. С. Шибитов, Н. В. Шибитова, А. Б. Голованчиков; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 159 с.
8. Пат. 2744742 РФ, МПК В01Д3/16, В01J 19/32. Клапанная тарелка массообменной колонны / И. А. Мнушкин, Д. В. Лесной; заявитель и патентообладатель: И. А. Мнушкин. – №: 2020122674; заявл. 09.07.2020; опубл. 15.03.2021, бюл. №8.
9. Пат. 2522072 РФ, МПК В01Д3/16, В01J 19/32. Чешуйчато-клапанная тарелка / Р. Р. Везиров, И. В. Сахаров; заявитель и патентообладатель: Р. Р. Везиров. – №: 2012111918/05; заявл. 27.03.2012; опубл. 10.07.2014, бюл. №19.
10. Пат. 143987 РФ, МПК В01J 19/00. Клапанная тарелка с перфорированными клапанами / И. В. Сахаров; заявитель и патентообладатель: Общество с ограниченной ответственностью «Рифоил». – №: 2013149689/05; заявл. 06.11.2013; опубл. 10.08.2014, бюл. №22.
11. Новая конструкция массообменной тарелки с переливным устройством подвешенного типа / Н. В. Шибитова, Н. С. Шибитов, А. Б. Голованчиков, И. В. Полупан // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2014. – № 10. – С. 18–21.
12. Шибитова, Н. В. Исследование гидродинамики потоков на массообменной прямооточной струйной тарелке / Н. В. Шибитова, Минь Тханг Ву, Л. В. Гушина // Современные наукоемкие технологии. – 2019. – № 10. – С. 222–226.

УДК 621.928.37

В. О. Яблонский

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗДЕЛЕНИЯ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКИХ СРЕД НАПОРНОЙ ФЛОТАЦИЕЙ В ГИДРОЦИКЛОНАХ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: everest58@mail.ru

Выполнено исследование влияния фактора разделения и пластических свойств среды на остаточную концентрацию частиц твердой фазы при реализации процесса очистки напорной флотацией в центробежном поле в гидроциклонах различных конструкций. Математическая модель разделения неоднородных жидких систем в поле центробежных сил адаптирована к процессу очистки вязкопластических жидкостей в гидроциклонах различной конструкции напорной флотацией. Модель учитывает действие сил инерции, Кориолиса и присоединенную массу жидкости. Система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая процесс флотации, сведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений и решена численным методом с учетом геометрии рабочего пространства гидроциклонов. На основе математической модели проанализировано влияние фактора разделения на остаточную концентрацию частиц твердой фазы для гидроциклонов различных конструкций при различных значениях числа пластичности. Даны рекомендации по выбору конструкции и режимов работы аппаратов. Приведено физическое обоснование установленных зависимостей. Полученные результаты могут использоваться при моделировании разделения вязкопластических сред напорной флотацией в гидроциклонах и являются основой для создания методики инженерного расчета гидроциклонов-флотаторов.

Ключевые слова: вязкопластическая среда, напорная флотация, гидроциклон-флотатор, число пластичности, фактор разделения, предельное напряжение сдвига, показатель нелинейности, индекс консистентности, остаточная концентрация.

V. O. Yablonskii

MODELING OF SEPARATION OF VISCOPLASTIC MEDIA BY PRESSURE FLOTATION IN HYDROCYCLONES OF VARIOUS DESIGNS

Volgograd State Technical University

The influence of the separation factor and the plastic properties of the medium on the residual concentration of solid phase particles during the purification process by pressure flotation in a centrifugal field in hydrocyclones of various designs has been studied. The mathematical model of separation of inhomogeneous liquid systems in the field of centrifugal forces is adapted to the process of purification of viscoplastic liquids in hydrocyclones of various designs by pressure flotation. The model takes into account the action of inertia forces, Coriolis and the attached mass of liquid. The system of partial differential equations describing the flotation process is reduced to a system of ordinary differential equations and solved numerically taking into account the geometry of the working space of hydrocyclones. On the basis of a mathematical model, the influence of the separation factor on the residual concentration of solid phase particles for hydrocyclones of various designs at different values of the plasticity number is analyzed. Recommendations on the choice of design and modes of operation of the devices are given. The physical justification of the established dependencies is given. The obtained results can be used in modeling the separation of viscoplastic media by pressure flotation in hydrocyclones and are the basis for creating a methodology for engineering calculation of hydrocyclones-flotators.

Keywords: viscoplastic medium, pressure flotation, hydrocyclone-flotator, plasticity number, separation factor, shear stress limit, nonlinearity index, consistency index, residual concentration.

Введение

Гидроциклоны, применяемые в химической и других отраслях промышленности – это аппараты, обеспечивающие высокие показатели процессов разделения, которые могут быть улучшены путем проведения высокоэффективных разделительных процессов в центробежном поле.

В ряде работ показано, что для уменьшения граничного зерна разделения перспективным является применение процесса напорной флотации, реализация которого в поле центробежных сил в гидроциклоне приводит к повышению качества разделения в случае обеспечения условий для пленочного режима течения. Процесс флотации широко применяется для очистки сточных вод, содержащих нефть, нефтепродукты, масла, волокнистые материалы, а также является основным процессом в обогащении полезных ископаемых.

Наибольшую интенсивность центробежного поля обеспечивает цилиндроконический гидроциклон за счет возрастания центробежного ускорения в нижней конической части корпуса. Цилиндрический гидроциклон, работающий в пленочном режиме течения, обеспечивает минимальные значения толщины пленки жидкости, что является важным для осуществления процесса напорной флотации, поэтому выбор конструктивного оформления аппарата для осуществления процесса напорной флотации является

актуальной теоретической и прикладной задачей для многих технологических процессов.

В работе [1] подчеркивается, что гидроциклоны традиционно довольно широко применяют на горно-обогатительных предприятиях, а для водоподготовки – неоправданно мало ввиду того, что частицы малого размера, выделяемые в процессах водоподготовки, не полностью сепарируются в гидроциклонах. Процесс флотации в поле центробежных сил, позволяющий существенно уменьшить граничное зерно разделения, в данном случае существенно расширяет область применения гидроциклонов.

В работе [2] установлено, что при турбулентном течении вязкой жидкости в поле центробежных сил газовые пузырьки являются неустойчивыми образованиями и могут разрушаться. Поэтому аппараты, работающие в пленочном ламинарном режиме течения, обеспечивают наиболее благоприятные условия для осуществления процесса напорной флотации в поле центробежных сил.

Опыты по разделению водомасляной эмульсии и трехкомпонентной системы «вода – моторное масло – кварцевый песок» в гидроциклоне-флотаторе [3] показали, что во всем исследованном интервале концентраций и входных давлений гидроциклон-флотатор обеспечивает более высокую эффективность улавливания твердой фазы, чем обычный гидроциклон.

В работе [4] показано, что извлечение взвешенных частиц из сточных вод напорной флотацией, осуществленной в поле центробежных сил в гидроциклоне, способствует значительной интенсификации процесса и достижению практически полного удаления частиц твердой фазы за счет отделения из сточных вод частиц наиболее мелких фракций. Для достижения более эффективной очистки предлагается методика расчета сепарационных процессов в гидроциклонах-флотаторах на основе уравнения радиального движения частицы, связанной с пузырьком воздуха.

В работе [5] отмечается, что наиболее перспективным путем интенсификации процессов разделения неоднородных жидких систем является соединение двух известных факторов – реализации процесса в тонкой пленке и наложения центробежного поля. Разработка методики моделирования и расчета аппаратов для осуществления таких процессов представляет значительный теоретический и прикладной интерес, что позволит расширить сферу их внедрения в промышленность.

В работах [6; 7] указывается на зависимость числа вероятных столкновений частиц твердой фазы и пузырьков газа от центробежного ускорения, показано, что центробежное поле является фактором, увеличивающим число столкновений частиц и пузырьков. Установлено, что в условиях напорной флотации преобладающим механизмом образования флотокомплексов является столкновение частиц твердой фазы с пузырьками газа. Эффективность процесса напорной флотации, зависящая от числа столкновений, определяется расстоянием, проходимым частицей твердой фазы в жидкой дисперсионной среде.

Авторами работы [8] предложено вводить диспергированный газ непосредственно во входной патрубок гидроциклона без учета того, что частицы твердой фазы служат центрами образования газовых пузырьков при напорной флотации, что существенно повышает интенсивность образования флотокомплексов.

В [9; 10] на основании результатов численного решения полной системы уравнений реодинамики выполнен анализ влияния конструктивных параметров гидроциклона на гидродинамику вязкопластической жидкости. Установлено влияние угла конусности конической части корпуса гидроциклона и фактора разделения на затухание окружной составляющей скорости в направлении оси гидроциклона и толщину пленки жидкости.

Описание разделительных процессов в гидроциклонах различной конструкции со свободно образующейся поверхностью вязкопластической жидкой фазы на основе решения полных уравнений реодинамики до сих пор не проведено и представляет значительный теоретический и прикладной интерес.

Целью работы является исследование влияния фактора разделения и пластических свойств среды на остаточную концентрацию частиц твердой фазы при реализации процесса очистки напорной флотацией в центробежном поле в гидроциклонах различных конструкций.

Математическая модель процесса разделения вязкопластических сред напорной флотацией в гидроциклоне

Схема течения разделяемой среды в гидроциклоне приведена на рис. 1. Гидроциклон состоит из цилиндрической камеры 1 и конической части 2 с углом конусности α . При $\alpha = 0$ имеем цилиндрический гидроциклон, содержащий цилиндрический корпус. В цилиндрическую камеру 1 через входной патрубок 3, установленный в ее верхней части, тангенциально подается при повышенном давлении (до 0,8 МПа) вязкопластическая суспензия, предварительно насыщенная газом (воздухом). Поступившая в гидроциклон суспензия стекает по стенкам корпуса аппарата вниз, обладая окружной V_ϕ , осевой V_z и радиальной V_r составляющими скорости, образуя вращающуюся пленку со свободной поверхностью 4. При снижении давления до атмосферного создается перенасыщение растворенного газа и суспензия «вскипает». Частицы твердой фазы под действием центробежной силы движутся к стенке корпуса гидроциклона, а пузырьки газа под действием выталкивающей центростремительной силы Архимеда – навстречу им к поверхности пленки. При столкновении частиц твердой фазы с пузырьками газа происходит образование флотокомплексов, выносящих частицы твердой фазы на поверхность пленки в пенный слой, который удаляется через верхний отводящий патрубок 5. Кроме того, частицы твердой фазы служат непосредственными центрами образования пузырьков газа, выделяющихся при снижении давления, что приводит к существенному повышению кинетического коэффициента напорной флотации. Осветленная суспензия удаляется из аппарата через нижний сливной патрубок 6.

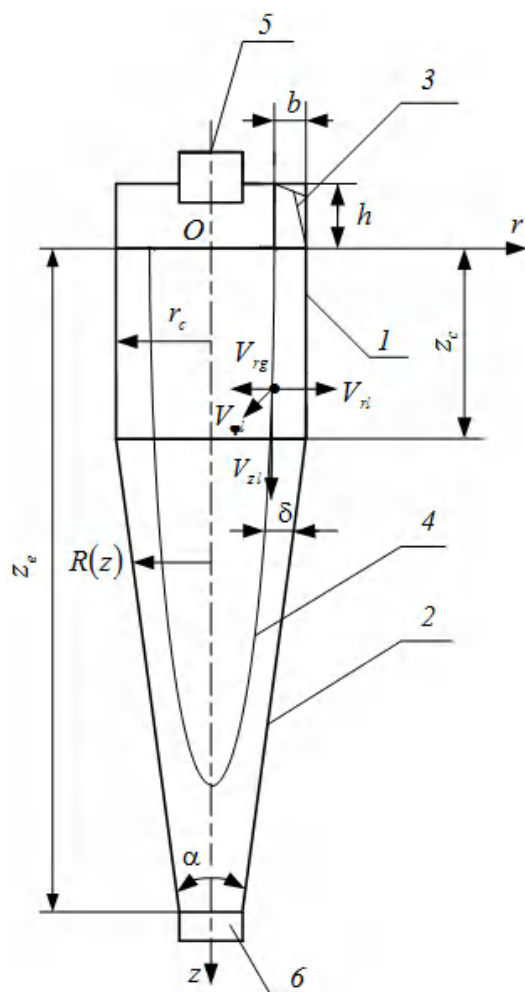


Рис. 1. Схема разделения вязкопластической среды напорной флотацией в гидроциклоне:
1 – цилиндрическая камера; 2 – коническая часть корпуса;
3 – входной патрубок; 4 – вращающаяся пленка жидкости со свободной поверхностью; 5 – верхний отводящий патрубок;
6 – нижний сливной патрубок

Течение вязкопластической среды в гидроциклоне осуществляется в пленочном режиме ввиду высокой эффективной вязкости вязкопластических сред, что обеспечивает устойчивую связь комплекса частица-пузырек ввиду отсутствия резкого возрастания окружной составляющей скорости вблизи оси гидроциклона.

Эффективность разделения в гидроциклоне определяется гидродинамическими параметрами предварительно закрученной пленки вязкопластической среды, стекающей по стенкам корпуса под действием силы тяжести и давления, создаваемого центробежной силой.

Многие из разделяемых в промышленности неоднородных жидких систем являются неньютоновскими вязкопластическими средами, имеющими предел текучести, что оказывает влияние на гидродинамику аппаратов. К ним относятся буровые растворы, смазочные масла с присадками, суспензии глазури, биомассы и белково-витаминных концентратов (паприн, гаприн, меприн), а также карбида кремния, сточные воды, содержащие нефть, жир и другие вещества.

В работе [11] сделано заключение, что к многофазным гетерогенным системам применимо реологическое уравнение состояния неньютоновской жидкости, которое для процессов очистки вязкопластических жидкостей записывают в виде закона Гершеля-Балкли. Выраженное через компоненты тензора скоростей деформаций для трехмерного течения с учетом условия пластичности фон Мизеса, уравнение Гершеля-Балкли имеет вид [12]:

$$\tau_{ij} = \left(\frac{\tau_0}{A} + kA^{n-1} \right) \gamma_{ij}, \quad (1)$$

$$A = \sqrt{2 \left(\frac{\partial V_r}{\partial r} \right)^2 + 2 \left(\frac{V_r}{r} \right)^2 + 2 \left(\frac{\partial V_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_\phi}{\partial r} - \frac{V_\phi}{r} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_\phi}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial V_z}{\partial r} + \frac{\partial V_r}{\partial z} \right)^2},$$

где τ_{ij} – компоненты тензора напряжений, Па;
 τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па;
 γ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций, с^{-1} ; A – интенсивность скоростей деформаций, с^{-1} ; V_r – радиальная составляющая скорости среды, м/с; V_ϕ – окружная составляющая скорости среды, рад/с; n – показатель нелинейности кривой течения; k – индекс консистентности, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$; r, z – радиальная и осевая координаты, м; ϕ – окружная координата, рад.

Математическая постановка задачи производится при следующих допущениях: при поступлении вязкопластической среды, предварительно насыщенной газом, в гидроциклон давление в суспензии падает и происходит выделение монодисперсных газовых пузырьков диаметром d_g , равномерно распределенных по всему объему, концентрация которых на входе в гидроциклон равна c_{go} ; коалесценция газовых пузырьков отсутствует; для пленочного течения суспензии с вязкопластической дисперсионной средой, обладающей высокой эффективной

вязкостью, режим течения ламинарный и режим осаждения частиц твердой фазы и всплытия пузырьков газа ламинарный [13].

Для математического моделирования поля концентраций при разделении суспензии с вязкопластической дисперсионной средой напорной флотацией в гидроциклоне используем дифференциальное уравнение конвективной диффузии в цилиндрических координатах, которое с учетом стока частиц твердой фазы за счет связывания в комплексы и флотации пузырьками газа при равенстве нулю коэффициента молекулярной диффузии может быть записано для частиц твердой фазы и пузырьков газа следующим образом:

$$\operatorname{div}(\bar{V}_h c_h) = -J_h, \quad (2)$$

$$\operatorname{div}(\bar{V}_g c_g) = -J_g,$$

где $\bar{V}_h$ – вектор скорости частиц твердой фазы; $\bar{V}_g$ – вектор скорости пузырьков газа; c_h – концентрация частиц твердой фазы, кг/м³; c_g – концентрация пузырьков газа, кг/м³; J_h, J_g – сток частиц твердой фазы и пузырьков газа за счет флотации.

Наиболее распространенным в практике гидроциклонной флотации является случай, когда одна частица извлекается несколькими пузырьками в поле центробежных сил. При этом концентрация пузырьков газа значительно превышает концентрацию частиц твердой фазы $c_g \gg c_h$ и можно полагать $c_g = \text{const}$ во всем объеме пленки суспензии в гидроциклоне. Для этого случая второе уравнение системы (2) можно исключить и система сводится к одному уравнению, сток частиц твердой фазы J_h за счет флотации в котором согласно [14] имеет вид, аналогичный кинетическому уравнению химической реакции первого порядка:

$$\operatorname{div}(\bar{V}_h c_h) = -K c_g c_h, \quad (3)$$

где K – кинетическая константа флотации, с⁻¹.

После преобразований уравнение (3) принимает вид:

$$V_{rh} \frac{\partial c_h}{\partial r} + V_{zh} \frac{\partial c_h}{\partial z} = -c_h \left\{ K c_g + \frac{1}{r} \frac{\partial [r(V_{rh} - V_{rl})]}{\partial r} \right\}, \quad (4)$$

где z – осевая координата, м; $V_{rh}(r, z)$ – радиальная составляющая скорости частиц твердой фазы, м/с; $V_{zh}(r, z)$ – осевая составляющая скорости частиц твердой фазы, м/с. Уравнение (3) решалось совместно с уравнением движения частицы твердой фазы.

При $c_g = 0$ сток частиц за счет флотации отсутствует и уравнение (4) описывает процесс разделения суспензии сепарацией в поле центробежных сил.

Полагаем, что все происходящие столкновения эффективны (заканчиваются образованием комплекса), образовавшиеся комплексы не разрушаются при подъеме в пену и не осыпаются из нее. В этих условиях константа скорости флотации K может быть определена по формуле, полученной в работе [15] на основании того, что вероятность столкновения частиц и пузырьков аналогична вероятности столкновения молекул в молекулярно-кинетической теории газов.

При разработке модели разделения суспензии в гидроциклоне напорной флотацией учитывались действующие на частицу твердой фазы в радиальном направлении силы инерции, которые являются существенными при флотации крупных частиц и значительной разности плотностей частиц твердой фазы и дисперсионной среды. При условии действия на частицу твердой фазы центробежной силы Архимеда, силы сопротивления и Кориолисовой силы уравнение движения частицы твердой фазы в проекциях на оси r, φ имеет вид:

$$\begin{aligned} V_{rh} \frac{\partial V_{rh}}{\partial r} + V_{zh} \frac{\partial V_{rh}}{\partial z} &= \frac{V_{\varphi h}^2}{r} \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_h} \right) - \frac{3 K_{fr} \rho_l (V_{rh} - V_{rl}) |V_{rh} - V_{rl}|}{4 \rho_h d_h \Phi} \\ V_{rh} \frac{\partial V_{\varphi h}}{\partial r} + V_{zh} \frac{\partial V_{\varphi h}}{\partial z} &= \frac{V_{\varphi h} V_{rh}}{r} - \frac{3 K_{f\varphi} \rho_l (V_{\varphi h} - V_{\varphi l}) |V_{\varphi h} - V_{\varphi l}|}{4 \rho_h d_h \Phi}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $K_{fr}, K_{f\varphi}$ – коэффициенты сопротивления движению частицы в радиальном и окружном направлениях; $V_{\varphi h}(r, z)$ – окружная составля-

ющая скорости частиц твердой фазы, м/с; $V_{rl}(r, z)$ – радиальная составляющая скорости дисперсионной среды, м/с; $V_{\varphi l}(r, z)$ – окружная

составляющая скорости дисперсионной среды, м/с; d_h – диаметр частиц твердой фазы, м; φ – окружная координата, град; Φ – поправочный коэффициент, учитывающий стесненность осаждения частиц твердой фазы.

Коэффициенты сопротивления при радиальном и окружном движении частицы K_{fr} и $K_{f\varphi}$ определялись согласно [16]. При этом индекс консистентности k рассчитывался как эффективная вязкость псевдопластической жидкости согласно реологическому уравнению (1) с учетом наличия у разделяемой среды предельного напряжения сдвига τ_0 .

Коэффициент Φ , учитывающий стесненность осаждения частиц, вычислялся по формуле В. И. Соколова [17].

Численное моделирование

Уравнение (3) решалось совместно с уравнением движения частицы твердой фазы (5). В соответствии с методом характеристик, система дифференциальных уравнений в частных производных, задаваемая уравнением (3) и уравнением движения частицы твердой фазы (5), сводится к эквивалентной системе обыкновенных дифференциальных уравнений, одно из которых задает траекторию частицы твердой фазы, а остальные – концентрацию частиц на траекториях с учетом стока за счет флотации.

Полученная система обыкновенных дифференциальных уравнений с граничным условием, задающим концентрацию частиц твердой фазы c_0 на входе в гидроциклон, решалась по методу Рунге-Кутты четвертого порядка с фиксированным шагом. Ввиду того, что скорость изменения осевой координаты при приближении траектории к стенке во много раз превышает скорость изменения радиальной координаты, данная система уравнений относится к классу жестких систем и требует для своего решения очень большого количества шагов. Интервал интегрирования от нижней границы входного патрубка гидроциклона до выходного отверстия в нижней части корпуса разбивался на $M = 3 \cdot 10^5$ шагов по оси z и полученная система дифференциальных уравнений численно интегрировалась с использованием программы, составленной на языке Compaq Visual Fortran. Погрешность решения системы оценивалась удвоением числа шагов и не превышала $1 \cdot 10^{-5}$.

Расчет на каждой траектории проводился до значения радиальной координаты, равного без-

размерному радиусу корпуса гидроциклона $R_c(Z)$, являющемуся в случае цилиндрического гидроциклона кусочно-линейной функцией Z , определяемой из соотношения:

$$R_c(Z) = 1 \quad (Z \leq Z_c),$$

$$R_c(Z) = 1 - (Z - Z_c) \operatorname{tg}(\alpha/2) \quad (Z > Z_c), \quad (6)$$

где $R_c(Z) = r_c(z)/r_c$ – безразмерный радиус корпуса гидроциклона; $Z = z/r_c$ – безразмерная осевая координата; r_c – радиус цилиндрической камеры гидроциклона, м.

В случае цилиндрического гидроциклона $R_c(Z) = 1$ для всех значений Z .

Течение вязкопластической жидкости в гидроциклоне характеризуется [9; 10] центробежным числом Фруда Fr (фактором разделения), модифицированным числом Рейнольдса Re_n , показателем нелинейности кривой течения n , а также параметром конструкции гидроциклона Q , характеризующим отношение площади сечения входного патрубка гидроциклона к площади горизонтального сечения корпуса аппарата.

Для оценки влияния реологических свойств дисперсионной среды на эффективность разделения в гидроциклоне-флотаторе необходимо использование интегральных показателей работы аппарата, наиболее важным из которых является остаточная концентрация S , характеризующая долю частиц твердой фазы, не извлеченных из суспензии в данном сечении пленки, определяемая по следующей формуле:

$$S = \frac{2\pi \int_1^1 C_h H_h(R, Z) R dR}{B \int_{1-B}^1 C_{h0} \Theta_{h0}(R, Z) dR}, \quad (7)$$

где $C_h = \frac{c_h}{c_{h0}}$ – безразмерная концентрация час-

тиц твердой фазы; $C_{h0} = \frac{c_{h0}}{c_{h0}} = 1$ – безразмерная

концентрация частиц твердой фазы во входном патрубке гидроциклона; $H_h(R, Z) = \frac{V_{zh}(r, z)}{U_0}$ –

безразмерная осевая составляющая скорости

частиц твердой фазы; $B = \frac{b}{r_c}$ – безразмерная

ширина входного патрубка гидроциклона;

$\Delta(Z) = \frac{\delta(z)}{r_c}$ – безразмерная толщина пленки

суспензии; $\Theta_{h0}(R, Z) = \frac{V_{\phi h0}}{U_0}$ – безразмерная ок-

ружная составляющая скорости частиц твердой фазы во входном патрубке гидроциклона; $V_{\phi h0}(r, z)$ – окружная составляющая скорости частиц твердой фазы во входном патрубке гидроциклона, м/с; U_0 – средняя скорость суспензии во входном патрубке гидроциклона, м/с; $\delta(z)$ – толщина пленки суспензии, м; b – ширина входного патрубка гидроциклона, м;

$R = \frac{r}{r_c}$, $Z = \frac{z}{r_c}$ – безразмерные радиальная и осевая координаты; r_c – радиус корпуса гидроциклона, м.

Обсуждение результатов

Результаты моделирования распределения остаточной концентрации частиц твердой фазы S по оси гидроциклона приведены на рис. 2, 3.

На рис. 2, а приведены зависимости распределения остаточной концентрации частиц твердой фазы S по оси цилиндрического гидроциклона при значениях $\alpha = 15^\circ$, $Pl = 0,0085$, $Re_n = 4 \cdot 10^3$, $Q = 0,02$, $n = 0,7$, $d_h = 2 \cdot 10^{-5}$ м, $d_g = 3 \cdot 10^{-5}$ м.

На кривых можно выделить участок быстрого снижения остаточной концентрации S (до $Z = 2,0 - 2,5$), соответствующий участку наиболее интенсивного затухания окружной составляющей скорости потока [9; 10]. Из ана-

лиза данных, приведенных на рис. 2, а, следует, что остаточная концентрация S в выходном сечении гидроциклона снижается с увеличением числа Fr (фактора разделения), что объясняется снижением затухания окружной составляющей скорости жидкости [9; 10], что приводит к увеличению радиальных составляющих скорости частиц твердой фазы V_h и пузырьков газа V_g , к росту кинетического коэффициента флотации K и снижению остаточной концентрации частиц твердой фазы S .

На рис. 2, б приведены зависимости распределения остаточной концентрации частиц твердой фазы S по оси цилиндрического гидроциклона при $\alpha = 0^\circ$ и тех же значениях параметров, что на рис. 2, а. Из сравнения данных, приведенных на рис. 2, а и б, следует, что остаточная концентрация частиц твердой фазы S ниже в выходном сечении цилиндрического гидроциклона вследствие увеличения толщины пленки жидкости, особенно в нижней конической части корпуса [9; 10], возрастания вследствие этого пути, проходимого частицами твердой фазы в жидкости, числа их столкновений с пузырьками газа и соответствующего снижения остаточной концентрации частиц твердой фазы S . Цилиндрический гидроциклон имеет также меньшие габаритные размеры и может применяться в условиях ограниченных размеров производственных помещений.

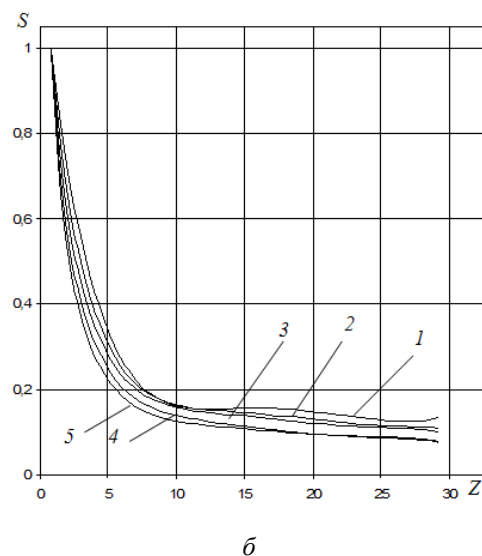
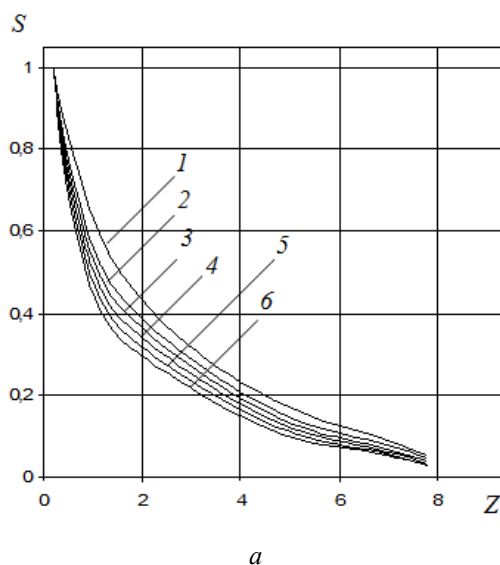


Рис. 2. Распределение остаточной концентрации частиц твердой фазы S по оси гидроциклона

при $Pl = 0,0085$; $Re_n = 4 \cdot 10^3$; $Q = 0,02$; $n = 0,7$; $d_h = 2 \cdot 10^{-5}$ м; $d_g = 3 \cdot 10^{-5}$ м:

а – $\alpha = 15^\circ$ (цилиндрический гидроциклон): 1 – $Fr = 40$; 2 – $Fr = 60$; 3 – $Fr = 70$; 4 – $Fr = 80$; 5 – $Fr = 90$; 6 – $Fr = 95$;

б – $\alpha = 0^\circ$ (цилиндрический гидроциклон): 1 – $Fr = 40$; 2 – $Fr = 60$; 3 – $Fr = 70$; 4 – $Fr = 80$; 5 – $Fr = 90$

На рис. 3 приведены те же зависимости, что на рис. 2, для значения числа пластичности $Pl = 0,085$. Из сравнения данных, приведенных на рис. 3, *а* и *б*, следует, что остаточная концентрация частиц твердой фазы S при $Pl = 0,085$ ниже в выходном сечении цилиндрического гидроциклона, вследствие снижения затухания окружной составляющей скорости

жидкости в осевом направлении при увеличении аномалии неньютоновских свойств (росте числа Pl) [9, 10], что приводит к увеличению радиальных составляющих скорости частиц твердой фазы V_h и пузырьков газа V_g , к росту кинетического коэффициента флотации K и снижению остаточной концентрации частиц твердой фазы S .

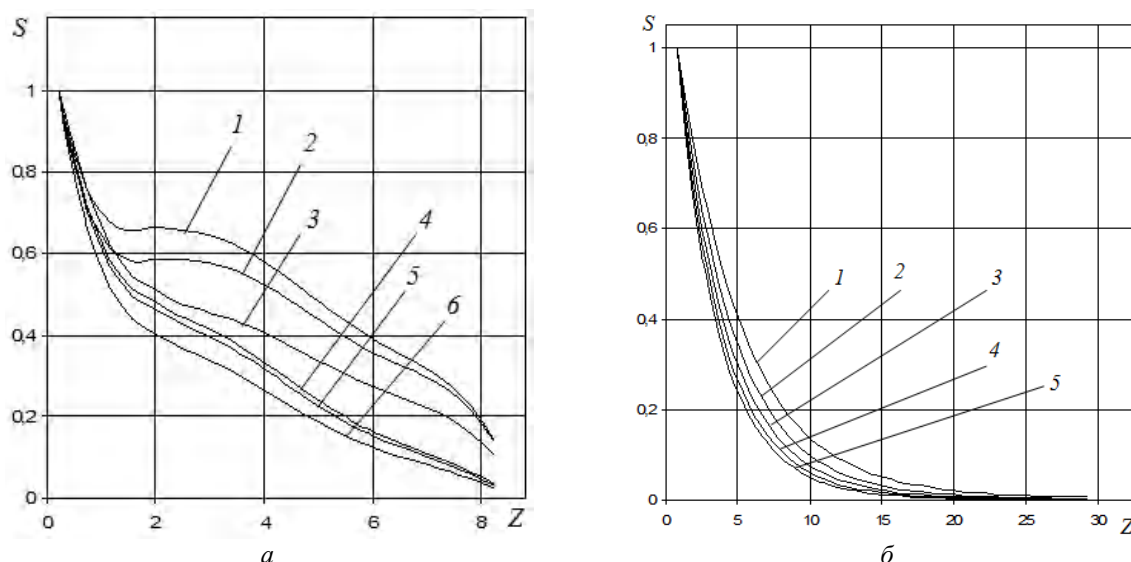


Рис. 3. Распределение остаточной концентрации частиц твердой фазы S по оси гидроциклона при $Pl = 0,085$; $Re_n = 4 \cdot 10^3$; $Q = 0,02$; $n = 0,7$; $d_h = 2 \cdot 10^{-5}$ м; $d_g = 3 \cdot 10^{-5}$ м:

а – $\alpha = 15^\circ$ (цилиндроконический гидроциклон): 1 – $Fr = 30$; 2 – $Fr = 40$; 3 – $Fr = 50$; 4 – $Fr = 60$; 5 – $Fr = 70$; 6 – $Fr = 80$;
б – $\alpha = 0^\circ$ (цилиндрический гидроциклон): 1 – $Fr = 30$; 2 – $Fr = 40$; 3 – $Fr = 50$; 4 – $Fr = 60$; 5 – $Fr = 70$

Из анализа данных, представленных на рис. 3, *а* и *б*, следует, что влияние числа Fr (фактора разделения) на остаточную концентрацию частиц твердой фазы S является более значительным для цилиндрического гидроциклона, что объясняется более существенным возрастанием окружной составляющей скорости дисперсионной среды Θ_i в нижней конической части корпуса гидроциклона.

Из сравнения зависимостей на рис. 2, *а* и рис. 3, *а* можно установить, что низкая остаточная концентрация частиц твердой фазы S в цилиндрическом гидроциклоне при высоких значениях числа пластичности Pl и предельного напряжения сдвига τ_0 наблюдается только при больших значениях числа Fr (фактора разделения), так как возрастание числа Fr приводит к увеличению толщины пленки жидкости, особенно в нижней конической части корпуса [9; 10] (при высоких значениях числа пластичности Pl толщина пленки меньше), возрастанию вследствие этого пути, проходимого

частицами твердой фазы в жидкости, числа их столкновений с пузырьками газа и соответствующего снижения остаточной концентрации частиц твердой фазы S . Следовательно, при разделении в цилиндрическом гидроциклоне сред, имеющих большое предельное напряжение сдвига τ_0 , для достижения минимальной остаточной концентрации частиц твердой фазы S необходимо проведение процесса при высоких значениях числа Fr ($Fr = 70 \dots 90$).

При разделении в цилиндрическом гидроциклоне (рис. 2, *б* и рис. 3, *б*) меньшая остаточная концентрация частиц твердой фазы S наблюдается при высоких значениях числа пластичности Pl и предельного напряжения сдвига τ_0 (рис. 2, *б*), вследствие снижения затухания окружной составляющей скорости жидкости в осевом направлении при увеличении аномалии неньютоновских свойств (росте числа Pl) [9; 10], что приводит к увеличению радиальных составляющих скорости частиц твердой фазы V_h и пузырьков газа V_g , к росту кинетического

коэффициента флотации K и снижению остаточной концентрации частиц твердой фазы S . Следовательно, при разделении сред, имеющих большое предельное напряжение сдвига τ_0 , для достижения минимальной остаточной концентрации частиц твердой фазы S необходимо проводить процесс в цилиндрическом гидроциклоне.

Заключение

1. С использованием математической модели разделения суспензий с вязкопластической дисперсионной средой напорной флотацией в гидроциклоне установлено влияние фактора разделения при различных значениях числа пластичности на остаточную концентрацию частиц твердой фазы на выходе из гидроциклона для аппаратов различной конструкции.

2. Исходя из необходимости достижения минимальной остаточной концентрации частиц твердой фазы на выходе из гидроциклона, установлено, что для сред с высокими значениями числа пластичности и предельного напряжения сдвига целесообразно проведение процесса разделения напорной флотацией в цилиндрических гидроциклонах или в цилиндрических гидроциклонах только при высоких значениях фактора разделения ($Fr = 70 \dots 90$). Для сред с низкими значениями числа пластичности и предельного напряжения сдвига целесообразно использование цилиндрических гидроциклонов.

3. Полученные результаты могут использоваться при моделировании разделения вязкопластических сред напорной флотацией в гидроциклонах и являются основой создания методики инженерного расчета гидроциклонов-флотаторов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Башаров, М. М. Устройство и расчет гидроциклонов: учеб. пособие / М. М. Башаров, О. А. Сергеева; под ред. А. Г. Лаптева. – Казань: Вестфалика, 2012. – 92 с.
2. Лагуткин, М. Г. Поведение газовых пузырей в гидроциклоне / М. Г. Лагуткин, А. П. Климов // Теоретические основы химической технологии. – 1993. – Т. 27, № 5. – С. 468–472.
3. Диков, В. А. Исследование возможности применения гидроциклонов для центробежно-флотационного обогащения калийсодержащих руд / В. А. Диков, Д. Е. Суха-

нов // Инженерный вестник Дона. – 2013. – Т. 2, № 4 (27). – С. 23–26.

4. Каратаев, О. Р. Моделирование сепарационных процессов в гидроциклонах-флотаторах / О. Р. Каратаев, З. Р. Шамсутдинова // Вестник технологического университета. – 2015. – Т. 18, № 16. – С. 117–119.

5. Щукина, А. Г. Математическое моделирование процессов разделения неоднородных систем с неньютоновской дисперсионной средой: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.16 / А. Г. Щукина. – Волгоград, 1996. – 16 с.

6. Орлов, С. Л. О столкновении частиц и пузырьков при пневматической флотации в центробежном поле / С. Л. Орлов // Развитие методов механической и биологической очистки сточных вод. Труды института «ВОДГЕО». – Москва, 1982. – С. 131–136.

7. Сотскова, Т. З. Взаимодействие мелких частиц с газовыми пузырьками при напорной флотации / Т. З. Сотскова, Ю. Ф. Баженов, Г. А. Голик // Химия и технология воды. – 1984. – Т. 6, № 1. – С. 17–22.

8. Кутепов, А. М. Разделение дисперсных систем в гидроциклонах с дополнительным вводом диспергированного газа / А. М. Кутепов, М. Г. Лагуткин, Г. В. Павловский, В. И. Муштаев // Теоретические основы химической технологии. – 1999. – Т. 33, № 5. – С. 571–577.

9. Яблонский, В. О. Влияние конструктивных параметров гидроциклона на гидродинамику нелинейно-вязкопластической жидкости / В. О. Яблонский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 8. – С. 6–10.

10. Яблонский, В. О. Гидродинамика нелинейно-вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне / В. О. Яблонский // Журнал прикладной химии. – 2013. – Т. 86, вып. 8. – С. 1236–1243.

11. Вайнштейн, И. А. Об уравнениях кинетики разделения суспензий / И. А. Вайнштейн // Инженерно-физический журнал. – 1983. – Т. 45, № 4. – С. 602–608.

12. Acary-Robert, C. Viscoplastic Free-Surface Flows: The Herschel-Bulkley Case / C. Acary-Robert, E. D. Fernandez-Nieto, G. Narbona-Reina, P. Vigneaux // Seventh International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD7). – Big Island, Hawaii. – 2012. – Pp. 1–15.

13. Dyakowski, T. Simulation of non-newtonian flow in a hydrocyclone / T. Dyakowski, G. Hornung, R. A. Williams // Chem. Eng. Res. Des. A. – 1994. – V. 72, № 4. – Pp. 520–523.

14. Дерягин, Б. В. Микрофлотация: водоочистка, обогащение / Б. В. Дерягин, С. С. Духин, Н. Н. Рулев. – Москва: Химия, 1986. – 112 с.

15. Тябин, Н. В. Расчет аппаратов идеального вытеснения для разделения тонких суспензий электролитическими газами / Н. В. Тябин, Г. Л. Дахина, А. Б. Голованчиков, А. А. Мамаков // Теоретические основы химической технологии. – 1989. – Т. 13, № 6. – С. 880–884.

16. Acharya, A. R. Flow of inelastic and viscoelastic fluids past a sphere / A. R. Acharya, A. J. Mashelkar, J. Ulbrecht // Rheologica Acta. – 1976. – Vol. 15, № 9. – Pp. 454–463.

17. Соколов, В. И. Центрифугирование / В. И. Соколов. – Москва: Химия, 1976. – 408 с.

УДК 621.433

Е. С. Агеев, Д. Н. Илюшин, Е. А. Салыкин, Е. А. Федянов

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ
МАЛОРАЗМЕРНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: tig@vstu.ru

На основании результатов моделирования процесса топливоподачи в статье показана возможность повышения давлений впрыскивания топлива, путем внедрения в топливную систему малоразмерного дизельного двигателя скоростного форсирования топливного насоса высокого давления и клапанного управления цикловой подачей топлива.

Ключевые слова: малоразмерный дизельный двигатель, топливоподача, скоростное форсирование, клапанное управление.

E. S. Ageev, D. N. Ilyushin, E. A. Salykin, E. A. Fedyanov

IMPROVING THE FUEL SYSTEMS OF SMALL DIESEL ENGINES

Volgograd State Technical University

Based on the results of modeling the fuel supply process, the article shows the possibility of increasing fuel injection pressures by introducing high-speed forcing of a high-pressure fuel pump and valve control of cyclic fuel supply into the fuel system of a small-sized diesel engine.

Keywords: small diesel engine, fuel supply, high-speed forcing, valve control.

В настоящее время для привода средств малой механизации различного назначения, небольших электрогенераторов широко используют одноцилиндровые дизельные двигатели мощностью до 10 кВт. Диаметр цилиндра таких дизелей не превышает, как правило, 90 мм, а рабочий объем цилиндра 0,5 дм³. Эти малоразмерные дизели отличаются простотой конструкции и относительно низкой стоимостью, достаточно надежны, удобны в эксплуатации, однако их топливная экономичность заметно хуже, чем у дизелей большей размерности. Так, например, номинальный удельный расход топлива, заявленный для дизельного двигателя Kipor KM186FA рабочим объемом 0,418 дм³ и мощностью 5,7 кВт при частоте вращения коленчатого вала 3000 мин⁻¹, равен 275 г/(кВт·ч) [1], в то время как у дизельных двигателей с диаметром цилиндра более 100 мм удельный расход топлива не превышает 200 г/(кВт·ч) [2].

Одной из главных причин повышенного расхода топлива в малоразмерных дизельных

двигателях является сложность организации в камерах сгорания малого диаметра процесса смесеобразования. В частности, при впрыскивании топлива в такую камеру сложно избежать попадания значительной части топлива на стенки [3]. При этом, чем хуже распыливание топлива, тем толщина образующейся на стенке камеры сгорания топливной пленки больше и тем меньше интенсивность испарения топлива и перемешивания его паров с воздухом. Увеличение число отверстий в распылителе форсунки и соответствующий подбор формы камеры сгорания в поршне позволяют добиться некоторого улучшения показателей дизеля [4], однако принципиально проблему смесеобразования не решают.

Важнейшим параметром, влияющим на мелкость распыливания топлива, является давление впрыскивания. В своем большинстве малоразмерные дизельные двигатели оснащаются топливными системами непосредственного действия разделенного типа с золотниковым

управлением цикловой подачей топлива [5]. Выбор такого типа топливных систем для малоразмерных дизелей продиктован, в значительной мере, соображениями их невысокой стоимости. Вместе с тем эти системы не позволяют получить давление распыливания выше 50–60 МПа и, соответственно, получить такую же мелкокость распыливания, которая достигается в современных аккумуляторных системах топливоподачи. Замена топливной системы непосредственного действия разделенного типа на малоразмерных двигателях аккумуляторной [4], приводит к заметному усложнению конструкции двигателя и его удорожанию.

Для четырехтактных дизелей известен способ повышения давления впрыскивания топлива в системе топливоподачи непосредственного действия, основанный на удвоении частоты вращения вала топливного насоса высокого давления (ТНВД) [6]. Удвоение частоты вращения

достигается тем, что привод ТНВД осуществляется непосредственно от коленчатого вала дизеля. Повышение вдвое скорости вытеснения топлива плунжером приводит к существенному повышению давления распыливания [6].

При скоростном форсировании ТНВД в четырехтактном дизеле на один рабочий цикл приходится два нагнетающих хода плунжера (основной и дополнительный). На основном ходе плунжера производится подача топлива через форсунку в цилиндр дизельного двигателя. Во время дополнительного хода плунжера ТНВД, приходящегося на такт выпуска отработавших газов, для предотвращения впрыскивания топлива в цилиндр осуществляется перепуск топлива из линии высокого давления через перепускной клапан. На рис. 1 показана схема топливной системы со скоростным форсированием ТНВД и электромагнитным перепускным клапаном.

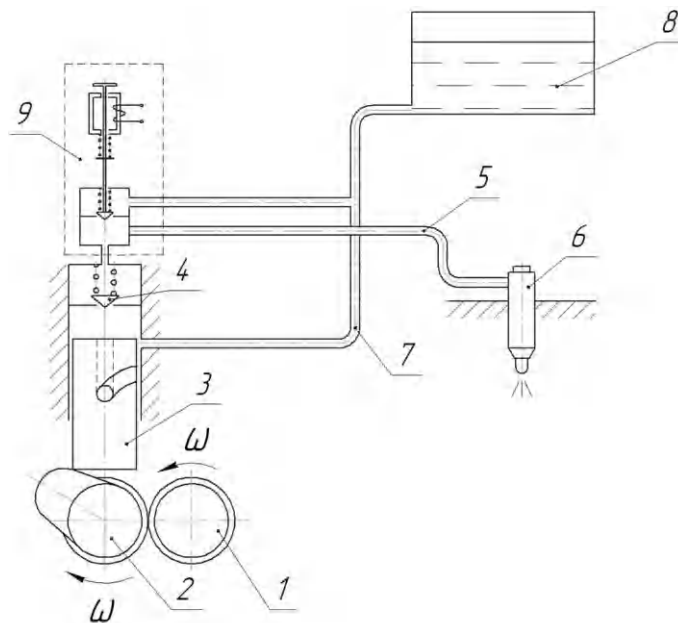


Рис. 1. Схема топливной системы непосредственного действия со скоростным форсированием ТНВД:

1 – коленчатый вал двигателя; 2 – вал ТНВД; 3 – плунжер; 4 – нагнетательный клапан; 5 – ЛВД; 6 – форсунка; 7 – линия низкого давления; 8 – топливный бак; 9 – перепускной клапан

Для управления электромагнитным перепускным клапаном двигатель должен быть оборудован устройством, генерирующим в необходимые моменты времени электрический импульс, открывающий клапан. Установка такого устройства несколько усложняет и удорожает двигатель, однако электромагнитный клапан в линии высокого давления можно использовать не только для перепуска топлива при допол-

нительном ходе плунжера в ТНВД, но и управлять с его помощью цикловой подачей топлива. Такой способ управления цикловой подачей позволяет использовать более простой по конструкции ТНВД. Схема системы с управлением величиной цикловой подачи топлива электромагнитным перепускным клапаном, установленным в линии высокого давления вблизи топливной форсунки, показана на рис. 2.

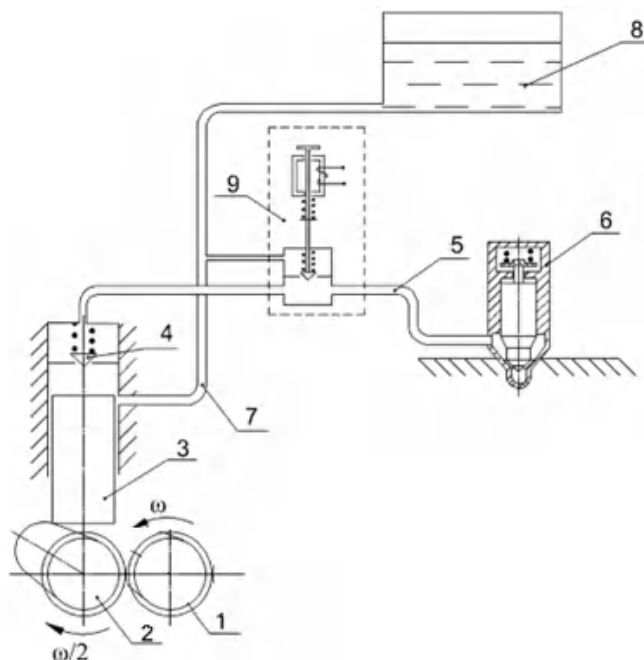


Рис. 2. Схема топливной системы непосредственного действия со скоростным форсированием ТНВД и клапанным управлением цикловой подачи:

1 – коленчатый вал двигателя; 2 – вал ТНВД; 3 – плунжер; 4 – нагнетательный клапан; 5 – ЛВД; 6 – форсунка; 7 – линия низкого давления; 8 – топливный бак; 9 – дозирующий клапан

На основном ходе плунжера ТНВД открытие перепускного клапана приводит к резкому падению давления перед форсункой и прекращению впрыскивания топлива. Таким образом, изменяя момент открытия и продолжительность открытого состояния клапана, можно управлять цикловой подачей топлива. При этом дизель должен быть оборудован электронной системой управления, которая в зависимости от требуемого режима работы формирует в требуемый момент времени управ-

ляющий сигнал на электромагнитный клапан.

Оценка характеристик впрыскивания топлива системой со скоростным форсированием ТНВД была проведена применительно к указанному выше дизелю Кіrog KM186FA с помощью моделирования процесса топливоподачи в программном комплексе «Впрыск» [7]. Расчеты выполнены для двух вариантов системы топливоподачи (рис. 3): для штатной системы непосредственного действия и для системы со скоростным форсированием ТНВД.

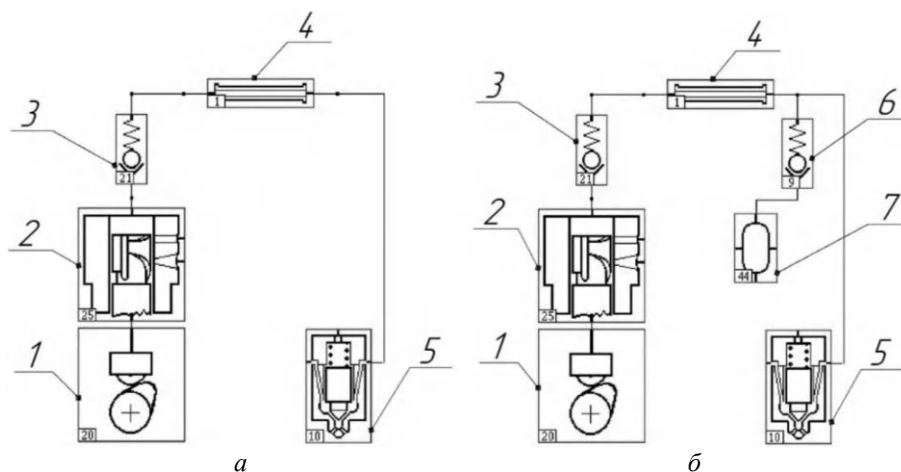


Рис. 3. Расчетная схема штатной топливной системы (а) и системы со скоростным форсированием ТНВД и перепускным клапаном (б):

1 – механизм привода плунжера; 2 – плунжерная пара; 3 – нагнетательный клапан; 4 – линия высокого давления; 5 – форсунка; 6 – перепускной клапан с электромагнитным приводом; 7 – полость низкого давления

Для системы топливоподачи со скоростным форсированием ТНВД моделировался процесс впрыскивания как при управлении цикловой подачей с помощью изменения положения отсечной кромки плунжера ТНВД, так и с помощью управления моментом открытия перепускного клапана.

На рис. 4 приведены полученные в результате моделирования зависимости давления впрыскивания топлива от времени для всех указанных вариантов расчета при условии неизменной величины цикловой подачи топлива: $q_{ц} = 17,4$ мг/цикл. За начальный момент времени принято начало подъема плунжера ТНВД.

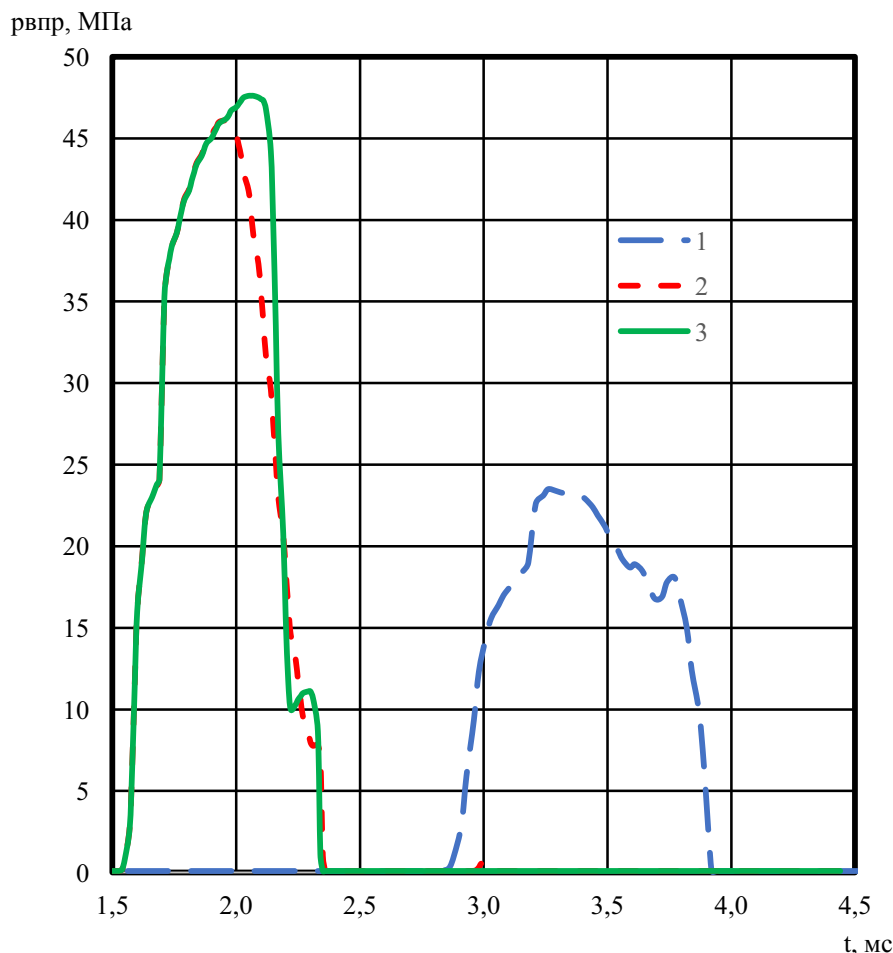


Рис. 4. Расчетные зависимости давления впрыскивания топлива от времени для дизельного двигателя Kipor KM186FA:

1 – штатная топливная система; 2 – топливная система со скоростным форсированием ТНВД;
3 – топливная система со скоростным форсированием ТНВД и клапанным управлением цикловой подачи

Впрыскивание топлива в системе со скоростным форсированием ТНВД начинается раньше, чем в штатной, что объясняется возрастанием скорости повышения давления в объемах системы при увеличении скорости плунжера ТНВД. Как видно из рис. 4, скоростное форсирование ТНВД позволяет повысить максимальное давление впрыскивания вдвое: до 46,1 МПа от 23,5 МПа в штатной системе топливоподачи. При этом, однако, наблюдается подвпрыскивание топлива. На рис. 4 импульс давления при подвпрыскивании виден на отметке времени 3 мс после начала впрыскивания.

Подвпрыскивание топлива исчезает при переходе от управления топливоподачей отсечной кромкой плунжера ТНВД к управлению перепускным клапаном. При этом расчеты показывают, что, располагая перепускным клапаном вблизи форсунки, можно получить небольшое (около 1 %) дополнительное увеличение максимального давления впрыскивания. Этот прирост давления объясняется тем, что при управлении клапаном отсечка топливоподачи по времени от ее начала начинается позже, чем при управлении отсечной кромкой плунжера.

В целом проведенное моделирование топливоподачи дает основание утверждать, что применение ТНВД, частота вращения вала которого равна частоте вращения коленчатого вала, позволяет примерно в два раза увеличить давление впрыскивания и за счет этого повысить мелкость распыливания топлива. При этом необходимый в системе топливоподачи с форсированным по частоте вращения ТНВД перепускной клапан может выполнять функцию управления величиной цикловой подачи топлива. В этом случае можно использовать ТНВД упрощенной конструкции без отсечных кромок на его плунжере.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kipor power operation manual. – Режим доступа: URL: <https://mcgrp.ru/files/viewer/162457/4> (дата обращения: 02.03.2022). – Текст: электронный.
2. *Кравец, В. Н.* Установление зависимостей между показателями топливной экономичности и передаточными числами агрегатов трансмиссии автобуса / В. Н. Кравец, Р. А. Мусарский, А. В. Тумасов. – Режим доступа: URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44559981> (дата обращения: 02.03.2022). – Текст: электронный.
3. Nishida, K., Ogawa, T. Small Bore Diesel Engine Combustion Concept – URL: <http://papers.sae.org/2015-01-0788> (дата обращения: 02.03.2022). – Текст: электронный.
4. Carpenter, A., High-Pressure Electronic Fuel Injection for Small-Displacement Single-Cylinder Diesel Engines. – Режим доступа: URL: <http://gasturbinespower.asmedigitalcollection.asme.org/> (дата обращения: 02.03.2022). – Текст: электронный.
5. *Грехов, Л. В.* Конструкция, расчет и технический сервис топливоподающих систем дизелей: учебное пособие / Л. В. Грехов, И. И. Габитов, А. В. Неговора. – Москва: Легион-Автодата, 2013. – 292 с.
6. Опыт модернизации дизельных систем топливоподачи непосредственного действия / Е. А. Салыкин [и др.] // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 8 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2011. – С. 38–40.
7. Лаборатория топливных систем кафедры «Поршневые двигатели» МГТУ им. Н. Э. Баумана. ПК «Впрыск». – Режим доступа: URL: <https://fuel-bmstu.ru/inject/> (дата обращения: 01.12.2022). – Текст: электронный.

Ответственный за выпуск редактор РИО
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)

Учредитель:
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Волгоградский государственный технический университет» (ВолГТУ)

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)
Гл. редактор, тел.: +7 (8442) 23-00-76
E-mail: rector@vstu.ru

Темплан 2023 г. (научные издания). Поз. № 19ж. Дата выхода в свет 28.09.2023 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,12. Уч.-изд. л. 5,42.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 0000

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО Издательства ВолГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

Отпечатано в типографии Издательства ВолГТУ
400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28, корп. 7.

В научно-техническом журнале «Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт» публикуются статьи, которые содержат результаты теоретических и экспериментальных исследований, представляют научный и практический интерес для широкого круга специалистов в области экономики.

Вопрос об опубликовании статьи или ее отклонении решает редакционная коллегия журнала, которая утверждается ректором университета, ее решение является окончательным. Редакция направляет представленный для издания материал на рецензирование.

Рукопись должна быть набрана и сверстана в текстовом редакторе Word и распечатана на лазерном принтере в режиме полной загрузки тонера. Формат бумаги А4 (210×297 мм).

Для ускорения подготовки издания необходимо представлять файлы статей на компакт-дисках (CD) в полном соответствии с распечатанным оригиналом. Диск должен быть вложен в отдельный конверт, на этикетке указываются фамилии авторов статьи.

При наборе текста следует соблюдать следующие требования: поля – верхнее – 2,0 см; нижнее – 3,0 см; левое – 2,5 см; правое – 2,5 см; шрифт Times, кегль 14, интервал полуторный.

Текст набирается с применением автоматического переноса слов, перед знаками препинания (в том числе внутри скобок) пробелы не допускаются, после них ставится один пробел. Разрядка слов не допускается, следует избегать перегрузки статей большим количеством формул, рисунков, таблиц. Для набора символов в формульном редакторе MS Equation (MS Word) использовать установки (Стиль/Размеры) только по умолчанию; рисунки должны быть выполнены в редакторах векторной графики, таких как CorelDRAW или в любом приложении к Word. Допускается сканирование рисунков в программе Microsoft Photo Editor.

Инициалы и фамилия автора (авторов) пишутся над заглавием статьи. Ниже заглавия, перед основным текстом, указывается организация или предприятие, где работает автор статьи. В конце статьи ставится полное название учреждения, которое рекомендует статью для публикации, дата и подпись автора (всех авторов).

Литературные ссылки должны быть оформлены в соответствии с ГОСТ 7.1–2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Библиографический список использованной литературы, составленный в порядке упоминания в тексте, дается в конце статьи; связь с основным текстом осуществляется цифровым порядковым номером в квадратных скобках в строке. Подстрочные ссылки не допускаются.

Иностранные фамилии и термины в тексте следует приводить в русском переводе. В библиографическом списке фамилии авторов, полное название книг и журналов приводятся на языке оригинала.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

При обозначении единиц физических величин должна применяться Международная система единиц (СИ).

Объем статьи не должен превышать 8 страниц бумаги формата А4, включая таблицы и библиографический список; число рисунков – не более четырех, включая рисунки, помеченные буквами *a*, *b*, и т. д. Рекомендуется включать в сборник статьи с авторским коллективом не более четырех человек с участием каждого автора в одной-двух статьях.

Статьи должны представлять сжатое четкое изложение результатов, полученных автором без повторов приводимых данных в тексте статьи, таблицах и рисунках. К статье должны быть приложены: сведения об авторах (полное имя, отчество, фамилия, ученая степень, звание, домашний адрес, номер телефона служебный, домашний, E-mail); документация, подтверждающая возможность ее открытого опубликования.