

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 3 (40)
2022



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., ВолГТУ
А. В. Баранов – д.ф.-м.н., проф.,
РГУ нефти и газа, г. Москва
А. Б. Голованчиков – д.т.н., проф., ВолГТУ
А. Е. Городецкий – д.т.н., проф., ИПМаш
РАН, г. Санкт-Петербург
А. П. Дарманян – д.т.н., проф., ВГАУ,
г. Волгоград
А. М. Иванов – д.т.н., проф.,
МГТУ (МАДИ), г. Москва
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., ВолГТУ
Б. В. Скворцов – д.т.н., проф., СНИИ
им. академика С. П. Королева, г. Самара
Е. А. Федянов – д.т.н., проф., ВолГТУ
В. Т. Фомичев – д.т.н., проф., ВолГТУ
А. Н. Шилин – д.т.н., проф., ВолГТУ

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

Журнал распространяется
по подписке.
Индекс журнала по каталогу
Агентства «Роспечать»
для Российской Федерации –
94193(ОК+ЭК).

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

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

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

№ 3 (40)
Сентябрь
2022

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. Darmanyan – 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 journal in the catalogue
of the Agency «Rospechat» for the Russian
Federation – 94193(OK+ЭК).

VSTU Publisher tel.:

+7 (8442) 24-84-08

+7 (8442) 24-84-05

e-mail: zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,

«Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport», 2022

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° (ФЧ77-64543, registration date: 22 January 2016

№ 3 (40)
September
2022

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

Байрашный Н. В. 27
Васильев П. С. 6, 15
Голованчиков А. Б. 11
Захаров Д. С. 31
Ильина Л. А. 6
Курапин А. В. 34
Меренцов Н. А. 11

Рева Л. С. 6
Чёрикова К. В. 15
Шагарова А. А. 6
Шилин А. А. 27
Шилин А. Н. 31
Шурак А. А. 11
Яблонский В. О. 18

AUTHOR INDEX

Bairashniy N. V. 27
Golovanchikov A. B. 11
Ilina L. A. 6
Kurapin A. V. 34
Merentsov N. A. 11
Reva L. S. 6
Shagarova A. A. 6

Shilin A. A. 27
Shilin A. N. 31
Shurak A. A. 11
Tchyorickowa X. V. 15
Vasilyev P. S. 6, 15
Yablonskii V. O. 18
Zaharov D. S. 31

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Ильина Л. А., Рева Л. С., Васильев П. С., Шагарова А. А.</i> Экспериментальное исследование процесса измельчения стеклобоя в шаровой мельнице.....	6
<i>Голованчиков А. Б., Шурак А. А., Меренцов Н. А.</i> Расчет параметров процесса сушки с переходом от i-х-диаграммы Рамзина к прямоугольной координатной системе.....	11
<i>Васильев П. С., Чёрикова К. В.</i> Гидравлические испытания кубооктаэдрической поропластовой насадки.....	15
<i>Яблонский В. О.</i> Моделирование влияния реологических свойств вязкопластической среды на показатели очистки флотацией в цилиндрическом гидроциклоне.....	18
<i>Шилин А. А., Байрашный Н. В.</i> Разработка информационно-измерительной системы контроля электромагнитных полей воздушных линий электропередач.....	27
<i>Шилин А. Н., Захаров Д. С.</i> Разработка информационно-измерительной системы для радиационного мониторинга окружающей среды на базе беспилотного летательного аппарата.....	31
 Часть 2. ТРАНСПОРТ	
<i>Курапин А. В.</i> Влияние переходных процессов на экономические и эффективные показатели комбинированного дизеля при сбросе и набросе нагрузки.....	34
К сведению авторов.....	48

CONTENTS

Part I. INDUSTRY

<i>Ilina L. A., Reva L. S., Vasilyev P. S., Shagarova A. A.</i> Experimental study of the glass breakage grinding process in a ball mill.....	6
<i>Golovanchikov A. B., Shurak A. A., Merentsov N. A.</i> Calculation of drying process parameters with transition from <i>i-x</i> -ramzin diagram to rectangular coordinate system.....	11
<i>Vasilyev P. S., Tchyorickowa X. V.</i> Hydraulic testing of cuboctahedral porous plastic packing.....	15
<i>Yablonskii V. O.</i> Modeling of the influence of rheological properties of a viscoplastic medium on the indicators of cleaning by flotation in a cylindrical hydrocyclone.....	18
<i>Shilin A. A., Bairashniy N. V.</i> Development of an information and measurement system for monitoring electromagnetic fields of overhead power lines.....	27
<i>Shilin A. N., Zaharov D. S.</i> Development of an information and measurement system for radiation monitoring of the environment based on an unmanned aerial vehicle.....	31

Part II. TRANSPORT

<i>Kurapin A. V.</i> Influence of transient processes on the economic and efficient indicators of a combined diesel engine during a sharp increase and a sharp decrease in load.....	34
---	----

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 621.926.52

Л. А. Ильина, Л. С. Рева, П. С. Васильев, А. А. Шагарова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ СТЕКЛОБОЯ В ШАРОВОЙ МЕЛЬНИЦЕ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: vgtupaph@gmail.com

В результате проведенных экспериментальных исследований измельчения стеклобоя отработанных ламп накаливания в барабанной шаровой мельнице определены наиболее эффективные режимы ее работы. Выполнена математическая обработка результатов экспериментов. Получены уравнения для прогнозирования конечного относительного фракционного состава измельченного стеклобоя, позволяющие определять долю кондиционной фракции.

Ключевые слова: шаровая мельница, измельчение, стеклобой, загрузка мельницы, мелющее тело, фракционный состав.

L. A. Ilina, L. S. Reva, P. S. Vasilyev, A. A. Shagarova

EXPERIMENTAL STUDY OF THE GLASS BREAKAGE GRINDING PROCESS IN A BALL MILL

Volgograd State Technical University

As a result of the experimental studies of glass breakage of used incandescent bulbs in a drum ball mill, the most effective modes of its operation have been determined. Mathematical processing of experimental results has been carried out. Equations for predicting final relative fractional composition of milled cullet, allowing to determine the share of conditioned fraction, are derived.

Keywords: ball mill, grinding, glass breakage, mill charge, grinding body, fractional composition.

В настоящее время вторичная переработка отработанных ламп накаливания, активно используемых в производстве и быту, практически не осуществляется. Такие отходы неопасны, относятся к V классу опасности и не перерабатываются наряду с остальным мусором этого класса. Таким образом, отработанные лампы накаливания выступают исключительно как загрязнители окружающей среды. В связи с этим переработка и утилизация отходов стекла в различных отраслях промышленности является актуальной задачей.

В существующих технологических схемах измельчения стеклобоя при утилизации производственных и бытовых отходов используют преимущественно молотковые мельницы, реализующие в своих конструкциях ударное воздействие [1].

Для утилизации стеклобоя отработанных ламп накаливания предлагается использовать барабанную шаровую мельницу, которая сочетает ударный и истирающий виды воздействия на измельчаемый материал [2; 3].

Целью работы является оценка эффективности применения барабанной шаровой мельницы для измельчения стеклобоя отработанных ламп накаливания.

Для достижения поставленной цели была разработана экспериментальная установка, основные параметры которой определялись следующим образом.

При имеющемся начальном среднем размере частиц измельчаемого материала (стеклобоя) $d_H = 15$ мм для обеспечения возможности его дальнейшей вторичной переработки конечный размер частиц должен составлять $d_K = 2$ мм [2].

С учетом этого диаметр помольных шаров рассчитывался по формуле [5]:

$$d_{ш} = 6 \cdot \sqrt{d_H} \cdot \lg d_K \quad (1)$$

и составил $d_{ш} = 7$ мм.

Диаметр и длина рабочей части барабана, а также количество помольных шаров рассчитывались исходя из массы загрузки (стеклобоя и помольных шаров) и объемных долей заполнения рабочего пространства барабана измельчаемым материалом (стеклобоем) и помольными шарами, равных 0,2 и 0,4 соответственно. Объемная доля равная 0,4 незаполненной части барабана необходима непосредственно для осуществления процесса измельчения [4].

Задавшись массой стеклобоя в загрузке 50 г, определим, что с учетом его порозности он занимает объем 90 см^3 и составляет 20 % от рабочего пространства барабана. Тогда объем, занимаемый помольными шарами, равен $V_{ш} = 180 \text{ см}^3$, что составляет 40 % от рабочего пространства барабана. Объем одного шара диаметром $d_{ш} = 7$ мм равен $V_1 = 0,1794 \text{ см}^3$. С учетом этого количество помольных шаров рассчитывалось по формуле:

$$n_{ш} = 0,6 \cdot \frac{V_{ш}}{V_1} \quad (2)$$

и составило $n_{ш} = 600$ штук.

Тогда общий объем барабана составит 450 см^3 . Исходя из полученного значения, были определены диаметр $D = 67$ мм и длина $L = 137$ мм рабочей части барабана.

Критическая (максимально допустимая) частота вращения барабана рассчитывалась по формуле [6]:

$$\omega_{кр} = 10 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g}{D}} \quad (3)$$

и составила $\omega_{кр} = 172$ об/мин.

На рис. 1 представлена схема экспериментальной барабанной шаровой мельницы, спроектированный по рассчитанным выше параметрам, а на рис. 2 – фотография ее закрепления в трехкулачковом патроне токарно-винторезного станка 16К20, используемого в качестве привода.

Рабочие частоты вращения барабана выбирались исходя из технических возможностей станка и составляли 56, 71, 90 и 112 об/мин. Время измельчения было равно 600 с. Фракционный состав исходного материала представлен в табл. 1.

На рис. 3 и 4 для различных частот вращения барабана показаны относительные фракционные составы измельченного материала в сравнении с его исходным составом.

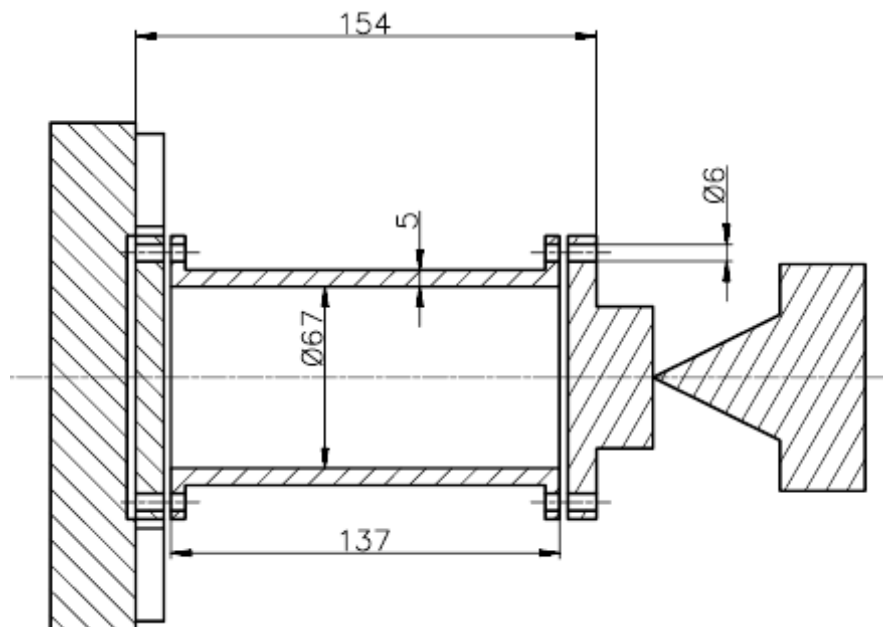


Рис. 1. Схема экспериментальной барабанной шаровой мельницы

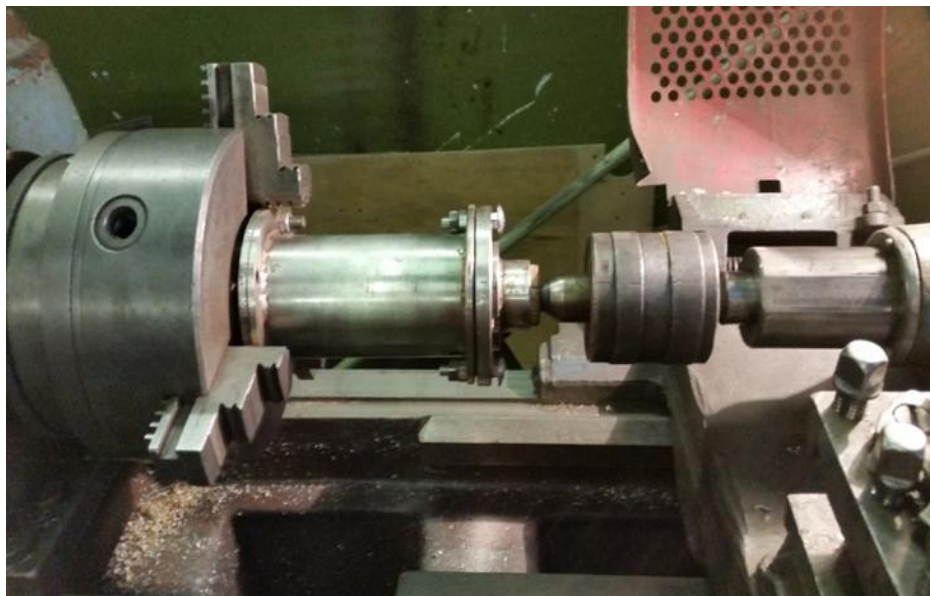


Рис. 2. Фотография экспериментальной установки – барабанной шаровой мельницы, установленной в патрон токарно-винторезного станка 16K20

Таблица 1

Фракционный состав исходного материала

Средний размер фракции, мм	5,0	7,5	11,0	15,0	20,0
Масса фракции, г	2,3	1,3	3,2	30,0	13,2
Массовая доля x	0,046	0,026	0,064	0,600	0,264

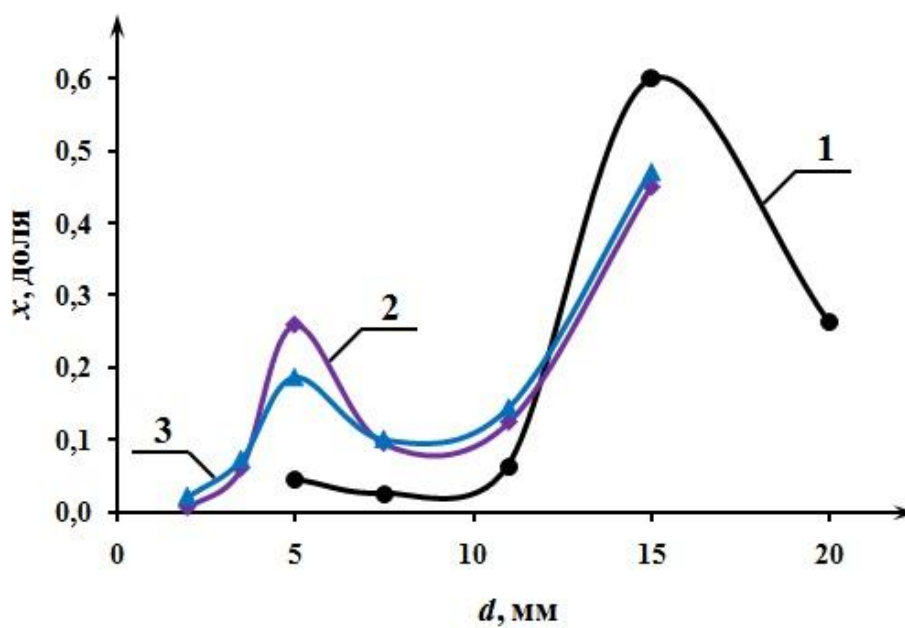


Рис. 3. Относительные фракционные составы измельчаемого материала:
1 – исходный состав; 2 – конечный состав при частоте вращения барабана 56 об/мин;
3 – конечный состав при частоте вращения барабана 71 об/мин

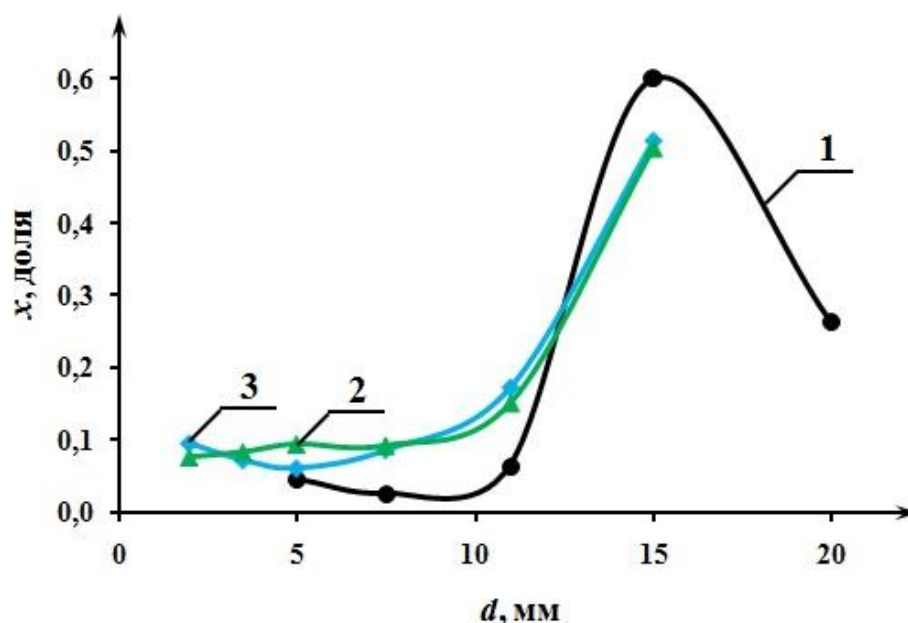


Рис. 4. Относительные фракционные составы измельчаемого материала:
1 – исходный состав; 2 – конечный состав при частоте вращения барабана 90 об/мин;
3 – конечный состав при частоте вращения барабана 112 об/мин

Из рис. 3 и 4 следует, что наиболее оптимальными, с точки зрения максимального выхода фракции требуемого размером $d_K = 2$ мм, являются режимы измельчения при частотах вращения барабана 90–112 об/мин. При этих же частотах наблюдается наиболее равномерное распределение конечного фракционного состава, что создает благоприятную технологическую возможность для организации поэтапного измельчения более крупных фракций или их рецикла.

Математическая обработка полученных экспериментальных данных проводилась для этого же диапазона частот вращения барабана.

Уравнения для прогнозирования количества измельченного стеклобоя, распределенного по шести фракциям со средним размером частиц 2,0, 3,5, 5,0, 7,5, 11,0 и 15,0 мм, образующихся за 600 с при частотах вращения барабана 90 и 112 об/мин, имеют вид:

$$x = 5,60 \cdot 10^5 \cdot d^3 - 9,67 \cdot 10^3 \cdot d^2 + 5,25 \cdot 10^1 \cdot d + 1,55 \cdot 10^{-3} \quad \text{для } 90 \text{ об/мин}; \quad (4)$$

$$x = 2,69 \cdot 10^5 \cdot d^3 - 1,87 \cdot 10^3 \cdot d^2 - 5,57 \cdot d + 1,07 \cdot 10^1 \quad \text{для } 112 \text{ об/мин}, \quad (5)$$

где x – массовая доля измельченного стеклобоя; d – средний размер частиц выделенных шести фракций, м.

В табл. 2 представлены основные результаты корреляционного и регрессионного анализа полученных уравнений: величины средней относительной ошибки $\delta_{ср}$, максимального $\delta_{макс}$ и минимального $\delta_{мин}$ отклонений экспериментальных данных от теоретических значений, рассчитанных по уравнениям (4) и (5), а также расчетные и табличные значения критериев

Кохрена, Фишера и Стьюдента [7–10]. Для критерия Стьюдента выбрано меньшее из четырех полученных для каждого из коэффициентов уравнений регрессии. Уровень значимости при расчете критериев был выбран 0,05. В табл. 2 также представлен коэффициент простой нелинейной корреляции R_{yx} .

Графики уравнений (4) и (5) с нанесенными на них экспериментальными точками приведены на рис. 5.

Таблица 2

Фракционный состав исходного материала

Показатели		Номер уравнения	
		(4)	(5)
R_{yx}		0,9996	0,9992
$\delta_{ср}, \%$		3,87	6,15
$\delta_{мин}, \%$		+9,46	+8,83
$\delta_{макс}, \%$		-4,80	-14,31
Критерий Кохрена	расч.	0,2185	0,2069
	табл.	0,2354	0,2354
Критерий Стьюдента	расч.	$2,9 \cdot 10^3$	$2,0 \cdot 10^5$
	табл.	2,0106	2,0106
Критерий Фишера	расч.	1,5804	1,4135
	табл.	1,7932	1,7932

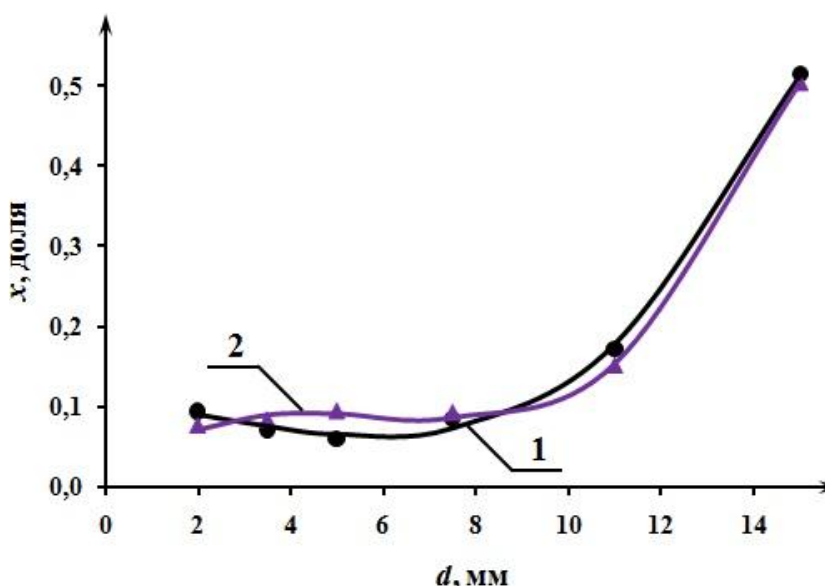


Рис. 5. Графическое сравнение полученных экспериментальных (точки) и теоретических (линии) данных: 1 – для частоты вращения барабана 90 об/мин (уравнение (4)); 2 – для частоты вращения барабана 112 об/мин (уравнение (5))

Таким образом, наибольшая эффективность измельчения стеклобоя отработанных ламп накаливания в барабанной шаровой мельнице, соответствующая максимальному выходу кондиционной фракции размером $d_K = 2$ мм, достигается при частотах вращения барабана $(0,52–0,65) \cdot \omega_{кр}$. Полученные в работе уравнения позволяют прогнозировать конечный фракционный состав измельченного стеклобоя в этом частотном диапазоне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сиденко, П. М. Измельчение в химической промышленности / П. М. Сиденко. – 2-е изд., перераб. – Москва: Химия, 1977. – 368 с.
2. Фатеев, К. А. Исследование процесса измельчения стеклобоя с целью повышения эффективности работы шаровой мельницы / К. А. Фатеев, Л. А. Ильина, П. С. Васильев // Технологии и оборудование химической, биотехнологической и пищевой промышленности: матер. X всерос. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых с междунар. участием (г. Бийск, 24-26 мая 2017 г.); Бийский технол. ин-т (филиал) ФГБОУ ВО «Алтайский гос. техн. ун-т им. И. И. Ползунова». – Бийск, 2017. – С. 246–249.
3. Экосервис. Утилизация отходов. Утилизация ламп [Электронный ресурс] / [2015]. – Режим доступа: <http://ekoservic.ru/vyvoz-i-utilizatsiya-lyuminestsentnyh-rtutsoderzhashchih-lamp>.
4. Расчет шаровой мельницы [Электронный ресурс] / Мир знаний [2016]. – Режим доступа: <http://mirznaniy.com/a/191112/raschet-sharovoy-melnitsy>.

5. Диаметр шаров для мельниц [Электронный ресурс] / Справочник химика 21 [2016]. – Режим доступа: <http://chem21.info/info/534368>.

6. Борщев, В. Я. Оборудование для измельчения материалов: дробилки и мельницы: учебное пособие / В. Я. Борщев. – Тамбов: Издательство ТГТУ. – 2004. – 75 с.

7. Новицкий, П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – 2-е изд., перераб. и доп. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1991. – 304 с.

8. Митропольский, А. К. Техника статистических вычислений / А. К. Митропольский. – Москва: Наука, 1971. – 576 с.

9. Большев, Л. Н. Таблицы математической статистики / Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов. – 3-е изд. – Москва: Наука, 1983. – 416 с.

10. Ферстер, Э. Методы корреляционного и регрессионного анализа / Э. Ферстер, Б. Ренц; пер. с нем. В. М. Ивановой. – Москва: Финансы и статистика, 1983. – 303 с.

УДК 66.047.9

А. Б. Голованчиков, А. А. Шурак, Н. А. Меренцов

РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА СУШКИ С ПЕРЕХОДОМ ОТ I-X-ДИАГРАММЫ РАМЗИНА К ПРЯМОУГОЛЬНОЙ КООРДИНАТНОЙ СИСТЕМЕ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: a-shurak2@mail.ru

Приведен метод расчета параметров рабочей линии действительной сушилки. Показано, что рабочая линия действительной сушилки описывается не прямолинейной зависимостью, как это обычно принято в научной и учебной литературе, а носит нелинейный вид. Проведено сравнение прямолинейной и полученной нелинейной зависимостей энтальпии от влагосодержания для случая постоянной и падающей скоростей сушки.

Ключевые слова: сушка, рабочая линия, скорость сушки, энтальпия, массообмен, действительная сушилка.

A. B. Golovanchikov, A. A. Shurak, N. A. Merentsov

CALCULATION OF DRYING PROCESS PARAMETERS WITH TRANSITION FROM I-X-RAMZIN DIAGRAM TO RECTANGULAR COORDINATE SYSTEM

Volgograd State Technical University

A method for calculating the parameters of the working line of a real dryer is given. It is shown that the working line of a real dryer is not described by a straight-line dependence, as is usually accepted in scientific and educational literature, but has a non-linear form. The direct and obtained nonlinear dependences of enthalpy on moisture content are compared for the case of constant and decreasing drying rates.

Keywords: drying, working line, drying speed, enthalpy, mass transfer, actual dryer.

В научной и учебной литературе в настоящее время рабочую линию действительной сушилки представляют в виде прямой, соединяющей точки I и II на I-X-диаграмме соответственно с координатами $(X_1; t_1)$ и $(X_2; t_2)$ (рис. 1) [1–3].

При этом любая точка этой прямой линии описывается линейным уравнением:

$$I = I_1 - \left(\frac{I_1 - I_2}{X_2 - X_1} \right) (X - X_1). \quad (1)$$

Целью работы является вывод уравнения рабочей линии действительной сушилки и сравнение этого уравнения с линейным уравнением (1).

Для вывода реального уравнения рабочей линии действительной сушилки необходимо

использовать следующую известную аналитическую зависимость:

$$I = c_p t + X(c_p t + r_p), \quad (2)$$

где X – влагосодержание для произвольной точки A, находящееся в пределах $X_1 \leq X \leq X_2$.

Парциальное давление p_a для сушильного агента – воздуха можно найти по графику $p = p(X)$. Уравнение этой зависимости определяется следующим образом. В известном уравнении:

$$X = 0,62 \frac{Ip^*}{P - Ip^*},$$

где p^* – давление насыщенных паров; $P = 1,033$ атм = 760 мм. рт. ст. – общее давление. Так как парциальное давление $p = Ip^*$, то

$$I = c_p t + X(c_p t + r_p). \quad (3)$$

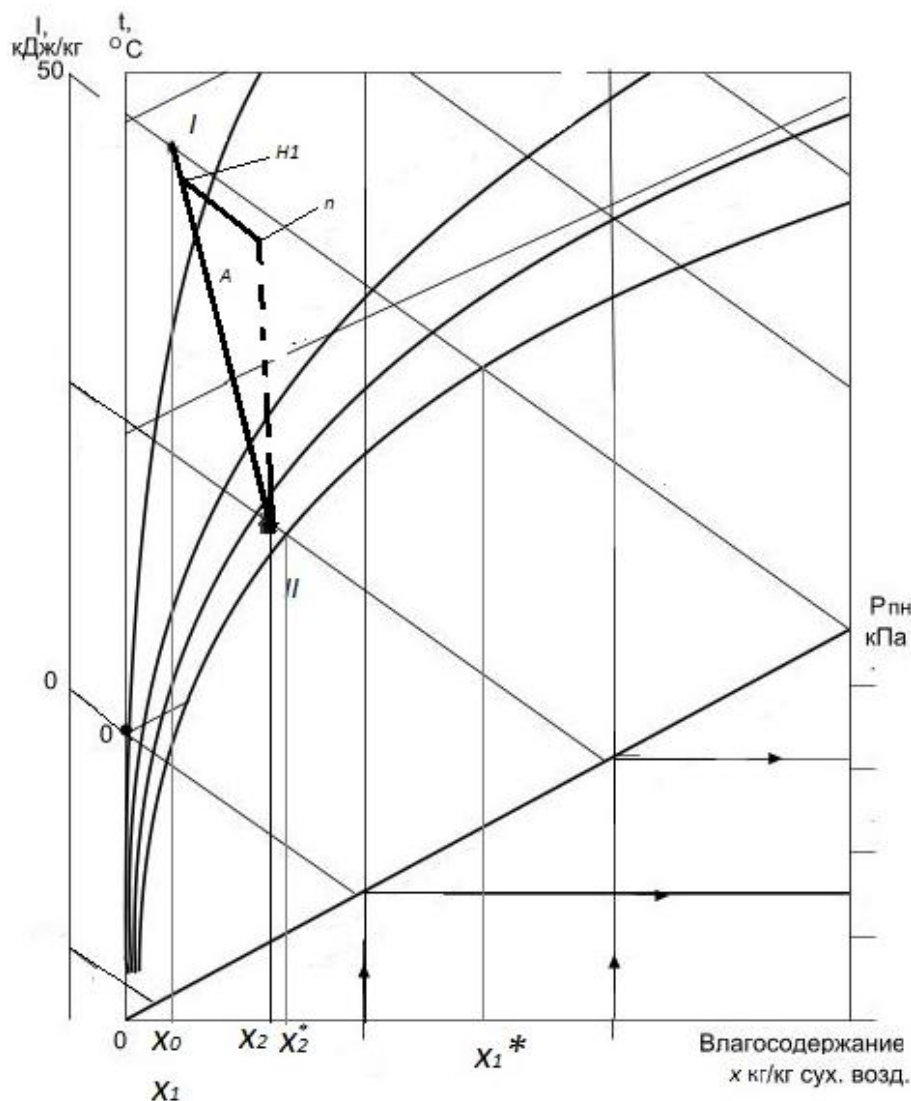


Рис. 1. Рабочая линия действительной сушилки I–II и основные параметры процесса сушки в косоугольной I-X-диаграмме Рамзина

Решая уравнение (3) относительно парциального давления паров для влагосодержания X_A , получим:

$$p_A = \frac{p X_A}{0,62 + X_A}, \quad (4)$$

где 0,62 – отношение молекулярных масс водяного пара и сухого воздуха.

Для получения численных значений остальных параметров процесса сушки в I-X-диаграмме необходима экспериментальная зависимость температуры на поверхности высушиваемого материала от его влагосодержания. Для разных высушиваемых материалов она может иметь различный вид [4]. Однако если считать,

что в первый период сушки, когда ее скорость постоянна, на поверхности высушиваемого материала устанавливается температура мокрого термометра t_A^* и соответствующее давление насыщенных паров p_A^* (рис. 2). Здесь линия $t_0-t_1^*$ соответствует режиму прогрева материала до температуры мокрого термометра на его поверхности с частичным удалением влаги. Предполагаем, что линия от ω_{H1} до ω_n соответствует первому периоду сушки с постоянной скоростью сушки и температурой мокрого термометра t_1^* на поверхности материала. Линия от ω_n до ω_k с возрастанием температуры на поверхности материала от t_n^* до t_k^* условно соответствует температуре мокрого термометра.

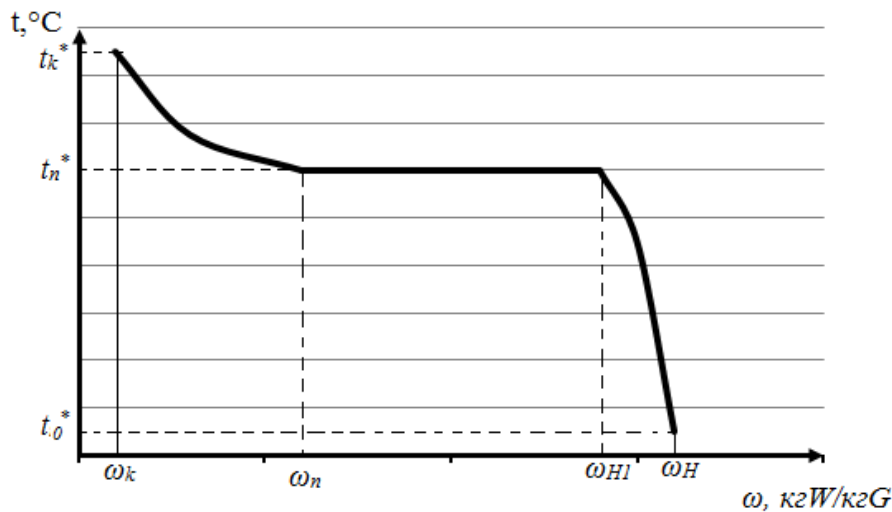


Рис. 2. Зависимость температуры мокрого термометра на поверхности высушиваемого материала от его влажности

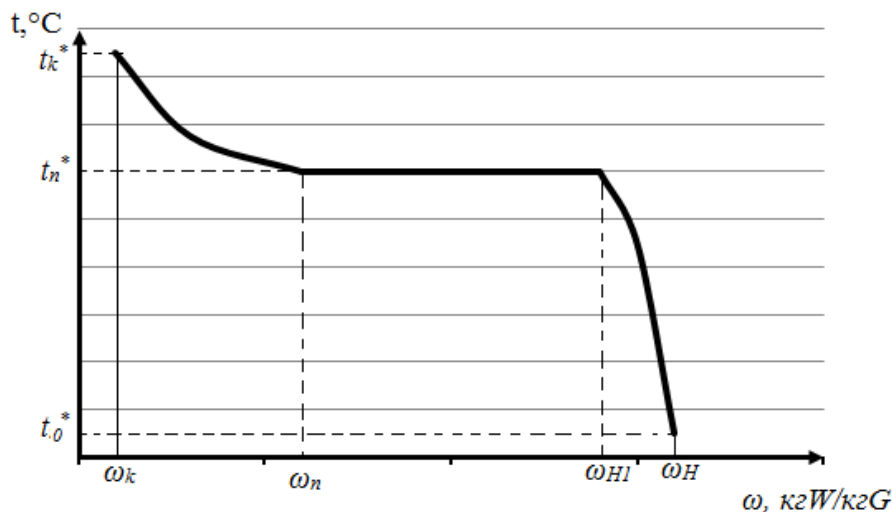


Рис. 3. Зависимость температуры мокрого термометра от влагосодержания сушильного агента

Для перехода от зависимости температуры мокрого термометра на поверхности высушиваемого материала от его влажности к зависимости этой температуры от влагосодержания воздуха $t^* = t^*(X)$ необходимо воспользоваться уравнением материального баланса:

$$X = X_1 + \left(\frac{G}{L}\right)(\omega - \omega_k) \quad (5)$$

и перевести график рис. 2 в график, представленный на рис. 3.

Аналитически энтальпию точки H_1 (рис. 1) можно рассчитать по формуле давления насыщенных паров, соответствующих температуре t_n^* :

$$p_n^* = 0,78 \left(\frac{t_n^*}{100} \right)^{2.58} [\text{ат}]. \quad (6)$$

Формула (6) получена с помощью обработки табличной зависимости давления насыщенных паров от температуры [5] методом наименьших квадратов с относительной ошибкой не превышающей 4 % [6].

По формуле (3) определяем влагосодержание точки H_1 :

$$X_{H1} = 0,62 \frac{p_n^*}{P - p_n^*}, \quad (7)$$

а по формуле (2) соответствующую ей энтальпию:

$$I_{H1} = c_s t_n^* + X_{H1} (c_p t_n^* + r_p). \quad (8)$$

Объединяя уравнения (6) и (7) и подставляя из них значения p_n^* и x_n , получаем зависимость энтальпии от температуры мокрого термометра:

$$I_{H1} = c_p t_n^* + 0,62 \frac{0,78 \left(\frac{t_n^*}{100} \right)^{2,58}}{1,033 - 0,78 \left(\frac{t_n^*}{100} \right)^{2,58}} (c_p t_n^* + r_p). \quad (9)$$

Как видно из уравнения (9), для режима постоянной скорости сушки, как показано выше, рабочая линия действительной сушилки идет по изоэнтальпии, так как температура мокрого термометра на поверхности высушиваемого материала $t_n^* = \text{const}$.

Рассмотрим вариант сушки термостабильных материалов, когда их температура повышается незначительно, и температура мокрого термометра увеличивается по линейной зависимости:

$$t^* = t_H^* - \frac{t_k^* - t_H^*}{\omega_H - \omega_k} (\omega - \omega_k). \quad (10)$$

Из уравнения материального баланса (5) получим:

$$\frac{G}{L} = \frac{X - X_1}{\omega - \omega_k}, \quad (11)$$

а для условия $\omega = \omega_H$ и $X = X_2$:

$$\frac{G}{L} = \frac{X_2 - X_1}{\omega_H - \omega_k}. \quad (12)$$

Из уравнений (11) и (12) следует отношение:

$$\frac{\omega - \omega_k}{\omega_H - \omega_k} = \frac{X - X_1}{X_2 - X_1},$$

которое при подстановке в уравнение (10) при

водит к линейной зависимости температуры мокрого термометра от влагосодержания X :

$$t^* = t_H^* - \left(\frac{X - X_1}{X_2 - X_1} \right) (t_k^* - t_H^*). \quad (13)$$

Зная температуру мокрого термометра t^* как функцию влагосодержания X , находим по формуле (6) давление насыщенных паров p^* , а по формуле (7) – соответствующее значение X^* , которое позволяет определить энтальпию I^* по формуле (9). Таким образом, для каждого значения $X_1 \leq X \leq X_2$ получим нелинейную функцию $I = I(X)$.

Рассмотрим вариант расчета параметров процесса сушки для случая, когда линия сушки соответствует прямой линии I–II, считающейся рабочей линией действительной сушилки [7], а весь процесс сушки от ω_n до ω_k идет при ее постоянной скорости, т. е. для любой точки A на прямой I–II температура поверхности высушиваемого материала равна температуре мокрого термометра. Тогда для данной прямой связь энтальпии и влагосодержания определяется уравнением (1).

Был проведен расчет для сушки поваренной соли с начальной влажностью $\omega_n = 6\%$ до конечной влажности $\omega_k = 0,2\%$ при температуре сушильного агента на входе в сушилку $t_1 = 200^\circ\text{C}$ [8]. Важным результатом расчетов является возможность построения рабочей и равновесной линий в традиционной для массообменных процессов прямоугольной системе координат (рис. 4).

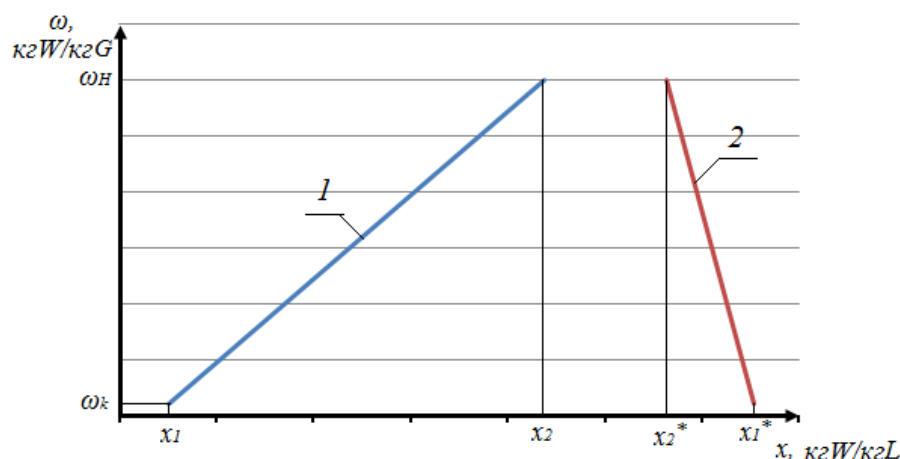


Рис. 4. Рабочая (1) и равновесная (2) линии процесса сушки поваренной соли

Как видно из рис. 4, равновесная линия является в данном случае практически прямой,

и средняя движущая сила может быть рассчитана аналитически как

$$\Delta X_{cp} = \frac{(X_1^* - X_1) - (X_2^* - X_2)}{\ln \left(\frac{X_1^* - X_1}{X_2^* - X_2} \right)}.$$

Таким образом, предлагаемая методика расчета параметров процесса сушки позволяет перейти от косоугольной I - X -диаграммы Рамзина к традиционной для массообменных процессов прямоугольной координатной системе Эйлера.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лыков, М. В. Сушка в химической промышленности / М. В. Лыков. – Москва: Химия, 1970. – 432 с.
2. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Г. С. Борисов [и др.]; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 4-е изд. – Москва: Альянс, 2008. – 272 с.
3. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – 14-е изд., стер. – Москва: Альянс, 2008. – 750 с.

4. Алексанян, И. Ю. Моделирование процесса сушки дисперсного материала / И. Ю. Алексанян, Л. М. Титова, А. Х.-Х. Нугманов // Процессы, оборудование и аппараты пищевых производств. – 2014. – №3. – С. 96-101.

5. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: учебное пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. П. Г. Романкова. – 14-е изд., стер. – Москва: ООО ИД «Альянс», 2007. – 576 с.

6. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии. Часть 1: учебное пособие / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонов. – Волгоград, 1994. – 114 с.

7. Надеев, А. А. Экспериментальные исследования аэродинамики установки для сушки сыпучих материалов в центробежном псевдоожиженном слое / А. А. Надеев, Ю. Н. Агапов, В. Г. Стогней // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2009. – Т. 5. – №5. – С. 76–78.

8. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ №2022613695 от 15.03.2022 г. РФ, МПК (нет). Программа для расчета параметров барабанной сушилки с учетом продольной диффузии / А. Б. Голованчиков, А. А. Шурак, Н. А. Меренцов, Н. В. Шибитова; заявитель и правообладатель ВолгГТУ.

УДК 66.069.833

П. С. Васильев, К. В. Чёрикова

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ КУБООКТАЭДРИЧЕСКОЙ ПОРОПЛАСТОВОЙ НАСАДКИ*

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: nestorvv@mail.ru

На основе анализа результатов гидравлических испытаний подтверждена гипотеза о самопроизвольном структурировании кубооктаэдрической поропластовой насадки, что приводит к уменьшению ее гидравлического сопротивления. Получены критериальные уравнения для прогнозирования гидравлического сопротивления кубооктаэдрических поропластовых насадок.

Ключевые слова: кубооктаэдрическая поропластовая насадка, гидравлическое сопротивление, критериальное уравнение.

P. S. Vasilyev, X. V. Tchyorickowa

HYDRAULIC TESTING OF CUBOCTAHEDRAL POROUS PLASTIC PACKING

Volgograd State Technical University

Based on the analysis of hydraulic tests results, the hypothesis of the cuboctahedral porous plastic packing spontaneous structuring was confirmed, which leads to a decrease in its hydraulic resistance. Criteria equations are obtained for predicting the hydraulic resistance of cuboctahedral porous plastic packings.

Keywords: cuboctahedral porous plastic packing, hydraulic resistance, criterion equation.

В настоящее время область практического применения поропластовых насадок включает в себя различные тепломассообменные и биоре-

акционные процессы химической, фармацевтической и пищевой отраслей промышленности. Их изготовление не представляет технологиче-

© Васильев П. С., Черикова К. В., 2022.

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

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

ских трудностей, а по своим эксплуатационным свойствам они не уступают насадкам из других материалов, в отдельных случаях значительно превосходя их по эффективности [1–3].

Также весьма перспективными являются структурированные насадки, уступающие однако по эффективности поропластовым, но обладающие по сравнению с ними меньшим гидравлическим сопротивлением. При этом необходимо отметить, что структурированные насадки более сложные в изготовлении и монтаже, что делает их практическое применение весьма дорогим и не повсеместно доступным [4; 5].

Используя известное свойство некоторых геометрических тел – создавать в ансамбле самоорганизованные пространственные системы, гипотетически предположим, что поропластовая насадка в виде правильных кубоктаэдров (как самая простая в изготовлении), загруженная в технологический аппарат внавал, в процессе работы будет приобретать некоторую структурность, обеспечивающую меньшее гидравлическое сопротивление при сохранении высокой эффективности [6].

Для подтверждения данной гипотезы необходимо провести гидравлические испытания кубоктаэдрической поропластовой насадки, что и является целью настоящей работы.

Экспериментальный аппарат для проведения гидравлических испытаний представлял собой колонну прямоугольной формы попереч-

ным сечением 125×125 мм. Загружаемая внавал поропластовая насадка представляла собой правильные кубоктаэдрические тела (рис. 1) размером 10 мм. Высота насадки в аппарате составляла 400 мм.



Рис. 1. Правильный кубоктаэдр

Гидравлические испытания проводились на системе *вода – воздух* в диапазоне фиктивных скоростей воздуха (в расчете на полное сечение пустого аппарата) 0,05–0,75 м/с при плотностях орошения 8–16 м³/(м²·ч).

На рис. 2 приведены результаты экспериментальных исследований гидравлического сопротивления кубоктаэдрической поропластовой насадки размером 10 мм в сравнении с поропластовыми кольцами Рашига размером 10×10×2 мм для плотности орошения 15,6 м³/(м²·ч). При этом необходимо отметить, что основные геометрические характеристики поропластовых насадок, определенные по методике [7], составляли:

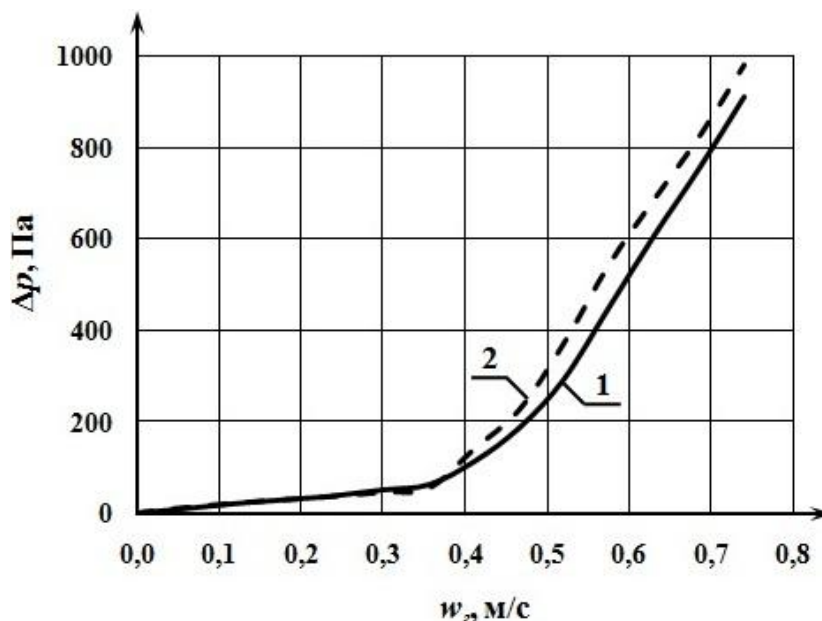


Рис. 2. Экспериментальная зависимость гидравлического сопротивления поропластовых насадок от фиктивной скорости воздуха $\Delta p = f(w_{г.})$ для плотности орошения 15,6 м³/(м²·ч): 1 – кубоктаэдрическая насадка размером 10 мм; 2 – кольцевая насадка размером 10×10×2 мм

– для кубооктаэдрической насадки: порозность $0,682 \text{ м}^3/\text{м}^3$, удельная поверхность $921 \text{ м}^2/\text{м}^3$, эквивалентный диаметр $2,96 \cdot 10^{-3} \text{ м}$;

– для кольцевой насадки: порозность $0,751 \text{ м}^3/\text{м}^3$, удельная поверхность $926 \text{ м}^2/\text{м}^3$, эквивалентный диаметр $3,24 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Из рис. 2 видно, что при одной и той же плотности орошения кубооктаэдрическая поропластовая насадка обладает меньшим гидравлическим сопротивлением, чем кольцевая

в диапазоне фиктивных скоростей воздуха, соответствующих пленочному и турбулентному гидродинамическим режимам работы колонны, несмотря на то, что порозность (доля свободного объема) кубооктаэдрической насадки по сравнению с кольцевой меньше. Это обстоятельство практически доказывает гипотезу о том, что для развитых гидродинамических режимов кубооктаэдрическая насадка проявляет свойство самоструктурирования.

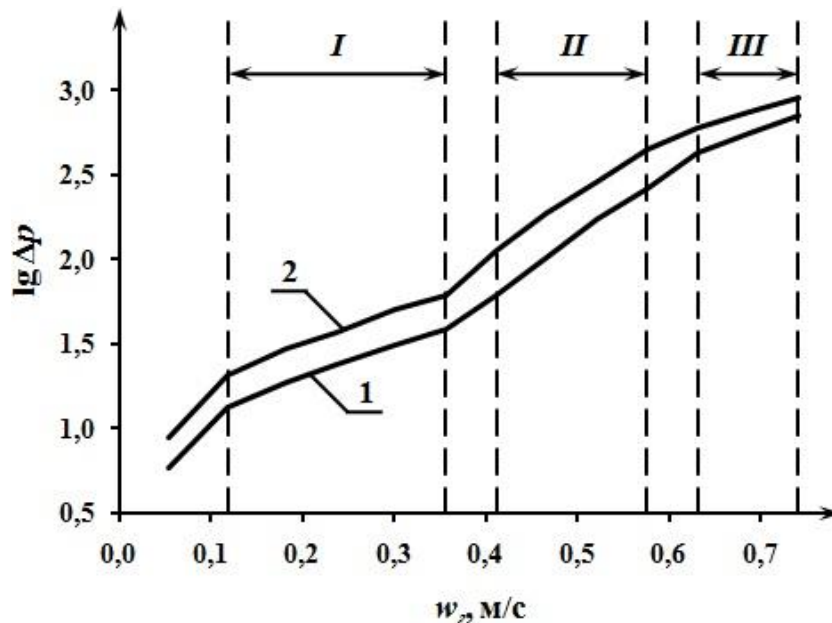


Рис. 3. График зависимости $\lg \Delta p = f(w_g)$ кубооктаэдрической поропластовой насадки размером 10 мм для различных плотностей орошения: 1 – $8,7 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; 2 – $15,6 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

На рис. 3 в полулогарифмической системе координат $\lg \Delta p = f(w_g)$ приведены результаты гидравлических испытаний кубооктаэдрической поропластовой насадки размером 10 мм для различных плотностей орошения, обобщенные для каждого гидродинамического режима работы колонны в виде уравнений:

– для капельного режима (диапазон I на рис. 3):

$$Eu_I = 186 \cdot Re_e^{-0,23} \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,77}; \quad (1)$$

– для пленочного режима (диапазон II на рис. 3):

$$Eu_{II} = 1,3 \cdot 10^{-5} \cdot Re_e^{3,24} \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,98}; \quad (2)$$

– для турбулентного режима (диапазон III на рис. 3):

$$Eu_{III} = 0,33 \cdot Re_e^{1,40} \cdot \left(\frac{L}{G} \right)^{0,53}, \quad (3)$$

где $Eu = \frac{\Delta p}{\rho_g \cdot w_g}$ – число подобия Эйлера;

Δp – гидравлическое сопротивление, w_g – фиктивная скорость газа, ρ_g – плотность газа;

$Re_e = \frac{4 \cdot w_g \cdot \rho_g}{\sigma \cdot \mu_g}$ – число подобия Рейнольдса для

газа: σ – удельная поверхность насадки, μ_g –

вязкость газа; $\frac{L}{G}$ – относительное орошение;

L – массовый расход жидкости, G – массовый расход газа.

Значения чисел подобия Рейнольдса в экспериментах лежали в диапазоне 15–210, а величина относительного орошения в диапазоне 2–66. Средняя относительная ошибка полученных уравнений (1)–(3) не превышает 2–4 %, отклонение отдельных точек не более 6 %.

Полученные результаты могут быть использованы при инженерном проектировании эффективных теплообменных аппаратов

с поропластовыми насадками для проведения различных тепломассообменных и биореакционных процессов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Porous plastic packing for heat and mass transfer processes / A. B. Golovanchikov, A. A. Shagarova, P. S. Vasil'ev, K. V. Cherkova // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2018. – Vol. 53 (11-12). – P. 759-764.
2. Jou, C.-J. G. A pilot study for oil refinery wastewater treatment using a fixed-film bioreactor / C.-J. G. Jou, G. C. Huang // *Advances in Environmental Research*. – 2003. – Vol. 7 (2). – P. 463-469.
3. П. м. № 131311 РФ, МПК В01J19/00. Насадка для массообменного аппарата / А. Б. Голованчиков, П. С. Васильев, Н. А. Дулькина, Т. Б. Агеева, В. В. Разуваев, В. Я. Закурский. – заявл. 04.02.2013; опубл. 20.08.2013.
4. New combination packing for heat- and mass-exchange vessels / G. B. Dmitrieva, M. G. Berengarten, A. S. Pushnov, V. Yu. Poplavskii, F. Marshik // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2006. – Vol. 42 (7). – P. 361-366.
5. Ivanov, A. E. Processes and equipment for chemical and oil-gas production / A. E. Ivanov, M. G. Berengarten, M. I. Klyushenkova // *Chemical and Petroleum Engineering*. – 2010. – Vol. 46 (7-8). – P. 433-440.
6. Лобанов, Ю. А. Самоорганизация геометрического пространства в природе (научный подход к разномаштабным моделям в процессе природных структур геометрическим образованием) / Ю. А. Лобанов. – Томск: Раско, 2002. – 348 с.
7. Васильев, П. С. Метод расчета основных геометрических характеристик насадок из поропластовых материалов / П. С. Васильев, Л. С. Рева, А. А. Шагарова // *Химическая технология*. – 2019. – Т. 20, № 9. – С. 429-432.

УДК 621.928.37

В. О. Яблонский

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ВЯЗКОПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ НА ПОКАЗАТЕЛИ ОЧИСТКИ ФЛОТАЦИЕЙ В ЦИЛИНДРИЧЕСКОМ ГИДРОЦИКЛОНЕ

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: pahp@vstu.ru

На основе разработанной математической модели очистки жидкостей, имеющих предел текучести, в цилиндрическом гидроциклоне напорной флотации проанализировано влияние фактора разделения при различных значениях числа пластичности и показателя нелинейности кривой течения на остаточную концентрацию частиц твердой фазы. Разработанная математическая модель учитывает действие сил инерции, Кориолиса и присоединенную массу жидкости. Система дифференциальных уравнений в частных производных, описывающая процесс напорной флотации в центробежном поле, сведена к системе обыкновенных дифференциальных уравнений и решена численным методом. Рассчитано поле концентраций частиц твердой фазы и определена остаточная концентрация. Полученные результаты могут использоваться при разработке оборудования для флотационной очистки вязкопластических жидкостей.

Ключевые слова: предел текучести, напорная флотация, цилиндрический гидроциклон, фактор разделения, число пластичности, показатель нелинейности, остаточная концентрация.

V. O. Yablonskii

MODELING OF THE INFLUENCE OF RHEOLOGICAL PROPERTIES OF A VISCOPLASTIC MEDIUM ON THE INDICATORS OF CLEANING BY FLOTATION IN A CYLINDRICAL HYDROCYCLONE

Volgograd State Technical University

On the basis of the developed mathematical model for the purification of liquids having a yield point in a cylindrical hydrocyclone by pressure flotation, the influence of the separation factor at different values of the number of plasticity and the nonlinearity index of the flow curve on the residual concentration of solid phase particles is analyzed. The developed mathematical model takes into account the action of inertia forces, Coriolis and the attached mass of liquid. The system of partial differential equations describing the process of pressure flotation in a centrifugal field is reduced to a system of ordinary differential equations and solved numerically. The field of concentrations of solid phase particles is calculated and the residual concentration is determined. The results obtained can be used in the development of equipment for flotation purification of viscoplastic liquids.

Keywords: yield strength, pressure flotation, cylindrical hydrocyclone, separation factor, plasticity number, nonlinearity index, residual concentration.

Многие технологические жидкости обладают вязкопластическими свойствами и имеют выраженный предел текучести (предельное напряжение сдвига). К ним относятся буровые растворы, смазочные масла с присадками, суспензии глазури, биомассы и белково-витаминных концентратов (паприн, гаприн, меприн), а также карбида кремния, сточные воды, содержащие, нефть, жир и другие вещества. Процесс напорной флотации широко применяется в химической и других отраслях промышленности для разделения продуктов биосинтеза, извлечения тонкодисперсной твердой фазы из суспензий и очистки различных технологических жидкостей.

В работе [1] предложено осуществлять процесс разделения в гидроциклоне с фильтрующей поверхностью сливного патрубка, что позволяет улавливать мелкодисперсные частицы и, таким образом, снижать остаточную концентрацию частиц твердой фазы. Однако повышенное гидравлическое сопротивление аппарата и необходимость вибрационного привода для регенерации фильтровальной перегородки делают процесс менее экономичным и приводят к дополнительным энергозатратам.

В работе [2] отмечается, что для эффективного разделения гетерогенных жидких систем в гидроциклонах необходимо стремиться к уменьшению граничного зерна разделения. Запросы современной биотехнологии или техника разделения жидких фаз (например «нефть – вода») требуют снижения размера граничного зерна разделения до субмикронной области.

В связи с этим для разделения в гидроциклонах необходимо использование новой технологии, которой является напорная флотация. Процесс напорной флотации, реализованный в поле центробежных сил, находит широкое применение в химической и других отраслях промышленности для разделения продуктов биосинтеза, извлечения тонкодисперсной твердой фазы из суспензий и очистки различных

технологических жидкостей. Наиболее подходящим аппаратом для разделения суспензий и технологических жидкостей напорной флотацией в центробежном поле является цилиндрический гидроциклон, сочетающий простоту устройства, надежность и высокую эффективность разделения.

В работе [3] приведены результаты теоретико-экспериментальных исследований процесса циклонной флотации, получено условие устойчивого всплытия комплекса частица – пузырек, определен диаметр частиц твердой фазы, которые могут быть удалены при данных режимных параметрах гидроциклона.

В работе [4] указывается на зависимость числа вероятных столкновений частиц твердой фазы и пузырьков газа от центробежного ускорения; показано, что центробежное поле является фактором, увеличивающим число столкновений частиц и пузырьков.

В статье [5] на основании решения уравнения радиального движения системы частица – пузырек предложена методика расчета показателей разделения гидроциклона – флотатора, а также диаметра цилиндрической части аппарата, при котором обеспечиваются заданные показатели разделения и минимальные капитальные и энергетические затраты.

Многие из разделяемых в промышленности неоднородных жидких систем являются неньютоновскими вязкопластическими средами, имеющими предел текучести, что оказывает влияние на гидродинамику аппаратов.

В работе [6] сделано заключение, что к многофазным гетерогенным системам применимо реологическое уравнение состояния неньютоновской жидкости, которое для процессов очистки вязкопластических жидкостей записывают в виде закона Гершеля-Балкли. Выраженное через компоненты тензора скоростей деформаций, для трехмерного течения с учетом условия пластичности фон Мизеса, уравнение Гершеля-Балкли имеет вид:

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

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

где τ_{ij} – компоненты тензора напряжений, Па;
 τ_0 – предельное напряжение сдвига, Па;
 γ_{ij} – компоненты тензора скоростей деформаций, с⁻¹;

A – интенсивность скоростей деформаций, с⁻¹; n – показатель нелинейности кривой течения; k – индекс консистентности, Па·сⁿ;

r, z – радиальная и осевая координаты, м;
 φ – окружная координата, рад.

При $n = 1$ уравнение (1) переходит в уравнение Шведова-Бингама для вязкопластической среды, при $\tau_0 = 0$ – в уравнение Оствальда де Виля для псевдопластической жидкости, при $n = 1$ и $\tau_0 = 0$ – в уравнение Ньютона-Петрова для ньютоновской жидкости.

В [7] проведено численное исследование течения пленки вязкопластической жидкости в гидроциклоне, основанное на решении полных уравнений реодинамики. Описание разделительных процессов в гидроциклоне со свободно образующейся поверхностью вязкопластической жидкой фазы на основе решения полных уравнений реодинамики до сих пор не проведено и представляет значительный теоретический и прикладной интерес.

Целью работы является исследование влияния фактора разделения при различных значениях предельного напряжения сдвига и показателя нелинейности кривой течения на остаточную концентрацию частиц твердой фазы в цилиндрическом гидроциклоне при очистке вязкопластических жидкостей напорной флотацией.

Схема течения разделяемой среды в цилиндрическом гидроциклоне приведена на рис. 1. Гидроциклон состоит из цилиндрического корпуса 1, в который тангенциально подается разделяемая суспензия через входной патрубок 2, установленный в его верхней части. Поступившая в гидроциклон суспензия стекает, вращаясь, по его стенкам вниз, обладая радиальной V_r , окружной V_φ и осевой V_z составляющими скорости, образуя вращающуюся пленку со свободной поверхностью 3. При падении давления на входе в гидроциклон из суспензии выделяются пузырьки воздуха, образующие с частицами твердой фазы флотокомплексы, извлекаемые под действием центробежных сил на поверхность пленки в пену. Осветленная суспензия удаляется через нижний слив 4, установленный в днище 5 гидроциклона, пена – через верхний отводящий патрубок 6.

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

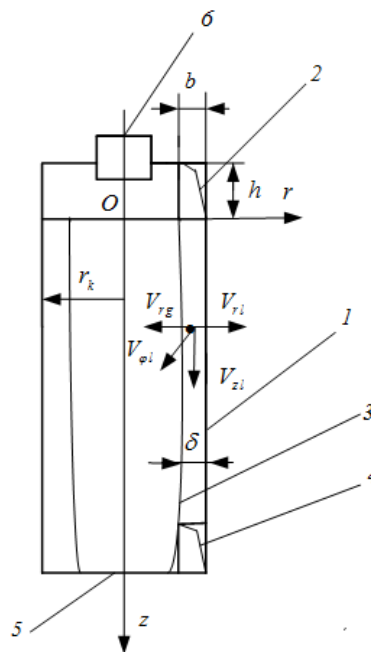


Рис. 1. Схема очистки жидкости в цилиндрическом гидроциклоне напорной флотацией:

1 – корпус гидроциклона; 2 – входной патрубок; 3 – вращающаяся пленка жидкости; 4 – патрубок для отвода жидкой фазы; 5 – днище гидроциклона; 6 – патрубок для отвода газа

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

Математическая постановка задачи производится при следующих допущениях: при поступлении суспензии в гидроциклон давление в суспензии падает и происходит выделение монодисперсных газовых пузырьков, равномерно распределенных по всему объему, концентрация которых на входе в гидроциклон равна c_{go} ; коалесценция газовых пузырьков отсутствует; для пленочного течения суспензии с неньютоновской дисперсионной средой, обладающей высокой эффективной вязкостью, режим течения ламинарный и режим осаждения частиц твердой фазы и всплытия пузырьков газа ламинарный [8].

Для математического моделирования поля концентраций при разделении суспензии с вязкопластической дисперсионной средой напорной флотацией в цилиндрическом гидроциклоне используем дифференциальное уравнение конвективной диффузии в цилиндрических координатах, которое с учетом стока частиц твердой фазы за счет флотации пузырьками газа, при равенстве нулю коэффициента молекуляр-

ной диффузии, может быть записано для частиц твердой фазы и пузырьков газа следующим образом:

$$\begin{cases} \operatorname{div}(\bar{V}_h c_h) = -J_h \\ \operatorname{div}(\bar{V}_g c_g) = -J_g \end{cases}, \quad (2)$$

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

Наиболее распространенным в практике гидроциклонной флотации является случай, когда одна частица извлекается несколькими пузырьками в поле центробежных сил. При этом концентрация пузырьков газа значительно превышает концентрацию частиц твердой фазы $c_g > c_h$, и можно полагать $c_g = \text{const}$ во всем объеме пленки суспензии в гидроциклоне.

Для этого случая второе уравнение системы

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

где z – осевая координата, м; $V_{zh}(r, z)$ – осевая составляющая скорости частиц твердой фазы, м/с. Уравнение (4) решалось совместно с уравнением движения частицы твердой фазы.

В [4] установлено, что в условиях напорной флотации преобладающим механизмом образования флотокомплексов является столкновение частиц с пузырьками, определяющее воздействие на который оказывают характеристики дисперсности и физические свойства фаз.

Полагаем, что все происходящие столкновения эффективны (заканчиваются образованием комплекса), образовавшиеся комплексы не разрушаются при подъеме в пену и не осыпаются из нее [10]. При таких допущениях стадия столкновения частиц с пузырьками определяет эффективность процесса напорной флотации в условиях пленочного течения разделяемой суспензии в цилиндрическом гидроциклоне, так как на транспортировку комплексов «частица – пузырек» к поверхности пленки затрачивается пренебрежимо малое время, и все последующие стадии зависят от стадии столкновения. В этих условиях зависимость кинетического коэффициента флотации от характеристик

(2) можно исключить, и тогда система (2) сводится к одному уравнению. Сток частиц твердой фазы J_h за счет флотации, который согласно [9] имеет вид, аналогичный кинетическому уравнению химической реакции первого порядка:

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

где A – кинетическая константа флотации, с⁻¹. При $c_g = 0$ сток частиц за счет флотации отсутствует, и уравнение (3) описывает процесс разделения суспензии осаждением в поле центробежных сил.

Поскольку радиальные составляющие скорости частиц твердой фазы и неразрывного потока дисперсионной среды различны, то

$$\operatorname{div} \bar{V}_h = \frac{1}{r} \frac{\partial [r(V_{rh} - V_{rl})]}{\partial r},$$

где r – радиальная координата, м; $V_{rh}(r, z)$ – радиальная составляющая скорости частиц твердой фазы, м/с; $V_{rl}(r, z)$ – радиальная составляющая скорости дисперсионной среды, м/с.

С учетом этого уравнение (3) примет вид:

разделяемой суспензии и параметров процесса во многом определяет адекватность математической модели флотации в гидроциклоне реальному процессу. Следовательно, константа скорости флотации может быть определена по формуле, полученной в работах [10; 11] на основании того, что вероятность столкновения частиц и пузырьков аналогична вероятности столкновения молекул в молекулярно-кинетической теории газов:

$$A = \frac{3}{2} \frac{1}{d_h} \left(1 + \frac{d_h}{d_g} \right)^2 \bar{U}_{rh}, \quad (5)$$

где d_h и d_g – диаметры частиц твердой фазы и пузырьков газа, м; $\bar{U}_{rh}$ – среднеквадратическая скорость частиц.

Формула (5) может быть использована для расчета процесса флотации в поле центробежных сил в гидроциклоне при условии использования среднеквадратической скорости частиц $\bar{U}_{rh}$, найденной из условия сохранения механической энергии при полной неподвижности пузырьков в поле центробежных сил:

$$\bar{U}_{rh} = \frac{U_{rh}}{\sqrt{1 + \frac{\rho_g}{\rho_h} \left(\frac{d_g}{d_h} \right)^3 \left(\frac{U_{rg}}{U_{rh}} \right)^2}}, \quad (6)$$

где $U_{rg}(r, z) = V_{rg}(r, z) - V_{rl}(r, z)$ – радиальная составляющая скорости пузырьков газа относительно дисперсионной среды, м/с; $U_{rh}(r, z) = V_{rh}(r, z) - V_{rl}(r, z)$ – радиальная составляющая скорости частиц твердой фазы относительно дисперсионной среды, м/с; $V_{rg}(r, z)$ – радиальная составляющая скорости пузырьков газа, м/с; ρ_g, ρ_h – плотности пузырька газа и частицы твердой фазы, кг/м³.

Радиальная составляющая скорости частицы твердой фазы относительно дисперсионной среды U_{rh} определялась из решения дифференциального уравнения движения частицы твердой фазы с учетом инерции. Радиальная составляющая скорости пузырька газа относительно дисперсионной среды U_{rg} определялась по формуле [12; 13] без учета инерции пузырька ввиду незначительной плотности газа:

$$U_{rg} = \left[\frac{2 \left(\frac{d_g}{2} \right)^{n+1}}{9} (\rho_l - \rho_g) \frac{V_{\phi l}^2}{r k f_1(n)} \right]^{\frac{1}{n}} \Omega(\phi), \quad (7)$$

где ρ_l – плотность дисперсионной среды, кг/м³; $V_{\phi l}(r, z)$ – окружная составляющая скорости дисперсионной среды, м/с; n – показатель нелинейности кривой течения дисперсионной среды; k – индекс консистенции дисперсионной среды, Па·сⁿ; $f_1(n)$ и $\Omega(\phi)$ – поправочные коэффициенты. Поправочный коэффициент $f_1(n)$, учитывающий неньютоновские свойства дисперсионной среды, определялся согласно [13]. Поправочный коэффициент $\Omega(\phi)$, учитывающий степень стесненности движения газовых пузырьков, определялся по формуле Бреннера [9] в зависимости от объемной доли пузырьков газа в суспензии ϕ .

Полагаем, что твердая фаза разделяемой суспензии является монодисперсной, что при проведении моделирования процесса разделения напорной флотацией для наиболее мелкой фракции позволит добиться заданной остаточной концентрации частиц твердой фазы. Силой инерции, действующей на частицу твердой фазы в осевом направлении, силой тяжести и выталкивающей силой Архимеда пренебрегаем, полагая, что осевая составляющая скорости частицы твердой фазы $V_{zh}(r, z)$ равна осевой составляющей скорости дисперсионной среды $V_{zl}(r, z)$. Это допущение хорошо реализуется на практике ввиду того, что разделение в гидроциклонах суспензий с вязкопластической дисперсионной средой, обладающей высокой эффективной вязкостью, протекает при больших значениях числа Фруда (фактора разделения). Полагаем также, что окружная составляющая скорости частиц твердой фазы во входном патрубке гидроциклона $V_{\phi h0}(r, z)$ равна окружной составляющей скорости дисперсионной среды $V_{\phi l0}(r, z)$.

Принимая во внимание, что разделение в гидроциклонах суспензий с вязкопластической дисперсионной средой, обладающей высокой эффективной вязкостью, протекает в условиях, когда число Рейнольдса, характеризующее режим осаждения частицы твердой фазы, невелико, силой Магнуса можно пренебречь.

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

$$\begin{aligned} V_{rh} \frac{\partial V_{rh}}{\partial r} + V_{zh} \frac{\partial V_{rh}}{\partial z} &= \frac{V_{\phi h}^2}{r} \left(1 - \frac{\rho_l}{\rho_h} \right) - \frac{3 K_{fr} \rho_l (V_{rh} - V_{rl}) |V_{rh} - V_{rl}|}{4 \rho_h d_h \Phi(B)} \\ V_{rh} \frac{\partial V_{\phi h}}{\partial r} + V_{zh} \frac{\partial V_{\phi h}}{\partial z} &= \frac{V_{\phi h} V_{rh}}{r} - \frac{3 K_{f\phi} \rho_l (V_{\phi h} - V_{\phi l}) |V_{\phi h} - V_{\phi l}|}{4 \rho_h d_h \Phi(B)}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $K_{fr}, K_{f\phi}$ – коэффициенты сопротивления движению частицы в радиальном и окружном

направлениях; $V_{\phi h}(r, z)$ – окружная составляющая скорости частиц твердой фазы, м/с;

d_h – диаметр частиц твердой фазы, м; φ – окружная координата, град; $\Phi(B)$ – поправочный коэффициент, учитывающий стесненность осаждения частиц твердой фазы.

Коэффициенты сопротивления при радиальном и окружном движении частицы K_{fr} и $K_{f\varphi}$ определялись согласно [13]. При этом индекс консистентности k рассчитывался как эффективная вязкость псевдопластической жидкости согласно реологическому уравнению (1)

$$\begin{cases} \frac{dR}{dZ} = \frac{G_h}{H_h} \\ \frac{dC_h}{dZ} = -\frac{C_h}{H_h} \left[\frac{1}{Fg} + \frac{d(G_h - G_l)}{dR} + \frac{G_h - G_l}{R} \right] \\ \frac{dG_h}{dZ} = \frac{\Theta_h^2}{H_h R} (1 - P) - \frac{3}{4} \frac{K_{fr} P (G_h - G_l) |G_h - G_l|}{D_h \Phi(B)} \\ \frac{d\Theta_h}{dZ} = \frac{\Theta_h G_h}{R} - \frac{3}{4} \frac{K_{f\varphi} P (\Theta_h - \Theta_l) |\Theta_h - \Theta_l|}{D_h \Phi(B)} \end{cases}, \quad (9)$$

где $G_h(R, Z) = \frac{V_{rh}(r, z)}{U_0}$, $H_h(R, Z) = \frac{V_{zh}(r, z)}{U_0}$

и $\Theta_h(R, Z) = \frac{V_{\varphi h}(r, z)}{U_0}$ – безразмерные радиальная, осевая и окружная составляющие скорости частиц твердой фазы; $\Theta_l(R, Z) = \frac{V_{\varphi l}(r, z)}{U_0}$

и $G_l(R, Z) = \frac{V_{rl}(r, z)}{U_0}$ – безразмерные окружная

и радиальная составляющие скорости дисперсионной среды; $Fg = \frac{U_0}{A c_g r_k}$ – безразмерный комплекс, характеризующий интенсивность протекания

процесса флотации; $C_h = \frac{C_h}{C_{h0}}$ – безразмерная

концентрация частиц твердой фазы; $P = \frac{\rho_l}{\rho_h}$ – па-

раметр плотности; $D_h = \frac{d_h}{r_k}$ – безразмерный диа-

метр частиц твердой фазы; $R = \frac{r}{r_k}$, $Z = \frac{z}{r_k}$ – без-

размерные радиальная и осевая координаты; U_0 – средняя скорость суспензии во входном патрубке гидроциклона, м/с; r_k – радиус корпуса гидроциклона, м.

с учетом наличия у разделяемой среды предельного напряжения сдвига τ_0 .

Коэффициент $\Phi(B)$, учитывающий стесненность осаждения частиц, вычислялся по формуле В. И. Соколова [14].

В соответствии с методом характеристик [15], система дифференциальных уравнений в частных производных, задаваемая уравнениями (4) и (8), сводится к эквивалентной системе обыкновенных дифференциальных уравнений, которая может быть представлена в безразмерной форме:

Граничное условие для системы обыкновенных дифференциальных уравнений (9) имеет вид:

$$Z = 0, \quad 1 - F \leq R \leq 1, \quad C_{h0} = 1, \quad (10)$$

где C_{h0} – безразмерная концентрация частиц твердой фазы во входном патрубке гидроциклона; $B = \frac{b}{r_k}$ – безразмерная ширина входного

патрубка гидроциклона; b – ширина входного патрубка гидроциклона, м.

Аппроксимационные зависимости для осевой $H_l(R, Z)$ и окружной $\Theta_l(R, Z)$ составляющих скорости дисперсионной среды в цилиндрическом гидроциклоне приведены в [16].

Первое уравнение системы (9) определяет траекторию движения частицы твердой фазы, зависящую от места входа частицы в аппарат, т. е. задает направление характеристики, а второе – значение функции, т. е. безразмерной концентрации частиц твердой фазы C_h , характеризующей их остаточную концентрацию, на характеристике. Остальные уравнения позволяют определить радиальную $G_h(R, Z)$ и окружную $\Theta_h(R, Z)$ составляющие скорости частицы.

Система дифференциальных уравнений (9) решалась по методу Рунге-Кутты четвертого порядка с фиксированным шагом. Ввиду того, что в случае малости числа Re_{nr} скорость из-

менения осевой координаты при приближении траектории к стенке во много раз превышает скорость изменения радиальной координаты, данная система уравнений относится к классу жестких систем [17] и требует для своего решения очень большого количества шагов. Интервал интегрирования от нижней границы входного патрубка гидроциклона до выходного отверстия в нижней части корпуса разбивался на $M = 3 \cdot 10^5$ шагов по оси Z и система дифференциальных уравнений (9) численно интегрировалась с использованием программы, составленной на языке Compaq Visual Fortran. Погрешность решения системы оценивалась удвоением числа шагов и не превышала $1 \cdot 10^{-5}$.

На основании результатов моделирования полей составляющих скорости и давления при течении вязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне [7] и последующей аппроксимации результатов, было выполнено моделирование разделения суспензий с вязкопластической дисперсионной средой напорной флотацией в гидроциклоне, которое заключалось в численном решении системы дифференциальных уравнений (9) при граничном условии (10) для различных значений определяющих чисел подобия и реологических констант дисперсионной среды при изменении их в широком диапазоне.

Течение вязкопластической жидкости в гидроциклоне характеризуется [7] центробежным числом Фруда Fr (фактором разделения), модифицированным числом Рейнольдса Re_n , показателем нелинейности кривой течения n , а также параметром безразмерного расхода Q . Извлечение частиц твердой фазы из суспензии за счет флотации пузырьками газа характеризуется комплексом Fg , определяющим интенсивность стока.

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

$$S = \frac{2\pi \int_1^1 C_h H_h(R, Z) R dR}{B \int_{1-F}^1 C_{h0} \Theta_{h0}(R, Z) dR}, \quad (11)$$

где $B = \frac{b}{r_k}$ – безразмерная ширина входного

патрубка гидроциклона; $\Delta(Z) = \frac{\delta(z)}{r_k}$ – безраз-

мерная толщина пленки суспензии;

$\Theta_{h0}(R, Z) = \frac{V_{\phi h0}}{U_0}$ – безразмерная окружная со-

ставляющая скорости частиц твердой фазы во входном патрубке гидроциклона; $V_{\phi h0}(r, z)$ – окружная составляющая скорости частиц твердой фазы во входном патрубке гидроциклона, м/с; $\delta(z)$ – толщина пленки суспензии, м.

Результаты численного моделирования процесса напорной флотации в цилиндрическом гидроциклоне представлены на рис. 2, 3.

На рис. 2, а приведены кривые распределения остаточной концентрации частиц твердой фазы S по оси цилиндрического гидроциклона при значениях $Pl = 0,085$, $Re_n = 4 \cdot 10^3$, $Q = 0,02$, $n = 0,7$, $d_h = 2 \cdot 10^{-5}$ м, $d_g = 3 \cdot 10^{-5}$ м.

На кривых можно выделить участок быстрого снижения остаточной концентрации S (до $Z=2,0-2,5$), соответствующий участку наиболее интенсивного затухания окружной составляющей скорости потока. Из анализа данных, приведенных на рис. 2, а следует, что остаточная концентрация S в выходном сечении гидроциклона снижается с увеличением числа Fr (фактора разделения), что может быть объяснено увеличением толщины пленки жидкости [7] и пути, проходимо-го в жидкости частицами твердой фазы и пузырьками газа, что приводит к увеличению числа столкновений. Увеличение радиальной скорости частиц твердой фазы и пузырьков газа также приводит к росту кинетического коэффициента флотации A и снижению остаточной концентрации частиц твердой фазы S .

На рис. 2, б приведены кривые распределения остаточной концентрации частиц твердой фазы S по оси цилиндрического гидроциклона при тех же значениях, что на рис. 2, а для $n = 0,9$. Из сравнения данных, приведенных на рис. 2, а и б, следует, что остаточная концентрация S в выходном сечении гидроциклона снижается с увеличением аномалии неньютоновских свойств дисперсионной среды, характеризуемой показателем нелинейности кривой течения n . Это происходит вследствие снижения интенсивности затухания окружной составляющей скорости дисперсионной среды Θ_l в направлении оси гидроциклона при уве-

личении аномалии неньютоновских свойств [7], что вызывает возрастание радиальных составляющих скорости частиц твердой фазы G_h и пузырьков газа G_g , и кинетического коэффи-

циента флотации A , и соответствующее увеличение количества столкновений частиц с пузырьками газа и снижение остаточной концентрации S .

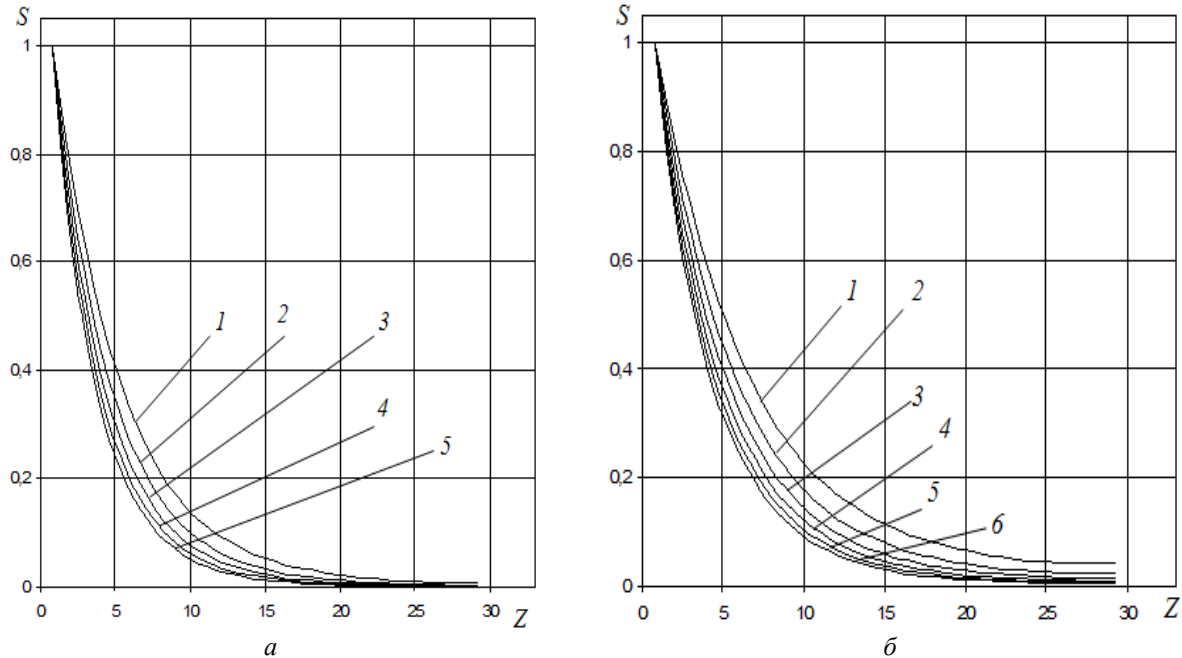


Рис. 2. Распределение остаточной концентрации частиц твердой фазы S по оси цилиндрического гидроциклона при $Pl = 0,085$, $Re_n = 4 \cdot 10^3$, $Q = 0,02$, $d_h = 2 \cdot 10^{-5}$ м, $d_g = 3 \cdot 10^{-5}$ м:
 $a - n = 0,7$; $b - n = 0,9$; 1 – $Fr = 30$; 2 – $Fr = 40$; 3 – $Fr = 50$; 4 – $Fr = 60$; 5 – $Fr = 70$; 6 – $Fr = 80$

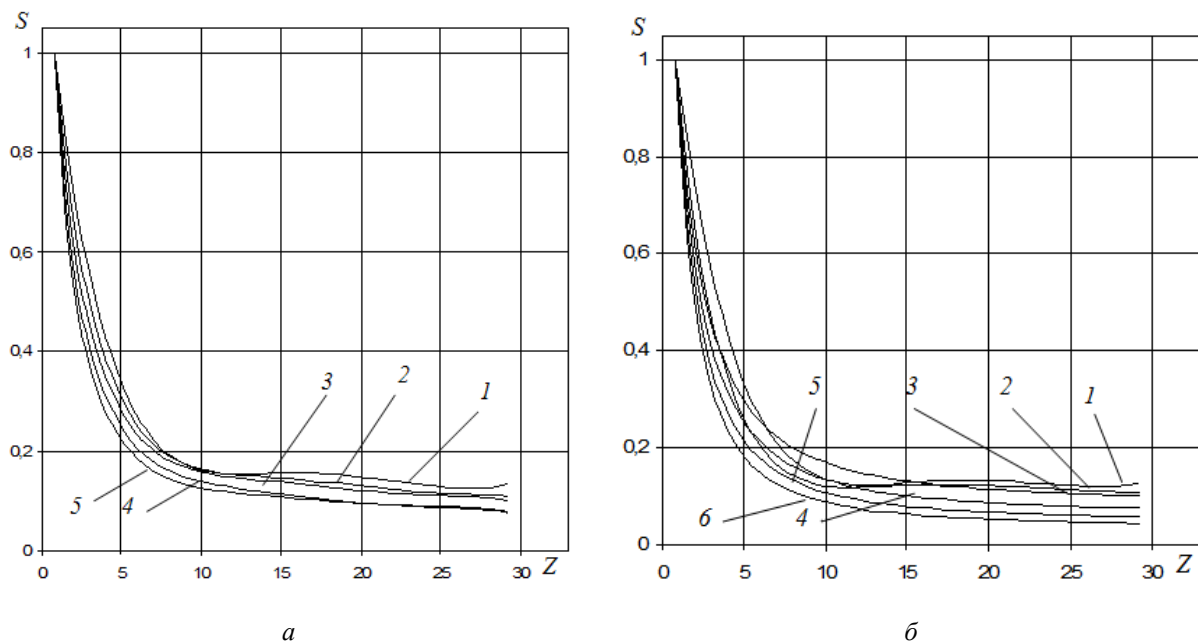


Рис. 3. Распределение остаточной концентрации частиц твердой фазы S по оси цилиндрического гидроциклона при $Pl = 0,0085$, $Re_n = 4 \cdot 10^3$, $Q = 0,02$, $d_h = 2 \cdot 10^{-5}$ м, $d_g = 3 \cdot 10^{-5}$ м:
 $a - n = 0,7$; $b - n = 0,9$; 1 – $Fr = 30$; 2 – $Fr = 40$; 3 – $Fr = 50$; 4 – $Fr = 60$; 5 – $Fr = 70$; 6 – $Fr = 80$

На рис. 3, a и b приведены те же зависимости, что на рис. 2, для значения $Pl = 0,0085$.

Из сравнения данных, приведенных на рис. 2 и рис. 3, следует, что повышение числа пла-

стичности Pl и соответствующее увеличение предельного напряжения сдвига τ_0 приводят к снижению остаточной концентрации S в выходном сечении гидроциклона, так как увеличение τ_0 приводит к увеличению аномалии неньютоновских свойств дисперсионной среды и соответствующему снижению интенсивности затухания окружной составляющей скорости дисперсионной среды Θ_l в направлении оси гидроциклона [7]. Это также приводит к снижению остаточной концентрации S по механизму, аналогичному влиянию показателя нелинейности кривой течения n .

Из сравнения рис. 2 и рис. 3 следует, что влияние показателя нелинейности кривой течения n на остаточную концентрацию частиц твердой фазы S увеличивается с ростом числа пластичности Pl и предельного напряжения сдвига τ_0 , так как приводит к большему изменению аномалии неньютоновских свойств среды.

Таким образом, с использованием разработанной математической модели разделения суспензий с вязкопластической дисперсионной средой напорной флотацией в цилиндрическом гидроциклоне установлено влияние пластических свойств и нелинейности кривой течения на остаточную концентрацию частиц твердой фазы на выходе из гидроциклона. После соответствующего экспериментального подтверждения полученные результаты могут быть положены в основу создания методики инженерного расчета гидроциклонов – флотаторов для разделения вязкопластических сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Моделирование процесса гидроциклонирования частиц «легких» фракций на фильтрующей поверхности сливного патрубка / А. Б. Голованчиков, И. М. Ламскова, А. Е. Новиков, М. И. Филимонов // Теоретические основы химической технологии. – 2022. – Т. 56, № 2. – С. 236–243.
2. Дик, И. Особенности течения высококонцентрированной суспензии в гидроциклоне / И. Дик, Л. Л. Миньков // Теоретические основы химической технологии. – 2019. – Т. 53, № 4. – С. 431–439.
3. Худобин, Л. В. Сепарация технологических жидкостей с помощью циклонной флотации / Л. В. Худобин, Г. К. Рябов // Алмазная и абразивная обработка деталей машин и инструмента. – Пенза: ППИ, 1985. – С. 41–45.
4. Орлов, С. Л. О столкновении частиц и пузырьков при пневматической флотации в центробежном поле / С. Л. Орлов // Развитие методов механической и биологической очистки сточных вод. – Москва: ВОДГЕО, 1982. – С. 132–136.
5. Разделение гетерогенных систем в цилиндрическом прямооточном гидроциклоне / А. М. Кутепов, М. Г. Лагуткин, В. И. Муштаев, С. Ю. Булычев // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2002 – № 7. – С. 14–18.
6. Вайнштейн, И. А. Об уравнениях кинетики разделения суспензий / И. А. Вайнштейн // Инженерно-физический журнал. – 1983. – Т. 45, № 4. – С. 602–608.
7. Яблонский, В. О. Влияние конструктивных параметров гидроциклона на гидродинамику нелинейно вязкопластической жидкости / В. О. Яблонский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 8. – С. 6–10.
8. Dyakowski, T. Simulation of non-newtonian flow in a hydrocyclone / T. Dyakowski, G. Hornung, R. A. Williams // Chemical Engineering Research and Design. – 1994. – Vol. 72, №4. – P. 523 – 520.
9. Дерягин, Б. В. Микрофлотация: водоочистка, обогащение / Б. В. Дерягин, С. С. Духин, Н. Н. Рулев. – Москва: Химия, 1986. – 112 с.
10. Расчет аппаратов идеального вытеснения для разделения тонких суспензий электролитическими газами / Н. В. Тябин, Г. Л. Дахина, А. Б. Голованчиков, А. А. Мамаков // Теоретические основы химической технологии. – 1979. – Т. 13, № 6. – С. 880–884.
11. Оптимизация процесса электрофлотационного разделения суспензий / Н. В. Тябин, А. Б. Голованчиков, Г. Л. Дахина, В. И. Зеленцов // Электронная обработка материалов. – № 5 – Кишинев: Штиинца, 1986. – С. 65–67.
12. К вопросу свободного осаждения сферических частиц в аномально-вязких жидкостях / Г. В. Виноградов [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 1975. – Т. 28, № 3. – С. 435–438.
13. Acharya, A. Flow of inelastic and viscoelastic fluids past a sphere / A. Acharya, R. A. Mashelkar, J. Ulbrecht // Rheologica Acta. – 1976. – Vol. 15, №9. – P. 454–463.
14. Соколов, В. И. Центрифугирование / В. И. Соколов. – Москва: Химия, 1976. – 408 с.
15. Матвеев, Н. М. Дифференциальные уравнения / Н. М. Матвеев. – Минск: Высшая школа, 1976. – 366 с.
16. Яблонский, В. О. Расчет разделения суспензий с неньютоновской дисперсионной средой в прямооточном цилиндрическом гидроциклоне / О. В. Яблонский // Химическая промышленность. – 2005. – Т. 82, № 1. – С. 40–48.
17. Каханер, Д. Численные методы и программное обеспечение / Д. Каханер, К. Моулер, С. Нэш – Москва: Мир, 2001. – 575 с.

УДК 621.396

*А. А. Шилин, Н. В. Байрашный***РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: shilinjr@gmail.com

Предложенное устройство относится к измерительной технике и может быть использовано при создании приборов для контроля электромагнитных полей и определения аварийного состояния в линиях электропередачи. Приведена схема конструкции простейших датчиков и описание первых опытов с ними. Принцип работы системы основан на регистрации изменения электромагнитного поля вокруг линии и опоры при аварийных режимах. Изменения электромагнитного поля регистрируются измерительными преобразователями, которые измеряют отдельно электрическую и магнитную составляющие поля.

Ключевые слова: воздушные линии электропередачи; аварийные режимы; электромагнитное поле; измерительные преобразователи; показатели надежности.

*A. A. Shilin, N. V. Bairashnyi***DEVELOPMENT OF AN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM
FOR MONITORING ELECTROMAGNETIC FIELDS OF OVERHEAD POWER LINES****Volgograd State Technical University**

The proposed device relates to measuring technology and can be used to create devices for monitoring electromagnetic fields and determining the emergency condition in power transmission lines. A design diagram of the simplest sensors and a description of the first experiments with them are given. The principle of operation of the system is based on the registration of changes in the electromagnetic field around the line and support in emergency conditions. Changes in the electromagnetic field are recorded by measuring transducers that measure the electric and magnetic components of the field separately.

Keywords: overhead power transmission lines; emergency modes; electromagnetic field; measuring transducers; reliability indicators.

Введение

Энергетическую систему России характеризует высокая степень морального и физического износа, высокие потери (10...15 %) и пониженный уровень надежности. Поэтому вопрос о повышении надежности ее функционирования является весьма актуальным. Из статистики надежности энергосистем следует, что самыми ненадежными элементами энергосистем являются воздушные линии электропередачи (ВЛЭП), при этом низкая надежность высоковольтных линий электропередачи объясняется частыми повреждениями проводов, что вызвано как естественными, так и искусственными причинами.

В электроэнергетике существуют два основных направления модернизации:

- увеличение энергетических мощностей, связанное с вводом новых электростанций;
- экономия электроэнергии за счет повышения коэффициента полезного действия потребителей и снижения потерь в сетях за счет оптимизации режимов их работы.

Второе направление модернизации является менее затратным и более эффективным, и по

этому направлению развивается энергетика во многих развитых странах мира. Данное направление реализуют создаваемые в настоящее время интеллектуальные электрические сети, которые представляют комплекс технических средств, работающих в автоматическом режиме и выявляющих наиболее слабые и аварийно опасные участки сети. В случае необходимости эти сети изменяют свои характеристики и топологию с целью предотвращения аварии и снижения потерь. Интеллектуальные электрические сети представляют собой систему, состоящую из двух основных частей – энергетической (силовой) и информационной. Информационная часть системы должна быть реализована на современной технической базе и поэтому является основой повышения уровня «интеллекта».

В электроэнергетике существует проблема оперативного определения места и вида аварийного режима воздушных линий электропередачи (ВЛЭП). Существуют информационно-измерительные системы регистрации вида и мест повреждения, которые содержат установ-

ленные на опорах измерительные преобразователи напряжений и токов каждой фазы. По результатам контроля токов и напряжений с помощью логической схемы определяется режим работы электрической сети. Если возникает аварийный режим, то информация о месте и виде аварии передается на центральный диспетчерский пульт. Основным недостатком такой системы, электрически соединенной с линией, является трудоемкость монтажа и обслуживания системы. Кроме того, информационные сигналы при аварийных режимах могут принимать различные значения в большом диапазоне, что затрудняет операцию определения вида аварии.

Физические основы регистрации аварийных режимов

Во время нормальной работы линии электропередачи и особенно высоковольтные создают вокруг себя электромагнитное поле, на изменение которого влияют аварийные режимы (короткие замыкания и обрывы). Эти изменения могут быть использованы для идентификации и распознавания аварийных режимов линий электропередачи. Для выявления причинно-

следственных связей между аварийными режимами и изменением электромагнитного поля необходимо использовать сведения о физических процессах вокруг линий электропередачи.

В настоящее время для регистрации изменений электромагнитного поля с частотой 50 Гц целесообразно отдельно контролировать две его составляющие: электрическое поле, зависящее от напряжения, и магнитное поле, определяемое током в проводе. Очевидно, что для реализации раздельного контроля необходимы два измерительных преобразователя.

Возможность измерения электрического поля высоковольтной ЛЭП

Датчик напряженности электрического поля

Для исследования возможности регистрации и измерения электрического поля промышленной частоты $f = 50$ Гц вблизи высоковольтных ЛЭП изготовлен датчик.

В качестве датчика напряженности электрического поля используется плоский конденсатор, представляющий собой две плоские параллельные пластины одинаковой площади S , расположенные на расстоянии d друг относительно друга (рис. 1).

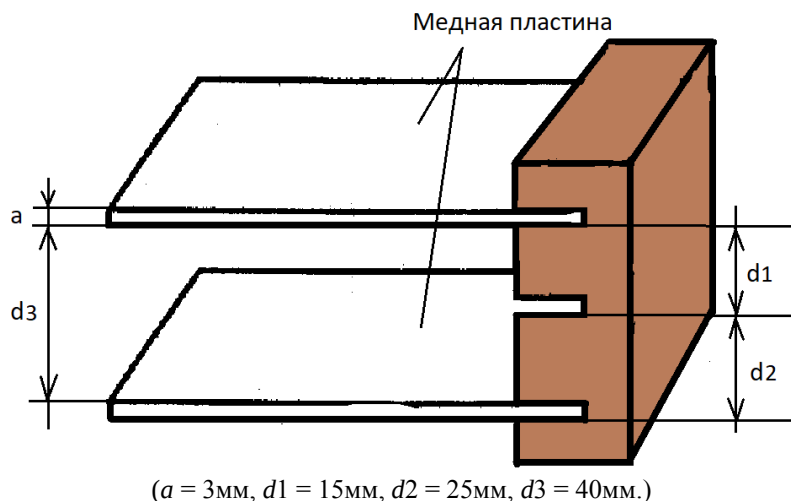


Рис. 1. Датчик электрического поля

Для оценки работоспособности датчика в лабораторных условиях была собрана установка (рис. 2). Датчик размещается под проводником с током в электрическом поле E_0 ,

проводник и датчик экранируются, нижняя пластина датчика и экран заземляются, датчик подключается к осциллографу.

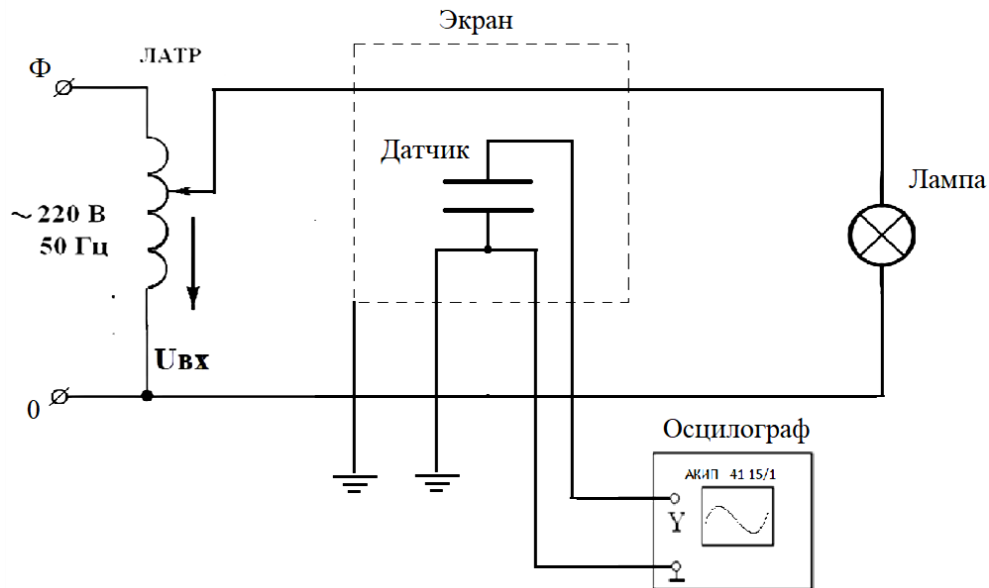


Рис. 2. Схема установки для тестирования датчика

Возможность измерения магнитного поля высоковольтной ЛЭП

Датчик индукции магнитного поля

Для исследования возможности регистрации и измерения магнитного поля промышленной частоты $f = 50$ Гц вблизи высоковольтных ЛЭП был изготовлен датчик.

В качестве датчика индукции магнитного поля используется датчик, представляющий собой катушку с ферромагнитным сердечником индуктивностью L , ось которой установлена по направлению вектора магнитного поля (рис. 3).

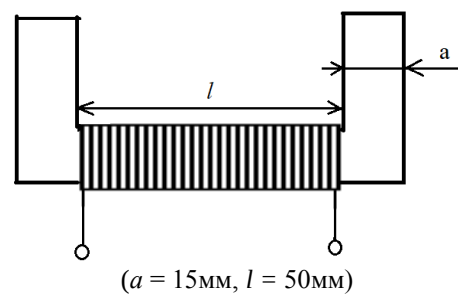


Рис. 3. Датчик магнитного поля

Для оценки работоспособности датчика в лабораторных условиях была собрана установка (рис. 4). Датчик подключен к осциллографу.

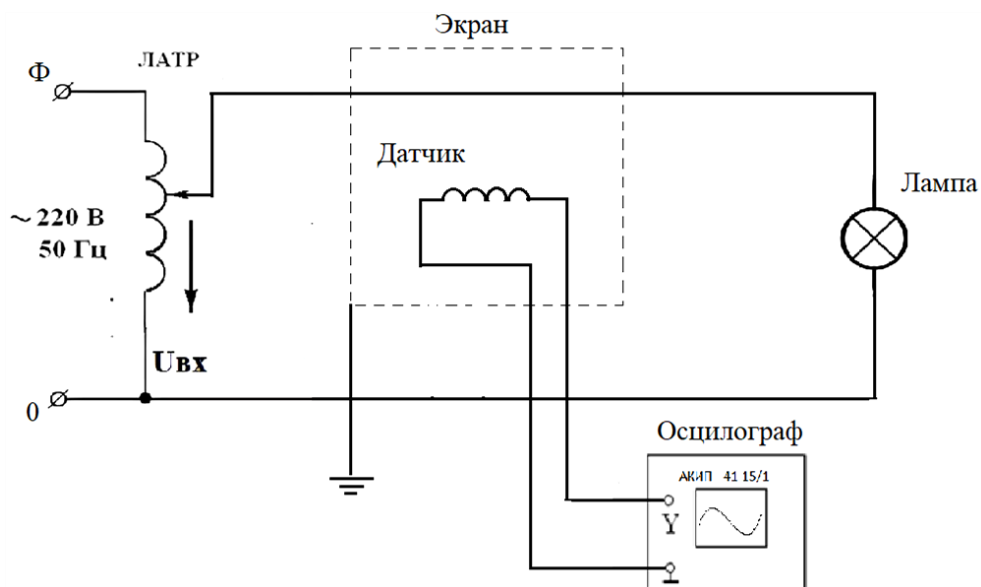


Рис. 4. Схема установки для тестирования датчика

Общий вид ИИС на основе датчиков

Разработанные выше датчики могут войти в состав устройства для определения местопо-

ложения и вида повреждения на воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) как средство для снятия первичной информации (рис. 5).

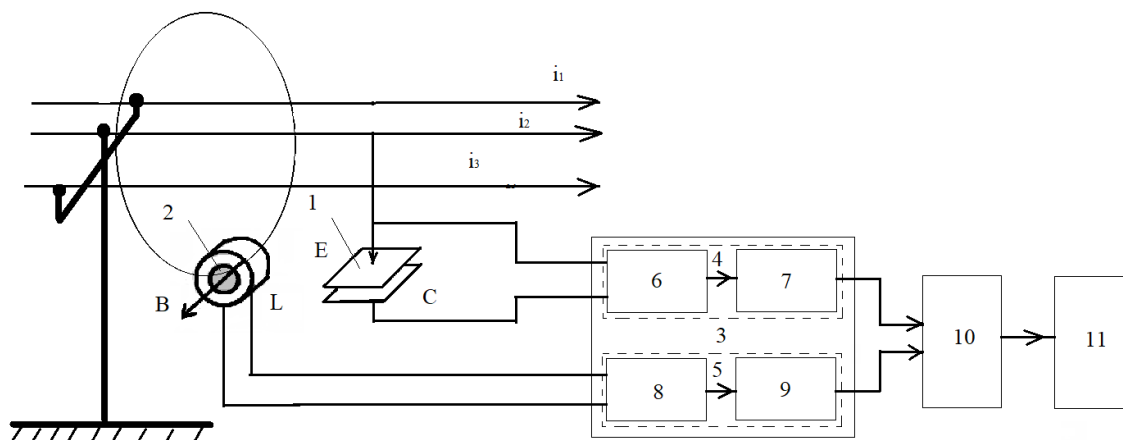


Рис. 5. Общий вид ИИС на основе датчиков

На рис. 5 представлена принципиальная схема данного устройства. Устройство содержит средство для снятия первичной информации, которое выполнено в виде двух датчиков. Датчик 1, регистрирующий суммарную напряженность электрического поля E и представляющий собой конденсатор емкостью C , состоящий из двух пластин, установленных горизонтально, и датчик 2, регистрирующий суммарную индукцию магнитного поля B и представляющий собой катушку с ферромагнитным сердечником индуктивностью L , ось которой установлена горизонтально и перпендикулярно проводам линии с токами i_1, i_2, i_3 . Выходы датчиков 1 и 2 соединены со средством обработки сигналов 3, которое выполнено в виде двух блоков 4 и 5, каждый из которых состоит из последовательно соединенных усилителя 6 и порогового устройства 7 и усилителя 8 и порогового устройства 9. Уровни напряжений срабатывания пороговых устройств 7 и 9 настраиваются в соответствии с идентификационными признаками режимов работы энергетической сети.

Выходы пороговых устройств 7 и 9 соединены с входами средства обработки информации 10, который представляет собой блок логического сравнения, предварительно настраиваемый по признакам режимов работы сети. Выход блока логического сравнения соединен со средством передачи информации 11, выполненном в виде GSM/GPRS модема, который предназначен для передачи информации на диспетчерский пункт.

Таким образом, устройство с помощью двух датчиков регистрирует изменение электромагнитного поля вокруг ВЛЭП и по результатам контроля определяет вид аварийного режима.

Заключение

Разработанные устройства распознавания вида повреждения на воздушных линиях электропередачи позволяют повысить оперативность и точность определения вида аварийного режима на ВЛЭП и представляют собой сравнительно простые конструкции для установки и эксплуатации.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шилин, А. Н. Погрешности измерения электрического поля воздушных линий электропередачи в системе контроля аварий / А. Н. Шилин, А. А. Шилин, Ф. Т. Нгуен // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2016. – № 3 (15). – С. 7–13.
2. Шилин, А. Н. Приборы контроля и диагностики в электроэнергетике : учеб. пособие / А. Н. Шилин, А. А. Шилин, Н. С. Артюшенко, С. С. Деметьев ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2017. – 132 с.
3. Михеев, В. П. Датчики и детекторы: учеб. пособие / В. П. Михеев, А. В. Просандеев. – М. : МИФИ, 2007. – 172 с.
4. Кузнецова, Н. С. Рефлектометр с автоматической коррекцией методической погрешности для определения места повреждения линии электропередачи : дис. ... канд. техн. наук / Н. С. Кузнецова. – Волгоград, 2017. – 111 с.
5. Макашева, С. И. Оценка электромагнитных полей, создаваемых высоковольтными линиями электропередачи : метод. указания по выполнению курсовой работы / С. И. Макашева. – Хабаровск : Изд-во ДВГУПС, 2017. – 40 с.
6. П.м. 100632 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Устройство для определения местоположения и вида повреждения на воздушной линии электропередачи / А. А. Шилин, А. Н. Шилин, В. С. Лукьянов ; ГОУ ВПО ВолгГТУ. – 2010.
7. П.м. 108149 Российская Федерация, МПК G 01 R 31/08. Устройство для определения местоположения и вида повреждения на воздушной линии электропередачи / А. А. Шилин, А. Н. Шилин ; ГОУ ВПО ВолгГТУ. – 2011.
8. Бессонов, А. А. Теоретические основы электротехники : Электрические цепи / А. А. Бессонов. – М. : Высшая школа, 1978. – 528 с.
9. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники. В 3 т. Т. 1 / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – СПб. : Питер, 2003. – 443 с.

УДК 504.064

*А. Н. Шилин, Д. С. Захаров***РАЗРАБОТКА ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ
ДЛЯ РАДИАЦИОННОГО МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ
НА БАЗЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: eltech@vstu.ru

Рассмотрен способ получения данных о мощности дозы: рассчитаны погрешности, метод получения данных, блок схема прибора, принцип работы.

Ключевые слова: показатели надежности; мощность дозы; структурная надежность; оценка быстродействия; воздушная разведка радиационного мониторинга; ионизирующее излучение.

*A. N. Shilin, D. S. Zaharov***DEVELOPMENT OF AN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEM
FOR RADIATION MONITORING OF THE ENVIRONMENT
BASED ON AN UNMANNED AERIAL VEHICLE****Volgograd State Technical University**

The method of obtaining data on the dose rate is considered: errors are calculated, the method of obtaining data, the block diagram of the device, the principle of operation.

Keywords: reliability indicators; dose rate; structural reliability; performance evaluation; aerial reconnaissance of radiation monitoring; ionizing radiation.

Введение

Дозиметр-прибор для измерения поглощенной и эквивалента дозы фотонного или нейтрального излучения, кермы фотонного излучения, а также для измерения мощности этих величин. Изучения и открытие ученых Рентгена и Беккереля дали человечеству такое новое понятие, как новая физическая реальность, которая является неощутимой и невидимой для человека, но регистрируется измерительным прибором. Углубляясь в историю, можно вспомнить, что одним из самых первых приборов-детекторов рентгеновского и гамма-излучения была обыкновенная фотопленка. Но пленка могла вывести только факт самого излучения, но не точную оценку полученной дозы. Первый прибор, который является прототипом современного дозиметра и дает точную оценку полученной дозы, – счетчик, созданный немецким физиком Гансом Вильгельмом Гейгером в 1908 году. Газоразрядный детектор, как его еще называли, стал одним из прототипов современных дозиметров ионизирующего излучения (ИИ). Вначале прибор был собран экспериментаторами и использовался только для лабораторных исследований.

До середины XX века прибор так и не приобрел популярность. Но с первым применением ядерного оружия и взрывом Чернобыль-

ской атомной электростанции, дозиметр стал неотъемлемой вещью, которой должен был владеть человек, находясь в местах с повышенным радиоактивным фоном. Излучение негативно воздействует на организм человека, поэтому необходимо проверять радиоактивный фон, так как оказывает прямое воздействие, приводящее к гибели клеток. Облучение вызывает множество различных болезней, вплоть до развития раковых клеток, смертельных для человека. Только после 1986 г. у людей появилась возможность купить дозиметр, который раньше использовали в крайней секретности военные и ученые для собственных целей. Через три года после аварии Национальная комиссия по вопросам радиационной защиты смогла разработать Концепцию о системе радиационного контроля для осуществления населения. В данном документе поднимался следующий вопрос для людей, проживающих на территориях, зараженных радионуклидами, необходимо организовать систему постоянного мониторинга гамма-фона. Это необходимо, чтобы люди смогли самостоятельно измерять дозы облучения, продукты питания, корма для животных на протяжении всей жизни и, таким образом, значительно уменьшить влияние радиации. Для этого комиссия поручила наладить производство и ис-

пользовать простые малогабаритные бытовые дозиметры – измерители или индикаторы радиации по гамма-излучению.

Первые приборы для измерения радиоактивного фона, которые появились на полках специальных магазинов, предназначались для людей, находящихся в зоне радиационного загрязнения, где было возможно постоянное проживание и ведение хозяйственной деятельности без ограничений. Фон в местах, где люди могут жить без каких-либо ограничений, не должен был превышать 0,6 мкВв/ч. Также допускалось проживание в зонах, где фон не превышал 1,2 мкВв/ч, если дома и различные постройки имели некоторую защиту от облучения с коэффициентом ослабления не менее 3. В зонах выше 1,2 мкВв/ч требовалось перенаправление людей в более чистые районы проживания.

В качестве средств дозиметрического контроля людям предлагались элементарные индикаторы радиоактивности со световым и звуковым сопровождением, настроенные на уровни мощности дозы 0,6 мкЗв/ч и 1,2 мкЗв/ч по гамма-излучению. Предлагались модели, например, ДРГ-15(Сверчок), ДРГ-20(Светофор). На тот момент база электроники позволяла создать более усовершенствованные модели, но цена их была высока.

Современные бытовые дозиметры отличаются от предыдущих моделей большой функциональностью, обширным сервисом. Такие приборы создаются на базе микроконтроллеров и микропроцессоров с собственным программным обеспечением, имеют удобные для работы меню, встроенную память для фиксации сотен результатов измерений, цветные цифровые дисплеи для визуального отображения всей необходимой информации.

Способ получения параметров на месте аварийного радиационного источника, по данным ВРРМ, заключается в следующем: определение

дозы мощности гамма-излучения в зависимости от высоты подъема облака радиоактивных примесей и активности радиоактивных веществ, вышедших в окружающую среду в случае аварии; путем решения обратной задачи по данным ВРРМ на базе БПЛА. Измерение гамма-излучения радиоактивного облака происходит с интервалом 1 мин и на высоте от 0 метров до 150 метров над уровнем исследуемой зоны. БПЛА оснащают:

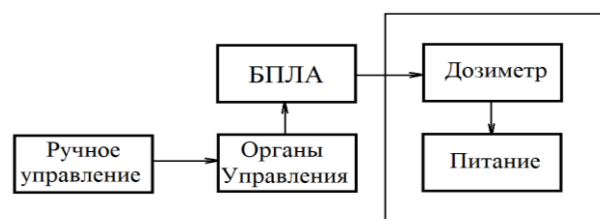
дозиметром, производящем замеры с интервалом в 1 мин и выводящем среднее показание за весь эксперимент;

GPS-модулем, благодаря которому можно узнать его нахождение;

видеокамерой, которая транслирует все происходящее на смартфон в реальном времени;

прибором измерением высоты относительно уровня земли над местом взятия проб;

устройством запоминания места взлета. В случае, если оператор не заметит, что аккумулятор разряжен, БПЛА автоматически вернется на место взлета.



Блок-схема системы мониторинга

Погрешность прогноза загрязнения окружающей среды в результате аварийных радиоактивных выбросов в атмосферу складывается из погрешности модели переноса примесей и погрешностей исходных данных.

В задачах прогноза распространения радиоактивных примесей в атмосфере широкое распространение получила гауссова модель рассеяния общего вида:

$$D(x, y, z) = \frac{QK}{(2\pi)^{\frac{3}{2}}\sigma_x(x)\sigma_y(x)\sigma_z(x)} \exp\left(-\frac{(x-x_u-ut)^2}{2\sigma_x(x)^2} - \frac{(y-y_u)^2}{2\sigma_y(x)^2}\right) \times \left(\exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z(x)^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z(x)^2}\right)\right) \quad (1)$$

где D – мощность дозы (МД) в точке пространства (x, y, z) , Зв/ч; K – коэффициент перехода от активности к МД в заданных единицах измерения; x, y – координаты точки на местности, м;

x_u, y_u – координаты аварийного источника, м; $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ – дисперсии распределения примеси в облаке, м; u – скорость среднего ветра, м/с; Q – активность источника, Бк; H – высота источника, м.

Кратность ослабления гамма-излучения с высотой h аппроксимируется экспоненциальной зависимостью:

$$K(h) = \exp(ah^{0.8}), \quad (2)$$

Для рассмотренных условий высота и активность источника загрязнения из модели (2) находятся из решением системы уравнений с двумя неизвестными вида:

$$\begin{aligned} D_1 &= \frac{QK}{\pi\sigma_x(x_{o1})\sigma_z(x_{o1})} \exp\left(-\frac{x_{o1}^2}{2\sigma_x(x_{o1})^2} - \frac{H^2}{2\sigma_z(x_{o1})^2}\right) \\ D_2 &= \frac{QK}{\pi\sigma_x(x_{o2})\sigma_z(x_{o2})} \exp\left(-\frac{x_{o2}^2}{2\sigma_x(x_{o2})^2} - \frac{H^2}{2\sigma_z(x_{o2})^2}\right). \end{aligned} \quad (3)$$

Система может иметь аналитическое решение, например, вида:

$$\begin{aligned} H &= \sqrt{\ln\left(\frac{D_2}{D_1} \frac{\sigma_x(x_2)\sqrt{\sigma_z(x_2)}}{\sigma_x(x_1)\sqrt{\sigma_z(x_1)}} \exp\left(\frac{x_1^2}{2\sigma_x(x_1)^2} - \frac{x_2^2}{2\sigma_x(x_2)^2}\right) \frac{\sigma_z(x_1)\sigma_z(x_2)}{2\sigma_z(x_2) - 2\sigma_z(x_1)}\right)} \\ Q &= \frac{D_1 \pi^{\frac{3}{2}} \sigma_x(x_1) \sqrt{\sigma_z(x_1)}}{\exp\left(\frac{-x_1^2}{2\sigma_x(x_1)^2} + \frac{-H^2}{2\sigma_z(x_1)^2}\right) K}, \end{aligned} \quad (4)$$

либо решаться численными методами.

Для поиска решения (4) необходимо произвести измерения МД по оси следа в двух точках [1]. В целях исключения радиоактивного загрязнения поверхностей БПЛА маршрут полета должен прокладываться над сформированной частью следа, то есть пересекать ось следа на удалении от эпицентра аварии на расстоянии не более

$$l = u(t_{\text{из}} - t_{\text{ав}}) \quad (5)$$

где u – скорость ветра, м/с; $t_{\text{из}}$ – время проведения измерений, $t_{\text{ав}}$ – время начала выброса радиоактивных примесей.

Для получения статистически важного значения координаты оси следа и величины МД на высоте 1 м от поверхности земли проводят измерения не менее чем на четырех уровнях. Для этого полет осуществляют по «этажерке» на высотах $h_1, h_1 + \Delta h, h_1 + 2\Delta h, h_1 + 3\Delta h$, где $\Delta h \geq 50$ м [2; 3]. При ведении разведки на нечетных уровнях удерживают первоначально выбранное направление, на четных – противоположное.

За точку на оси следа принимают среднее значение проекций координат максимумов на поверхность земли:

$$A_{o1}(\bar{x}_{o1}, \bar{y}_{o1}) = A_{o1}\left(\frac{\sum_{i=1}^4 \bar{x}_i}{4}, \frac{\sum_{i=1}^4 \bar{y}_i}{4}\right). \quad (6)$$

Определяют кратность ослабления МД слоями воздуха Δh на оси следа A_{o1} по проведенным измерениям:

$$k_i = \frac{D_{\max i}}{D_{\max i+1}}. \quad (7)$$

Из (2) находят математическое ожидание коэффициента:

$$\alpha_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{\ln k_i}{h_{i+1}^{0.8} - h_i^{0.8}}}{3}. \quad (8)$$

По измеренным значениям оценивают значение МД на высоте 1 м от поверхности земли над осью следа:

$$D_1 = \frac{\sum_{i=1}^4 D_{\max i} \exp(\alpha_{cp} h_i)}{4}. \quad (9)$$

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ефимов, В. В. Основы аэродинамики и динамики полета летательных аппаратов / В. В. Ефимов, В. Г. Ципенко, В. Т. Калугин. – Москва : МГТУ ГА, 2003. – 26 с.
2. Мартынов, В. В. Система для радиационного мониторинга окружающей среды на базе беспилотного летательного аппарата / В. В. Мартынов // XXIV региональная конференция молодых ученых и исследователей Волгоградской области (г. Волгоград, 03-06 дек. 2019 г.) : тез. докл. / редкол.: А. В. Навроцкий [и др.] ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2020. – С. 262–263.
3. Беляев, Б. И. Оптическое дистанционное зондирование / Б. И. Беляев, Л. В. Катковский. – Минск : БГУ, 2016. – 455 с.

УДК 621.43

А. В. Курапин

**ВЛИЯНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ
НА ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ
КОМБИНИРОВАННОГО ДИЗЕЛЯ ПРИ СБРОСЕ И НАБРОСЕ НАГРУЗКИ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: a_kurapin@vstu.ru

В статье представлена математическая модель расчета переходных процессов в комбинированном дизеле, основанная на модели стационарных рабочих процессов. Приводятся результаты моделирования переходных процессов в комбинированном дизеле Д-145Т на режимах наброса и сброса нагрузки при постоянной частоте вращения коленчатого вала, полученных путем мгновенного увеличения и уменьшения цикловой подачи топлива.

Ключевые слова: комбинированный дизель, переходные процессы, изменение нагрузки, цикловая подача топлива.

A. V. Kurapin

**INFLUENCE OF TRANSIENT PROCESSES ON THE ECONOMIC
AND EFFICIENT INDICATORS OF A COMBINED DIESEL ENGINE
DURING A SHARP INCREASE AND A SHARP DECREASE IN LOAD**

Volgograd State Technical University

The article presents a mathematical model for calculating transient processes in a combined diesel engine, based on a model of stationary working processes. The results of simulation of transient processes in the D-145T combined diesel engine in the modes of loading and unloading at a constant crankshaft speed, obtained by instantaneous increase and decrease in the cyclic fuel supply, are presented.

Keywords: combined diesel, transient processes, load change, cyclic fuel supply.

Транспортные дизели в условиях эксплуатации значительную часть времени работают на переходных режимах. Переходные процессы занимают от 20 до 50 % всего времени работы дизелей. При этом мощностные, экономические и экологические показатели дизеля при этих процессах значительно отличаются от показателей на установившихся режимах [1; 2].

Предлагаются математическая модель, методика и результаты расчета переходных процессов в комбинированном дизеле при набросе и сбросе нагрузки, использование которых позволяет проследить влияние различных конструктивных и регулировочных параметров дизеля на показатели его работы при переходных режимах и определить их оптимальные значения, позволяющие получить наилучшие экономические показатели.

Рабочий цикл дизеля, реализуемый в условиях эксплуатации, представляет собой некоторую совокупность установившихся и неустановившихся (переходных) режимов. Математическая модель должна отражать оба вида режимов. Рабочие циклы, составляющие переходный процесс, различны, поэтому методика расчета должна обеспечивать определение текущих параметров не только в течение одного цикла, но и во всей последовательности циклов, т. е. во время всего переходного процесса. Таким образом, математическая модель рабочего цикла на переходном режиме должна базироваться на одном из методов расчета стационарных режимов [3; 4], ибо из-за цикличности работы поршневого двигателя понятие об установившемся режиме справедливо с точностью до цикла. Считают, что в течение цикла все входные

и выходные параметры не зависят от времени. Следовательно, на установившемся режиме все следующие друг за другом рабочие циклы в каждом цилиндре абсолютно одинаковы. Но ведь в течение одного цикла параметры рабочего тела как в цилиндре, так и во впускном и выпускном коллекторах заметно изменяются во времени. И современные методы расчета установившихся режимов с достаточной для практики точностью позволяют проследить эти изменения. Таким образом, достоверность результатов расчета переходных режимов принципиально возможна.

Сформируем математическую модель рабочих процессов двигателя на переходных режимах.

Реальная система газозовдухообмена двигателя (коллекторы и цилиндры) аппроксимируется цепочкой полостей, связанных между со-

бой каналами, через которые и осуществляется газообмен [5–7]. Течение газа в полостях и каналах принимается одномерным, а изменение его состояния в полостях – адиабатическим. Кроме конвективного теплообмена, связанного с перетеканием газа через каналы между полостями, учитывается подвод тепла к газу при сгорании топлива и теплообмен между газом и стенками, а также изменение состояния, связанное с изменением объема полости.

Рассмотрим изменение состояния газа в полости i , связанной с полостью j каналом F_{ij} (рис. 1). Текущее состояние газа в полости характеризуется объемом V_i , давлением P_i , температурой T_i , удельной изохорной теплоемкостью C_{vi} и газовой постоянной R_i . Процесс изменения состояния газа в полости i рассматривается как квазистационарный. Этому процессу соответствует следующая физическая интерпретация.

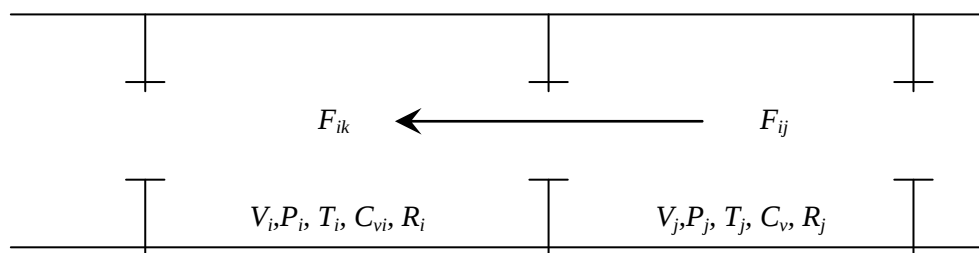


Рис. 1. Расчетная схема рабочей полости

В момент времени t в полости i находится масса газа M_i , движущаяся со скоростью ω_i и обладающая внутренней энергией $E_i = C_{vi} \cdot M_i \cdot T_i$ и кинетической энергией $E_{ki} = 0,5 M_i \omega_i^2$.

В связи с расходом газа через каналы его масса в полости i будет изменяться со скоростью, равной сумме расходов $\sum_{j=1}^N G_{ij}$, где G_{ij} – расход газа через канал связи между полостями i и j . Расход газа будем считать положительным при поступлении газа в полость i .

В случае впрыскивания топлива в полость масса газа в ней получит дополнительное при-

ращение $\frac{dm_{Ti}}{dt} \cdot \Delta t$, где $m_{Ti}(t)$ – закон подачи топлива. Таким образом, для описания скорости накопления массы в отдельной полости за малый промежуток времени Δt , в течение которого процесс газообмена может рассматриваться как стационарный, справедливо дифференциальное уравнение:

$$\frac{dM_i}{dt} = \sum_{j=1}^N G_{ij} + \frac{dm_{Ti}}{dt} \quad (1)$$

Аналогичные рассуждения позволяют записать дифференциальное уравнение изменения энергии газа в полости:

$$\frac{d}{dt} (C_{vi} M_i T_i + 0,5 M_i \omega_i^2) = \sum_{j=1}^N C_{pj} G_{ij} T_j + 0,5 \sum_{j=1}^N G_{ij} \omega_j^2 + \frac{dQ_i}{dt} - \frac{dQ_{Toi}}{dt} - P_i \frac{dV_i}{dt} \quad (2)$$

Система уравнений (1), (2) замыкается уравнением состояния:

$$P_i V_i = M_i R_i T_i \quad (3)$$

и уравнением Майера:

$$R_i = C_{pi} - C_{vi}, \quad (4)$$

где C_{pi} – удельная изобарная теплоемкость газа в полости i .

Левая часть уравнения (2) представляет скорость накопления внутренней и кинетической энергии газа в полости i . Составляющие правой части уравнения (2) имеют следующий

физический смысл:

$\sum_{j=1}^N C_{pk} C_{ij} T_k$ – скорость изменения теплосодержания газа в полости i в связи с массообменом, где индекс $k = i$ при $P_i > P_j$; $k = j$ при $P_i < P_j$.

$0,5 \sum_{j=1}^N G_{ij} \omega_{ij}^2$ – сумма скоростей прихода

и ухода кинетической энергии газа в полость i в связи с массообменом, где ω_{ij} – скорость газа в канале связи между полостями i и j ;

$\frac{dQ_i}{dt}$ – скорость подвода тепла к газу в полости i при сгорании топлива;

$P_i \frac{dV_i}{dt}$ – скорость производства внешней

работы газа при изменении объема полости.

По имеющимся оценкам, кинетическая энергия газов составляет величину второго порядка малости от внутренней его энергии и от энтальпии, что дает основание на первом этапе анализа процессов газообмена ее не учитывать.

При этом уравнение (2) примет вид:

$$\frac{d}{dt}(C_{vi} M_i T_i) = \sum_{j=1}^N C_{pk} C_{ij} T_k + \frac{dQ_i}{dt} - \frac{dQ_{Toi}}{dt} - P_i \frac{dV_i}{dt}. \quad (5)$$

Продифференцировав левую часть уравнения (5) и разрешив его относительно dT_i / dt , получим дифференциальное уравнение температуры газа в полости i :

$$\frac{dT_i}{dt} = \frac{1}{C_{vi} M_i} \sum_{j=1}^N C_{pk} C_{ij} T_k + \frac{1}{C_{vi} M_i} \left[\frac{dQ_i}{dt} - \frac{dQ_{Toi}}{dt} - P_i \frac{dV_i}{dt} - C_{vi} T_i \frac{dM_i}{dt} \right]. \quad (6)$$

Дифференциальное уравнение давления газа в полости i получим, продифференцировав правую и левую части уравнения состояния (3) при $R_i = \text{const}$:

$$V_i \frac{dP_i}{dt} + P_i \frac{dV_i}{dt} = R_i T_i \frac{dM_i}{dt} + R_i M_i \frac{dT_i}{dt} \quad (7)$$

Из уравнения (7) следует:

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{R_i T_i}{V_i} \frac{dM_i}{dt} + \frac{R_i M_i}{V_i} \frac{dT_i}{dt} - \frac{P_i}{V_i} \frac{dV_i}{dt};$$

с учетом уравнения (3) имеем:

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{P_i}{M_i} \frac{dM_i}{dt} + \frac{P_i}{T_i} \frac{dT_i}{dt} - \frac{P_i}{V_i} \frac{dV_i}{dt} \quad (8)$$

Учитывая циклический характер рабочих процессов двигателя, дифференциальные уравнения (1), (6), (8) целесообразно представить в функции угла поворота кривошипа φ путем замены dt на $d\varphi$ с учетом зависимости $dt = d\varphi / \omega$, где ω – частота вращения коленчатого вала двигателя.

После замены dt на $d\varphi$ и преобразований получим замкнутую систему уравнений относительно производных по углу поворота коленчатого вала от массы, температуры и давления газа в выделенной полости системы газообмена:

$$\left. \begin{aligned} M_i &= \frac{P_i \cdot V_i}{R_i \cdot T_i}; \\ \frac{dM_i}{d\varphi} &= \frac{\sum_{j=1}^N G_{ij} + \omega \frac{dm_{Ti}}{d\varphi}}{\omega}; \\ \frac{dP_i}{d\varphi} &= \frac{P_i}{M_i} \frac{dM_i}{d\varphi} + \frac{P_i}{T_i} \frac{dT_i}{d\varphi} - \frac{P_i}{V_i} \frac{dV_i}{d\varphi}; \\ \frac{dT_i}{d\varphi} &= \frac{1}{\omega C_{vi} M_i} \sum_{j=1}^N C_{pk} G_{ij} T_k + \frac{1}{C_{vi} M_i} \left[\frac{dQ_i}{d\varphi} - \frac{dQ_{Toi}}{d\varphi} - P_i \frac{dV_i}{d\varphi} - C_{vi} T_i \frac{dM_i}{d\varphi} \right]; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Система линейных дифференциальных уравнений (9) описывает состояние газа как в цилиндрах двигателя, так и в коллекторах выпуска и наполнения. Модель позволяет проанализировать влияние на показатели работы дви-

гателя в установившихся и переходных режимах следующих факторов: группировки цилиндров, впускных и выпускных коллекторов, турбокомпрессоров; объемов коллекторов и площадей их сечений в узловых точках; фаз газораспреде-

ния; основных размеров клапанов, их количества и законов подъема; конструктивных параметров топливоподающей аппаратуры. В данной работе она используется также для расчета сходственных установившихся режимов.

Из-за отсутствия на начальном этапе проектирования точного описания геометрии и конструкции газоздушного тракта двигателя, а также граничных и начальных условий, строится квазистационарная модель течений газов с использованием принципа изотропности рабочего тела в исследуемой полости двигателя. Поток принимается одномерным. Модель допускает ориентировочное задание начальных условий с последующим их уточнением методом итераций.

Для расчета интегральных показателей двигателя и моделирования переходного процесса в системе дизель-турбокомпрессор определяются следующие параметры: работа газа в цилиндре на любом участке цикла при соответствующем изменении угла поворота кривошипа от φ_n до φ_k ; средняя мощность соответствующего процесса в цилиндре за цикл, кВт; текущая удельная адиабатическая работа газа в канале турбины, кДж; удельная адиабатическая работа сжатия воздуха в компрессоре, кДж; средняя за цикл адиабатическая мощность турбины, кВт; частота вращения вала турбокомпрессора, об/мин

Условие прекращения переходного процесса в системе дизель-турбокомпрессор и переход ее в установившийся режим заключается в балансе мощностей турбины и компрессора

$$N_{ki} = \eta_{тк} \cdot N_{ti}, \quad (10)$$

где N_{ki} – адиабатическая мощность компрессора; $\eta_{тк}$ – общий адиабатический КПД турбокомпрессора ($\eta_{тк} = 0,42 \dots 0,55$); N_{ti} – адиабатическая мощность турбины.

Учитывая, что

$$N_{ki} = \frac{k}{k-1} G_g R_g T_0 \left[\left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (11)$$

из уравнения (10) получаем зависимость для расчета давления P_k и температуры T_k воздуха после компрессора:

$$P_k = \left[\frac{1000 \eta_{тк} N_{ti} (k-1) P_0}{k G_g R_g T_0 + 1} \right]^{\frac{k}{k-1}}, \quad (12)$$

$$T_k = T_0 \left(\frac{P_k}{P_0} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (13)$$

где k – показатель политропы воздуха при сжатии в компрессоре; G_g – расход воздуха через компрессор.

Полученные значения P_k , T_k при наступлении установившегося режима должны с определенной погрешностью Δ совпадать с их значениями, заданными в качестве начальных условий для данного цикла расчета. В противном случае в двигателе еще будет продолжаться переходный процесс, полученные значения P_k и T_k принимаются за начальные условия и расчет цикла повторяется. Таким образом, реализуются циклы переходного процесса до выполнения условий установившегося режима.

Моделирование переходного процесса в комбинированном дизеле при использовании описанной выше стационарной модели (система уравнений (9)) возможно при выполнении некоторых условий.

Первое условие – постоянство частоты вращения коленчатого вала двигателя. Переходный процесс, при котором резко увеличивается («набрасывается») нагрузка, а частота вращения вала остается постоянной, характерен для дизель-генераторных установок. Однако и в автотракторных двигателях встречаются такие режимы, например, при работе бульдозера или пахотного агрегата, когда встречается тяжелый участок, резко возрастает нагрузка, и регулятор резко перемещает рейку топливного насоса. Хотя частота вращения коленчатого вала при этом несколько изменяется, будем считать ее постоянной.

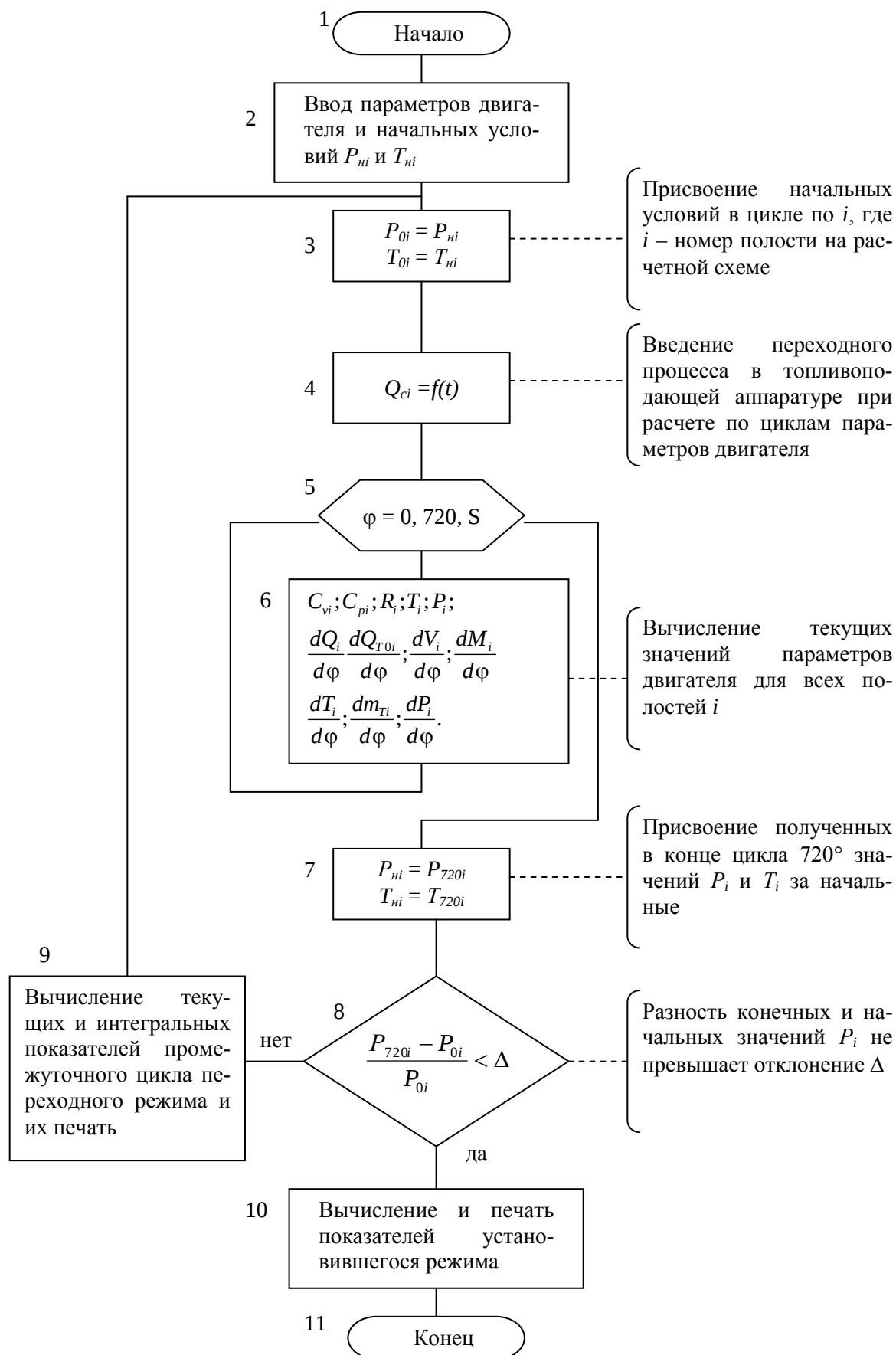


Рис. 2. Алгоритм расчета переходного процесса в комбинированном дизеле

Второе условие необходимо для упрощения модели. Не рассматривается переходный процесс в регуляторе частоты вращения вала двигателя. Считаем, что переходный процесс в нем уже закончился и рассматриваем процессы только в ТА и дизеле.

Третьим условием является безынерционность ротора турбокомпрессора.

При выполнении указанных условий моделируется переходный процесс в дизеле с использованием результатов расчета переходного процесса в топливоподающей системе [8; 9]. Изменение цикловой подачи топлива в течение переходного процесса аппроксимировалось полиномом. Последний использовался при расчете рабочего цикла в дизеле.

Алгоритм расчета переходных процессов (переходных режимов) работы комбинированного дизеля представлен на рис. 2. В блоке 8, где проверяется условие наступления установившегося режима, под полостью i подразумевается компрессор наддувочного воздуха.

Методика расчета переходных процессов заключается в следующем. С использованием программы расчета установившегося режима определяются начальные условия (P_{oi} , T_{oi}) в полостях двигателя, соответствующие исходному установившемуся режиму, то есть цикловой подаче исходного установившегося режима. Затем используется программа расчета переходного процесса, при этом количество циклов переходного процесса в топливоподающей системе и цикловая подача топлива для каждого цикла в виде полинома берутся из расчета переходного процесса в топливоподающей системе. По истечении последнего продолжается переходный процесс в двигателе, который прекратится при выполнении условия установившегося режима. Показатели циклов переходного процесса записываются в файл результатов. По этим данным строятся переходные процессы в дизеле.

Для сравнения параметров установившегося и неустановившегося режимов рассчитываются также сходственные установившиеся режимы работы двигателя, соответствующие цикловым подачам переходного процесса в топливоподающей системе.

В соответствии с описанной методикой были проанализированы переходные процессы, полученные в результате мгновенного увеличения и уменьшения цикловой подачи топлива, то есть, соответственно, при набросе и сброса нагрузки в дизеле Д-145Т с насосом УТН-5 при постоянной частоте вращения вала насоса $n = 1000$ об/мин.

На рис. 3, а; 4, а; 5, а; 6, а и 7, а приведено изменение показателей рабочего цикла дизеля Д-145Т в течение переходного процесса при набросе нагрузки. Подача топлива Q_c увеличивается от 20 до 70 мм³ и стабилизируется в течение 0,24 с., однако переходный процесс в дизеле длится 0,6 с. (рис. 5, а). Следует отметить, что это время переходного процесса несоизмеримо мало в сравнении со случаем, когда при набросе нагрузки путем увеличения цикловой подачи топлива скорость вращения коленчатого вала увеличивается [10]. Это объясняется как особенностью протекания процессов рабочего цикла при изменяющейся скорости вращения коленчатого вала, так и инерционностью подвижных частей дизеля. По окончании переходного процесса в системе топливоподдачи (0,24 с.) скорость вращения ротора турбокомпрессора $n_{тк}$ далеко не соответствует установившемуся режиму (рис. 3, а), и, как следствие, – к этому моменту давление наддува P_k (рис. 7, а) и расход наддувочного воздуха G_v (рис. 4, а) намного меньше, чем в установившемся режиме. Этому соответствует и уменьшенное значение коэффициента избытка воздуха α (рис. 3, а). В конце переходного процесса в топливоподающей системе меньшие значения, чем в установившемся режиме, приобретают такие показатели, как среднее индикаторное давление P_i (рис. 7, а), эффективная мощность N_e (рис. 5, а), максимальное давление цикла P_z и температура наддувочного воздуха T_k (рис. 6, а). Удельный эффективный расход топлива g_e больше в сравнении с установившимся режимом (рис. 4, а). Ухудшение мощностных и экономических показателей дизеля, а также снижение максимального давления цикла объясняется уменьшением коэффициента избытка воздуха, что привело к неполному сгоранию топлива.

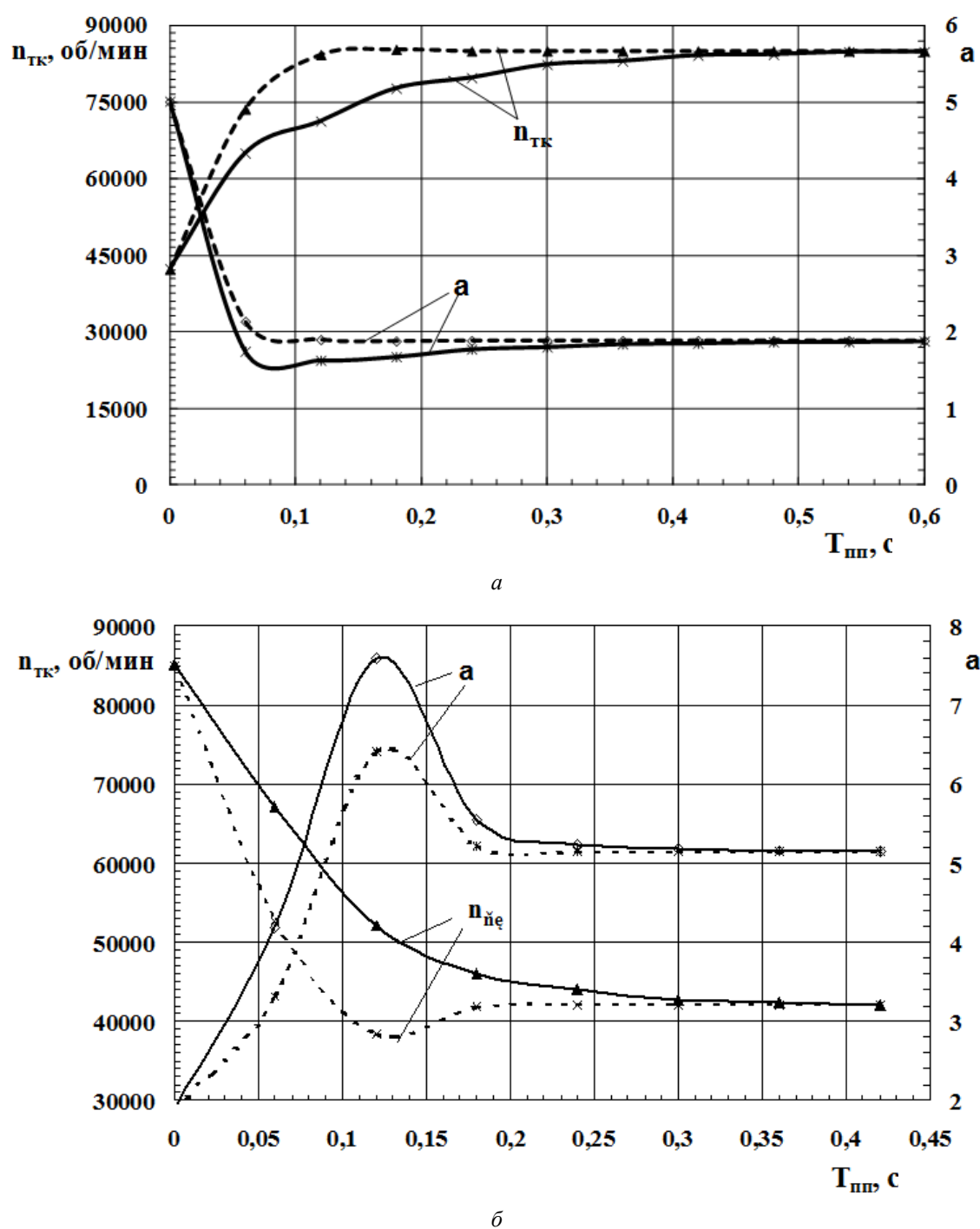
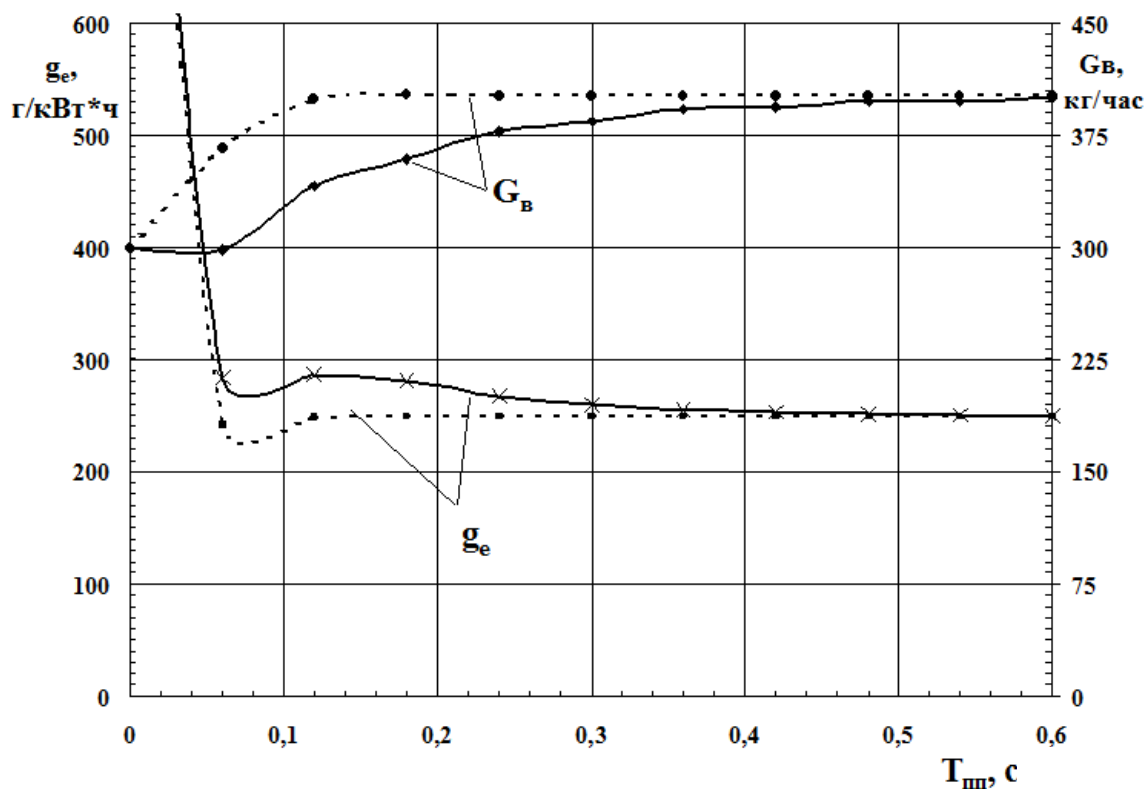
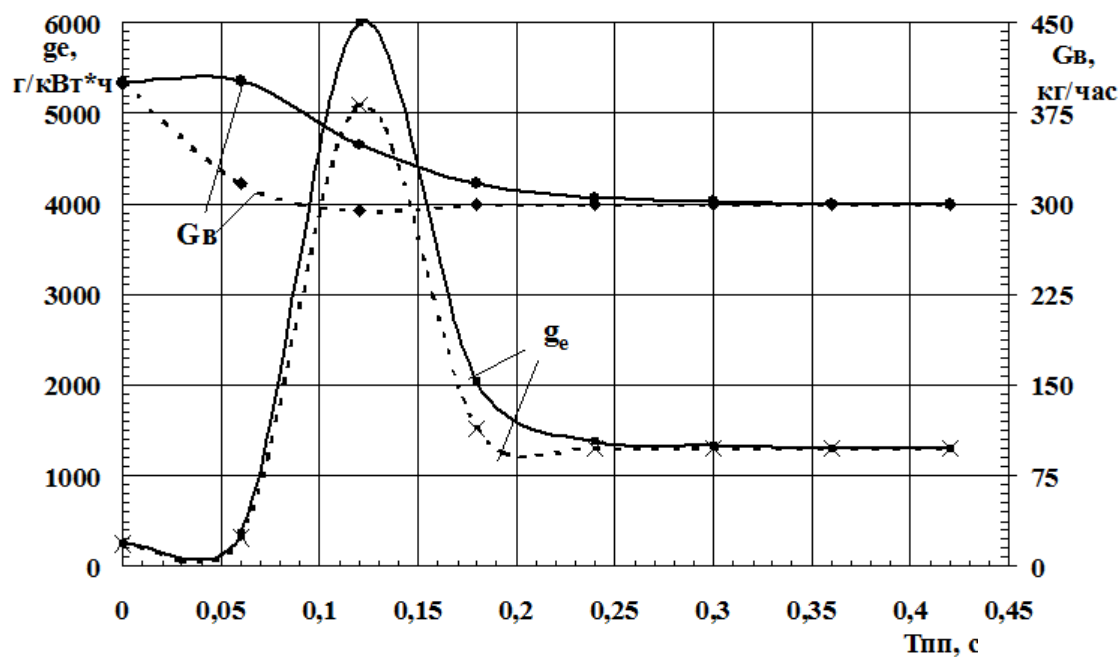


Рис. 3. Изменение коэффициента избытка воздуха α и частоты вращения ротора турбокомпрессора n_{TK} комбинированного дизеля Д-145Т при набросе нагрузки от холостого хода до номинальной (а), и при сбросе нагрузки от номинальной до холостого хода (б).

Режимы: — — — — — неустойчивые; - - - - - соответствующие им установившиеся



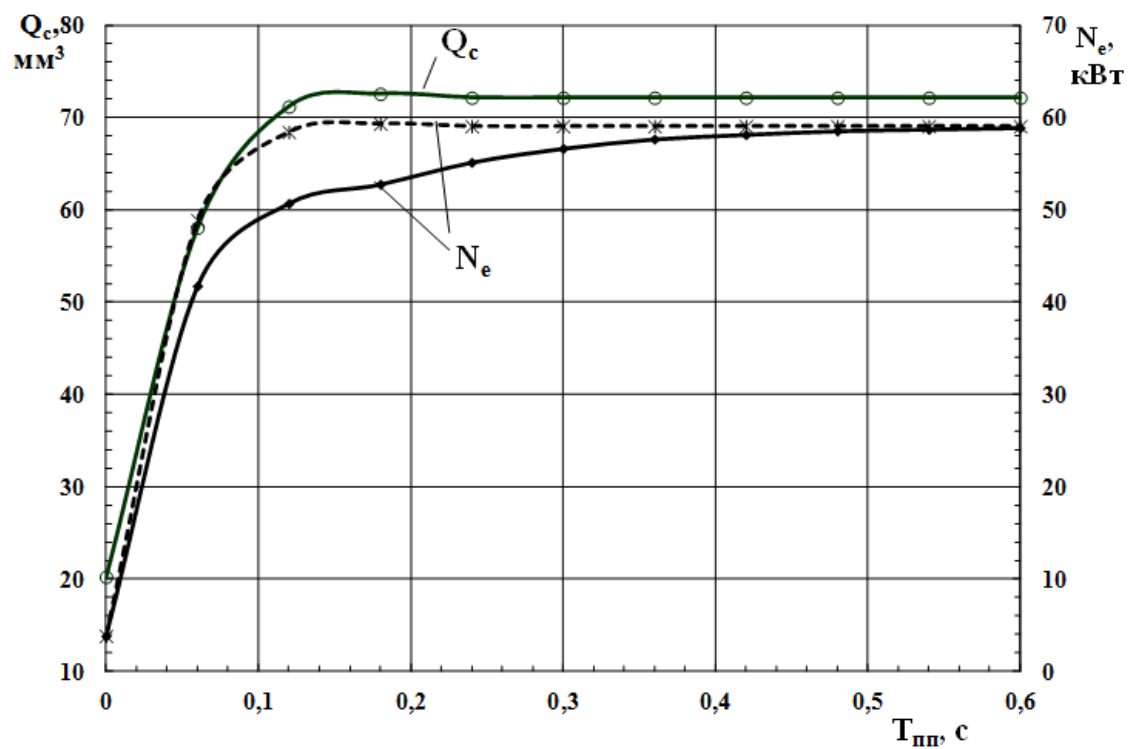
а



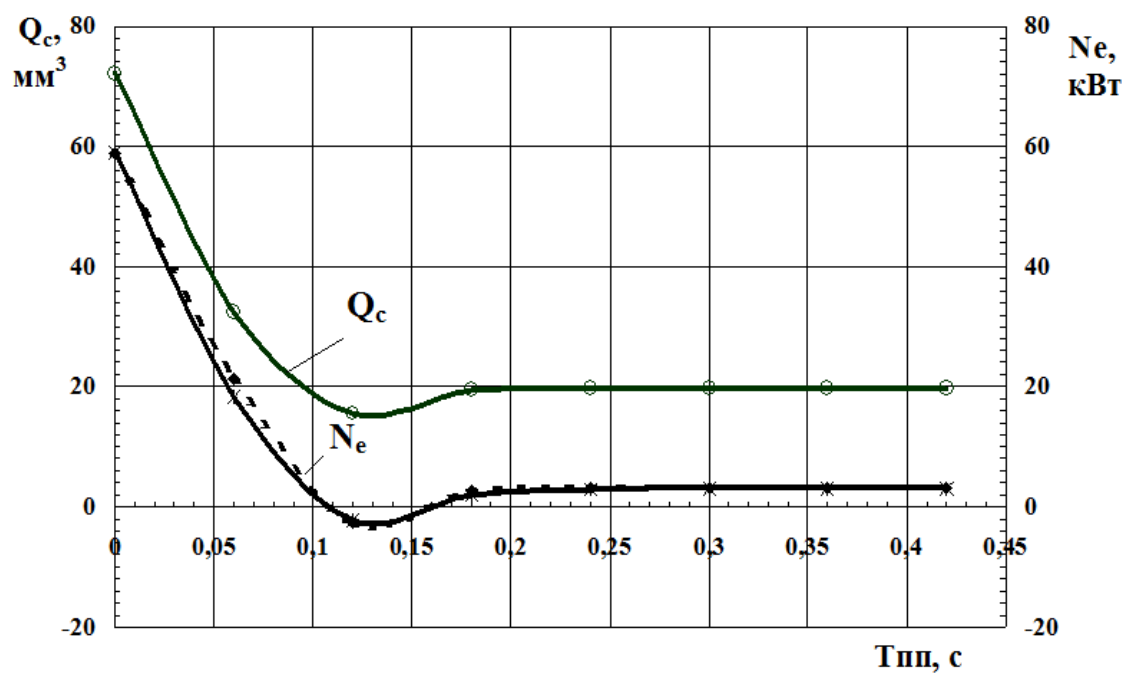
б

Рис. 4. Изменение часового расхода воздуха G_B и удельного эффективного расхода топлива g_e комбинированного дизеля Д-145Т при набросе нагрузки от холостого хода до номинальной (а), и при сбросе нагрузки от номинальной до холостого хода (б).

Режимы: — — — — — неустойчивые; — — — — — соответствующие им установившиеся



а



б

Рис. 5. Изменение цикловой подачи топлива Q_c и эффективной мощности N_e комбинированного дизеля Д-145Т при набросе нагрузки от холостого хода до номинальной (а), и при сбросе нагрузки от номинальной до холостого хода (б).

Режимы: ————— — неустановившиеся; - - - - - — соответствующие им установившиеся

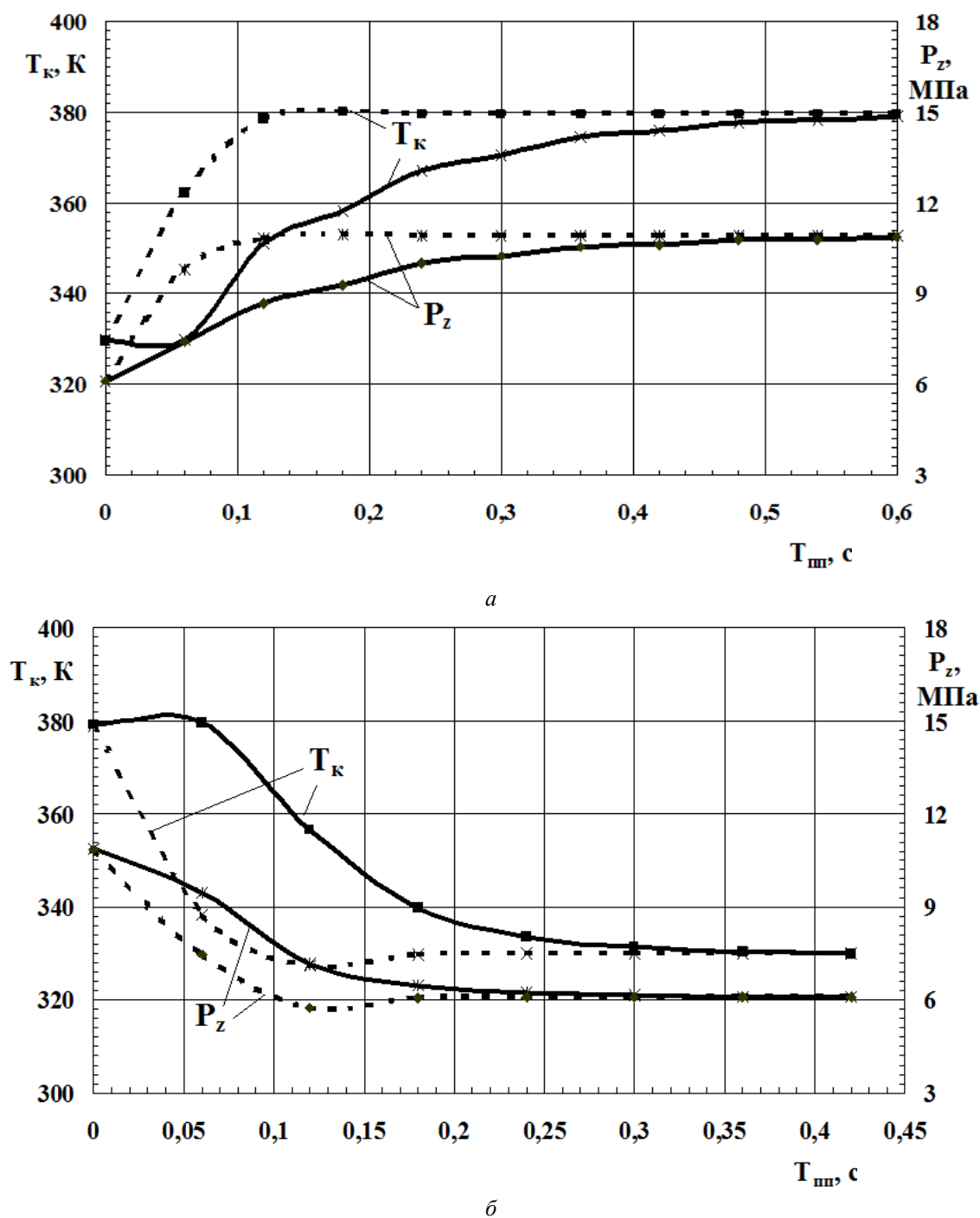


Рис. 6. Изменение температуры наддувочного воздуха T_k и максимального давления цикла P_z комбинированного дизеля Д-145Т при набросе нагрузки от холостого хода до номинальной (а), и при сбросе нагрузки от номинальной до холостого хода (б).

Режимы: — — — — — неустойчивый; - - - - - соответствующие им установившиеся

Вторая фаза характеризуется незначительным изменением цикловой подачи и продолжается до окончания переходного процесса в топливоподающей системе.

Третья фаза длится до окончания переходного процесса в дизеле.

В первой фазе резкому нарастанию цикловой подачи соответствует также резкое увеличение эффективной мощности N_e , среднего индикаторного давления P_i и давления наддувочного воздуха P_k , расхода воздуха G_v и температуры наддувочного воздуха T_k (см. рис. 4, а, 5, а, 6, а, 7, а).

В конце первой фазы переходного процесса наблюдается наибольшее отличие исследуемых показателей цикла от их значений в соответствующем сходственном установившемся режиме (на рисунках показан штриховой линией). Для второй фазы характерно уменьшение этого отличия, что особенно заметно в третьей фазе переходного процесса.

При сбросе нагрузки (уменьшение цикловой подачи топлива Q_c от 70 до 20 мм³) время переходного процесса в системе топливоподачи составляет также 0,24 с, как и при набросе на-

грузки (рис. 5, б). Переходный процесс в дизеле длится 0,42 с. Резкое уменьшение цикловой подачи продолжается 0,12 с. В течение этого времени значительно изменяются N_e , (рис. 5, б), P_i , P_k (рис. 7, б), $n_{тк}$ (рис. 3, б). В меньших пределах в этой фазе переходного процесса изменяются расход воздуха G_e (рис. 4, б), давление P_z и температура наддувочного воздуха T_k (рис. 6, б). Заброс коэффициента избытка воздуха α соответствует резкому увеличению удельного расхода топлива g_e (рис. 3, б и 4, б).

В начале второй фазы переходного процесса заметно изменяются α , $n_{тк}$ и G_v (рис. 3, б и 4, б). Другие параметры изменяются меньше.

В третьей фазе все параметры почти не изменяются и приближаются к своим значениям в сходственном установившемся режиме.

Для наглядности показатели работы дизеля в неустойчивом и сходственном установившемся режимах приведены в таблице.

**Показатели работы комбинированного дизеля
в переходном и сходственном установившемся режимах**

Показатель	Наброс нагрузки		Сброс нагрузки	
	переходный режим	установивш. режим	переходный режим	установивш. режим
Время переходного процесса в дизеле, с	0,6	—	0,42	—
Коэффициент избытка воздуха α	1,747	2,136	7,59	6,41
Частота вращения ротора турбокомпрессора $n_{тк}$, об/мин	71284	84308	52117	38473
Расход воздуха G_e , кг/час	298,5	366	348,6	294,6
Удельный расход топлива g_e , г/кВт·ч	283,75	242,4	2042,4	1514,65
Эффективная мощность N_e , кВт	50,7	58,4	1,936	2,612
Давление наддува P_k , МПа	0,142	0,178	0,146	0,114
Индикаторное давление P_i , МПа	1,0	1,13	0,21	0,21
Температура наддувочного воздуха T_k , К	350,92	378,49	356,6	327,4
Максимальное давление в цилиндре P_z , МПа	8,69	10,83	7,16	5,75

В заключение можно отметить, что разработанная методика расчета показателей рабочего цикла дизелей на неустойчивых режимах позволяет смоделировать сброс и наброс нагрузки при неизменной частоте вращения коленчатого вала.

Расчеты показали, что при набросе нагрузки время переходного процесса в дизеле больше, чем при сбросе нагрузки, и наиболее значительное изменение показателей рабочего цикла дизеля происходит в период резкого увеличения или уменьшения цикловой подачи топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Архангельский, В. М. Работа автотракторных двигателей на неустойчивых режимах / В. М. Архангельский, Г. Н. Злотин. — М.: Машиностроение, 1979. — 215 с.
2. Работа дизелей в условиях эксплуатации: Справочник / А. К. Костин, Б. П. Пугачев, Ю. Ю. Кочинев; под общ. ред. А. К. Костина. — Л.: Машиностроение, 1989. — 284 с.
3. Круглов, М. Г. Газовая динамика комбинированных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / М. Г. Круглов, А. А. Меднов. — М.: Машиностроение, 1988. — 360 с.
4. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: учеб. пособие / З. М. Петриченко и др.; под

общ. ред. З. М. Петриченко. – Л.: Машиностроение, 1990. – 328 с.

5. Расчет и оптимизация процессов и систем комбинированных дизелей: учеб. пособие / Е. А. Григорьев, В. М. Славущий, В. И. Игнатенко и др.; ВолгГТУ. – Волгоград, 1994. – 100 с.

6. Математическое моделирование и алгоритмы расчета рабочих процессов комбинированного двигателя: учеб. пособие / В. И. Игнатенко, Хани Мансур; ВолгГТУ. – Волгоград, 1997. – 64 с.

7. Дульгер, М. В. Газовая динамика и агрегаты наддува ДВС. Учеб. пособие / М. В. Дульгер, Г. Н. Злотин, Е. А. Федянов Волгоград: ВолгПИ. – 1989. – 330 с.

8. Славущий, В. М. Переходные процессы в топливоподающей аппаратуре дизелей / В. М. Славущий, А. В. Курапин // Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – № 10. – С. 31–35.

9. К исследованию переходных процессов в топливоподающей системе транспортных дизелей / В. М. Славущий, А. В. Курапин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 6 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2008. – (Серия «Процессы преобразования энергии и энергетические установки»; вып. 1). – С. 34–38.

10. Костин, А. К. Эксплуатационные режимы транспортных дизелей / А. К. Костин, К. Б. Ермекбаев. – Алма-Ата: Наука, 1988. – 190 с.

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» (ВолгГТУ)

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

Темплан 2022 г. (научные издания). Поз. № 19ж. Дата выхода в свет 28.09.2022 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 5,58. Уч.-изд. л. 5,04.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 407.

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

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

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

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

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

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