

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 1 (42)
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:

И. И. Артюхов – д.т.н., проф., СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
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., ИШМаш
РАН, г. Санкт-Петербург
А. П. Дарманян – д.т.н., проф., ВГАУ,
г. Волгоград
А. М. Иванов – д.т.н., проф.,
МГТУ (МАДИ), г. Москва
А. В. Келлер – д.т.н., проф., НАМИ, г. Москва
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
Мертен Клеменс – д.т.н., проф.,
университет г. Штутгарт, Германия
В. А. Марков – д.т.н., проф., МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. Е. Новиков – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф.,
ВолгГТУ
Б. В. Скворцов – д.т.н., проф., СНИУ
им. академика С. П. Королева, г. Самара
Е. А. Федянов – д.т.н., проф., ВолгГТУ
В. Т. Фомичев – д.т.н., проф., ВолгГТУ
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/](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.

№ 1 (42)
Март
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 Academician of RAS,
D. Sc. (Technical), Professor

Editorial Board:

I. I. Artuchov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
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. P. Darmanyanyan – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSAU, Volgograd
A. M. Ivanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
MADI, Moscow
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering), Prof.,
NAMI, Moscow
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
ITMO University, St. Petersburg
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU, Saratov
M. Clemens – D. Sc. (Engineering), Prof.,
University of Stuttgart, Germany
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. E. Novikov – Corresponding Member
of RAS, D. Sc. (Engineering), Prof., VSTU,
Volgograd
B. V. Skvortsov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
Samara University, Samara
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. T. Fomichev – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
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- e 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

№ 1 (42)
March
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

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| Анипкин П. А. 26 | Павлова Е. А. 11 |
| Бусалаев А. В. 34 | Папсуева И. Д. 20 |
| Васильев П. С. 11, 20 | Персидский А. В. 6 |
| Голованчиков А. Б. 6 | Потапов П. В. 34 |
| Дудников Р. Д. 40 | Рева Л. С. 20 |
| Клементьев Е. В. 34 | Ситникова А. В. 20 |
| Левин Ю. В. 40 | Топилин М. В. 6 |
| Ляшенко М. В. 34 | Трясогузов А. Г. 31 |
| Меренцов Н. А. 6 | Федянов Е. А. 40 |
| Морсков М. В. 34 | Шаронова В. Г. 31 |
| Нефедьев А. И. 31 | Шеховцов В. В. 34 |

AUTHOR INDEX

- | | |
|-----------------------|-----------------------|
| Anipkin P. A. 26 | Papsueva I. D. 20 |
| Busalaeв D. V. 34 | Pavlova E. A. 11 |
| Dudnikov R. D. 40 | Persidskiy A. V. 6 |
| Fedyanov E. A. 40 | Potapov P. V. 34 |
| Golovanchikov A. B. 6 | Reva L. S. 20 |
| Klementiev E. V. 34 | Sharonova V. G. 31 |
| Levin Y. V. 40 | Shekhotsov V. V. 34 |
| Lyashenko M. V. 34 | Sitnikova A. V. 20 |
| Merentsov N. A. 6 | Topilin M. V. 6 |
| Morskov M. V. 34 | Tryasoguzov A. G. 31 |
| Nefed'ev A. I. 31 | Vasilyev P. S. 11, 20 |

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Голованчиков А. Б., Меренцов Н. А., Персидский А. В., Топилин М. В.</i> О возможности снижения «пиковых» концентрационных нагрузок в дымовых газах.....	6
<i>Васильев П. С., Павлова Е. А.</i> Совершенствование аппаратного оформления стадии гранулирования технического углерода мокрым способом.....	11
<i>Васильев П. С., Рева Л. С., Пасуева И. Д., Ситникова А. В.</i> Анализ работы вращающегося барабанного холодильника для тушения кокса водой.....	20

Часть 2. ТРАНСПОРТ

<i>Анипкин П. А.</i> Разработка аппаратно-программной платформы тренажера для тренировки управления транспортом.....	26
<i>Нефедьев А. И., Трясогузов А. Г., Шаронова В. Г.</i> Конденсаторный модуль зажигания для ДВС.....	31
<i>Бусалаев Д. В., Ляшенко М. В., Шеховцов В. В., Потапов П. В., Морсков М. В., Клементьев Е. В.</i> Стойка передней подвески автомобиля с улучшенными свойствами гашения высокочастотных колебаний.....	34
<i>Дудников Р. Д., Левин Ю. В., Федянов Е. А.</i> Влияние добавок синтез-газа на полноту сгорания топлива в бензиновом роторно-поршневом двигателе.....	40

CONTENTS

Part I. INDUSTRY

<i>Golovanchikov A. B., Merentsov N. A., Persidskiy A. V., Topilin M. V.</i> On the possibility of reducing "peak" concentration loads in flue gases.....	6
<i>Vasilyev P. S., Pavlova E. A.</i> Improvement of the apparatus design for the wet granulation stage of carbon black.....	11
<i>Vasilyev P. S., Reva L. S., Papsueva I. D., Sitnikova A. V.</i> Analysis of rotary drum cooler for quenching coke with water.....	20

Part II. TRANSPORT

<i>Anipkin P. A.</i> Development of a hardware and software platform of a simulator for training transport management.....	26
<i>Nefed'ev A. I., Tryasoguzov A. G., Sharonova V. G.</i> Condenser ignition module for combustion engine.....	31
<i>Busalaev D. V., Lyashenko M. V., Shekhotsov V. V., Potapov P. V., Morskov M. V., Klementiev E. V.</i> Car front suspension strut with improved characteristics of damping high-frequency vibrations.....	34
<i>Dudnikov R. D., Levin Y. V., Fedyanov E. A.</i> The effect of synthesis gas additives on the completeness of fuel combustion in a gasoline rotary piston engine.....	40

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 66.081

А. Б. Голованчиков¹, Н. А. Меренцов¹, А. В. Персидский², М. В. Топилин³

О ВОЗМОЖНОСТИ СНИЖЕНИЯ «ПИКОВЫХ» КОНЦЕНТРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ*

¹Волгоградский государственный технический университет
²АО Федеральный научно-производственный центр «Титан-Баррикады»
³ЛУКОЙЛ-Инжиниринг ВолгоградНИПИморнефть

e-mail: steeple@mail.ru

Предлагается для снижения «пиковых» концентраций вредных веществ в дымовых газах использовать их ионизацию перед подачей в абсорбционные или адсорбционные массообменные аппараты. Экспериментально показано, что растворимость ионов галогенов, серо- и азотосодержащих соединений по сравнению с растворимостью молекул увеличивается на два-три порядка. Описывается система управления, позволяющая предотвращать выбросы так называемых «лисьих хвостов» дымовых газов в атмосферу.

Ключевые слова: пиковые концентрации, дымовые газы, ионизация, сорбционные процессы и аппараты, абсорбция, адсорбция, система управления, напряженность электрического поля.

A. B. Golovanchikov¹, N. A. Merentsov¹, A. V. Persidskiy², M. V. Topilin³

ON THE POSSIBILITY OF REDUCING «PEAK» CONCENTRATION LOADS IN FLUE GASES

¹Volgograd State Technical University
²JSC Federal Scientific and Production Centre «Titan-Barricady»
³Branch of LUKOIL-Engineering VolgogradNIPImorneft

It is proposed to reduce the «peak» concentrations of harmful substances in flue gases to use their ionization before being supplied to absorption or adsorption mass exchangers. It has been experimentally shown that the solubility of halogen ions, sulfur and nitrogen-containing compounds is increased by 2-3 orders of magnitude compared to the solubility of molecules. A control system is described to prevent the release of so-called «fox tails» of flue gases into the atmosphere.

Keywords: peak concentrations, flue gases, ionization, sorption processes and apparatuses, absorption, adsorption, control system, electric field strength.

Существующие методы очистки газовых выбросов (дымовых газов) рассчитаны на усредненные во времени концентрации вредных веществ (компонентов), а системы управления очистным оборудованием позволяют нивелировать отклонения концентраций от средних значений максимум на 20–30 %. Однако, как показывает хронология контроля колебаний, концентраций вредных веществ, периодически при «пиковых нагрузках» по концентрациям их кратковременный всплеск может возрастать более чем на порядок. Это наблюдается по так называемым «лисьим хвостам» – выбросам из дымовых труб крупных металлургических предприятий желто-коричневых газов, а вблизи химических и нефтеперерабатывающих заводов внезапным неприятным запахам в воздухе

и объясняется тем, что очистные системы не справляются с периодически возникающими «пиковыми» концентрациями галогенсодержащих, азот- и серосодержащих соединений, бужета других вредных компонентов (бензапирена, угарного газа, органики) в газовых выбросах даже после очистки [1]. Особо хочется обратить внимание на системы газоочистки и их управления для мусороперерабатывающих заводов. В Волгоградской области предполагается строительство такого предприятия вблизи крупного дачного массива, и оно не случайно вызывает серьезную озабоченность населения. Приведенные ниже данные говорят о больших экологических проблемах, возникающих у таких предприятий по выбросам вредных веществ в дымовых газах [1; 2]

© Голованчиков А. Б., Меренцов Н. А., Персидский А. В., Топилин М. В., 2023.

* Работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации для молодых ученых-кандидатов наук МК-1287.2020.8 «Моделирование процессов управления в массообменном экологическом и нефтегазоперерабатывающем оборудовании».

**Эмиссия и предельные концентрации вредных веществ
из установок сжигания мусора**

Соединения газов	Диапазон концентраций, мг/м ³	ПДК рабочей зоны
Хлорсодержащие (Cl ₂ и HCl)	400-11500	1
Фторсодержащие (HF и F ₂)	2-20	до 1
Серосодержащие (H ₂ S и SO ₂)	200-800	10
Азотсодержащие	150-400	5
Углеродсодержащие (CO и CO ₂)	20-600	20
Органические соединения (бензапирен, ароматика и др.)	300-500	до 5
Пыль	800-15000	3

Из числовых параметров таблицы видно, что пиковые выбросы вредных веществ мусороперерабатывающего завода могут превышать нормативные значения на один-два порядка. При очистке сточных вод на эту проблему стали обращать внимание в 90-е годы прошлого века [3; 4] с возможностью замены традиционного для нашей страны хлорирования на озонирование и ультрафиолетовую обработку. В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по обеззараживанию воды в электрическом поле [5], а сама технология электрохимической очистки воды представлена в работе [6]. Авторы работы [7] предложили и описали результаты экспериментальных исследований по интенсификации сорбционных процессов в электрическом поле. Предложены новые конструкции электросорбционных аппаратов и их узлов, а также методики их расчетов [8–18], позволяющие увеличить скорость процессов массопередачи при очистке ионизированного газа (воздуха) по сравнению с типовыми процессами сорбции молекул вредных и опасных извлекаемых веществ в десятки и сотни раз за счет увеличения скорости дрейфа ионов в электрическом поле (рис. 1). В монографиях [19; 20], а также работах [21–24] описаны процессы управления сорбционными системами в экологическом и нефтегазоперерабатывающем массообменном оборудовании, обеспечивающие устойчивые режимы работы массообменных аппаратов селективной очист-

ки газовых выбросов в оптимальном режиме эмульгирования за точкой инверсии фаз при номинальных колебаниях расходов очищаемого газа и концентраций вредных улавливаемых веществ (молекул). Однако возможности управления сорбционными процессами при «пиковых» увеличениях концентраций (на порядок или выше номинальных) не рассматривается.

На рис. 1 представлены графические зависимости относительных увеличений коэффициентов массопередачи от напряженности электрического поля для электросорбционных процессов.

Целью работы является создание системы управления массообменными сорбционными процессами при «пиковых» всплесках концентраций улавливаемых компонентов в очищаемом газе.

На рис. 2 показана модифицированная система управления массообменной сорбционной колонной в условиях «пиковых» нагрузок, позволяющая за счет подачи в период «пиковых» всплесков концентраций вредных веществ ионизированного очищаемого газового потока с созданием в сорбционном оборудовании (абсорберах и адсорберах) напряженности электрического поля, которое увеличивает скорость массопередачи за счет дрейфа ионов к массообменным поверхностям (сплошной жидкой фазы абсорбента от пузырьков газа или поверхности частиц адсорбента) в десятки и сотни раз (рис. 1).

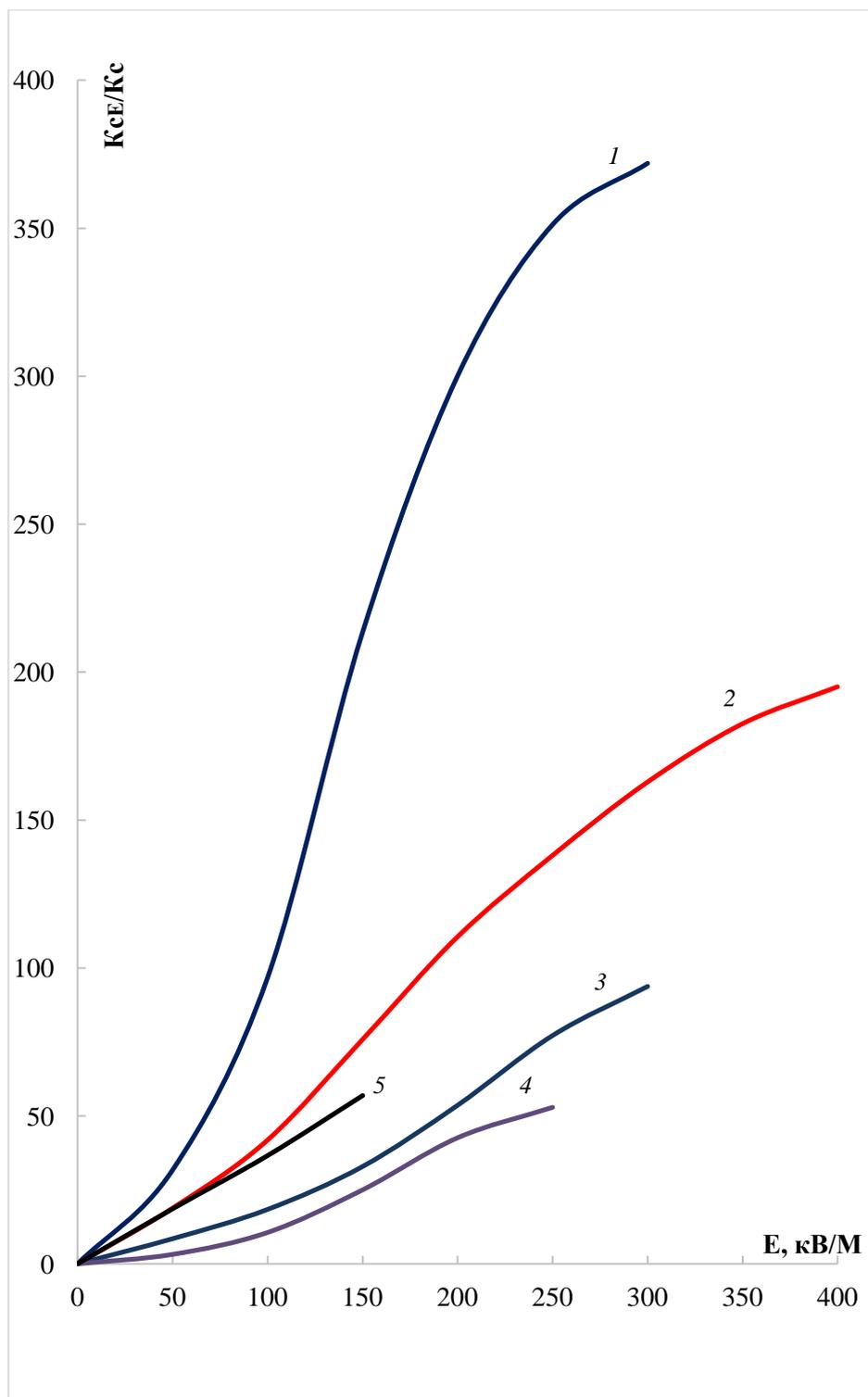


Рис. 1. Относительное увеличение коэффициента массопередачи при увеличении напряженности электрического поля от 0 до $E_{кр}$:
1 – фенол ($E_{кр} = 283$); 2 – ацетон ($E_{кр} = 407$); 3 – метилмеркаптан ($E_{кр} = 295$); 4 – иприт ($E_{кр} = 272$); 5 – диоксин ($E_{кр} = 165$)

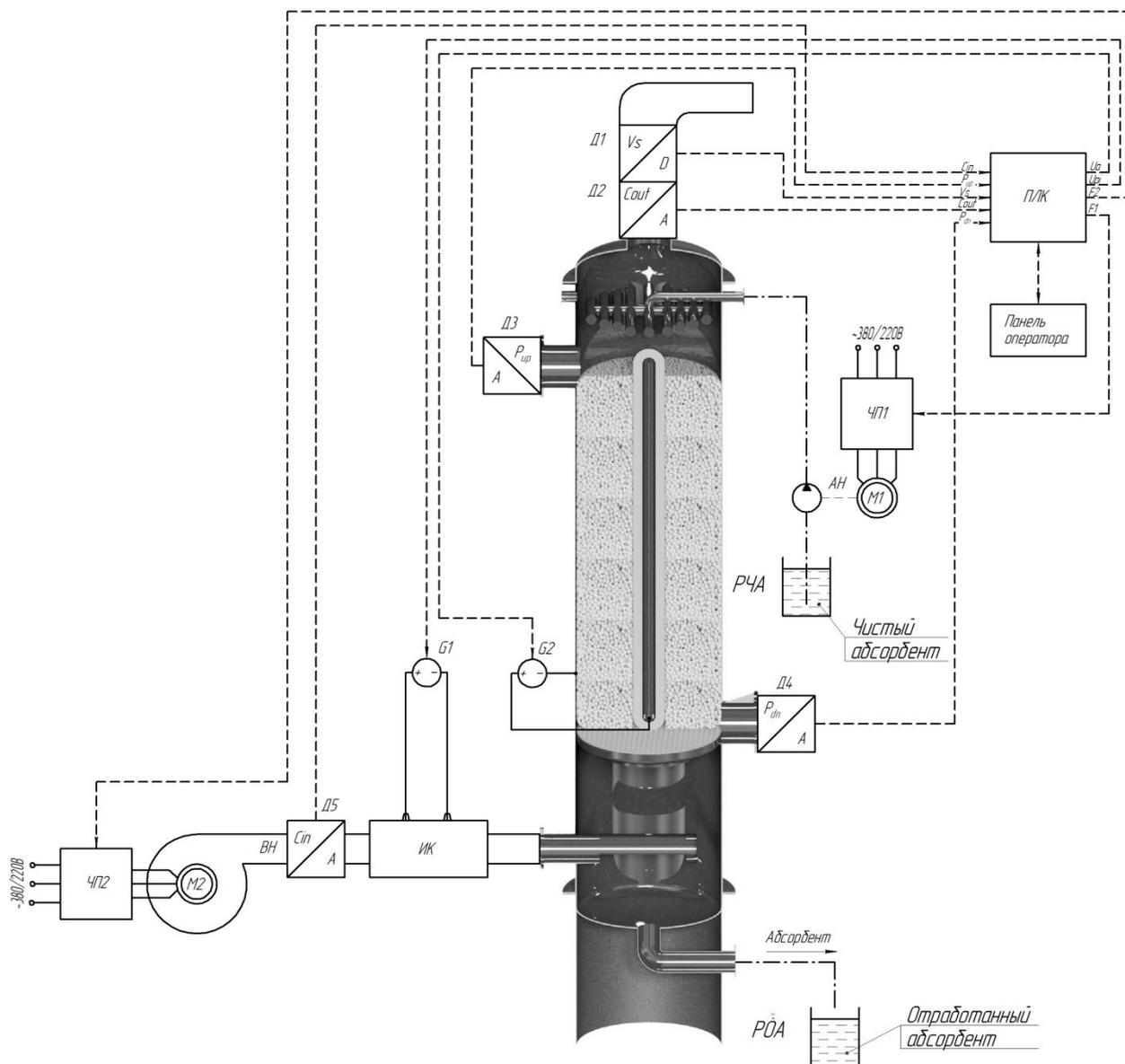


Рис. 2. Модифицированная схема управления насадочным абсорбером для улавливания целевых компонентов с учетом «пиковых» концентрационных колебаний вредных веществ в очищаемом газовом потоке

Модифицированная информационно-измерительная и управляющая система абсорбционного аппарата селективной очистки газовых выбросов (рис. 2) состоит из датчика скорости газового потока $Д1$, измеряющего расход очищаемого потока газовой фазы через аппарат, датчиков концентрации извлекаемого вещества во входящем ($Д5$) и исходящем ($Д2$) газовом потоке, а также датчиков давления газа над насадочным блоком ($Д3$) и под ним ($Д4$). Источник высокого напряжения $G1$ обеспечивает подачу высоковольтного питания в камеру предварительной ионизации газового потока ($ИК$), а источник $G2$ подает высокое напряжение между сердечником насадочного блока, находя-

щимся в диэлектрической капсуле и корпусом массообменного аппарата. Это обеспечивает поддержание внутри аппарата электрического поля заданной напряженности E с радиальным направлением силовых линий. Насос $АН$ обеспечивает подачу чистого абсорбента в аппарат из резервуара чистого абсорбента ($РЧА$). Отработанный абсорбент скапливается в резервуаре отработанного абсорбента ($РОА$). Управление расходом жидкого абсорбента осуществляется с помощью частотного преобразователя $ЧП1$, задающего частоту вращения насоса $АН$. Поток газовой фазы подается (нагнетается) воздуходувкой ($ВН$), расход которой регулируется частотным преобразователем $ЧП2$. Программи-

руемый логический контроллер (*ПЛК*) выполняет программы управления и автокалибровки, собирает с датчиков и обрабатывает информацию о состоянии и режиме работы массообменной системы (аппарата) и выдает управляющие воздействия исполнительным устройствам.

Модификация типовых схем управления, описанных в монографиях [19; 20] и работах [21–24], заключается в следующем: при появлении «пиковой» концентрационной нагрузки мгновенно запускается модуль аппарата для ионизации очищаемого газа и весь поток сплошной газовой фазы пропускается через ионизатор. Одновременно включается генератор постоянного тока, создающий внутри аппарата электрическое поле заданной напряженности E . Под действием этой напряженности в десятки и сотни раз возрастает скорость дрейфа ионов к вышеназванным массообменным поверхностям, обеспечивающая ускоренное поглощение ионов вредных веществ сорбирующими поверхностями. После снятия «пиковой» концентрационной нагрузки ионизатор и генератор постоянного тока автоматически адаптивно выключаются.

Вывод

Дополнительная установка в системы очистки и улавливания процессов сорбции ионизатора и генератора постоянного тока позволит массообменным сорбционными системам адаптивно автоматически реагировать и снижать «пиковые» концентрационные всплески вредных компонентов в очищаемых газовых потоках, так как скорость заряженных ионов в электрическом поле на несколько порядков выше скорости молекул, что приводит к интенсификации процессов массоотдачи и повышению скорости очистки в десятки раз по сравнению с традиционными типовыми методами сорбционной очистки газовых выбросов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ильин, А. В. Очистка выбросов в атмосферу в промышленности Волгоградской области: учеб. пособие / А. В. Ильин, А. Б. Голованчиков, В. Е. Субботин; ВолгГТУ. – Волгоград, 2002. – 63 с.
2. Экологическая химия : Основы и концепции / Ф. Корте, М. Бахадир, В. Клайн и др. ; Ред. Ф. Корте; Пер. с нем. В. В. Соболя под ред. Н. Б. Градовой. – М. : Мир, 1997. – 395 с.
3. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник. Том 1 / А. С. Тимонин. – Калуга: Издательство Н. Бочкаревой, 2003. – 917 с.
4. Озонирование воды / В. А. Орлов – М.: Стройиздат, 1984. – 88 с.
5. Голованчиков, А. Б. Обеззараживание воды в электрическом поле: учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, Н. О. Сиволобова; ВолгГТУ. – Волгоград, 2007. – 61 с.
6. Яковлев, С. В. Технология электрохимической очистки воды / С. В. Яковлев. – Л.: Стройиздат, 1987. – 312 с.
7. Голованчиков, А. Б. Интенсификация сорбционных процессов в электрическом поле: учеб. пособие / А. Б. Голованчиков, М. Ю. Ефремов; ВолгГТУ. – Волгоград, 2005. – 72 с.
8. П. м. 207217 Российская Федерация, МПК В01Д 53/06 Электроадсорбер непрерывного действия / Н. А. Меренцов, М. В. Топилин, А. В. Персидский, А. Б. Голованчиков, В. В. Грошев; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2021.
9. П. м. 195520 Российская Федерация, МПК В01Д53/00 Массообменный аппарат для электросорбционных процессов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, М. В. Топилин, В. А. Балашов, А. Б. Голованчиков; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2020.
10. П. м. 207218 Российская Федерация, МПК В01Д 53/06 Электроадсорбер непрерывного действия / Н. А. Меренцов, М. В. Топилин, А. В. Персидский, А. Б. Голованчиков, В. В. Грошев; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2021.
11. П. м. 198300 Российская Федерация, МПК В01Д53/06 Электроадсорбер / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, А. В. Персидский, М. В. Топилин, Н. Р. Тагаев; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2020.
12. П. м. 207238 Российская Федерация, МПК В01Д 53/06 Электроадсорбер непрерывного действия / Н. А. Меренцов, М. В. Топилин, А. В. Персидский, А. Б. Голованчиков, В. В. Грошев; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2021.
13. Designs of electroadsorption mass transfer apparatuses / N.A. Merentsov, A.V. Persidskiy, M.V. Topilin, A.B. Golovanchikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679. – 17 p. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1679/5/052021/pdf>.
14. Calibration of technological parameters of an electroadsorption apparatus with a fixed layer of adsorbent / N. A. Merentsov, A. V. Persidskiy, M. V. Topilin, A. B. Golovanchikov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1679. – 17 p. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1679/5/052020/pdf>.
15. Control of operating modes of an electroadsorption apparatus with a fixed layer of adsorbent / N. A. Merentsov, A. V. Persidskiy, M. V. Topilin, A. B. Golovanchikov // Journal of Physics: Conference Series. - 2020. - Vol. 1679. – 16 p. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1679/5/052096/pdf>.
16. Меренцов, Н. А. Система автоматизированного управления режимами работы электроадсорбционных аппаратов селективной очистки газовых выбросов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, М. В. Топилин, А. Б. Голованчиков // Вестник Тамбовского государственного технического университета (ВестникТГТУ) (Transactions TSTU). – 2020. – Т. 26, № 4. – С. 513–528.
17. Меренцов, Н. А. Система автоматизированной калибровки технологических параметров электроадсорбционных аппаратов селективной очистки газовых выбросов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, М. В. Топилин, А. Б. Голованчиков // Вестник Тамбовского государственного технического университета (ВестникТГТУ). – 2020. – Т. 26, № 3. – С. 371–387.
18. Голованчиков, А. Б. Моделирование процессов фильтрования и конструкции аппаратов для очистки жидких и газовых неоднородных систем: монография / А. Б. Го-

лованчиков, Н. А. Меренцов, В. А. Балашов; ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – 204 с.

19. Меренцов, Н. А. Моделирование процессов управления в нефтегазоперерабатывающем массообменном оборудовании: монография / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, А. В. Персидский, М. В. Топилин; ВолгГТУ. – Волгоград, 2021. – 212 с.

20. Меренцов, Н. А. Моделирование процессов управления в экологическом массообменном оборудовании: монография / Н. А. Меренцов, А. Б. Голованчиков, А. В. Персидский, В. Н. Лебедев; ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – 188 с.

21. Меренцов, Н. А. Идентификация математической модели управления абсорбционными аппаратами селективной очистки газовых выбросов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, А. Б. Голованчиков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10, № 2 (37). – 12 с. – Режим доступа. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1178>.

22. Меренцов, Н. А. Управление массообменными

процессами при сорбционной очистке газовых выбросов / Н. А. Меренцов, А. В. Персидский, А. Б. Голованчиков // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. – 2022. – Т. 10, № 2 (37). – 13 с. – Режим доступа. – URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1179>.

23. Self-adapting automated mode control system of packed absorbers used for selective gas emission treatment / A. V. Persidskiy, N. A. Merentsov, A. B. Golovanchikov, D. A. Tezikov, V. V. Groshev // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1889. 2021. – Article 022069. – 14 p. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1889/2/022069>.

24. System for automated process parameters adjustment of packed absorbers intended for selective gas emissions treatment / N. A. Merentsov, A. V. Persidskiy, A. B. Golovanchikov, V. N. Lebedev, V. V. Groshev // Journal of Physics: Conference Series. Vol. 1889. 2021. – Article 022040. – 16 p. – URL : <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/1889/2/022040>.

УДК 661.666.4:66.099.2

П. С. Васильев, Е. А. Павлова

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ АППАРАТУРНОГО ОФОРМЛЕНИЯ СТАДИИ ГРАНУЛИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА МОКРЫМ СПОСОБОМ*

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: nestorvv@mail.ru, e.pavlova1999@icloud.com

Отмечены недостатки использования традиционного технологического оборудования стадии гранулирования технического углерода мокрым способом. Указаны преимущества использования для этой цели комбинированного аппарата фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя. Проанализирована кинетика роста гранул технического углерода с точки зрения комбинированной гидродинамической модели их движения в аппарате фонтанирующего слоя. Представлены описание конструкции и основы методики расчета эффективного комбинированного гранулятора технического углерода. Приведен пример расчета и проанализированы полученные результаты.

Ключевые слова: технический углерод, гранулирование, фонтанирующий слой, кинетика, проектирование, аппарат, энергоресурсоэффективность.

P. S. Vasilyev, E. A. Pavlova

IMPROVEMENT OF THE APPARATUS DESIGN FOR THE WET GRANULATION STAGE OF CARBON BLACK

Volgograd State Technical University

The disadvantages of using the traditional technological equipment of the stage of technical carbon pelletizing by wet method are noted. The advantages of using for this purpose combined apparatus of spouting layer with additional lateral input of coolant are indicated. The kinetics of carbon black granules growth has been analyzed from the point of view of combined hydrodynamic model of their motion in the fountain layer apparatus. The description of the design and basis for the calculation methodology of the effective combined carbon black granulator is presented. An example of calculation is given and the obtained results are analyzed.

Keywords: carbon black, granulation, fountain layer, kinetics, spouting, design, apparatus, energy and resource efficiency.

Технический углерод – высокодисперсный промежуточный продукт химической промышленности, который широко используется в производстве резин, лакокрасочных материалов

и пластмасс в качестве наполнителя, значительно повышающего эксплуатационные свойства конечных продуктов [1; 2].

Гранулирование является одной из основ-

ных технологических стадий производства технического углерода. В настоящее время наиболее распространен мокрый способ гранулирования, пригодный для производства любых марок технического углерода и осуществляемый в специальных смесителях-грануляторах барабанного типа. Как правило, полученные гранулы размером 0,25–3 мм далее высушиваются в барабанной сушилке до конечной влажности 0,3–0,9 % [2]. При этом дополнительно затрачивается энергия на привод используемого технологического оборудования, общая масса которого составляет около 80–90 тонн.

В связи с этим совершенствование аппаратного оформления стадии гранулирования технического углерода мокрым способом для повышения энергоресурсоэффективности его производства в целом является актуальной задачей и представляет собой цель настоящей работы.

Для решения поставленной задачи предлагается использовать комбинированный аппарат фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя – аэрозоля технического углерода, в котором одновременно протекают процессы гранулирования и сушки. Использование фонтанирующего слоя позволяет реализовать двойной механизм роста гранул: 1) возникновение центров гранулообразования и рост частиц за счет наслаивания на их поверхность тонких пленок; 2) агломерацию мелких частиц при избытке связующей жидкости

на их поверхности. Наличие дополнительного бокового ввода теплоносителя обеспечивает интенсивное перемешивание частиц в зоне устья фонтана, что способствует увеличению скорости роста гранул и интенсивности процесса сушки [3; 4].

Эти обстоятельства позволяют проводить процесс гранулирования технического углерода мокрым способом непосредственно из аэрозоля, получая на выходе сухой готовый продукт.

Схема конструкции аппарата фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя с четырьмя симметрично расположенными относительно друг друга патрубками показана на рис. 1.

Сложное движение потока частиц дисперсной фазы в таком аппарате наиболее точно описывается комбинированной гидродинамической моделью, для которой: 1) ядро фонтана и периферийная зона действия боковых струй описывается ячеечной моделью; 2) периферийная зона ниже действия боковых струй описывается моделью идеального вытеснения; 3) между зонами происходит циркуляция дисперсных частиц.

С учетом этого среднее время пребывания частиц в аппарате τ_{cp} до достижения ими необходимого среднего конечного размера d_{cp} определяется из уравнения [4]:

$$d_{cp} = d_0 \cdot \int_0^{\infty} C(\theta) \cdot d\theta + \lambda \cdot \tau_{cp} \cdot \int_0^{\infty} \theta \cdot C(\theta) \cdot d\theta, \quad (1)$$

$$C(\theta) = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{p^{i-1} \cdot (1+p)^{i(n-1)}}{m^{i-n} \cdot (i \cdot n - 1)!} \cdot \left[\theta - (i-1) \cdot \frac{b}{p} \right]^{i-n-1} \cdot \exp \left\{ -\frac{1+p}{m} \cdot \left[\theta - (i-1) \cdot \frac{b}{p} \right] \right\} \times \left\langle \theta - (i-1) \cdot \frac{b}{p} \right\rangle,$$

где $\theta = \frac{\tau}{\tau_{cp}}$ – безразмерное время пребывания;

τ – текущее время;

$$\left\langle \theta - (i-1) \cdot \frac{b}{p} \right\rangle = \begin{cases} 0; & \theta < (i-1) \cdot \frac{b}{p} \\ 1; & \theta > (i-1) \cdot \frac{b}{p} \end{cases} \quad \text{– единичная}$$

функция;

$$p = -3,305 \cdot 10^{-6} \cdot \tau_{cp}^2 + 2,145 \cdot 10^{-2} \cdot \tau_{cp} + 6,394 \cdot 10^{-2}$$

– параметр рециркуляции; $m = \frac{1-b}{n}$ – объемная

доля зоны идеального смешения; b – объемная доля зоны идеального вытеснения; n – число ячеек идеального перемешивания; d_0 – начальный диаметр частиц ретурра; λ – скорость роста гранул.

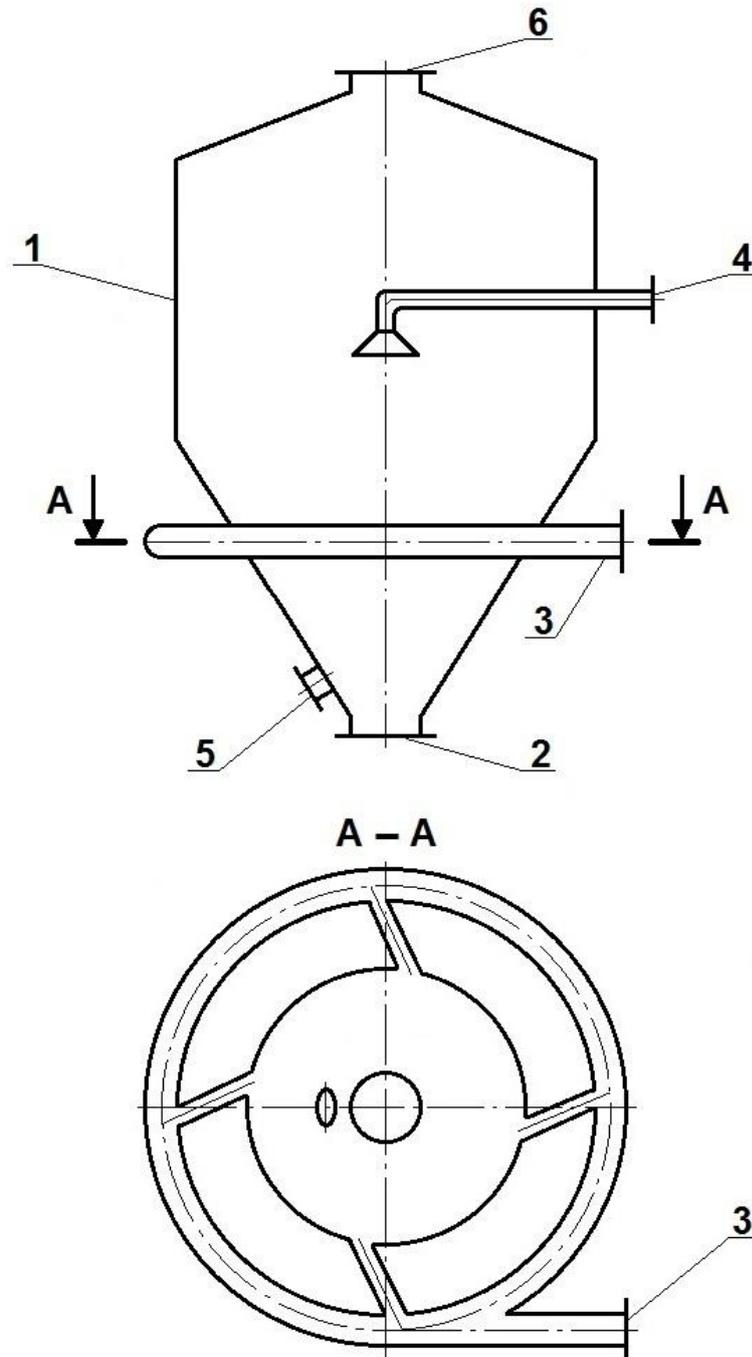


Рис. 1. Схема конструкции аппарата фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя (аэрозоля технического углерода):
 1 – цилиндрически-конический корпус; 2 – основной ввод теплоносителя;
 3 – дополнительный боковой ввод теплоносителя; 4 – ввод связующей жидкости;
 5 – вывод сухого готового продукта; 6 – вывод отработанного теплоносителя

Интегральная функция распределения частиц по размерам равна [4]:

$$F = \frac{\int_0^{K_2} f(r) \cdot r^3 \cdot dr}{\int_0^{\infty} f(r) \cdot r^3 \cdot dr}, \quad K_1, K_2 \in (0; \infty); \quad (2)$$

$$f(r) = \left(\frac{p}{\lambda \cdot m \cdot \tau_{cp}} \right)^{p \cdot n} \cdot \exp \left\{ - \frac{p \cdot \left[r - \left(r_0 + \frac{p-1}{p} \cdot \lambda \cdot b \cdot \tau_{cp} \right) \right]}{\lambda \cdot m \cdot \tau_{cp}} \right\} \times$$

$$\times \frac{\left[r - \left(r_0 + \frac{p-1}{p} \cdot \lambda \cdot b \cdot \tau_{cp} \right) \right]^{p \cdot n - 1}}{(n \cdot p - 1)!} \cdot \left\langle r - \left(r_0 + \frac{p-1}{p} \cdot \lambda \cdot b \cdot \tau_{cp} \right) \right\rangle,$$

$$\text{где } \left\langle r - \left(r_0 + \frac{p-1}{p} \cdot \lambda \cdot b \cdot \tau_{cp} \right) \right\rangle = \begin{cases} 0; & r < r_0 + \frac{p-1}{p} \cdot \lambda \cdot b \cdot \tau_{cp} \\ 1; & r > r_0 + \frac{p-1}{p} \cdot \lambda \cdot b \cdot \tau_{cp} \end{cases} \quad \text{— единичная функция; } r_0 \text{ — начальный радиус}$$

диус частиц ретура; r — текущий радиус частиц.

Для рекомендуемых в [4] значений $b = 0,4$ и $n = 2$ с учетом того, что скорость роста гранул технического углерода постоянна для мокрого способа гранулирования и равна $\lambda = 8,33 \cdot 10^{-6}$ м/с [2], решение уравнения (1), полученное численно на ЭВМ методом Симпсона для начального диаметра частиц ретура $d_0 < 0,25$ мм, хорошо аппроксимируется полиномиальным уравнением (средняя относительная ошибка 0,2%), с:

$$\tau_{cp} = -12,6 \cdot d_{cp}^2 + 58,1 \cdot d_{cp} + 93,3. \quad (3)$$

Необходимо отметить, что уравнение (3) получено для диапазона значений $d_{cp} = 1-2$ мм, а результаты расчета по нему хорошо коррелируются с данными промышленного производства технического углерода [2].

Решение уравнения (2), полученное аналогично для начального радиуса частиц ретура $r_0 < 0,125$ мм и среднего времени их пребывания в аппарате $\tau_{cp} = 152$ с, хорошо аппроксимируется логистическим полиномиальным уравнением (средняя относительная ошибка 1,0%):

$$F = \frac{1}{1 + \exp(0,016d^6 - 0,390d^5 + 3,705d^4 - 18,086d^3 + 48,620d^2 - 71,190d + 46,465)}, \quad (4)$$

где d — текущий диаметр частиц, мм.

На рис. 2 сплошной линией показан график уравнения (4), а двумя пунктирными линиями —

графики уравнения (2) для $\tau_{cp} = 149$ с и $\tau_{cp} = 169$ с, являющимися границами практической применимости уравнения (3).

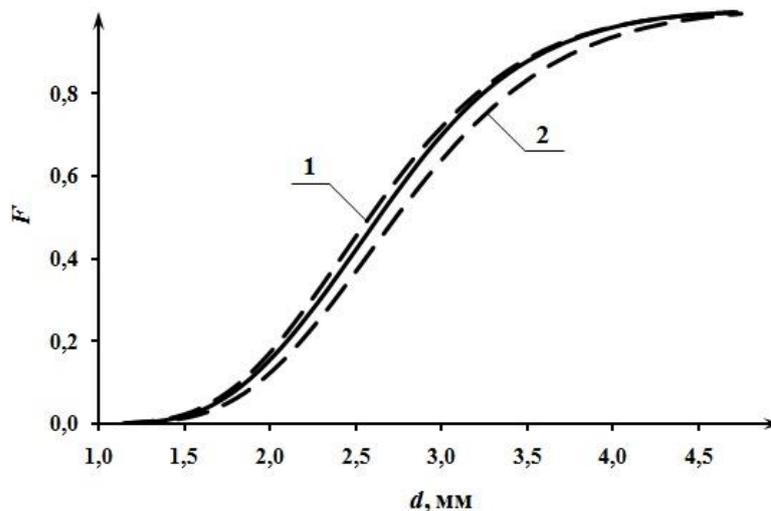


Рис. 2. Графики уравнения (4) (сплошная линия) для $\tau_{cp} = 152$ с и уравнения (2) (пунктирные линии) для: 1 — $\tau_{cp} = 149$ с; 2 — $\tau_{cp} = 169$ с

Из рис. 2 следует, что фракционный состав гранул технического углерода, полученных в аппарате фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя, практически не зависит от режимных параметров его работы и с приемлемой для инженерных расчетов точностью может быть описан уравнением (4).

Прочность гранул является важным показателем качества готового продукта и зависит от раз-

мера частиц и их конечной влажности, Н/Г [4]:

$$F_p = 10,98 \cdot d^{1,26} \cdot \omega_k^{-0,88}, \quad (5)$$

где ω_k – конечная влажность готового продукта, %.

На рис. 3 показаны графики зависимости прочности гранул технического углерода, полученных в аппарате фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя для различной конечности влажности готового продукта.

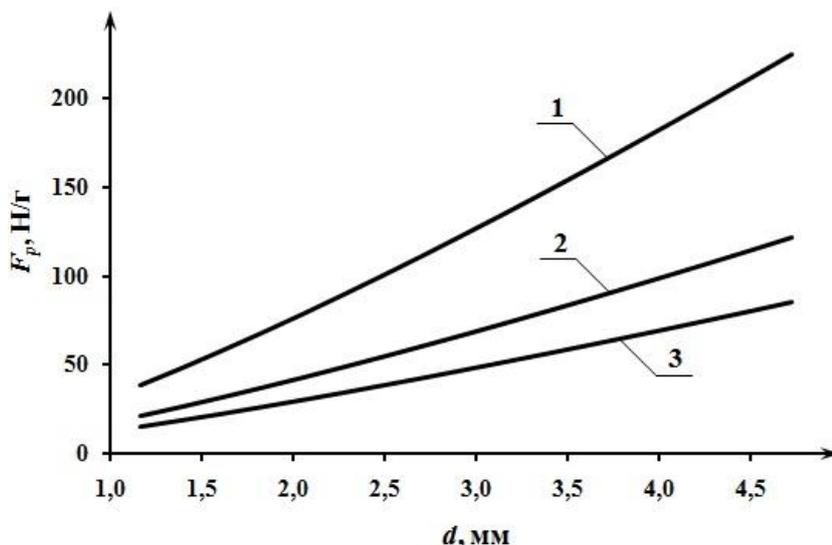


Рис. 3. Графики зависимости прочности гранул технического углерода для различной конечной влажности готового продукта:
1 – $\omega_k = 0,3\%$; 2 – $\omega_k = 0,6\%$; 3 – $\omega_k = 0,9\%$

Полученные на рис. 3 прочностные характеристики важны для определения режимных параметров работы гранулятора [2].

Ниже приведены основные расчетные зависимости комбинированного аппарата для гранулирования и сушки технического углерода.

Скорость витания частиц среднего конечного размера в аппарате w_{sum} определяется из уравнения [5]:

$$Re_{sum} = \frac{Ar}{18 \cdot \varphi_n^2 + \sqrt{\frac{\varphi_n \cdot \varphi_\phi}{3} \cdot Ar}}, \quad (6)$$

где Ar – число Архимеда; φ_n и φ_ϕ – соответственно коэффициент удельной поверхности и коэффициент формы и шероховатости поверхности частиц, учитывающие реальную гидродинамическую обстановку в аппарате в процессе фонтанирования.

Рабочая скорость фонтанирования рас-

считывается по формуле [4]:

$$w_\phi = 1,525 \cdot w_{sum} \cdot \exp(0,84 \cdot \alpha), \quad (7)$$

где α – отношение расхода теплоносителя через дополнительный боковой ввод L_σ к его расходу через основной ввод L_ϕ .

Диаметр нижнего сечения аппарата определяется по формуле [4]:

$$d_\phi = 2 \cdot \sqrt{\frac{L_\phi}{\pi \cdot w_\phi \cdot \rho}}, \quad (8)$$

где ρ – плотность теплоносителя при его средней температуре.

Высота расположения дополнительного бокового ввода теплоносителя рассчитывается по формуле [4]:

$$h_\sigma = 0,6 \cdot H_0, \quad (9)$$

при этом высота неподвижного слоя H_0 в аппарате определяется из трансцендентного уравнения:

$$H_0^3 - \frac{2}{3} \cdot \frac{d_\phi}{\text{tg}(\gamma/2)} \cdot H_0^2 + \frac{4}{3} \cdot \left[\frac{d_\phi}{\text{tg}(\gamma/2)} \right]^2 \cdot H_0 - \frac{(1+R) \cdot G_k \cdot \tau_{cp}}{\rho_{um} \cdot \text{tg}^2(\gamma/2)} = 0, \quad (10)$$

где R – доля рецикла ретура; G_k – производительность по готовому продукту; $\rho_{\text{чи}}$ – насыпная плотность готового продукта; γ – угол раскрытия конуса.

Диаметр патрубков дополнительного бокового ввода теплоносителя рассчитывается по формуле [4; 6]:

$$d_{\delta} = 1,17 \cdot \frac{C \cdot X}{\beta}, \quad (11)$$

где $C = 0,81 \cdot Ar^{-0,115} \cdot Re_{\delta}^{0,32} k$ – коэффициент боковых струй, при этом число Рейнольдса в фонтане на уровне расположения бокового ввода Re_{δ} определяется по скорости фонтанирования

на этом уровне $w_{\phi\delta} = w_{\phi} \cdot \left(\frac{d_{\phi}}{D_{\delta}}\right)^2$;

$X = \sqrt{\left(\frac{D_{\delta}}{2}\right)^2 - \left(\frac{D_{\text{я}}}{2}\right)^2}$ – дальность боковых струй;

$D_{\delta} = 2 \cdot h_{\delta} \cdot \text{tg}(\gamma/2) + d_{\phi}$ – диаметр сечения конуса на уровне расположения бокового ввода; $D_{\text{я}} = 0,21 \cdot h_{\delta} + d_{\phi}$ – диаметр сечения ядра фонтана на уровне расположения бокового ввода; β – отношение скорости истечения боковых струй к скорости витания частиц. Количество патрубков дополнительного бокового ввода теплоносителя рассчитывается по формуле [4]:

$$n_{\delta} = \frac{4 \cdot \alpha \cdot L}{\pi \cdot d_{\delta}^2 \cdot \beta \cdot w_{\text{вм}} \cdot \rho}, \quad (12)$$

где L – общий расход теплоносителя, определяемый из теплового баланса процесса сушки.

На практике изготовить аппарат с рассчитанным количеством патрубков возможно только в случае, если они взаимно не перекрывают друг друга на уровне расположения дополнительного бокового ввода, т. е. коэффициент их взаимного перекрытия должен быть меньше единицы:

$$K = \frac{(d_{\delta} + 2 \cdot \delta_{\delta}) \cdot n_{\delta}}{\pi \cdot D_{\delta} + \delta} < 1, \quad (13)$$

где δ и δ_{δ} – толщины стенок конической обечайки аппарата и патрубков бокового ввода теплоносителя соответственно.

Для предварительной оценки значения K без выполнения основного расчета аппарата рекомендуется уравнение (средняя относительная ошибка 2,2 %):

$$K = 5,725 \cdot 10^{11} \cdot G_k^{0,273} \cdot \tau_{cp}^{-5,767}, \quad (14)$$

полученное в диапазоне значений $G_k = 200$ –3000 кг/ч и $\tau_{cp} = 149$ –169 с.

Высота конической части аппарата определяется по формуле [4]:

$$H_k = h_{\delta} + 2,5 \cdot X, \quad (15)$$

а диаметр сечения конуса на высоте H_k – по формуле:

$$D_k = 2 \cdot H_k \cdot \text{tg}(\gamma/2) + d_{\phi}. \quad (16)$$

Диаметр сепарационной зоны гранулятора рассчитывается по формуле:

$$D_{\text{cen}} = \max \left\{ D_k; 2 \cdot \sqrt{\frac{L}{\pi \cdot w_{\text{cen}} \cdot \rho}} \right\}, \quad (17)$$

где скорость витания сепарируемых частиц w_{cen} определяется аналогично уравнению (6). В случае, если $D_{\text{cen}} > D_k$, необходимо скорректировать высоту конической части аппарата:

$$H_k^* = \frac{D_{\text{cen}} - d_{\phi}}{2 \cdot \text{tg}(\gamma/2)}. \quad (18)$$

Высота сепарационной зоны гранулятора принимается равной высоте конической части аппарата, а высота расположения форсунки для распыливания связующей жидкости принимается равной половине высоты сепарационной зоны.

Масса фонтанирующего слоя в грануляторе рассчитывается по формуле [4]:

$$M = (1 + R) \cdot G_k \cdot \tau_{cp}, \quad (19)$$

а его гидравлическое сопротивление – по формуле:

$$\Delta P = 0,146 \cdot Ar^{0,13} \cdot (1 + \alpha)^{0,25} \cdot g \cdot \rho_{\text{чи}} \cdot H_0. \quad (20)$$

В табл. 1 приведены основные исходные, справочные данные и результаты модельного расчета аппарата фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя для гранулирования технического углерода мокрым способом на производительность по готовому продукту 3000 кг/ч. Расчет производился численно на ЭВМ по приведенным выше основным зависимостям (3), (5)–(20), а также по классическим расчетным зависимостям процесса сушки [7]. При этом предварительная оценка значения коэффициента K , рассчитанного по формуле (14), показала, что для обеспечения заданной производительности необходима параллельная работа трех комбинированных грануляторов производительностью 1000 кг/ч каждый.

Из табл. 1 следует, что для полученных геометрических размеров масса одного аппарат составляет ориентировочно 650 кг.

Таблица 1

Исходные, справочные данные и результаты модельного расчета комбинированного аппарата для гранулирования технического углерода

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4
Исходные данные			
1. Производительность по готовому продукту	кг/ч	G_k	1000
2. Начальная влажность пульпы [2]	%	ω_n	50
3. Конечная влажность готового продукта [2]	%	ω_k	0,3
4. Доля рецикла ретура [2; 4]	–	R	0,5
Справочные данные			
1. Средний конечный размер гранул	мм	d_{cp}	1,5
2. Начальная температура связующей жидкости (воды)	°С	t_0	20
3. Температура теплоносителя (аэрозоля технического углерода) на входе в аппарат [2]	°С	t_n	200
4. Температура теплоносителя на выходе из аппарата	°С	t_k	100
5. Плотность готового продукта [2]	кг/м ³	ρ_u	1800
6. Насыпная плотность готового продукта [2]	кг/м ³	ρ_{un}	400
7. Коэффициент удельной поверхности гранул [5]	–	φ_n	1,18
8. Коэффициент формы и шероховатости поверхности гранул [5]	–	φ_ϕ	1,27
9. Отношение расхода теплоносителя через дополнительный боковой ввод к его расходу через основной ввод [4]	–	α	0,5
10. Угол раскрытия конуса [4]	град.	γ	42
11. Отношение скорости истечения боковых струй к скорости витания частиц [4]	–	β	10
12. Толщина стенки конической обечайки аппарата	мм	δ	4
13. Толщина стенки патрубков дополнительного бокового ввода теплоносителя	мм	δ_δ	4
14. Максимальный диаметр сепарируемых частиц	мм	d_{cen}	0,5
15. Тепловые потери в окружающую среду [4]	%	Π	10
Расчетные параметры			
1. Среднее время пребывания частиц в аппарате	с	τ_{cp}	152
2. Прочность гранул среднего конечного размера	Н/г	F_p	53
3. Производительность по испаренной влаге	кг/ч	W	994
4. Тепловая нагрузка аппарата	кВт	Q	805
5. Общий расход теплоносителя	кг/ч	L	26830
6. Расход теплоносителя через основной ввод	кг/ч	L_ϕ	13415
7. Расход теплоносителя через дополнительный боковой ввод	кг/ч	L_δ	13415
8. Скорость витания частиц среднего конечного размера	м/с	$w_{вит}$	7,11
9. Рабочая скорость фонтанирования	м/с	w_ϕ	16,50
10. Диаметр нижнего сечения аппарата	м	d_ϕ	0,58
11. Высота неподвижного слоя в аппарате	м	H_0	0,38
12. Высота расположения дополнительного бокового ввода теплоносителя	м	h_δ	0,23
13. Диаметр патрубков дополнительного бокового ввода теплоносителя	м	d_δ	0,04
14. Количество патрубков дополнительного бокового ввода теплоносителя	–	n_δ	49
15. Коэффициент взаимного перекрытия патрубков дополнительного бокового ввода теплоносителя на уровне его расположения	–	K	0,99

Окончание табл. 1

1	2	3	4
16. Высота конической части аппарата	м	H_k	0,75
17. Диаметр сечения конуса на высоте H_k	м	D_k	1,16
18. Скорость витания сепарируемых частиц	м/с	w_{cen}	2,88
19. Диаметр сепарационной зоны гранулятора	м	D_{cen}	1,97
20. Скорректированная высота конической части аппарата	м	H_k^*	1,81
21. Высота сепарационной зоны гранулятора	м	H_{cen}	1,81
22. Высота расположения форсунки для распыливания связующей жидкости	м	h_ϕ	0,90
23. Общая высота гранулятора	м	H	3,61
24. Масса фонтанирующего слоя в грануляторе	кг	M	63,33
25. Гидравлическое сопротивление фонтанирующего слоя	кПа	ΔP	1,08

При прочих равных условиях на ту же производительность были рассчитаны традиционные смеситель-гранулятор барабанного типа и барабанная сушилка.

В табл. 2 приведено сравнение результатов расчета двух вариантов аппаратного оформления стадии гранулирования технического углерода мокрым способом по массе и до-

полнительно затрачиваемой мощности.

Предлагаемая конструкция комбинированного аппарата фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя на порядок более энергоресурсоэффективна по сравнению с традиционным аппаратным оформлением стадии гранулирования технического углерода мокрым способом (табл. 2).

Таблица 2

Сравнение результатов расчета двух вариантов аппаратного оформления стадии гранулирования технического углерода мокрым способом

Аппаратурное оформление	Общая масса, т	Дополнительно затрачиваемая мощность, кВт
1	2	3
Традиционное: смеситель-гранулятор барабанного типа и барабанная сушилка	85	90
Предлагаемое: аппарат фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя	2	—

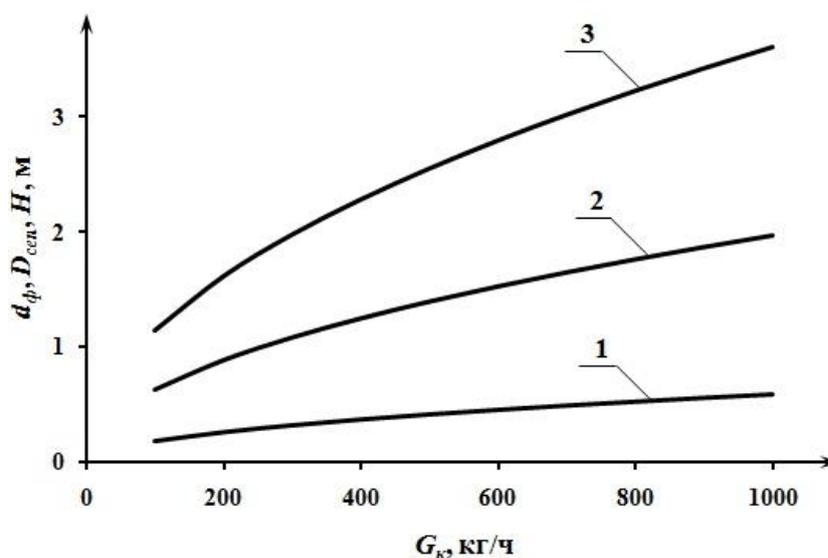


Рис. 4. Графики зависимости габаритных размеров комбинированного гранулятора от производительности по готовому продукту:
 $1 - d_\phi = f(G_k)$; $2 - D_{cen} = f(G_k)$; $3 - H = f(G_k)$

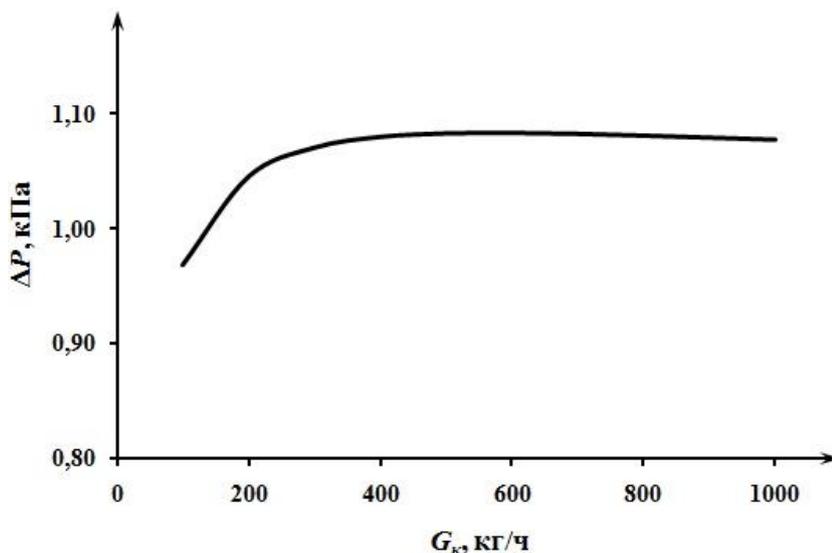


Рис. 5. График зависимости гидравлического сопротивления фонтанирующего слоя от производительности по готовому продукту $\Delta P = f(G_k)$

На рис. 4 и 5 показаны графики зависимости габаритных размеров комбинированного гранулятора и гидравлического сопротивления фонтанирующего слоя от производительности по готовому продукту соответственно.

Габаритные размеры предлагаемого комбинированного гранулятора монотонно увеличиваются с увеличением его производительности по готовому продукту (рис. 4). Из рис. 5 следует, что при этом гидравлическое сопротивление фонтанирующего слоя остается практически постоянным.

Таким образом, полученные результаты позволяют вести инженерное проектирование оптимального с точки зрения энергоресурсоэффективности аппаратного оформления стадии гранулирования технического углерода мокрым способом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шурупов, С. В. Закономерности образования дисперсного углерода при изотермическом пиролизе углеводородного сырья / С. В. Шурупов // Газохимия. – 2009. – № 9. – С. 64–72.
2. Ивановский, В. И. Технический углерод. Процессы и аппараты: учеб. пособие / В. И. Ивановский. – Омск: ОАО «Техуглерод», 2004. – 228 с.
3. Классен, П. В. Гранулирование / П. В. Классен, И. Г. Гришаев, И. П. Шопин. – Москва: Химия, 1991. – 240 с.
4. Кикалишвили, О. И. Обезвоживание и грануляция в аппарате фонтанирующего слоя с дополнительным боковым вводом теплоносителя: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / О. И. Кикалишвили. – Москва, 1984. – 185 с.
5. Рева, Л. С. Методы гидродинамического и теплового расчета теплообменников с зернистой насадкой: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08 / Л. С. Рева. – Волгоград, 1984. – 310 с.
6. Овчинников, Л. Н. Разработка эффективных технологических процессов гранулирования и модифицирования минеральных удобрений в аппаратах взвешенного слоя: дис. ... д-ра техн. наук: 05.17.08 / Л. Н. Овчинников. – Иваново, 1998. – 543 с.
7. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – 10-е изд., стер., дораб. – Москва: ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с.

УДК 66.045.129.9:662.741.351

*П. С. Васильев, Л. С. Рева, И. Д. Папсуева, А. В. Ситникова***АНАЛИЗ РАБОТЫ ВРАЩАЮЩЕГОСЯ БАРАБАННОГО
ХОЛОДИЛЬНИКА ДЛЯ ТУШЕНИЯ КОКСА ВОДОЙ*****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: nestorvv@mail.ru

На основе теоретического анализа теплообменного процесса с участием движущегося и перемешивающегося мелкозернистого слоя определены оптимальные геометрические размеры и технологические параметры работы вращающегося барабанного холодильника для тушения кокса водой.

Ключевые слова: мелкозернистый слой, теплоотдача, оптимизация, анализ.

*P. S. Vasilyev, L. S. Reva, I. D. Papsueva, A. V. Sitnikova***ANALYSIS OF ROTARY DRUM COOLER
FOR QUENCHING COKE WITH WATER****Volgograd State Technical University**

Based on a theoretical analysis of the heat-exchange process involving a moving and mixing fine-grained layer, the optimal geometric dimensions and technological parameters of the rotary drum cooler for quenching coke with water have been determined.

Keywords: fine-grained layer, heat transfer, optimization, analysis.

Теплообмен с участием движущихся и перемешивающихся мелкозернистых слоев различных материалов широко распространен во многих отраслях промышленности.

При этом в некоторых отдельно взятых производствах, в том числе крупнотоннажных, осуществляется теплообмен между стенкой и мелкозернистым слоем, медленно движущимся и перемешивающимся в газовой фазе. Как правило, в таких производствах используется специальное теплообменное оборудование, сконструированное не на основе результатов теоретического расчета, а с опорой на опытно-промышленные данные. Это обстоятельство обусловлено повышенной сложностью учета факторов, влияющих на процесс теплоотдачи при периодическом контакте частиц мелкозернистого слоя со стенкой,

и приводит в процессе эксплуатации оборудования к необходимости его длительных наладки и поиска оптимального режима работы.

Одним из таких крупнотоннажных производств является производство кокса – ценного продукта, который применяется в качестве топлива и сырья для изготовления электродов, различных конструкционных материалов, абразивов и сорбентов [1].

После образования и прокалики в печи мелкозернистый слой кокса необходимо эффективно потушить водой, для чего на многих промышленных предприятиях используют вращающийся барабанный холодильник, схема конструкции которого показана на рис. 1. Как правило, несущий барабан такого аппарата имеет диаметр 1,5–3 м, длину 15–30 м и частоту враще-

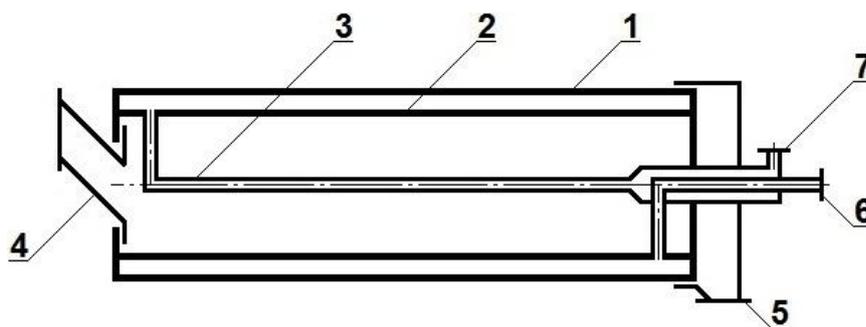


Рис. 1. Схема конструкции вращающегося барабанного холодильника для тушения мелкозернистого слоя кокса водой [2]:

1 – несущий барабан; 2 – теплообменный барабан; 3 – система подачи воды;
4 – ввод кокса; 5 – вывод кокса; 6 – ввод воды; 7 – вывод воды

© Васильев П. С., Рева Л. С., Папсуева И. Д., Ситникова А. В., 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».

ния 1,5–5 об./мин, а вода движется в пространстве между несущим и теплообменным барабанами в турбулентном режиме для обеспечения максимальной интенсивности процесса конвективной теплоотдачи [2].

Определение оптимальных геометрических размеров и режимных параметров работы вращающегося барабанного холодильника для тушения кокса водой на основе теоретического анализа теплообменного процесса с участием движущегося и перемешивающегося мелкозернистого слоя является актуальной задачей и представляет собой цель настоящей работы.

Полный коэффициент теплоотдачи от мелкозернистого слоя кокса к стенке неподвижного теплообменного барабана определяется согласно выражению [3]:

$$\alpha_z = \alpha_{z,m} + \alpha_{z,u}, \quad (1)$$

где коэффициент теплоотдачи за счет молекулярной теплопроводности воздуха равен:

$$\alpha_{z,m} = \frac{4 \cdot \lambda_g}{d_3} \cdot \left[(Kn_g + 1) \cdot \ln \left(1 + \frac{1}{Kn_g} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

$Kn_g = \frac{4 \cdot l_g}{d_3} \cdot \frac{2 - \gamma_g}{\gamma_g}$ – модифицированное число

Кнудсена для воздуха; $l_g = \frac{8,49 \cdot 10^{-3} / P_g}{1 + 116 / (273 + t_{z,cp})}$ –

средняя длина свободного пробега молекул воздуха при его давлении P_g и средней температуре кокса $t_{z,cp}$; γ_g – коэффициент аккомодации воздуха при температуре $t_{z,cp}$; λ_g – теплопроводность воздуха при температуре $t_{z,cp}$; d_3 – эквивалентный диаметр частиц мелкозернистого слоя, а коэффициент теплоотдачи за счет излучения равен:

$$\alpha_{z,u} = 0,2268 \cdot \varepsilon_m \cdot \left(\frac{273 + t_{z,cm}}{100} \right)^3, \quad (3)$$

ε_m – степень черноты кокса;

$t_{z,cm} = \frac{t_{z,cp} - t_{cm,z}}{\ln(t_{z,cp}/t_{cm,z})}$ – средняя температура

у поверхности стенки со стороны мелкозернистого слоя; $t_{cm,z}$ – температура стенки со стороны кокса.

Полный коэффициент теплоотдачи от мелкозернистого слоя кокса к стенке вращающегося теплообменного барабана определяется согласно выражению [3]:

$$\alpha_z^* = \frac{\alpha_z}{\sqrt{\pi \cdot Fo \cdot Bi}} \cdot \left[1 - \frac{\ln(1 + Bi \cdot \sqrt{Fo})}{\sqrt{\pi \cdot Fo \cdot Bi}} \right], \quad (4)$$

где $Fo_z = \frac{a_0 \cdot \tau}{h^2}$ и $Bi_z = \frac{\alpha_z \cdot h}{\lambda_0}$ – соответственно

число Фурье и число Био для мелкозернистого

слоя; $a_0 = \frac{\lambda_0}{(1 - \varepsilon)^2 \cdot \rho_z \cdot c_{pz}}$ – температуропровод-

ность мелкозернистого слоя; ε – порозность мелкозернистого слоя; ρ_z – плотность кокса; c_{pz} – теплоемкость кокса при температуре $t_{z,cp}$;

$\tau = \frac{30 \cdot \varphi}{\pi \cdot n}$ – время контакта частиц мелкозерни-

стого слоя со стенкой; n – частота вращения

барабана; $h = \frac{d_m \cdot (\varphi - \sin \varphi)}{8 \cdot \sin(\varphi/2)}$ – средняя высота

мелкозернистого слоя в барабане; d_m – внутренний диаметр теплообменного барабана.

Необходимо отметить, что выражение (4) справедливо только для $Fo_z < 0,1$.

Эффективная теплопроводность мелкозернистого слоя кокса рассчитывается по формуле [4]:

$$\lambda_0 = 0,0032 \cdot \lambda_1 + 0,6724 \cdot \lambda_2 + \frac{0,3333 \cdot \lambda_1}{1 + 0,0273 \cdot \lambda_1 / \lambda_2}, \quad (5)$$

где $\lambda_1 = \varepsilon \cdot \lambda_g + (1 - \varepsilon) \cdot \lambda_z$ – эффективная теплопроводность мелкозернистого слоя по модели с параллельным направлением теплового потока; λ_2 – теплопроводность кокса при температуре

$t_{z,cp}$; $\lambda_2 = 1 / \left(\frac{\varepsilon}{\lambda_g} + \frac{1 - \varepsilon}{\lambda_z} \right)$ – эффективная тепло-

проводность мелкозернистого слоя по модели с перпендикулярным направлением теплового потока.

Угол наполнения барабана мелкозернистым слоем кокса φ определяется из трансцендентного уравнения:

$$2\pi \cdot \psi = \varphi - \sin \varphi, \quad (6)$$

где ψ – коэффициент загрузки теплообменного барабана.

Коэффициент конвективной теплоотдачи от стенки теплообменного барабана к воде определяется по широко известным в литературе критериальным зависимостям [5].

В таблице приведены основные исходные, справочные данные и результаты модельного расчета вращающегося барабанного холодильника для тушения мелкозернистого слоя кокса водой. Расчет производился численно на ЭВМ с использованием приведенных выше формул (1)–(6) при условии соблюдения равенства удельных тепловых потоков со стороны горяче-

го (кокса) и холодного (воды) теплоносителей. При этом диаметр несущего барабана выбирался из практических рекомендаций [2], а диаметр теплообменного барабана подбирался таким образом, чтобы движение воды в пространстве между барабанами осуществлялось в турбулентном режиме ($Re_x > 10000$).

Из таблицы видно, что число Фурье для мелкозернистого слоя кокса значительно меньше $Fo_2 < 0,1$, что делает правомерным использование в расчете выражения (4).

На рис. 2 приведены графики зависимости температуры стенки теплообменного барабана со стороны воды от частоты его вращения для различных значений коэффициента загрузки. Для обеспечения процесса конвективной теплоотдачи необходимо поддерживать температуру стенки несколько ниже температуры кипения воды. На рис. 2 предельно допустимая температура стенки, равная $90\text{ }^\circ\text{C}$, обозначена пунктирной линией.

Исходные, справочные данные и результаты модельного расчета вращающегося барабанного холодильника для тушения мелкозернистого слоя кокса водой

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4
Исходные данные			
1. Производительность по коксу	кг/ч	G_2	10000
2. Начальная температура кокса [2]	$^\circ\text{C}$	$t_{z,n}$	1200
3. Конечная температура кокса [2]	$^\circ\text{C}$	$t_{z,k}$	90
4. Начальная температура воды [2]	$^\circ\text{C}$	$t_{x,n}$	50
5. Конечная температура воды [2]	$^\circ\text{C}$	$t_{x,k}$	80
Справочные данные			
1. Плотность кокса [2]	кг/м ³	ρ_z	2000
2. Теплоемкость кокса при его средней температуре [2]	Дж/(кг·К)	c_{pz}	1354
3. Теплопроводность кокса при его средней температуре [2]	Вт/(м·К)	λ_z	0,944
4. Степень черноты кокса [3]	–	ε_m	0,9
5. Теплопроводность воздуха при средней температуре кокса	Вт/(м·К)	$\lambda_{\text{в}}$	0,063
6. Коэффициент аккомодации воздуха при средней температуре кокса [3]	–	$\gamma_{\text{в}}$	0,9
7. Давление воздуха	Па	$P_{\text{в}}$	$1 \cdot 10^5$
8. Эквивалентный диаметр частиц мелкозернистого слоя [1]	м	d_3	0,002
9. Порозность мелкозернистого слоя [2]	м ³ /м ³	ε	0,528
10. Наружный диаметр несущего барабана	м	D_n	2,70
11. Толщина стенки несущего барабана	м	$\delta_{cm,n}$	0,02
12. Внутренний диаметр теплообменного барабана	м	d_m	2,54
13. Толщина стенки теплообменного барабана	м	$\delta_{cm,m}$	0,02
14. Теплопроводность стенки теплообменного барабана	Вт/(м·К)	λ_{cm}	17,5
15. Термическое сопротивление загрязнений стенки теплообменного барабана	(м ² ·К)/Вт	r_3	$2 \cdot 10^{-4}$
16. Тепловые потери в окружающую среду	%	Π	3
17. Коэффициент загрузки теплообменного барабана	–	ψ	0,4
18. Частота вращения барабанов	об/мин	n	2,41
Расчетные параметры			
1. Тепловая нагрузка аппарата	кВт	Q	4175
2. Расход воды	кг/ч	G_x	116320
3. Средняя движущая сила процесса теплопередачи	$^\circ\text{C}$	Δt_{cp}	324,1
4. Средняя температура кокса	$^\circ\text{C}$	$t_{z,cp}$	389,1
5. Температура стенки теплообменного барабана со стороны кокса	$^\circ\text{C}$	$t_{cm,z}$	116,2

Окончание таблицы

1	2	3	4
6. Коэффициент теплоотдачи от мелкозернистого слоя к стенке неподвижного теплообменного барабана за счет молекулярной теплопроводности воздуха	Вт/(м ² ·К)	$\alpha_{z,m}$	965,3
7. Коэффициент теплоотдачи от мелкозернистого слоя к стенке неподвижного теплообменного барабана за счет излучения	Вт/(м ² ·К)	$\alpha_{z,u}$	25,3
8. Полный коэффициент теплоотдачи от мелкозернистого слоя кокса к стенке неподвижного теплообменного барабана	Вт/(м ² ·К)	α_z	990,6
9. Эффективная теплопроводность мелкозернистого слоя кокса	Вт/(м·К)	λ_0	0,220
10. Угол наполнения барабана мелкозернистым слоем кокса	град.	φ	86,7
11. Время контакта частиц мелкозернистого слоя со стенкой теплообменного барабана	с	τ	6,0
12. Средняя высота мелкозернистого слоя кокса в теплообменном барабане	м	h	0,24
13. Число Фурье для мелкозернистого слоя кокса	–	Fo_z	$3,86 \cdot 10^{-5}$
14. Полный коэффициент теплоотдачи от мелкозернистого слоя кокса к стенке вращающегося теплообменного барабана	Вт/(м ² ·К)	α_z^*	69,5
15. Температура стенки теплообменного барабана со стороны воды	°С	$t_{cm,x}$	90,0
16. Число Рейнольдса для воды	–	Re_x	18130
17. Коэффициент конвективной теплоотдачи от стенки теплообменного барабана к воде	Вт/(м ² ·К)	α_x	760,9
18. Коэффициент теплопередачи	Вт/(м ² ·К)	K	58,7
19. Площадь поверхности теплопередачи	м ²	F	219,6
20. Длина теплообменного барабана	м	L	27,32

Ни рис. 3. приведены графики зависимости длины теплообменного барабана от частоты его вращения для различных значений коэффициента загрузки. Предельно допустимая длина теплообменного барабана, равная 30 м, что обусловлено практическими рекомендациями [2], на рис. 3 обозначена пунктирной линией.

Из рис. 2 следует, что максимальная интенсивность теплообменного процесса, соответствующая предельно допустимой температуре стенки $t_{cm,x} = 90^\circ\text{C}$, достигается для следующих режимных параметров работы аппарата: для $\psi = 0,3$ при $n = 1,64$ об/мин; для $\psi = 0,4$ при $n = 2,41$ об/мин; для $\psi = 0,5$ при $n = 4,67$ об/мин.

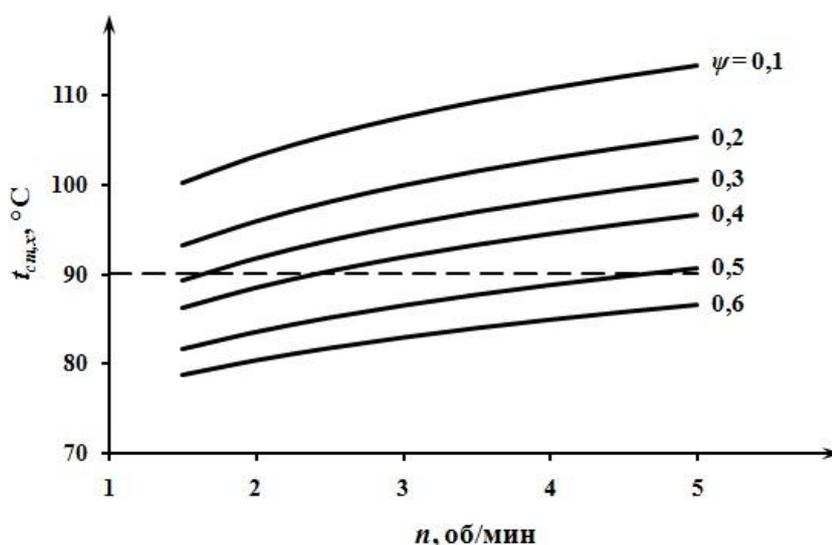


Рис. 2. Графики зависимости температуры стенки теплообменного барабана со стороны воды от частоты его вращения для различных значений коэффициента загрузки

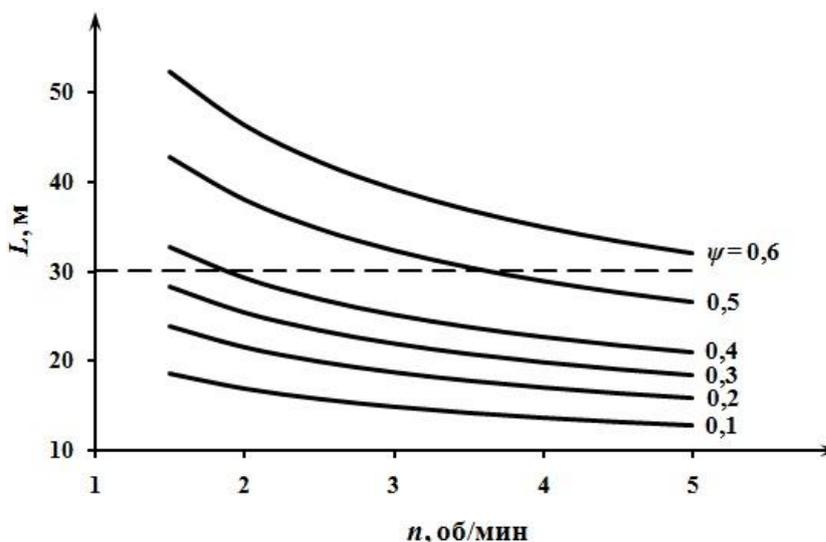


Рис. 3. Графики зависимости длины теплообменного барабана от частоты его вращения для различных значений коэффициента загрузки

Из рис. 3 следует, что для всех трех определенных из рис. 2 частот вращения теплообменного барабана при соответствующих им значениях коэффициента загрузки его длина будет равна $L = 27,32$ м.

Таким образом, определенные на основании результатов теоретического анализа теплообменного процесса с участием движущегося и перемешивающегося мелкозернистого слоя геометрические размеры и режимные параметры работы вращающегося барабанного холодильника для тушения кокса водой являются оптимальными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Глаголева, О. Ф. Кокс нефтяной. Лекция 4. Прокаливание нефтяного кокса / О. Ф. Глаголева // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. – 2009. – № 6. – С. 38–43.
2. Мучник, Д. А. Возможности улучшения качества кокса вне печной камеры: учеб.-практ. Пособие / Д. А. Мучник, В. И. Бабанин. – Москва: Инфра-Инженерия, 2014. – 368 с.
3. Справочник по теплообменникам: В 2 т. Т. 1 / пер. с англ. под ред. О. Г. Мартыненко [и др.]. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 352 с.
4. Рева, Л. С. Методы гидродинамического и теплового расчета теплообменников с зернистой насадкой: дис. ... канд. техн. Наук: 05.17.08 / Л. С. Рева. – Волгоград, 1984. – 310 с.
5. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – 10-е изд., стер., дораб. – Москва: ООО ТИД «Альяс», 2004. – 753 с.

ТРАНСПОРТ

УДК 621.22-546

П. А. Анипкин

РАЗРАБОТКА АППАРАТНО-ПРОГРАММНОЙ ПЛАТФОРМЫ ТРЕНАЖЕРА ДЛЯ ТРЕНИРОВКИ УПРАВЛЕНИЯ ТРАНСПОРТОМ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: pavelan99@gmail.com

Представлена разработка микропроцессорной системы и программы для персонального компьютера, реализующих симулятор руля гоночного автомобиля. Система построена на базе микроконтроллерного модуля STM32 Blue Pill, реализована возможность адаптации различных элементов управления под конкретные задачи обучения пилота. В качестве элементов управления используются кнопки, потенциометры, энкодеры.

Ключевые слова: тренировка; симуляция; управление транспортом; микроконтроллер; устройство управления.

P. A. Anipkin

DEVELOPMENT OF A HARDWARE AND SOFTWARE PLATFORM OF A SIMULATOR FOR TRAINING TRANSPORT MANAGEMENT

Volgograd State Technical University

The development of a microprocessor system and a program for a personal computer implementing a simulator of a racing car steering wheel is presented. The system is built on the basis of the STM32 Blue Pill microcontroller module, the possibility of adapting various controls to specific pilot training tasks is implemented. Buttons, potentiometers, encoders are used as controls.

Keywords: training; simulation; transport management; microcontroller; control device.

Введение

Методы обучения любым навыкам совершенствуются всю историю развития человечества. Развитие образовательных методик всегда сопряжено с развитием технологий, и кроме того само появление новых технологий способствовало появлению задач, которым требуется обучать. Такая тенденция проявляется и в обучении управлению различными видами техники.

На первом этапе развития методик обучения навыкам управления сложными механизмами действия оператора требовалось отрабатывать сразу на оборудовании. Следующая ступень – это классическое обучение из смеси аудиторных лекций и практик на реальном оборудовании. Такой метод обучения является основным и по сей день, хотя и имеет ряд недостатков. Так, при взаимодействии со сложными видами техники, что особенно специфично для авиации, существует проблема высокого износа элементов конструкции в процессе обу-

чения, которая несвойственна при работе в штатных режимах. Из-за этой проблемы сильно повышается стоимость обучения. На данный момент самым передовым методом тренировок является предварительное обучение на симуляторе и только после этого допуск к реальной технике. Основной причиной не столь быстрого распространения данного метода при обучении управлению более простой техникой является необходимость приобретения специального оборудования и программного обеспечения только для тренировочных задач. Кроме того, для некоторых видов техники на данный момент еще не существует готовых решений в виде контроллеров для учебных симуляторов, из-за чего в таких случаях нередко используется оборудование из смежных сфер деятельности, либо используется обучение непосредственно на оборудовании, что чревато частыми поломками этого оборудования и травматизмом обучающихся.

В случае тренировок на симуляторе элементы управления должны повторять реальное оборудование как можно точнее в тех критериях, которые важны при управлении данным видом техники. Использование симуляторов для целей обучения является достаточно прогрессивным методом, так как это значительно может снизить затраты. Например, при обучении пилотов, стоимость обучения на симуляторах в десятки раз ниже, при незначительном уменьшении качества, которое нивелируется уже незначительным количеством тренировок на реальном оборудовании. Поэтому актуально создание системы контроллеров, которые можно подстраивать под задачи обучения на определенном этапе тренировок взаимодействия с требуемой техникой. Во многих аспектах летной подготовки лишь некоторые конкретные навыки

тренируются на определенном этапе обучения. В таких случаях эффективно поэтапное обучение. Устройство может обеспечить эффективное обучение, хотя и ограниченное под конкретную тренировочную задачу.

Требования к оборудованию

Управление любой сложной техникой предполагает использование достаточно большого количества элементов управления, таких как кнопки, рычаги управления, многопозиционные переключатели. В исходной системе, реализующей симулятор управления оборудованием, основным инструментом для подобных задач на данный момент является модуль Leo Bodnar BU0836X, изображенный на рис. 1, основным недостатком которого является сложность в настройке.

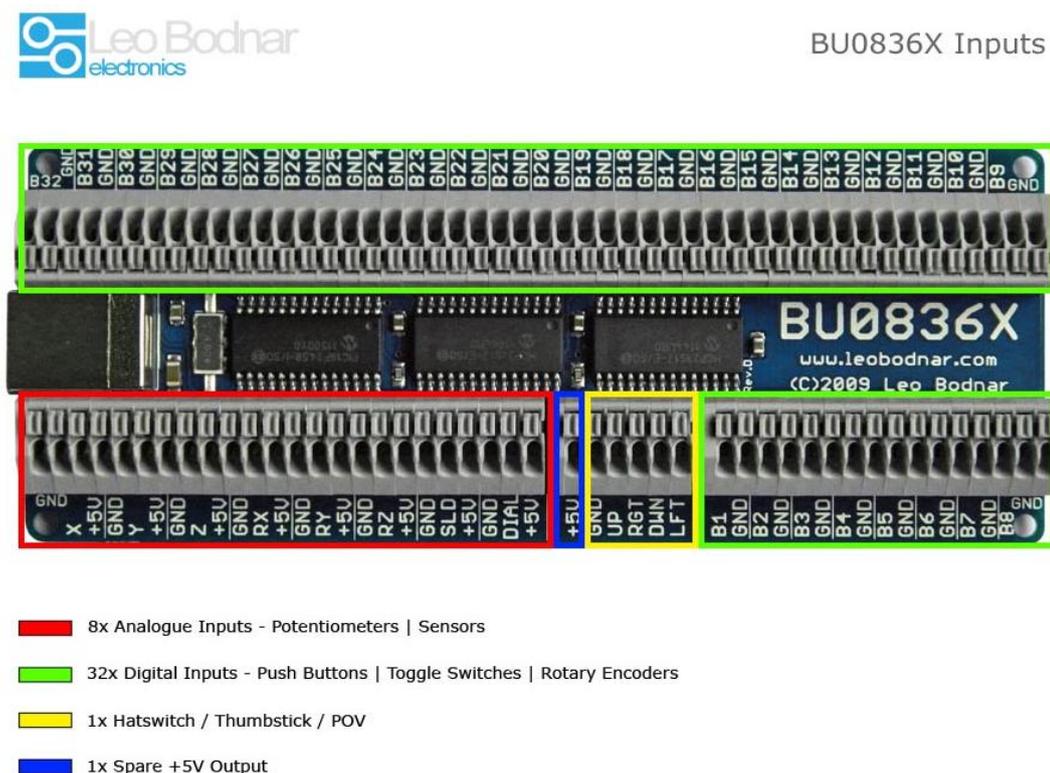


Рис. 1. Схема подключения платы Leo Bodnar BU0836X

Разрабатываемое решение должно соответствовать той же функциональности или превосходить уже существующий вариант. Текущими требованиями к системе является:

- количество управляющих устройств должно быть не менее 6 аналоговых осей с разрешением 12 бит;
- количество кнопок не менее 32;

– возможность расширения количества осей с помощью применения на осях энкодеров, а не только аналоговых входов;

– соединение с компьютером с помощью протокола USB;

– низкая стоимость изготовления, возможно, за счет использования готовых аппаратных модулей;

- возможность конфигурации под требуемые элементы управления с их последующим возможным изменением;
- понятный интерфейс программы настройки системы, для того чтобы была возможность после модульного изменения произвести доработку силами сотрудников центра тренировок.

Разработка системы

Для решения поставленных задач был выбран микроконтроллер STM32F103 с использованием платы Blue pill (рис. 2), так как он имеет достаточное количество цифровых и аналоговых входов.

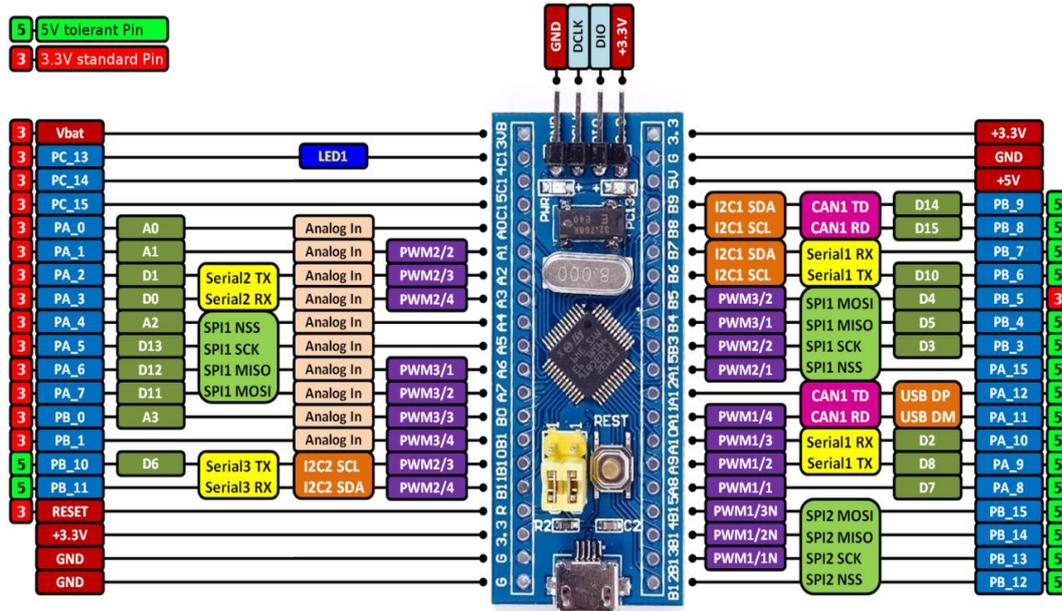


Рис. 2. Выводы платы Blue pill

Для данной отладочной платы был создан тестовый прототип, представляющий из себя матрицу кнопок с двумя потенциометрами (рис. 3), который позже был преобразован в пе-

чатную плату со стандартизированными креплениями автомобильного руля (рис. 4). Был собран прототип, изображающий руль гоночного автомобиля класса LMP1 (рис. 5).

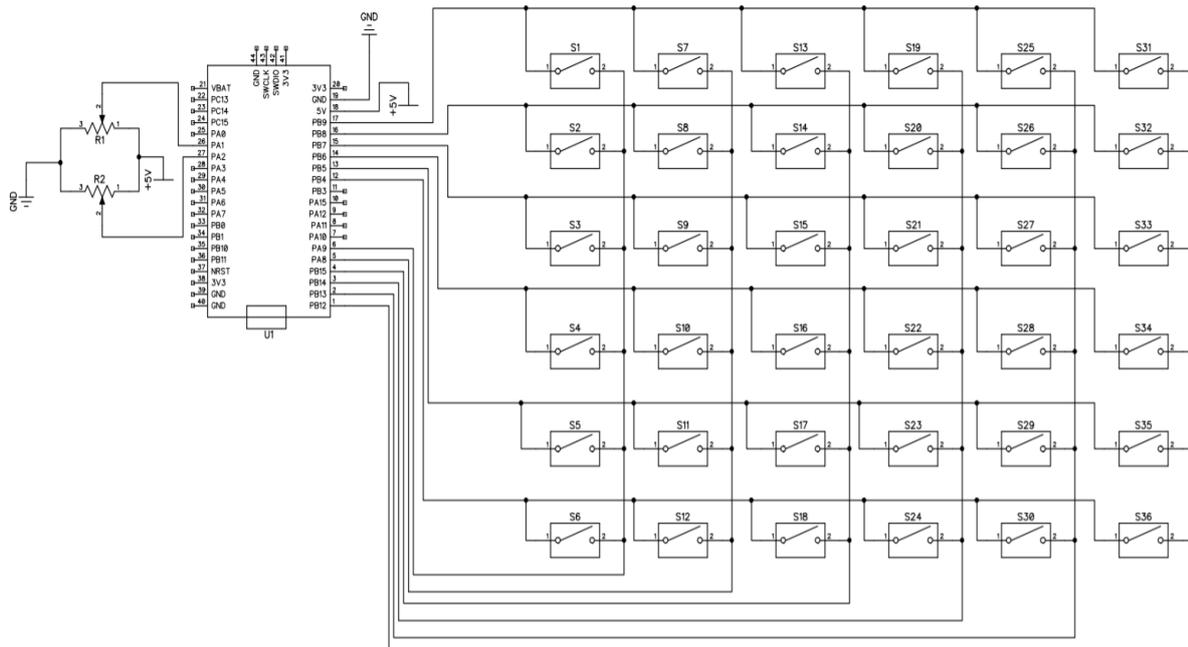


Рис. 3. Матричное подключение кнопок

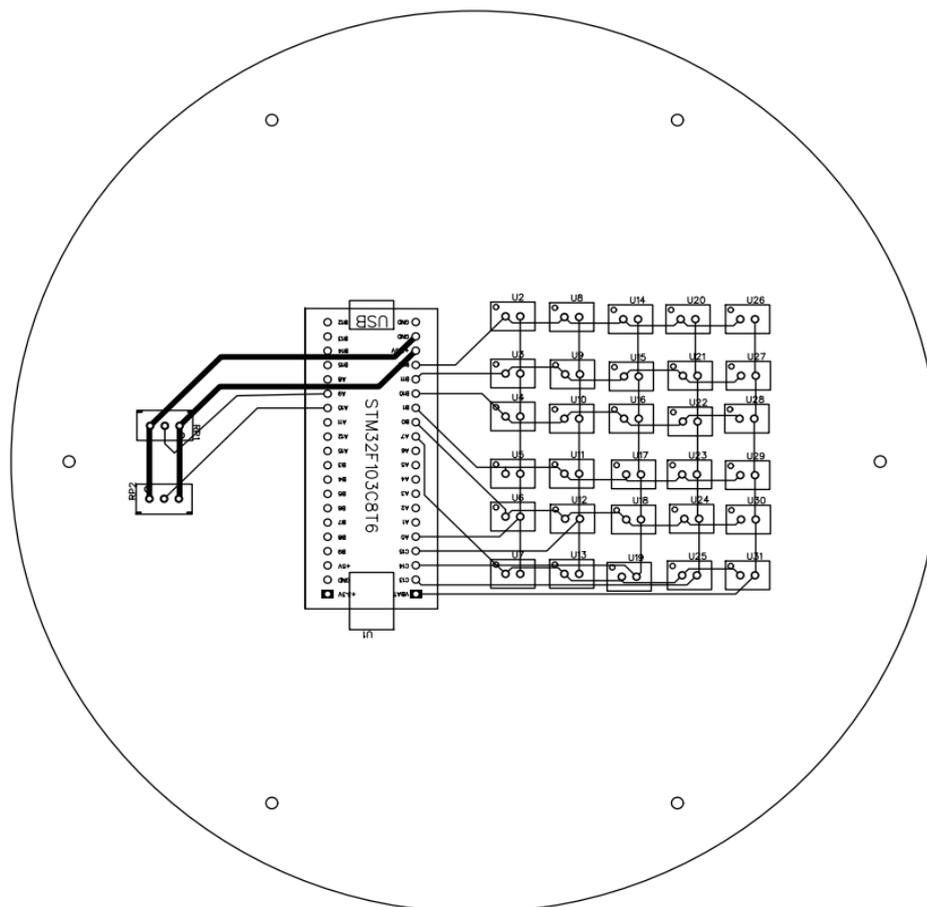


Рис. 4. Печатная плата системы



Рис. 5. Общий вид прототипа

Как было сказано ранее, для работы с настройкой данной системы была применена отдельно созданная программа, которую можно видеть на рис. 6. Каждая вкладка настройки отвечает за свои функции, такие как назначение выводов отладочной платы для выполнения тех

или иных задач, настройка осей, проверка кнопок и назначение на них определенных функций, использование аналоговой оси как множественности кнопок, конфигурирование энкодеров и настройки взаимодействия системы с компьютером.

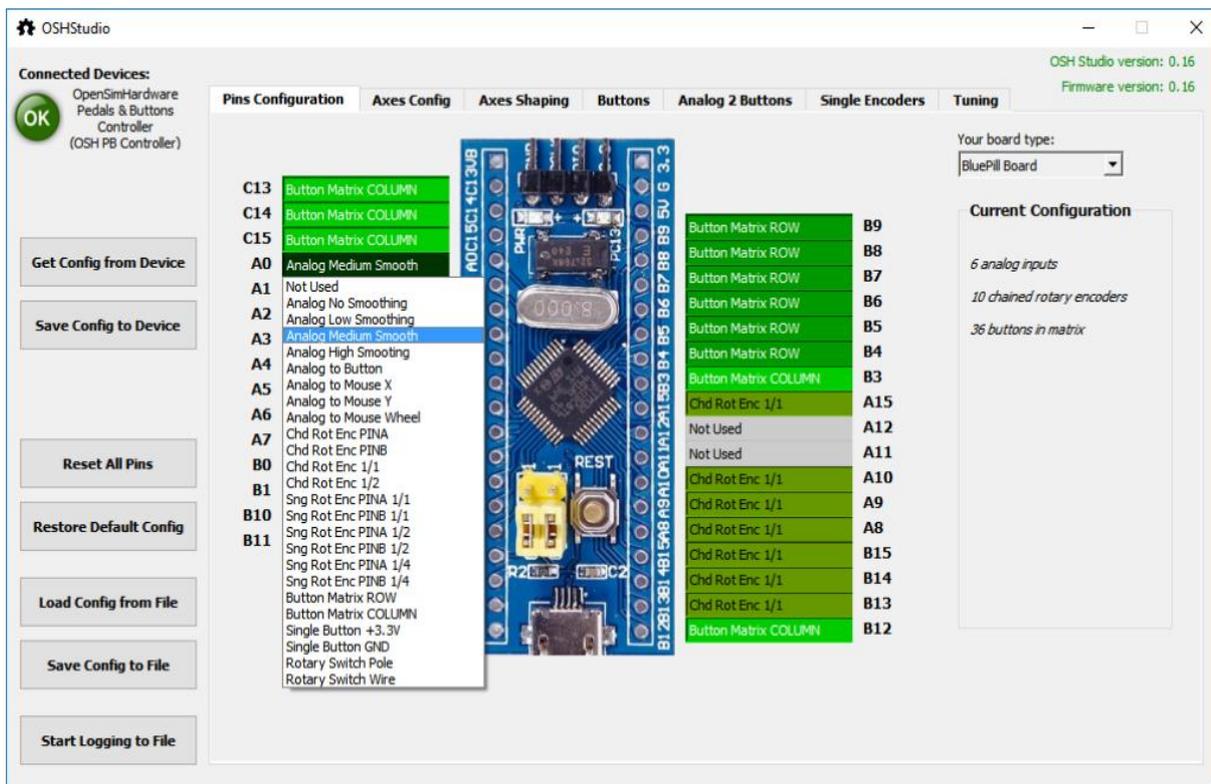


Рис. 6. Внешний вид программы

Рассмотрим отдельно использование каждого из возможных элементов управления симулятора в их применимости к воссозданию элементов управления реального гоночного автомобиля.

Самым базовым элементом можно считать кнопку. Так как сейчас основная масса устройств в транспорте также управляется кнопками, то используя похожую либо даже оригинальную

кнопку, можно получить тактильную информацию и информацию по расположению тех или иных кнопок. Ярким примером может служить руль в гоночных болидах, для воссоздания которого и был разработан прототип, представленный на рис. 6. В данном случае кнопки используются как для работы с радиосистемой, так для активации дополнительной силовой установки в соревнованиях F1.

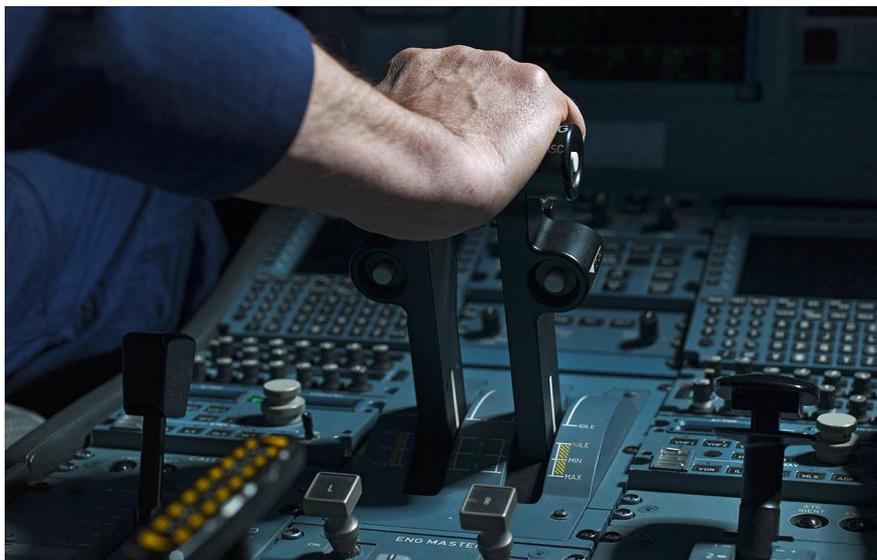


Рис. 7. Ручка управления двигателем

Аналоговые оси могут быть представлены двумя основными сенсорами, а именно потенциометром (переменным резистором), в случае если основная измеряемая характеристика – перемещение, и тензодатчиком, в том случае, если основной измеряемой характеристикой является усилие. Примером задачи, в которой используется перемещение, является РУД (ручка управления двигателем) в самолете, которая регулирует обороты двигателя. Пример ее

внешнего вида можно увидеть на рис. 7. Другой пример – ручка управления тормозным балансом, которую можно увидеть в нижней левой части прототипа на рис. 5. Примером же использования измерения усилия можно указать автомобильные педали. В данном случае используется тензодатчик совместно с упругими элементами, которые производят на него давление. Внешний вид данной системы можно увидеть на рис. 8.



Рис. 8. Педали для автосимулятора

Частично аналоговые оси могут заменить энкодеры, так как в случае с энкодером обрабатывается каждый импульс и направление, что может дать даже большую точность в задачах с незначительным перемещением вала управляющей системы, либо при изменении значений многооборотной подстройкой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров, К. К. Электротехнические чертежи и схемы / К. К. Александров, Е. Г. Кузьмина. – М.: Радио и связь, 1987. – 567 с.

2. Трухин, М. П. Основы компьютерного проектирования и моделирования радиоэлектронных средств : лабораторный практикум / М. П. Трухин. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2015. – 136 с.

3. David J Allerton. The impact of flight simulation in aerospace / David J Allerton - Aeronautical Journal, 2010.

4. Vlakveld W.P. The use of simulators in basic driver training. Workshop in Humanist TFG on the Application of New Technologies to Driver Training, Brno, Czech Republic. / Vlakveld W.P. 2005

5. Selander, H., Stave, C., Willstrand, T.D. Driving simulator-based training to improve self-rating ability of driving performance in older adults – a pilot study, 2019

УДК 621.433.04:504

*А. И. Нефедьев¹, А. Г. Трясогузов², В. Г. Шаронова³***КОНДЕНСАТОРНЫЙ МОДУЛЬ ЗАЖИГАНИЯ ДЛЯ ДВС**¹Волгоградский государственный технический университет²АО «Максимум», г. Санкт-Петербург³Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

e-mail: nefediev@rambler.ru

В статье приводятся результаты разработки конденсаторно-тиристорного модуля зажигания и рассматриваются особенности его работы в пусковом и стационарном режимах. Предложена структурная схема модуля конденсаторно-тиристорного модуля зажигания, а также приведены амплитудно-временные диаграммы напряжений и токов, в цепях модуля зажигания. Надежность работы системы зажигания газового двигателя внутреннего сгорания зависит от надежности искрообразования в его цилиндрах. Результаты исследования показали, что применение конденсаторно-тиристорного модуля зажигания позволяет получить искровой разряд с достаточно высокой длительностью и с высокой скоростью нарастания напряжения во вторичной цепи катушки зажигания.

Ключевые слова: конденсаторный модуль зажигания, свеча зажигания, катушка зажигания, газозвдушная смесь, искровой разряд, ДВС.

*A. I. Nefed'ev¹, A. G. Tryasoguzov², V. G. Sharonova³***CONDENSER IGNITION MODULE FOR COMBUSTION ENGINE**¹Volgograd State Technical University²AO «Maximum», St. Petersburg³Penza State University of Architecture and Construction

The article presents the results of the development of a capacitor-thyristor ignition module, and discusses the features of its operation in starting and stationary modes. A block diagram of the module of the capacitor-thyristor ignition module is proposed, as well as amplitude-time diagrams of voltages and currents in the circuits of the ignition module. The reliability of the ignition system of a gas internal combustion engine depends on the reliability of sparking in its cylinders. The results of the study showed that the use of a capacitor-thyristor ignition module makes it possible to obtain a spark discharge with a sufficiently long duration and with a high rate of voltage rise in the secondary circuit of the ignition coil.

Keywords: capacitor ignition module, spark plug, ignition coil, gas-air mixture, spark discharge, internal combustion engine.

Введение жестких экологических требований по нормам токсичности вынуждает производителей автотранспортных средств перевести двигатели внутреннего сгорания с бензина различных марок и дизельного топлива на альтернативные виды топлива – сжатый или сжиженный природные газы.

Проблемы при использовании в ДВС газозвдушной смеси связаны с низкой скоростью горения и резким снижением скорости сгорания природного газа по мере обеднения газозвдушной смеси, что является одной из причин повышения выбросов несгоревших углеводородов, снижения мощности и КПД газового двигателя [1; 2].

Преимущества КТМЗ в наибольшей мере проявляются при поджоге обедненных и бедных газозвдушных смесей. Это обусловлено

высокой скоростью нарастания вторичного напряжения, большой плотностью тока плазменного разряда емкостной фазы пробоя в увеличенном зазоре свечи и позволяет в течение первой короткой сильноточной индуктивной фазы разряда поджечь существенно больший объем топливозвдушной смеси [3].

Конденсаторные системы зажигания создают между электродами свечи зажигания дуговой разряд, что приводит к возникновению первоначального очага горения большого объема и его интенсивного расширения в течение второй слаботочной длительной индуктивной фазы разряда приводит к большей скорости нарастания давления в цилиндре и, соответственно, увеличению мощности и вращающего момента на холостых, малых, средних, больших, переходных режимах работы двигателя и частичной нагрузке [4].

Формирование дугового разряда в зазоре свечи зажигания позволяет увеличить эффективную длину положительного столба разряда, повысить температуру в искровом канале и выделяемую в увеличенном объеме межэлектродного зазора энергию.

Также полезной функцией системы зажигания является увеличение мощности искрового разряда при пуске двигателя.

Наличие мощного (пускового) режима с увеличенной плотностью тока во вторичной обмотке катушки зажигания, большей поверхностью и объемом иницирующего разряда, позволяет надежно запускать двигатель при температуре до $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ без предварительного подогрева топливовоздушной смеси [5; 6].

Для решения этих задач был разработан конденсаторный модуль зажигания, схема которого представлена на рис. 1.

При включении напряжения бортовой сети ($U_{\text{БС}}$) начинает работать преобразователь напряжения (ПН), и заряжает конденсатор $C1$ и $C2$ до уровня 320–360 В. Конденсатор $C2$ включен параллельно конденсатору $C1$ через

тиристор $VS1$. В момент подачи питания конденсатор $C3$ разряжен, и ток заряда конденсатора $C3$ протекает по цепи $U_{\text{БС}}$ – конденсатор $C3$ – резистор $R3$ – база-эмиттерный переход транзистора $VT1$ – управляющий переход тиристора $VS1$ – общий провод. При этом транзистор $VT1$ открывается, и через управляющий переход тиристора $VS1$ протекает ток, ограниченный резистором $R2$. Параметры конденсатора $C3$ и резисторов $R3$ и $R4$, выбраны такими, чтобы обеспечить время открытого состояния тиристора $VS1$ в течение 3–5 с. Подключение конденсатора $C2$ параллельно конденсатору $C1$ позволяет существенно увеличить мощность искрового разряда в момент запуска двигателя.

При приходе запускающего импульса от блока управления двигателем (БУ) формирователь импульсов формирует импульс запуска тиристора $VS2$. При этом конденсатор $C1$ разряжается через первичную обмотку катушки зажигания ($K3$), при этом амплитуде тока возрастает. Скорость нарастания напряжения на первичной обмотке катушки зажигания определяется временем включения тиристора $VS1$.

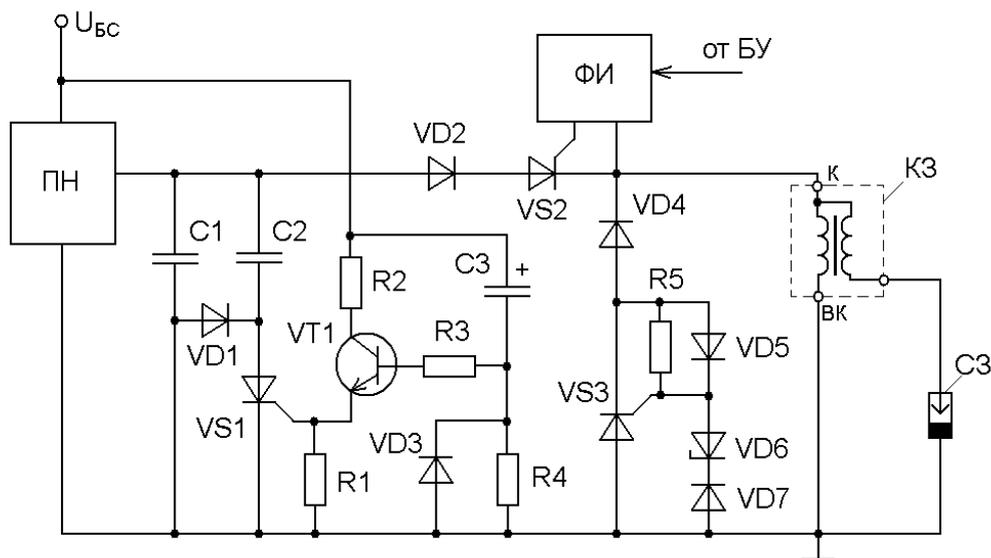


Рис. 1. Схема конденсаторного модуля зажигания

В момент, когда напряжение на конденсаторе $C1$ (а в пусковом режиме и на конденсаторе $C2$) становится равным нулю, ток в колебательном контуре, образованном конденсатором $C1$ и первичной обмоткой катушки зажигания, достигает максимального значения. Далее напряжение на первичной обмотке $K3$ меняет полярность из-за появления ЭДС самоиндукции, и ток в колебательном контуре сохраняет свое

первоначальное направление. Происходит перезаряд конденсатора $C1$ ($C2$) через диод $VD1$. При достижении на этих конденсаторах напряжения обратного знака 51–56 В пробивается стабилитрон $VD6$, который открывает тиристор $VS3$ и напряжение обратного знака конденсатора $C1$ ($C2$) прикладывается к тиристорам $VS2$. Это приводит к его быстрому выключению. После выключения тиристора $VS2$ начинается

заряд конденсатора $C1$ (в пусковом режиме и $C2$) до рабочего напряжения. После срабатывания тиристора $VS3$ уменьшающийся по значению ток начинает протекать по цепи: зажим ВК катушки зажигания – тиристор $VS3$ – диод $VD4$ – зажим К катушки зажигания, уменьшаясь по величине. Длительность иницирующего разряда зависит от параметров резонансной первичной низковольтной цепи,

включающей первичную обмотку катушки зажигания и накопительный конденсатор $C1$ ($C2$). После уменьшения тока в контуре и заряда конденсатора $C1$ (в пусковом режиме и $C2$) до рабочего напряжения модуль зажигания готов к формированию следующего иницирующего разряда.

Временные диаграммы работы модуля зажигания приведены на рис. 2–4.

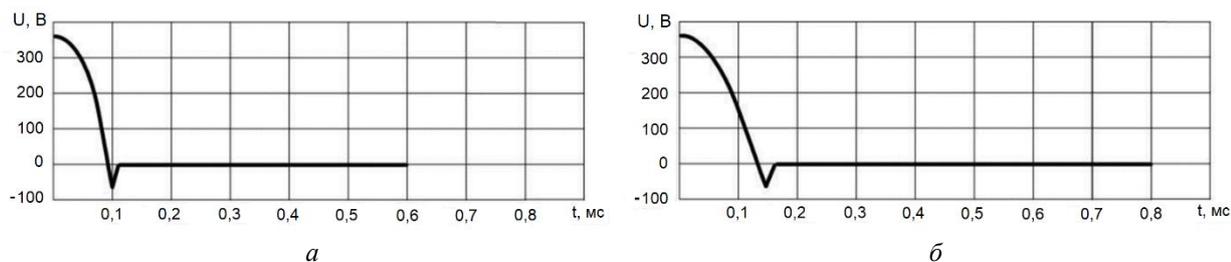


Рис. 2. Временные диаграммы напряжения:
a – в нормальном режиме на конденсаторе $C1$; *б* – в пусковом режиме на конденсаторах $C1$ и $C2$

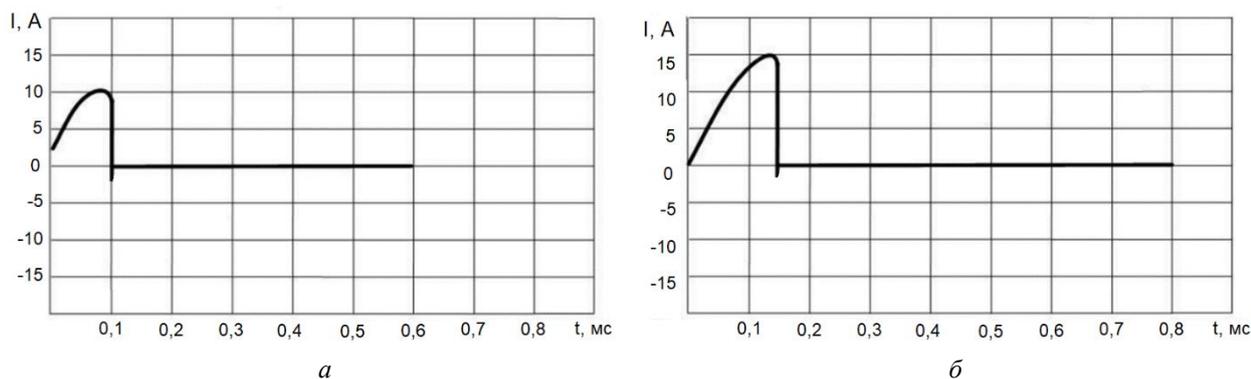


Рис. 3. Временные диаграммы тока через тиристор $VS2$:
a – в нормальном режиме, *б* – в пусковом режиме

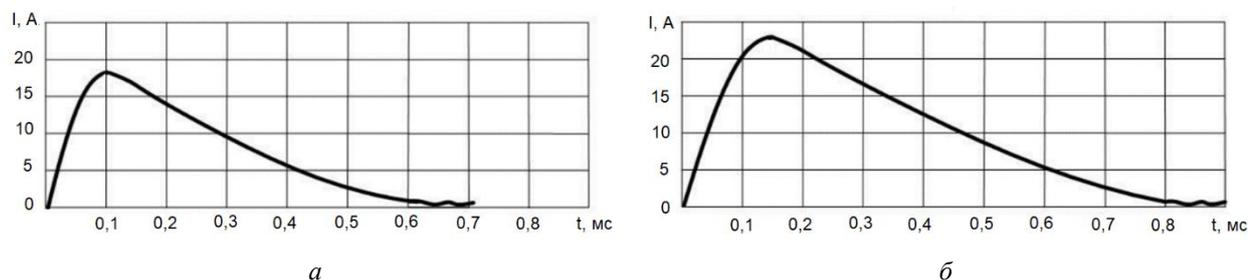


Рис. 4. Временные диаграммы тока через первичную обмотку катушки зажигания:
a – в нормальном режиме; *б* – в пусковом режиме

Разработанный конденсаторный модуль зажигания имеет хорошую повторяемость. Высокая надежность модуля зажигания обеспечивается выбором достаточных коэффициентов запаса по нагрузке всех элементов и специальными схемотехническими решениями. Улучшены экономические и экологические показате-

ли двигателя за счет обеспечения мощного искрового разряда.

Конденсаторный модуль зажигания может быть установлен на автомобиле с центральным, распределенным и непосредственным впрыском топлива, на газобаллонные автомобили (при этом происходит существенно меньшее

снижения мощности двигателя при переходе с бензина на газ, становится возможным запуск двигателя непосредственно на газе), на автотехнику в северном исполнении, спецавтомобили и автомобили с большим сроком эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ютт, В. Е. Электрооборудование автомобилей: учебник для студентов вузов / В. Е. Ютт. – М. : Транспорт, 1995. – 304 с
2. Трясогузов, А. Г. Конденсаторно-тиристорные модули зажигания для ДВС / А. Г. Трясогузов, Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: эксплуатация и развитие автомобильного транспорта : матер. XII междунар. заочн. науч.-техн. конф. (г. Пенза, 15 апр. 2016 г.) / под общ. ред. Э. Р. Домке ; ФГБОУ ВО «Пензенский гос. ун-т архитектуры и строительства», Автомобильно-дорожный ин-т. – Пенза, 2016. – С. 185–192.

3. Шаронов, Г. И. Конденсаторные модули зажигания для двигателей внутреннего сгорания: монография / Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев, Л. А. Симонова; Казанский федеральный ун-т, Набережночелнинский ин-т. – Казань, 2016. – 138 с.

4. Нефедьев, А. И. Development of Microprocessor-Based Car Engine Control System / А. И. Нефедьев, Г. И. Шаронов // Procedia Engineering. Vol. 150 : 2nd International Conference on Industrial Engineering (ICIE-2016) / ed. by A.A. Radionov. – [Elsevier publishing], 2016. – P. 1341–1344.

5. Шаронов, Г. И. Микропроцессорная система управления силовым агрегатом автомобиля / Г. И. Шаронов, А. И. Нефедьев // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2016. – № 3. – 2–4.

6. Патент РФ на ПМ №116578, МПК F02P 3/08. Коммутатор системы зажигания двигателя внутреннего сгорания / А. И. Нефедьев, Г. И. Шаронов; – № 2011150378/07; заявл. 09.12.2011; опубл. 27.05.2012; Бюл. № 15.

УДК 629.3. 027

*Д. В. Бусалаев, М. В. Ляшенко, В. В. Шеховцов
П. В. Потапов, М. В. Морсков, Е. В. Клементьев*

СТОЙКА ПЕРЕДНЕЙ ПОДВЕСКИ АВТОМОБИЛЯ С УЛУЧШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ ГАШЕНИЯ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: shehovtsov@vstu.ru

В статье рассмотрены примеры технических решений устройств крепления пружинной стойки передней подвески легкового автомобиля. Приведено описание предложенного авторами технического решения устройства крепления стойки передней подвески автомобиля с улучшенными вибро- и шумоизолирующими свойствами при гашении низкоамплитудных высокочастотных колебаний, а также с улучшением управляемости и устойчивости автомобиля при малых углах увода управляемых колес.

Ключевые слова: устройство крепления, пружинная стойка подвески, вибро- и шумоизолирующие свойства, низкоамплитудные высокочастотные колебания, управляемость и устойчивость автомобиля, малый угол увода управляемых колес.

*D. V. Busalaev, M. V. Lyashenko, V. V. Shekhotsov,
P. V. Potapov, M. V. Morskov, E. V. Klementiev*

CAR FRONT SUSPENSION STRUT WITH IMPROVED CHARACTERISTICS OF DAMPING HIGH-FREQUENCY VIBRATIONS

Volgograd State Technical University

This article describes variants of technical solutions of the upper mount for the car front spring strut suspension. Also, description of the scheme of the upper mount proposed by authors is presented. This upper mount has improved vibration and noise isolation characteristics in low-amplitude high-frequency vibration zone and provides better car steering and stability at small slip angles of steering wheels.

Keywords: strut upper mount, spring suspension strut, vibration and noise protection characteristics, car steering and stability, small slip angle.

Введение

В подвеске легкового автомобиля важное значение для обеспечения плавности хода, шумо- и виброизоляции салона имеет конструкция

пружинной стойки передней подвески. В конструкцию крепления этой стойки обязательно включаются упругие и демпфирующие элементы из эластомеров. В разных технических реше-

роваться, тем самым снижать уровень вибронагруженности и поглощать часть колебательной энергии;

- при ударном нагружении расположенная между металлическим верхним тарельчатым ограничителем хода и верхней частью металлического кольцеобразного корпуса 1 верх-

няя часть упругого кольца 12 может срезаться.

Следующее техническое решение резино-металлической опоры передней подвески автомобиля направлено на снижение габаритных размеров и массы верхней опоры стойки подвески (рис. 2) [7], а также улучшение ее шумо- и виброизолирующих свойств.

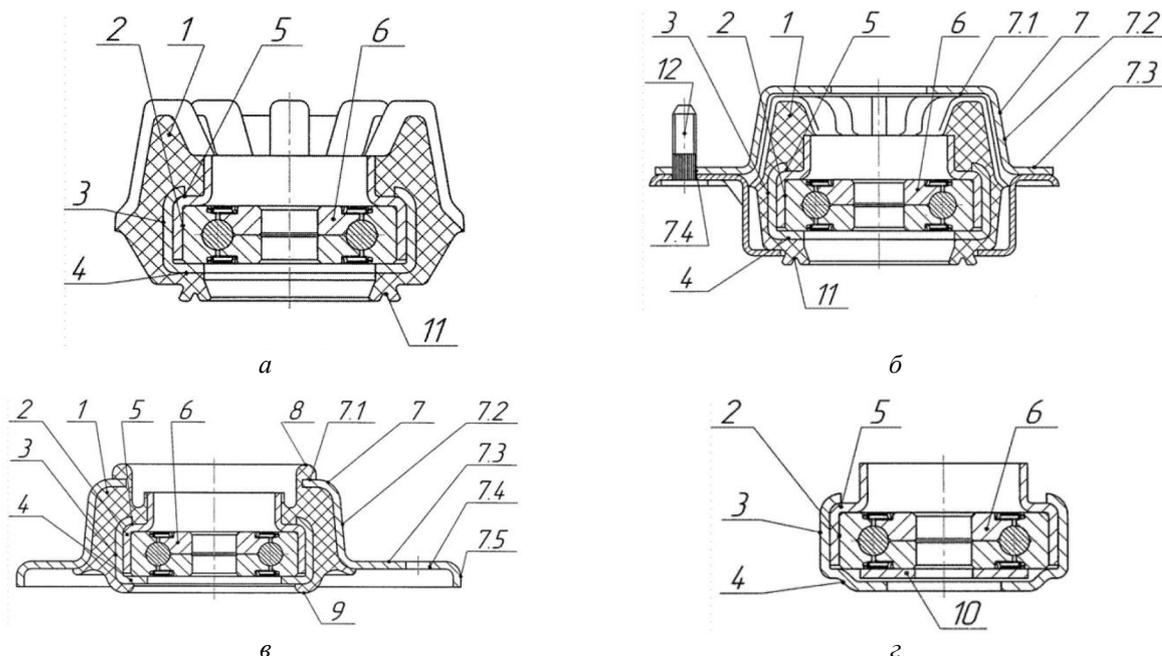


Рис. 2. Резино-металлическая опора стойки:
а – конструкция опоры; б, в, г – опора, помещенная в наружные корпуса различных форм

Конструкция верхней опоры, изображенная на рис. 2, в, состоит из наружного корпуса 7, имеющего коническую 7.2 и фланцевую часть 7.3, на которой выполнены отверстия 7.4 для установки крепежных элементов 12. Во внутреннем объеме конической части наружного корпуса 7 расположен внутренний корпус 2, выполненный в виде двухцилиндровой втулки и дополнительной втулки 3, имеющей отбортовку 4. Дополнительная арматура 3 и внутренний корпус 2 соединены между собой с помощью завальцовки 5, расположенной со стороны, противоположной отбортовке 4. Во внутреннем объеме, который образовался между большей по диаметру частью внутреннего корпуса 2 и дополнительной втулкой, помещен подшипник 6. Резиновый виброизолятор 1 неразъемно соединен с корпусом 2 и 7 и дополнительной арматурой 3.

Данная конструкция опоры, в отличие от известных, исключает деформирование перемычки, соединяющей цилиндрические части внутреннего корпуса, которое возникает при

фиксации подшипника в корпусе с помощью завальцовки. Кроме этого, появляется возможность увеличения грузоподъемности опоры без увеличения ее геометрических размеров и роста жесткости резинового виброизолятора. Это возможно за счет перевода деформации виброизолятора со сдвига на сжатие путем как увеличения площади перемычки, соединяющей цилиндрические части внутреннего корпуса 2, так и выполнением отбортовки 7.1 на верхней части наружного корпуса 7. Кроме увеличения грузоподъемности опоры, предлагаемая конструкция позволяет обеспечить лучшую защиту от дорожных условий подшипника качения. Это достигается (рис. 2, в) как за счет уплотнения между опорой и верхней чашкой пружины, которое выполнено в виде выступов из резины 9, которые неразъемно расположены на отбортовке 4, так и за счет шайбы 10 (рис. 2, г), которая располагается в объеме, образованном торцевыми поверхностями подшипника 6 и отбортовкой 4, и вращается вместе с подвижным кольцом подшипника.

Это техническое решение обладает следующим недостатком: резиновый виброизолятор 1 опоры выполнен моноблочным, моноблок резины находится в замкнутом объеме и не имеет возможности деформироваться с заполнением свободных объемов, его упругие и га-

сящие свойства одинаковы по осевому и боковым направлениям, поэтому они адаптивно не изменяются при действии вибронгрузок с разными амплитудами и частотами.

В патенте на изобретение [8] также описана опора подвески транспортного средства (рис. 3).

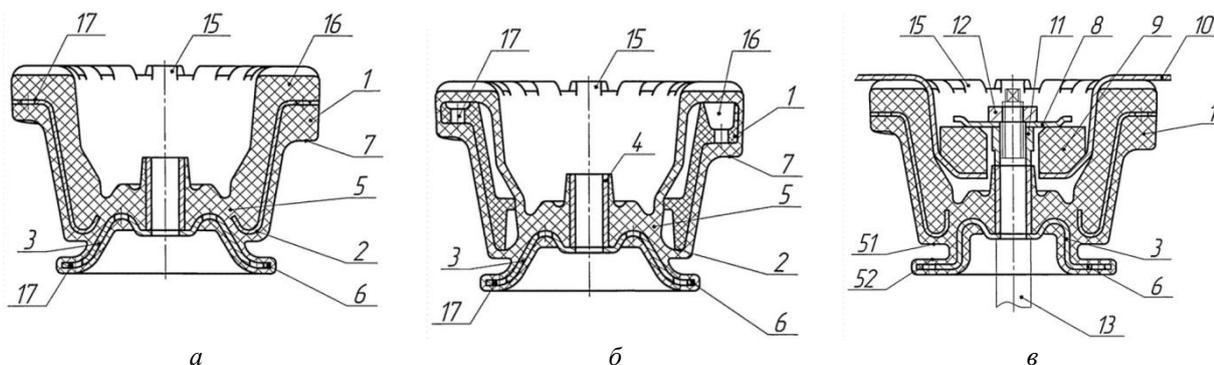


Рис. 3. Опора подвески транспортного средства:
а – поперечный разрез опоры с металлическим кольцевым элементом; *б* – с кольцевым элементом из композиционного материала или пластмассы; *в* – схема крепления опоры в подвеске

Опора состоит из наружного кольцевого элемента 1, на котором выполнено посадочное место 7 под подшипник или под пружину.

Во внутреннем пространстве кольцевого элемента расположена втулка 4, нижняя торцевая поверхность которой соединена с арматурой 3, на которой выполнена фланцевая часть 6. На нижней части кольцевого элемента выполнена поверхность 2, которая имеет участки, повторяющие участки арматуры 3, т. е. имеющие так же, как и арматура 3, или конические участки, или цилиндрические, или их комбинацию. При этом фланцевая часть 6 арматуры 3 располагается ниже торцевой поверхности кольцевого элемента 1. Все элементы опоры неразъемно соединены с эластичным элементом 5. На эластичном элементе 5 в верхней части опоры могут быть выполнены оребрения 15 или вогнутости 16, также могут быть выполнены на кольцевом элементе 1, который изготовлен из композиционного материала, как это изображено на рис. 3, *б*. На кольцевом элементе 1 и арматуре 3 может быть выполнена перфорация 17.

Опора при ее установке на автомобиль крепится на шток 13 гайкой 11 и комплектуется ограничителем хода отбоя 8 и виброизолятором (подушкой) 9, которые фиксируются гайкой 12 к брызговику кузова автомобиля 10. Поверхности арматуры 3 и кольцевого элемента 1, а также наклон фланцевой части 6 выполняются таким образом, чтобы при приложении осевой

нагрузки, возникающей при ходах сжатия подвески, деформация эластичного элемента происходила вначале в виде сдвига, при котором осевая жесткость опоры минимальна. С увеличением нагрузки, в результате соприкосновения эластичного материала на поверхностях 51 и 52, происходит его деформация сжатия, т. е. деформация части эластичного элемента, расположенного между фланцевой частью арматуры 3 и торцевой поверхностью кольцевого элемента 1. Жесткость опоры при этом возрастает. Для увеличения диапазона изменения жесткостных свойств опоры, на поверхностях части эластичного элемента, расположенных на плоскостях 51 и/или 52, могут быть выполнены оребрения 15. Кроме этого, фланцевая часть арматуры 3 является ограничителем величины деформации эластичного элемента при ходе сжатия подвески. В случае конических поверхностей (рис. 3, *а* и *б*) при ходе сжатия подвески происходит одновременная деформация эластичного элемента в виде сдвига и сжатия. При этом, если нагрузка незначительна, то основной вклад в осевую жесткость опоры вносит деформация сдвига, а с увеличением нагрузки – деформация сжатия. В результате этого опора – мягкая при небольших нагрузках, и жесткая – при значительных.

Это техническое решение уже предполагает некоторую адаптационную приспособляемость упругих и диссипативных свойств виброизолятора стойки подвески к действию вибронгру-

зок с разными амплитудами и частотами. Однако и здесь виброизолятор выполнен моноблочным, и его упругие и гасящие свойства одинаковы по осевому и боковым направлениям, поэтому его адаптационные свойства ограничены.

2. Описание предложенного технического решения

На основе анализа приведенных выше конструктивных решений устройств крепления пружинной стойки подвески автомобиля авторами предложено новое техническое решение [9], направленное на устранение их перечисленных выше недостатков.

Устройство крепления пружинной стойки подвески автомобиля 1 (рис. 4, 5) пружинной стойки 2 подвески автомобиля содержит: верхнюю опору 3 с элементами крепления 4 к кузову (не показан), корпусом 5, упругим элементом 6, буфером отбоя 7, ограничителем хода отбоя 8, центральной втулкой 9 упругого элемента, в которой закреплен хвостовик 10 штока 11 стойки, тарельчатым ограничителем хода сжатия 12, опорный элемент 13 с чашкой 14

пружины 15, в которой (чашке 14) выполнено винтовое посадочное седло 16 под верхний виток пружины 15 и опорой 17 буфера 18, который зафиксирован в опоре 17 своей верхней частью, подшипник 19, установленный в посадочном гнезде 20 упругого элемента 6 и опирающийся на опорный элемент 13.

Корпус 5 (рис. 4) верхней опоры 3 устройства крепления 1 пружинной стойки 2 содержит крепежный фланец 21 с элементами крепления 4, опирающийся на кузов автомобиля (не показан), опорную плоскость 22 и конусную часть 23.

Установленный в корпусе 5 упругий элемент 6 верхней опоры 3 содержит посадочное гнездо 20 подшипника 19, а также армирующий стакан 24 с площадкой 25 посадочного гнезда 20 подшипника 19, при этом стакан 24 делит массив упругого элемента 6 на две части: наружную 26, которая в своей нижней части содержит верхнюю прокладку 27 посадочного гнезда 20, и внутреннюю 28, нижняя часть которой содержит буфер сжатия 29 с волнообразной профилированной поверхностью 30, образующей с ограничи-

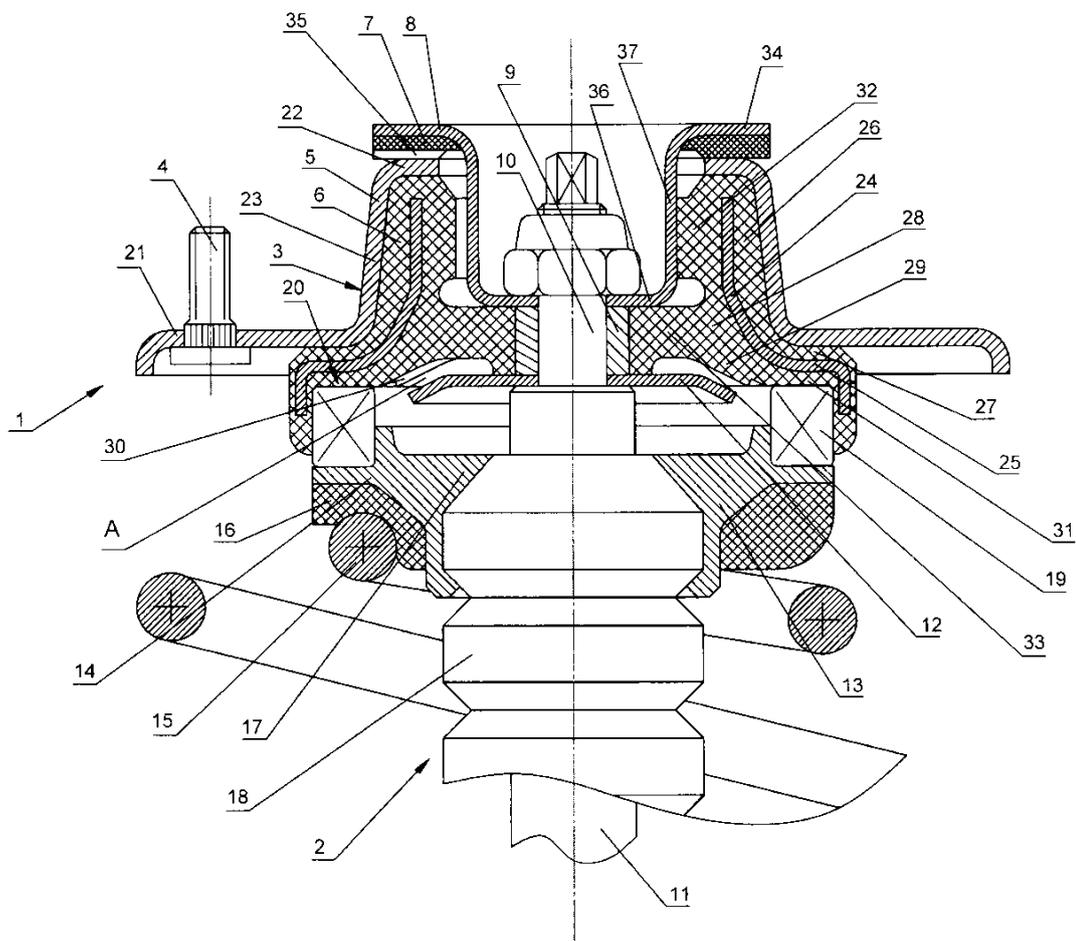


Рис. 4. Устройство крепления пружинной стойки подвески автомобиля в разрезе

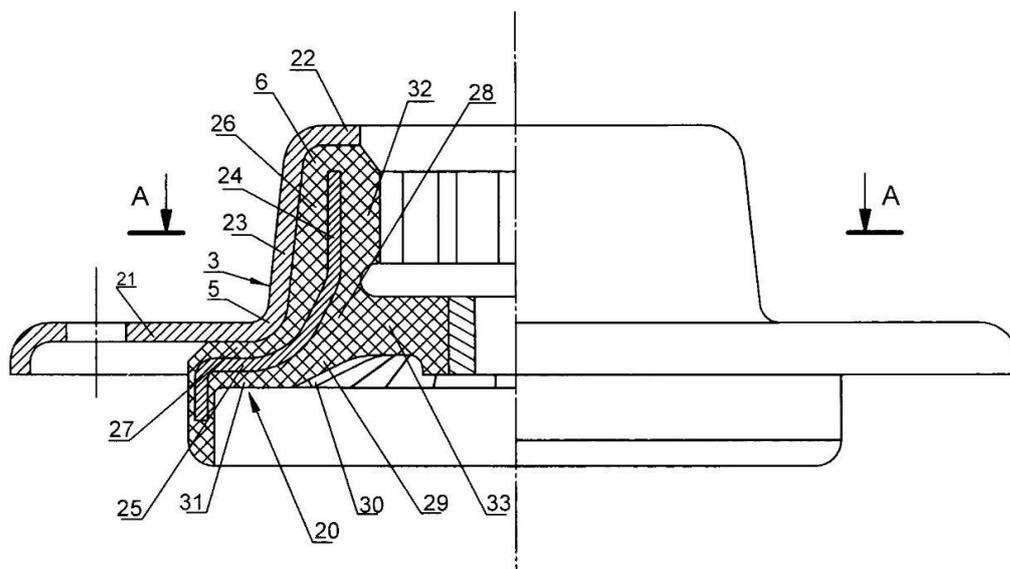


Рис. 5. Верхняя опора устройства крепления пружинной стойки подвески автомобиля

телом хода сжатия кольцевой зазор А, и нижней прокладку 31 посадочного гнезда 20, верхняя – цилиндрическую втулку 32, внутренняя поверхность которой выполнена волнообразной, а часть упругого элемента 6 между буфером 29 и втулкой 32 выполнена в виде диафрагмы 33.

По торцам центральной втулки 9 (рис. 4) упругого элемента 6 установлены тарельчатый ограничитель хода сжатия 12, образующий кольцевой зазор А с волнообразной профилированной поверхностью 30 буфера сжатия 29 упругого элемента 6, и ограничитель хода отбоя 8 с опорным фланцем 34, опирающимся на имеющий дискообразную форму и волнообразную профилированную поверхность 35 буфер отбоя 7 с плоской посадочной частью 36 и цилиндрической частью 37, контактирующей с выступами волнообразной внутренней поверхности 38 (рис. 6) цилиндрической втулки 32 (рис. 4) упругого элемента 6.

Работает устройство крепления пружинной стойки подвески автомобиля следующим образом.

В статическом состоянии автомобиля устройство крепления 1 (рис. 4), пружинной стойки 2 обеспечивает соединение с кузовом стойки 2 путем жесткого крепления верхней опоры 3 к кузову (не показан) с помощью элементов крепления 4, при этом усилия от пружины 15 передаются через опорный элемент 13 на подшипник 19 и далее через посадочное гнездо 20 упругого элемента 6 и крепежный фланец 21 корпуса 5 верхней опоры 3 на кузов автомобиля, а остальные элементы устройства крепления 1 в это время не нагружены.

При прямолинейном равномерном движении автомобиля по ровной дороге на устройство крепления 1 (рис. 4) передаются осевые и радиальные усилия совокупно от высокочастотных низкоамплитудных колебаний, возникающих вследствие недостаточных демпфирующих качеств низкопрофильных шин и от сил в пятне контакта колеса, обусловленных малыми углами увода, вызываемых возмущениями от мелких неровностей дорожного полотна и неравномерностью аэродинамического сопротивления автомобиля; при этом совокупные усилия передаются на устройство крепления 1 (рис. 4) пружины 15 и штоком 11 пружины 15.

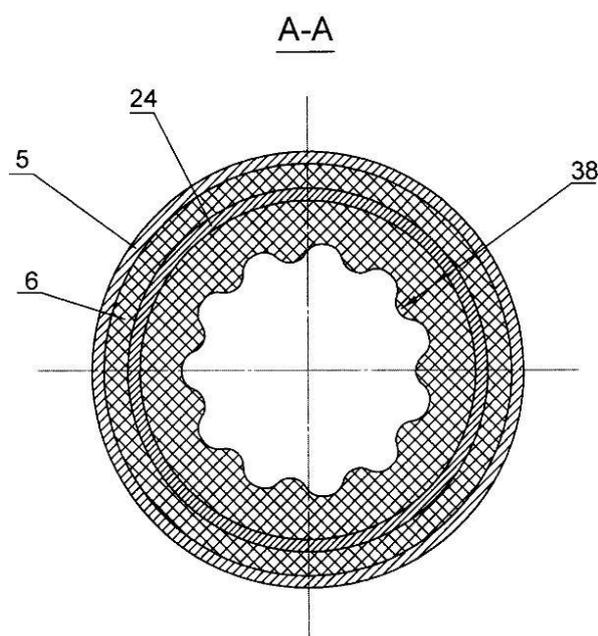


Рис. 6. Горизонтальное сечение верхней опоры

жинной стойки 2 подвески автомобиля, а осевые усилия, передаваемые пружиной 15 демпфируются (поглощаются) пакетом эластичных прокладок 27 и 31 посадочного гнезда 20 упругого элемента б верхней опоры 3.

Осевые усилия при ходе сжатия, передаваемые на устройство крепления 1 (рис. 4) штоком 11 стойки 2 вызывают изгиб диафрагмы 33 внутренней части 28 упругого элемента б, при этом буфер сжатия 29, отделенный зазором А от ограничителя хода сжатия 12 в работу не вступает и не передает на упругий элемент б усилия сжатия от осевых высокочастотных низкоамплитудных колебаний при ходе сжатия.

Радиальные усилия, обусловленные малыми углами увода управляемых колес, вызывают радиальную деформацию диафрагмы 33 упругого элемента б верхней опоры и дополнительно деформацию выступов волнообразной поверхности 38 (рис. 6) цилиндрической втулки 32 (рис. 4) упругого элемента б, вследствие чего повышается радиальная жесткость верхней опоры 3 устройства 1, что положительно влияет на управляемость и устойчивость автомобиля при малых углах увода управляемых колес.

Таким образом, предлагаемое устройство обладает лучшими вибро- и шумоизолирующими свойствами при гашении низкоамплитудных высокочастотных колебаний, а также обеспечивает улучшение управляемости и устойчивости управляемости и устойчивости автомобиля при малых углах увода управляемых колес.

УДК 621.433

Р. Д. Дудников, Ю. В. Левин, Е. А. Федянов

ВЛИЯНИЕ ДОБАВОК СИНТЕЗ-ГАЗА НА ПОЛНОТУ СГОРАНИЯ ТОПЛИВА В БЕНЗИНОВОМ РОТОРНО-ПОРШНЕВОМ ДВИГАТЕЛЕ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: tig@vstu.ru

В статье рассмотрен эффект от добавки синтез-газа к бензину в роторно-поршневом двигателе. На основе математического моделирования показано, что добавка содержащего свободный водород синтез-газа сокращает продолжительность периода индукции при искровом зажигании и уменьшает объем топливовоздушной смеси, недогорающей вблизи задней по ходу вращения вершины ротора. Результаты моделирования процесса распространения пламени в бензовоздушной смеси с добавкой синтез-газа в рабочей камере роторно-поршневого двигателя позволяют прогнозировать примерно двухкратное уменьшение выбросов несгоревших углеводородов с отработавшими газами.

Ключевые слова: синтез-газ, процесс сгорания, роторно-поршневой двигатель.

© Дудников Р. Д., Левин Ю. В., Федянов Е. А., 2023.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ротенберг, Р. В.* Подвеска автомобиля. Колебания и плавность хода / Р. В. Ротенберг. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1972. – 392 с.
2. *Deboli, R.* Whole-body vibration: Measurement of horizontal and vertical transmissibility of an agricultural tractor seat / R. Deboli, A. Calvo, C. Preti // International Journal of Industrial Ergonomics. – 2017. – Vol. 58. – P. 69-78.
3. Виброзащитные системы с квазиузеловой жесткостью: монография / П. М. Алабужев [и др.]; под ред. К. М. Рагульскаса. – Л.: Машиностроение, 1986. – 96 с.
4. П. м. 177004 Российская Федерация, МПК В 60 N 2/52. Подвеска сиденья транспортного средства / М. В. Ляшенко, В. В. Шеховцов, П. В. Потапов, А. И. Искалиев; ВолГТУ. – 2018.
5. *Ляшенко, М. В.* Analysis of vibroprotection characteristics of pneumatic relaxation seat suspension with capability of vibration energy recuperation [Электронный ресурс] / М. В. Ляшенко, П. В. Потапов, А. И. Искалиев // MATEC Web of Conferences. Vol. 129: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2017) (Sevastopol, Russia, September 11-15, 2017) / eds.: S. Bratan [et al.]; Sevastopol State University, National University of Science and Technology «MISIS», Polzunov Altai State Technical University, Inlink Ltd. and International Union of Machine Builders. – [Publisher: EDP Sciences], 2017. – 5 p. – URL: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/43/mateconf_icmtmte2017_06018.pdf.
6. П.м. 80401 РФ, МПК В60G 15/06. Верхняя опора стойки передней пружинной подвески автомобиля / А. М. Модин. – 2009.
7. Пат. 2436687 РФ, МПК В60G 15/06, F16M 7/00, F16M 13/00. Резино-металлическая опора стойки с совмещенными нагрузками / Е. И. Андряков. – ООО «АРТ-ХОЛДИНГ» – 2011.
8. Пат. 2516865 РФ, МПК В60G 15/06, F16F 1/38. Опора подвески транспортного средства / Е. И. Андряков. – ООО «АРТ-ХОЛДИНГ» – 2014.
9. П.м. 136391 РФ, МПК В60G 15/00. Устройство крепления пружинной стойки подвески автомобиля / Д. В. Бусалаев, В. В. Шеховцов, М. В. Ляшенко. – 2014.

R. D. Dudnikov, Y. V. Levin, E. A. Fedyanov

THE EFFECT OF SYNTHESIS GAS ADDITIVES ON THE COMPLETENESS OF FUEL COMBUSTION IN A GASOLINE ROTARY PISTON ENGINE

Volgograd State Technical University

The article considers the effect of adding synthesis gas to gasoline in a rotary piston engine. On the basis of mathematical modeling, it is shown that the addition of synthesis gas containing free hydrogen reduces the duration of the induction period during spark ignition and reduces the volume of the air-fuel mixture that does not burn near the back top of the rotor. The results of modeling the process of flame propagation in a gasoline-air mixture with the addition of synthesis gas in the working chamber of a rotary piston engine make it possible to predict an approximately two-fold decrease in emissions of unburned hydrocarbons with exhaust gases.

Keywords: synthesis gas, combustion process, rotary piston engine.

Исследования, проведенные как в России, так и за рубежом [4], свидетельствуют о том, что относительно небольшие добавки свободного водорода к основному углеводородному топливу в двигателях внутреннего сгорания положительно влияют на их показатели, особенно на экологические. Для роторно-поршневых двигателей промотирующее влияние водорода на процесс сгорания топлива оказывается существенно важным, так как несколько больший по сравнению с поршневыми двигателями расход топлива и повышенные выбросы несгоревших углеводородов с отработавшими газами являются в значительной степени следствием недостаточной скорости распространения пламени [3, 7, 9]. Как показывают опыты [9–12], добавки свободного водорода к углеводородному топливу в роторно-поршневых двигателях повышают полноту сгорания топливовоздушной смеси и уменьшают выбросы несгоревших углеводородов с отработавшими газами.

Практическое применение в роторно-поршневых двигателях рабочего процесса с добавками свободного водорода к основному углеводородному топливу сдерживается не только неизбежным усложнением системы топливоподачи, но и известными принципиальными сложностями хранения этого газа на транспортных машинах. Исходя из особенностей эксплуатации автомобилей, не является приемлемым вариант с установкой на автомобиль устройства для получения водорода электролизом воды.

Известно [11, 12], что свободный водород входит в состав синтез-газов, получаемых конверсией углеводородов. Синтез-газ может быть получен непосредственно на двигателе конверсией основного углеводородного топлива, на котором работает двигатель. При этом генерация синтез-газа может быть осуществлена с использованием теплоты отработавших газов двигателя. В этих случаях удается получить

синтез-газ, теплота сгорания которого выше, чем исходного углеводородного топлива, и тем самым осуществить так называемую термохимическую рекуперацию теплоты, повышающую КПД двигателя.

Для того чтобы определить эффект, получаемый от добавки к основному углеводородному топливу синтез-газа, и сравнить его с эффектом, наблюдаемым при добавках чистого водорода, авторами проведено теоретическое исследование влияния указанных добавок на процесс распространения пламени в камере сгорания бензинового роторно-поршневого двигателя, выполненного по схеме Ванкеля.

Исследование выполнено с помощью неоднократно апробированной [1, 2, 3, 5, 6, 8], математической модели процесса распространения пламени в камере сгорания роторно-поршневого двигателя.

Модель описывает процесс распространения пламени в камере сгорания роторно-поршневого двигателя, оборудованного двумя свечами зажигания, и учитывает все особенности геометрии и газодинамики этого типа двигателей. Для определения скорости перемещения турбулентного пламени использована модель «погружения» [6, 8, 10]. Подробное описание модели дано, в частности, в работе [10].

Влияние добавок синтез-газа на скорость горения учитывалось также, как это было ранее сделано при исследовании влияния на показатели роторно-поршневого двигателя водорода, изменением нормальной скорости распространения ламинарного пламени. При этом предполагалось, что нормальная скорость определяется соотношением масс водорода, содержащегося в синтез-газе, и основного топлива – бензина. Состав синтез-газа, для которого проведены расчеты, соответствовал тому, который получается при паровой конверсии углеводородов: 11,5 % H_2 и остальное CO_2 .

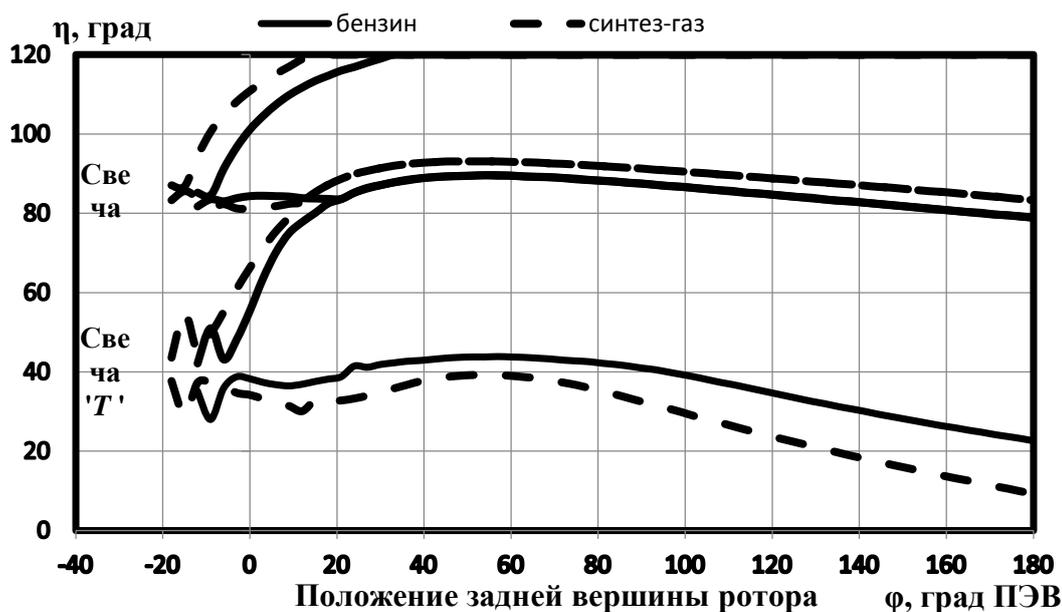
Влияние добавок синтез-газа на длительность периода индукции пламени в свечных предкамерах учитывалось введением в известную формулу (1), для определения этой величины дополнительного коэффициента, значение которого зависит от содержания свободного водорода в смесевом топливе [8]:

$$\Delta\Psi_i = C_i \cdot K_{H_2} \frac{\sqrt[3]{\omega}}{\sqrt{\omega_{H_2}} \cdot p^{0.88} \cdot T_u^{0.9} \cdot q_u}, \quad (1)$$

где $\Delta\Psi_i$ – угол поворота ротора, соответствующий длительности периода индукции, C_i – константа, зависящая от типа системы зажигания и межэлектродного зазора, K_{H_2} – коэффициент, учитывающий содержание свободного водорода в смесевом топливе, p и T – давление и температура заряда в рабочей полости в момент начала искрового разряда на свече, q_{bf} – теплота сгорания единицы массы топливовоздушной смеси.

Расчет с помощью указанной выше модели позволяет определять для каждого значения угла поворота ротора и соответственно угла поворота эксцентрикового вала двигателя положение в рабочей камере границ зон исходной топливовоздушной смеси и зон продуктов сгорания.

На рисунке в качестве примера показано полученное расчетом положение границ зон исходной топливовоздушной смеси в рабочей камере роторно-поршневого двигателя ВАЗ–311, работающего с частотой вращения эксцентрикового вала $n_e = 2000 \text{ мин}^{-1}$ при значении среднего эффективного давления $p_e = 0,2 \text{ МПа}$. Регулировочные параметры: коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1$; угол опережения зажигания для свечи «L» $\theta_L = -25 \text{ град}$ поворота эксцентрикового вала (ПЭВ) до ВМТ, угол опережения зажигания для свечи «Т» $\theta_T = -25 \text{ град}$ ПЭВ до ВМТ.



Влияние добавки синтез-газа (17,5 %) на распространение пламени в рабочей камере двигателя ВАЗ-311 (η – угловая координата положения фронтов пламени относительно задней вершины ротора, ϕ – угол поворота эксцентрикового вала относительно ВМТ)

На рисунке сплошными линиями показано положение границ зон несгоревшей топливовоздушной смеси при работе двигателя на бензине, а штриховыми – при работе на бензине с добавкой 17,5 % по массе синтез-газа указанного выше состава. Величина добавки синтез-газа выбрана таким образом, чтобы массовая доля содержащегося в синтез-газе свободного водорода составляла по отношению к общей массе горючих компонентов топливной смеси

2,5 %. В этом случае результаты моделирования могут быть сопоставлены с результатами теоретических и экспериментальных исследований работы этого же двигателя на бензине с добавкой только свободного водорода.

Как видно из рисунка добавка к бензину синтез-газа заметно сокращает длительность периода индукции и несколько повышает скорость распространения пламени в сторону задней по ходу вращения вершины ротора. При

этом важно отметить то обстоятельство, что мгновенные значения указанной скорости увеличиваются в завершающей части процесса сгорания после поворота эксцентрикового вала на угол, больший 60 град. ПЭВ. По мнению авторов, это обусловлено тем, что при углах поворота эксцентрикового вала меньших 60 град. ПЭВ, площади поперечного сечения камеры сгорания минимальны, а скорость обусловленного движением ротора направленного движения заряда максимальны. При этих скоростях фронт пламени не только не перемещается в сторону задней вершины, но даже сносится потоком в сторону передней вершины. Как хорошо видно на рисунке, при повороте эксцентрикового вала на 60 град. ПЭВ расстояние от границы зоны несгоревшей топливоздушной смеси до задней вершины достигает наибольшего значения.

В завершающей части процесса сгорания при углах поворота эксцентрикового вала 160–180 град. ПЭВ, сопоставление размеров зоны несгоревшей топливоздушной смеси при работе на бензине и на бензине с добавками синтез-газа позволяет сделать вывод, что добавка синтез-газа уменьшает объем несгоревшей смеси примерно вдвое. Соответственно в такой же мере можно прогнозировать снижение за счет добавок синтез-газа выбросов несгоревших углеводородов. Влияние добавок синтез-газа на топливную экономичность будет очевидно меньшим и также, как это было установлено исследованиями с добавкой к бензину только свободного водорода [1–4, 8], не превышает 4–5 %. Работа, совершаемая рабочим телом цикла в завершающей части процесса сгорания существенно меньше работы, совершаемой вблизи ВМТ вследствие высоких давлений в камере сгорания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Федянов, Е. А. Влияние добавки водорода на показатели роторно-поршневого двигателя Ванкеля / Е. А. Федянов, Ю. В. Левин, С. Н. Шумский, В. А. Алексейчук // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (5) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 65–68.
2. Левин, Ю. В. Влияние добавки водорода на процесс сгорания в роторно-поршневых двигателях / Ю. В. Левин, Е. А. Захаров, Е. А. Федянов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 4 (258) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – (Серия «Наземные транспортные системы»). – С. 16–18.
3. An experimental investigation of hydrogen-enriched gasoline in a Wankel rotary engine / F. Amrouche, P. Erickson, J. Park, S. Varnhagen // International Journal of Hydrogen Energy. – 2014. – Т. 39 – Р. 8525 – 8534.
4. Мищенко, А. И. Применение водорода для автомобильных двигателей / А. И. Мищенко. – Киев: Наук. думка, 1984. – 143 с.
5. Злотин, Г. Н. Моделирование индикаторного процесса роторно-поршневого двигателя с фазированным впрыском топлива / Г. Н. Злотин, Е. М. Иткис, Е. А. Федянов, С. Г. Черноусов // Двигателестроение. – 2002. – №3. – С. 24–26.
6. Дудников, Р. Д. Математическая модель процесса сгорания углеводородного топлива с добавками синтез-газа в роторно-поршневом двигателе / Р. Д. Дудников, Ю. В. Левин, Е. А. Федянов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2021. – № 4 (37). – С. 49–52.
7. Использование генератора синтез-газа в ДВС автомобиля / Бризицкий О. Ф., Терентьев В. Я., Кириллов В. А., Савицкий А. И., Бурцев В. А. Транспорт на альтернативном топливе. – 2008. – № 6.
8. Левин, Ю. В. Улучшение топливной экономичности и экологичности роторно-поршневого двигателя за счет добавок свободного водорода к основному топливу. Дисс. – 2016. – 128 с.
9. Зиновьев, И. В. Особенности процесса сгорания и организация расслоения заряда в роторно-поршневых двигателях / И. В. Зиновьев, Е. В. Шатров // Автомобильная промышленность. – 1980. – № 12. – С. 7–10.
10. Дутьгер, М. В. Улучшение экономических и технических показателей роторно – поршневых двигателей путем оптимизации их конструктивных параметров: Дис. ... канд. техн. наук 05.04.02. – Волгоград, 1984, 149 с.
11. Злотин, Г. Н. Особенности рабочего процесса и пути повышения энергетической эффективности роторно-поршневых двигателей Ванкеля: монография / Г. Н. Злотин, Е. А. Федянов. – Волгоград, 2010. – 120 с.
12. Форсирование развития начального очага горения в ДВС с искровым зажиганием / Г. Н. Злотин, В. З. Гибадуллин, Е. А. Федянов, С. Н. Шумский, Е. А. Захаров, А. Ю. Свитачев // Наука – производству. – 2000. – № 1. – С. 24–26.
13. Злотин, Г. Н. Определение состава продуктов неполного сгорания различных углеводородных топлив / Г. Н. Злотин, Ю. В. Иванов, Е. А. Федянов // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 7 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2009. – (Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки» ; вып. 2). – С. 25–27.

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. № 17ж. Дата выхода в свет 14.03.2023 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 4,61.
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.