

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 1 (26)
2019



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ





Издается
с января 2004 г.

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

ISSN 2500-0586

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

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
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. Дарманиян – д.т.н., проф. ВГАУ,
г. Волгоград
А. М. Иванов – д.т.н., проф.,
МГТУ (МАДИ), г. Москва
В. В. Кортаев – д.т.н., проф., ИТМО,
г. Санкт-Петербург
О. Г. Котиев – д.т.н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов – д.т.н., проф., СГТУ
им. Ю. А. Гагарина, г. Саратов
Мертен Клеменс – д.т.н., проф.,
университет г. Штутгарт, Германия
В. А. Марков – д.т.н., проф., МВТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. В. Навроцкий – д.т.н., проф., ВолГТУ
Б. В. Скворцов – д.т.н., проф., СГАУ
им. академика С. П. Королева, г. Самара
О. А. Тишин – д.т.н., проф., ВолГТУ
Е. А. Федянов – д.т.н., проф., ВолГТУ
В. М. Шаповалов – д.т.н., проф. ВолГТУ;
В. М. Шарипов – д.т.н., проф., МГТУ
(МАМИ), г. Москва
А. Н. Шилин – д.т.н., проф., ВолГТУ

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

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

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

№ 1 (26)
Март
2019

УЧРЕДИТЕЛЬ:
ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет»
Периодичность: четыре раза в год

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

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

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

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

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

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

VSTU Publisher tel.:

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

© Volgograd State Technical University,
«Energo- e resursosberezhenie: promyshlennost' i transport», 2019

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:
ПИ .N° (ФЦ77-64543, registration date: 22 January 2016

**№ 1 (26)
March
2019**

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

- Авдоши В. А. 65
Атрашенко О. С. 19
Баринов В. В. 39
Витальева Е. М. 45
Водопьянов В. И. 39
Ганзин С. В. 65
Голованчиков А. Б. 7, 11, 14, 23, 37, 39, 42
Горлов И. Ф. 45
Губицкая Е. В. 49
Джерайом Н. 32
Клещук В. В. 11
Копейкина Т. В. 28
Кофи Куаме Э. 32
Курбатова Д. А. 14
Кустов И. А. 57
Мазина Л. В. 49
Мгебришвили И. В. 45
Меренцов Н. А. 7, 11
Минь Кьонг Доан 42
Остапенко А. А. 7
Парахневич Д. В. 49
Парахневич Е. Д. 49
Прохоренко Н. А. 7, 11, 23, 37
Романенко М. Д. 37, 39
Русакова Г. Г. 14, 49
Русакова М. М. 49
Санжапов Р. Р. 61, 65
Сильченков Д. Д. 61
Смольская Д. О. 7, 11
Соболевский М. О. 61
Федянов Е. А. 57
Цыбенко А. Ф. 49
Чёрикова К. В. 14
Чижикова Ю. М. 61
Шибитова Н. В. 42
Яблонский В. О. 32
Янборисов Р. Р. 65

AUTHOR INDEX

- Atrashenko O. S. 19
Avdoshin V. A. 65
Barinov V. V. 39
Chizhikova Yu. M. 61
Chyorikova K. V. 14
Fedyanov E. A. 57
Ganzin S. V. 65
Golovanchikov A. B. 7, 11, 14, 23, 37, 39, 42
Gorlov I. F. 45
Gubitskaya E. V. 49
Jeraiom N. 32
Kleschuk V. V. 11
Kofi Kuame E. 32
Kopeykina T. V. 28
Kurbatova D. A. 14
Kustov I. A. 57
Mazina L. V. 49
Merentsov N. A. 7, 11
Mgebrishvili I. V. 45
Minh Cuong Doan 42
Ostapenko A. A. 7
Parakhnevich D. V. 49
Parakhnevich E. D. 49
Prohorenko N. A. 7, 11, 23, 37
Romanenko M. D. 37, 39
Rusakova G. G. 14, 49
Rusakova M. M. 49
Sanzhapov R. R. 61, 65
Shibitova N. V. 42
Silchenkov D. D. 61
Smolskaya D. O. 7, 11
Sobolevsky M. O. 61
Tsybenko A. F. 49
Vitalieva E. M. 45
Vodop'ianov V. I. 39
Yablonskii V.O. 32
Yanborisov R. R. 65

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Меренцов Н. А., Смольская Д. О., Остапенко А. А.</i>	
Моделирование тепловых процессов при противоточном движении горячего и холодного теплоносителя в двухходовом кожухотрубном теплообменнике.....	7
<i>Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А., Смольская Д. О., Меренцов Н. А., Клещук В. В.</i>	
Расчет оптимального числа смесителей в каскаде.....	11
<i>Голованчиков А. Б., Чёрикова К. В., Русакова Г. Г., Курбатова Д. А.</i>	
Расчет оптимального расхода экстрагента с учетом капитальных затрат и оборотных средств.....	14
<i>Атращенко О. С.</i>	
Перспективы создания системы электроснабжения постоянного тока для автономного электроснабжения.....	19
<i>Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А.</i>	
Расчет оптимального диаметра труб с учетом энерго- и ресурсосбережения.....	23
<i>Копейкина Т. В.</i>	
Борьба с образованием гололеда на проводах ЛЭП.....	28
<i>Яблонский В. О., Кофи Куаме Э., Джерайом Н.</i>	
Оптимизация режимов работы цилиндрического гидроциклона для разделения сточных вод производства суспензионного поливинилхлорида.....	32
<i>Романенко М. Д., Голованчиков А. Б., Прохоренко Н. А.</i>	
Вакуумная сушилка с паровой рубашкой и функцией рециклинга пара.....	37
<i>Романенко М. Д., Голованчиков А. Б., Водопьянов В. И., Баринев В. В.</i>	
Методика поверхностного упрочнения и инженерный расчет режущего инструмента.....	39
<i>Голованчиков А. Б., Минь Кыонг Доан, Шибитова Н. В.</i>	
Аппроксимация экспериментальных данных методом наименьших квадратов и методом наименьших относительных квадратов.....	42
<i>Мгебришвили И. В., Горлов И. Ф., Витальева Е. М.</i>	
Разработка низкочастотной технологии сгущения бахчевых культур.....	45
<i>Русакова М. М., Русакова Г. Г., Парахневич Е. Д., Парахневич Д. В., Мазина Л. В., Губицкая Е. В., Цыбенко А. Ф.</i>	
Логистическая цепь производства семян сарептской горчицы.....	49

Часть 2. ТРАНСПОРТ

<i>Кустов И. А., Федянов Е. А.</i>	
Уточнение основанной на понятии удельной работы методики априорной оценки эффективности регулирования рабочего объема двигателя отключением цилиндров.....	57
<i>Сильченко Д. Д., Санжапов Р. Р., Чижикова Ю. М., Соболевский М. О.</i>	
Решение задачи ресурсосбережения за счет совершенствования организации дорожного движения.....	61
<i>Янборисов Р. Р., Авдоиш В. А., Ганзин С. В., Санжапов Р. Р.</i>	
Возможности использования стандартного видеоряда транспортного потока для анализа соответствия состояния дорожного покрытия требованиям безопасности дорожного движения.....	65

CONTENTS

Part 1. INDUSTRY

<i>Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Merentsov N. A., Smolskaya D. O., Ostapenko A. A.</i>	
MODELING OF HEAT PROCESSES UNDER THE FLASHING MOTION OF THE HOT AND COLD HEAT CARRIER IN THE DOUBLE-SHEED COIL HEAT EXCHANGER.....	7
<i>Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A., Smolskaya D. O., Merentsov N. A., Kleschuk V. V.</i>	
THE CALCULATION OF THE OPTIMAL NUMBER OF MIXERS IN CASCADE.....	11
<i>Golovanchikov A. B., Chyrikova K. V., Rusakova G. G., Kurbatova D. A.</i>	
CALCULATION OF THE OPTIMUM EXPENDITURE OF THE EXTRACENT WITH ACCOUNTING CAPITAL EXPENDITURES AND CURRENT MEANS.....	14
<i>Atrashenko O. S.</i>	
THE PROSPECTS OF CREATION OF SYSTEM OF POWER SUPPLY OF THE DIRECT CURRENT FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY.....	19
<i>Golovanchikov A. B., Prokhorenko N. A.</i>	
CALCULATION OF THE OPTIMAL DIAMETER OF PIPES, TAKING INTO ACCOUNT ENERGY AND RESOURCE SAVING.....	23
<i>Kopeykina T. V.</i>	
COMBATING THE FORMATION OF ICE ON THE WIRES OF POWER LINES.....	28
<i>Yablonskii V. O., Kofi Kuame E., Jeraiom N.</i>	
OPTIMIZATION OF WORKING REGIMES OF CYLINDRICAL HYDROCYCLONE FOR SUSPENSIOUS POLIVINILCHLORID DRAIN WATER SEPARATION.....	32
<i>Romanenko M. D., Golovanchikov A. B., Prohorenko N. A.</i>	
STEAM-JACKETED VACUUM DRYER AND STEAM RECYCLING FUNCTION.....	37
<i>Romanenko M. D., Golovanchikov A. B., Vodop'ianov V. I., Barinov V. V.</i>	
METHOD OF SURFACE STRENGTHENING AND ENGINEERING CALCULATION OF CUTTING TOOL.....	39
<i>Golovanchikov A. B., Minh Cuong Doan, Shibitova N. V.</i>	
THE APPROXIMATION OF EXPERIMENTAL DATA USING THE LEAST SQUARES METHOD AND THE LEAST RELATIVE SQUARES METHOD.....	42
<i>Mgebrishvili I. V., Gorlov I. F., Vitalieva E. M.</i>	
THE DEVELOPMENT OF LOW-COST TECHNOLOGIES THE CONCENTRATION OF THE PULP OF WATERMELON AND MELON...	45
<i>Rusakova M. M., Rusakova G. G., Parakhnevich E. D., Parakhnevich D. V., Mazina L. V., Gubitskaya E. V., Tsybenko A.F.</i>	
LOGISTICS CHAIN IS PRODUCTION SAREPTA MUSTARD.....	49

Part 2. TRANSPORT

<i>Kustov I. A., Fedyanov E. A.</i>	
REFINING THE METHOD BASED ON THE CONCEPT OF SPECIFIC WORK FOR ESTIMATE OF THE EFFECTIVENESS VARIABLE DISPLACEMENT ENGINE DISCONNECTING THE CYLINDERS.....	57
<i>Silchenkov D. D., Sanzhapov R. R., Chizhikova Yu. M., Sobolevsky M. O.</i>	
SOLUTION OF THE PROBLEM OF RESOURCE SAVING AT THE EXPENSE OF AN ORGANIZATION OF ROAD TRAFFIC.....	61
<i>Yanborisov R. R., Avdoshin V. A., Ganzin S. V., Sanzhapov R. R.</i>	
POSSIBILITIES OF USING A STANDARD TRAFFIC FLOW VIDEO SEQUENCE FOR ANALYZING THE COMPLIANCE OF A ROAD CONDITION WITH ROAD SAFETY REQUIREMENTS.....	65

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 66.021.4.046

А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов, Д. О. Смольская, А. А. Остапенко

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПРОТИВОТОЧНОМ ДВИЖЕНИИ ГОРЯЧЕГО И ХОЛОДНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ДВУХХОДОВОМ КОЖУХОТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННИКЕ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: natasha292009@yandex.ru

Описывается конструкция двухходового кожухотрубного теплообменника с противоточным движением теплоносителей в трубах и межтрубном пространстве. Проводятся сравнительные расчеты технологических параметров и геометрических размеров предлагаемой конструкции и типового двухходового кожухотрубного течения одного теплоносителя в трубах с перекрестным током второго теплоносителя в межтрубном пространстве на примеры утилизации тепла дымовых газов водой. Показывается преимущество противоточного движения обоих теплоносителей вдоль поверхности труб по сравнению с продольно-поперечным их движением в типовой конструкции.

Ключевые слова: противоточное движение, перекрестный ток, межтрубное пространство, двухходовое движение, продольное течение, продольно-поперечное течение, коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи, поверхность теплопередачи.

A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko, N. A. Merentsov, D. O. Smolskaya, A. A. Ostapenko

MODELING OF HEAT PROCESSES UNDER THE FLASHING MOTION OF THE HOT AND COLD HEAT CARRIER IN THE DOUBLE-SHEED COIL HEAT EXCHANGER

Volgograd State Technical University

The design of a two-way shell-and-tube heat exchanger with countercurrent movement of coolants in pipes and annular space is described. Comparative calculations of technological parameters and geometrical dimensions of the proposed design and typical two-way shell-and-tube flow of one heat carrier in pipes with cross currents of the second heat carrier in the annular space are carried out for examples of flue gas heat utilization by water. The advantage of countercurrent movement of both fluids along the surface of pipes is shown in comparison with their longitudinal transverse movement in a typical design.

Keywords: countercurrent motion, cross current, annular space, two-way motion, longitudinal current, longitudinal transverse current, heat transfer and heat transfer coefficients, heat transfer surface.

Известны типовые конструкции одноходовых и многоходовых кожухотрубных теплообменников обеспечивают продольное течение одного теплоносителя в трубах трубного пучка и их поперечное обтекание вторым теплоносителем в межтрубном пространстве (рис. 1, а) [1; 2].

Авторами разработаны конструкции кожухотрубных теплообменников, в которых оба теплоносителя движутся вдоль поверхностей теплоотдачи внутри и снаружи труб противотоком.

Целью работы является теоретическая проверка эффективности теплообменного процесса в двухтрубном кожухотрубном теплообменнике

предлагаемой конструкции с противоточным движением теплоносителей в сравнении с аналогичным типовым теплообменником с перекрестным движением теплоносителей.

На рис. 1, б показана конструкция такого двухходового кожухотрубного теплообменника, в котором установлена продольная перегородка, в межтрубном пространстве обеспечивающая продольное движение теплоносителя вдоль наружной поверхности труб. Линии тока в трубном и межтрубном пространстве показывают, что при повороте потока первого теплоносителя на 180 ° в трубах, такой же поворот обеспечивает

эта продольная перегородка в межтрубном пространстве и второго теплоносителя. Как видно из рис. 1, б, продольная перегородка в межтрубном пространстве устанавливается осесиммет-

рично с продольной перегородкой 5 днища 4 герметично с нижней трубной решеткой с зазором для поворота второго теплоносителя на 180° в межтрубном пространстве в верхней части.

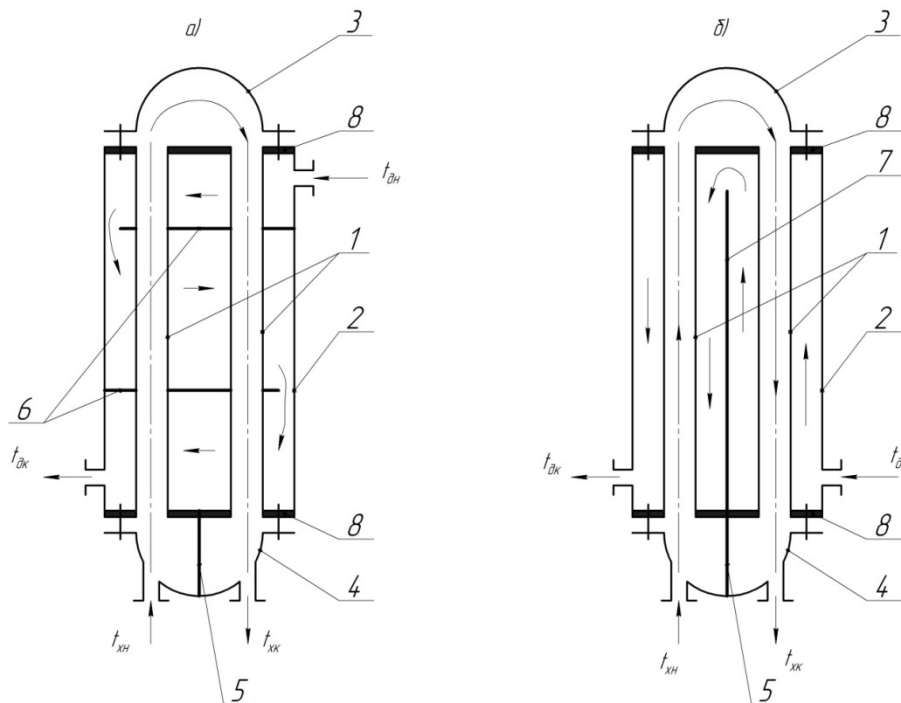


Рис. 1. Схема двухходового кожухотрубного теплообменника:

а — типовый с продольным движением одного теплоносителя в трубах и поперечным движением второго теплоносителя в межтрубном пространстве; б — предлагаемая конструкция с противоточным течением обоих теплоносителей в трубах и межтрубном пространстве;
1 — трубы трубного пучка; 2 — кожух; 3 — крышка; 4 — днище с перегородкой; 5 — продольная перегородка; 6 — поперечные перегородки в межтрубном пространстве; 7 — продольная перегородка в межтрубном пространстве; 8 — трубные решетки

В таблице приведены исходные и справочные данные для расчета двухходового кожухотрубного теплообменника предлагаемой конструкции в сравнении с аналогичным типовым двухтрубным теплообменником с поперечным движением теплоносителя в межтрубном пространстве. Расчет проводился для случая утилизации тепла дымовых газов, движущихся в межтрубном пространстве и изменяющих свою температуру от $t_{гн}$ до $t_{гк}$ и передающих тепловую энергию воде, движущейся в трубах и нагреваемых от температуры $t_{хн}$ до $t_{хк}$. На рис. 2 представлен график изменения температур обоих теплоносителей при противоточном их движении относительно друг друга в теплообменнике предлагаемой конструкции (рис. 1, б). Аналогичный график для типового двухходового кожухотрубного теплообменника (рис. 1, а) может быть представлен условно, так как в нем нет ни прямоточного, ни противоточного движения теплоносителей относительно друг дру-

га. Важно другое: при противоточном движении горячего теплоносителя в межтрубном пространстве число Рейнольдса Re_o увеличивается в 2 раза по сравнению с перекрестным током в типовом теплообменнике, а увеличение числа Рейнольдса в два раза влечет за собой увеличение числа Нуссельта Nu_o для газов и его коэффициента теплоотдачи, так как коэффициент теплоотдачи от газов к стенке обычно на порядок меньше коэффициента теплоотдачи от стенки трубы к воде. Это подтверждают и данные таблицы.

Как видно из расчетных данных таблицы, число Рейнольдса для газов в новой конструкции теплообменника (последний столбик таблицы) попадает в переходный режим течения. Поэтому расчетная формула имеет вид [2]:

$$Nu_o = 0,008 \cdot Re_o^{0,09} \cdot Pr_o^{0,43} \cdot \left(\frac{Pr_o}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}, \quad (1)$$

а число Рейнольдса Re_o рассчитывается с уче-

том эквивалентного диаметра межтрубного пространства:

$$Re_o = \left[\frac{G_o \cdot d_3}{(3600 \cdot s_m \cdot \mu_o)} \right] \cdot z. \quad (2)$$

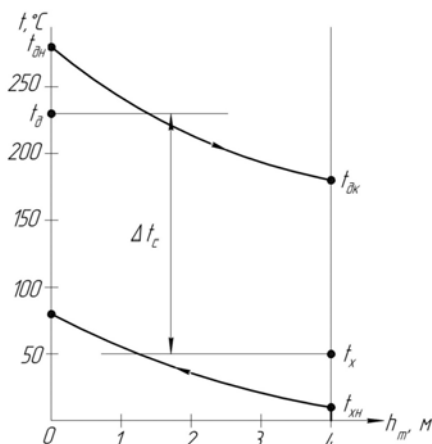


Рис. 2. Профили температур горячего и холодного теплоносителей при их противоточном двухходовом движении в трубах и межтрубном пространстве кожухотрубного теплообменника предлагаемой конструкции (рис. 1, б)

Для типового теплообменника с перекрестным током вода в межтрубном пространстве характерным линейным размером выбирается наружный диаметр трубок [2]:

$$d_n = d_e + 2 \cdot \delta_c, \quad (3)$$

и число Рейнольдса рассчитывалось по формуле:

$$Re_o = \frac{v_o \cdot d_n \cdot \rho_o}{\mu_o}, \quad (4)$$

$$\text{где } v_o = \frac{G_o}{3600 \cdot \rho_o \cdot s_m}.$$

Число Нуссельта [2]:

$$Nu_g = 0,56 Re^{0,5} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr_g}{Pr_{cm}} \right)^{0,25}. \quad (5)$$

Последняя формула справедлива для коридорного и шахматного расположения труб в межтрубном пространстве при угле атаки газа на трубы $\varphi = 90^\circ$ и $Reg < 1000$, что соответствует расчетному режиму течения газа в межтрубном пространстве (см. строку 12 в таблице).

Исходные данные и расчетные параметры для двухходового кожухотрубного теплообменника, предназначенного для утилизации тепла дымовых газов нагреваемой водой

№	Наименование параметра	Размер-ность	Обозначение	Величина	
			В алгоритме	Типовой рис. 1, а	Предлагаемый рис. 1, б
1	2	3	4	5	6
Исходные данные					
1	Производительность по газу	кг/час	G	3000	
2	Начальная температура газа	°C	t _н	280	
3	Конечная температура газа	°C	t _к	180	
4	Начальная температура воды	°C	t _{хн}	10	
5	Конечная температура воды	°C	t _{хк}	80	
6	Давление	ат	P	1,033	
Справочные данные					
1	Плотность воды при средней температуре	кг/м ³	ρ _х	990	
2	Динамическая вязкость воды при средней температуре	Пас	μ _{х0}	0,000632	
3	Вязкость газов при 0 °C	Пас	μ _{д0}	2,35 · 10 ⁻⁵	
4	Коэффициент вязкости газов	(град) ⁻¹	а _д	1,405 · 10 ⁻³	
5	Теплоемкость воды	КДж/КгК	С _х	4,19	
6	Теплоемкость газов	КДж/КгК	С _д	1,07	
7	Коэффициент объемного расширения воды	(град) ⁻¹	b _х	4,6 · 10 ⁻⁵	
8	Коэффициент объемного расширения газов	(град) ⁻¹	b _д	3,7 · 10 ⁻³	
9	Теплопроводность воды	Вт/мК	λ _х	0,675	
10	Теплопроводность газа	Вт/мК	λ _д	0,028	
11	Теплопроводность стенки трубы	Вт/мК	λ _w	46,2	
12	Термическое загрязнение стенки	м ² К/Вт	r _s	4 · 10 ⁻⁴	

Окончание таблицы

№	Наименование параметра	Размер- ность	Обозначение	Величина	
			В алгоритме	Типовой рис. 1, а	Предлагаемый рис. 1, б
1	2	3	4	5	6
13	Высота труб	м	h _т	4	
14	Внутренний диаметр труб	м	d _в	0,035	
15	Толщина стенок труб	м	d _с	0,0025	
16	Средняя молекулярная масса газов	кг/ кмоль	M _д	29,6	
17	Число ходов в трубном пространстве	—	z	2	
Варьируемые параметры					
1	Число труб в трубном пучке	—	n	453	395
Расчетные параметры					
1	Производительность по нагреваемой воде	кг/час	G _х	1094,4	
2	Средняя движущая сила при противоточном движении теплоносителей	°C	Δt _{ср}	184,5	
3	Средняя температура воды – холодного теплоносителя	°C	t _х	45	
4	Средняя температура газов – горячего теплоносителя	°C	t _д	229,5	
5	Динамическая вязкость газов при их средней температуре	Пас	μ _д	3,24·10 ⁻⁵	
6	Диаметр кожуха теплообменника	м	D _к	1,97	1,85
7	Задаваемая поверхность теплопередачи	м ²	F _с	213,3	185,1
8	Число Рейнольдса для воды	—	Re _х	77,3	89,1
9	Число Грасгофа для воды в трубах	—	Gr _х	2,31·10 ⁵	2,52·10 ⁵
10	Площадь сечения межтрубного пространства - общая	м ²	Sm	2,48	2,2
11	Эквивалентный диаметр межтрубного пространства	м ²	D _э	0,157	0,158
12	Число Рейнольдса для газов в межтрубном пространстве	—	Re _д	414,6	3724,5
13	Число Прандтля для газов	—	Pr _д	1,24	1,24
14	Число Прандтля для воды	—	Pr _х	3,92	3,98
15	Температура ржавчины на внутренней стенке трубы	°C	t _w	49,9	50,3
16	Число Нуссельта для воды	—	Nu _х	4,43	4,69
17	Коэффициент теплоотдачи для воды	Вт/м ² К	α _х	85,5	90,4
18	Удельная тепловая мощность для воды	Вт/м ²	qx	416	480,7
19	Температура ржавчины и других отложений на на- ружной поверхности трубы	°C	x	50	50,5
20	Число Нуссельта для газа в межтрубном пространстве	—	Nu _г	13,1	15,3
21	Коэффициент теплоотдачи для газов	Вт/м ² К	α _д	2,34	2,7
22	Удельная тепловая мощность для газов	Вт/м ²	q _д	419,9	483
23	Средняя удельная тепловая мощность для газов	Вт/м ²	q _с	417,9	481,8
24	Расчетная поверхность теплопередачи	м ²	F	213,3	185
25	Коэффициент теплопередачи	Вт/м ² К	Kt	2,26	2,61

Значительное отличие чисел Рейнольдса для газа Re_g в типовом расчете при перекрестном токе и при продольном обтекании труб при противотоке в межтрубном пространстве в предлагаемой конструкции объясняется тем, что в первом случае характерным размером

является наружный диаметр труб d_n , а во втором – эквивалентный диаметр межтрубного пространства.

Как видно из сравнения результатов расчета технологических и геометрических параметров предлагаемого двухходового кожухотрубного

теплообменника с противоточным движением теплоносителей и типового – с перекрестным движением газа в межтрубном пространстве, в предлагаемом теплообменнике теплообменнике коэффициент теплоотдачи увеличивается на 15,5 %, соответственно уменьшается расчетная поверхность с 213 м² до 185,5, а число труб с 453 до 395.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – Изд. 14-е, стер. – М.: Альянс, 2014. – 752 с.
2. Павлов К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учеб. пособие для вузов / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков; под ред. гл.-корр. АН России П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2013. – 576 с.

УДК 66.022.63

А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко, Д. О. Смольская, Н. А. Меренцов, В. В. Клещук

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ЧИСЛА СМЕСИТЕЛЕЙ В КАСКАДЕ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: natasha292009@yandex.ru

Описывается методика расчета числа смесителей в каскаде, обеспечивающих минимизацию суммарных затрат на амортизационные отчисления от капитальной стоимости аппарата и оборотные средства. Приводится пример расчета для каскада аппаратов, когда структура потоков в каждом описывается моделью идеального смешения, а весь каскад ячеечной моделью. На примере показано, что для обеспечения требуемой по техническому регламенту наибольшей допустимой концентрации SO₂ в сырой нефти перед ее подачей на ректификацию необходимо установить 5 смесителей в каскад, то есть последовательно, с объемом каждого в 5 м³.

Ключевые слова: каскад аппаратов идеального смешения, оптимальное число смесителей, объем, профиль концентраций SO₂ в сырой нефти, допустимая предельная концентрация, оборотные средства, амортизационные отчисления, капитальные затраты.

A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko, D. O. Smolskaya, N. A. Merentsov, V. V. Kleschuk

THE CALCULATION OF THE OPTIMAL NUMBER OF MIXERS IN CASCADE

Volgograd State Technical University

A method of calculating the number of mixers in the cascade is described, which minimizes the total cost of depreciation from the capital cost of the device and working capital. An example of calculation for a cascade of devices is given, when the structure of flows in each is described by a model of ideal mixing, and the entire cascade by a cell model. For example, it is shown that in order to provide the required technical regulations for the maximum permissible concentration of SO₂ in crude oil before it is fed to the distillation it is necessary to install 5 mixers in a cascade, that is, in series with the volume of each in 5 m³.

Keywords: cascade apparatus of ideal mixing, the optimum number of mixer volume, a profile of SO₂ concentration in crude oil, the permissible limit concentration, working capital, depreciation, capital costs.

Сырая нефть, подаваемая в ректификационную колонну, должна содержать не более 0,5 % диоксида серы (SO₂), однако ее локальные концентрации часто превышают это допустимое значение концентрации C^* . Поэтому перед ректификацией устанавливают смесители-усреднители, позволяющие выровнять профиль концентрации SO₂ во времени так, чтобы локальные ее значения не превышали C^* . На графике представлен профиль концентрации SO₂ в сырой нефти во времени (рис. 1) [1].

В работах [2, 3] приведена математическая модель и алгоритмы расчета одного аппарата

идеального смешения и каскада таких аппаратов, установленных последовательно, позволяющая оценивать возможность уменьшения пиковых локальных концентраций компонентов смеси на выходе:

$$\frac{dc}{d\tau} = \frac{C_{ax} - C}{\tau_c}, \quad (1)$$

где C – локальные концентрации на выходе как функции времени τ ;

$$\tau_c = \frac{V_1}{q_v} - \text{среднее время пребывания в сме-}$$

сителе объемом V_1 и расходом q_v .

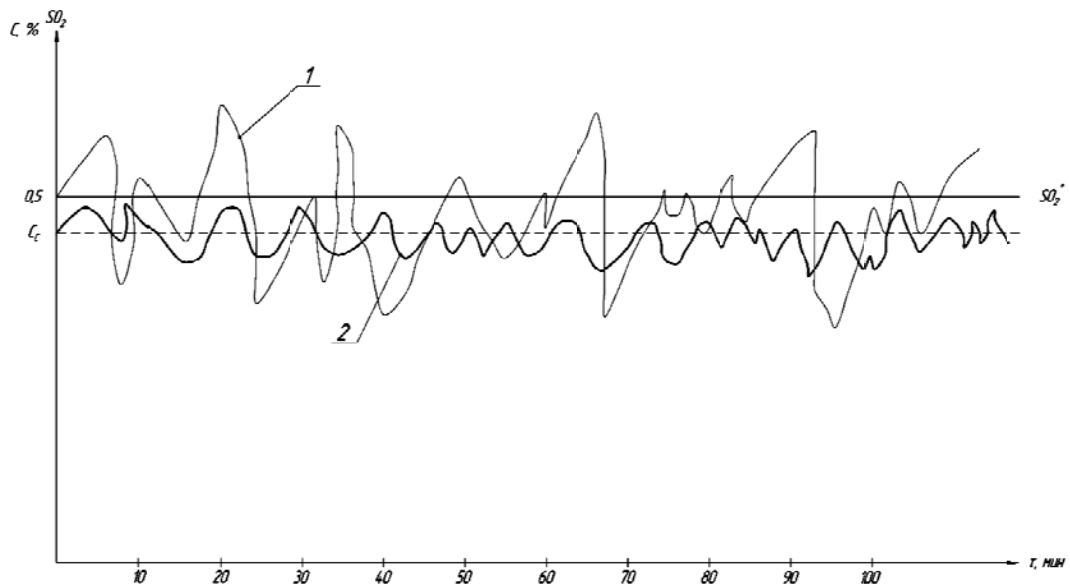


Рис. 1. Профиль концентраций SO_2 в сырой нефти во времени:
1 – перед подачей в каскад смесителей-усреднителей [1]; 2 – после перемешивания в каскаде смесителей-усреднителей при оптимальном числе аппаратов идеального смешения равном 5

Для каскада из m смесителей равного объема, то есть установленных последовательно, математическая модель образует систему дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dc_1}{d\tau} &= \frac{C_{\text{ex}} - C_1}{\tau_{c1}} \\ \frac{dc_2}{d\tau} &= \frac{C_{\text{ex}} - C_2}{\tau_{c1}} \\ \dots \\ \frac{dc_m}{d\tau} &= \frac{C_{m-1} - C_m}{\tau_{c1}} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) несложны при численном решении:

$$C = \frac{\left(C_n + \frac{C_{\text{ex}} \cdot \Delta\tau}{\tau_c} \right)}{\left(1 + \frac{\Delta\tau}{\tau_c} \right)}, \quad (3)$$

где $C_n = \int_0^{\tau_k} \frac{C_{\text{ex}} \cdot d\tau}{\tau_c}$ – средняя концентрация компонента, подаваемого в период $0 \leq \tau \leq \tau_k$ или в численном виде:

$$C_n = \left(\sum_{i=1}^k C_{\text{ex}i} \right) \cdot \frac{\Delta\tau}{\tau_c}, \quad (4)$$

где $\Delta\tau$ – равный интервал разбиения по времени заданного профиля концентраций $C_{\text{ex}}(\tau)$. Можно вместо C_n подставить допускаемую концентрацию C^* .

В таблице приведены результаты расчетов объема каждого смесителя-усреднителя в каскаде и их суммарный объем от числа аппаратов в каскаде. Как видно из этой таблицы, суммарный объем аппаратов в каскаде гиперболически уменьшается с ростом числа смесителей N . Соответственно гиперболически уменьшается и относительная величина капитальных затрат:

$$C_k = N \cdot V_1, \quad (5)$$

где
$$V_1 = \frac{1}{N^p}, \quad (6)$$

p – показатель степени > 1 .

Относительная доля затрат на оборотные средства, наоборот монотонно увеличивается:

$$C_{\text{об}} = K_0 \cdot N, \quad (7)$$

где K_0 – доля затрат на оборотные средства (зарплата, ремонт, электроэнергия), отнесенная к единице относительных затрат на амортизационные отчисления в капитальных затратах.

Тогда общая относительная стоимость застра:

$$C_3 = C_k + C_{\text{об}} \quad (8)$$

или с учетом формул (5÷7):

$$C_3 = \frac{N}{N^p} + K_0 \cdot N \quad \text{или} \quad C_3 = N^{1-p} + K_0 \cdot N.$$

Функция C_3 имеет минимум:

$$\frac{dC_3}{dN} = \frac{(1-p)}{N^p} + K_0 = 0.$$

При $K_0 = 0,04$ и $p = 2$. Получаем:
 $\frac{-1}{N^2} + 0,04 = 0$, откуда $N^* = \sqrt[2]{25} = 5$.

Если доля стоимости обратных средств по отношению к стоимости амортизационных отчислений накопительные затраты увеличиваются (оборудование недорогое, а его обслужива-

ние стоит дорого), то при увеличении K_0 с 0,04 до $K_0 = 0,11$ оптимальное число аппаратов в каскаде $N^* = 3$.

Обработка заданной табличной зависимости суммарного объема смесителей от их числа в каскаде МНК степенным уравнением

Число смесителей в каскаде	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Объем каждого аппарата, м ³	540	55	30	20	15	12	10	9	8	7
Суммарный объем смесителей в каскаде, м ³	540	510	90	80	75	72	70	72	72	70
Теоретические значения суммарного объема смесителей в каскаде по степенной зависимости, м ³	–	104,1	90,5	83,4	78,7	75,3	72,5	70,3	68,5	66,9
Относительное отклонение теоретических значений суммарного объема от заданного, %	–	-5,4	0,56	4,26	4,95	4,52	3,63	-2,33	-4,92	-4,49

На рис. 1 (кривая 2) проведен профиль концентраций на выходе из каскада 5 смесителей. При объеме каждого смесителя $V_1 = 15$ м³ локальные концентрации SO₂ на выходе из такого каскада не превышают допускаемых $C^* = 0,5$ %.

Можно функцию минимизации (8) с учетом формулы (6) представить в виде:

$$U = K \cdot (N \cdot V_1) + N, \quad (9)$$

где K – доля капитальных затрат по отношению к затратам на оборотные средства и $K = \frac{1}{K_0}$,

$$а U = \frac{C_3}{K_0}.$$

$$\text{Тогда } V_{об} = N \cdot V_i.$$

Проведя обработку заданной табличной зависимости суммарного объема смесителей от числа смесителей в каскаде степенным уравнением получаем:

$$V_{об} = A \cdot N^B, \quad (10)$$

где $A = 104,06$, а $B = -0,201$, то есть со средней относительной ошибкой, не превышающей 3,5 % и наибольшей в 5,4 % зависимость суммарного объема смесителей от их числа в каскаде можно описать гиперболой, на расчет надо вести, начиная с $N = 2$.

Точность аппроксимации повышается еще больше, если расчеты вести до числа смесителей в каскаде $N_k = 7$, когда их заданный суммарный объем минимален и равен $V = 70$ м³.

На рис. 2 приведен график зависимости функции минимизации суммарных затрат от числа смесителей в каскаде N , рассчитанный по

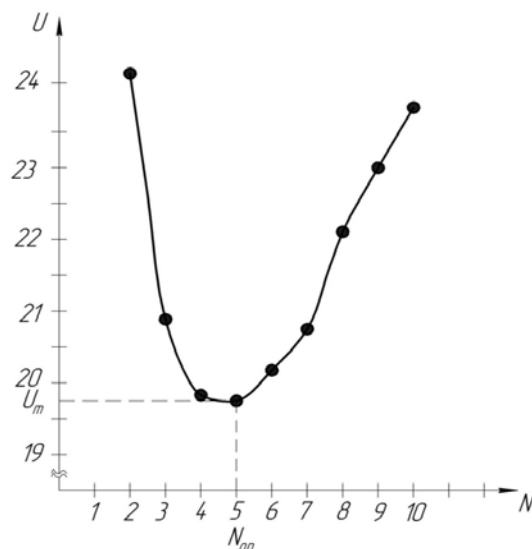


Рис. 2. Зависимость функции минимизации суммарных затрат от числа смесителей в каскаде

формуле (9), при доли капитальных затрат по отношению к затратам на оборотные средства $k = 0,21$, то есть в каждый рубль оборотных средств надо добавить 21 коп. амортизационных отчислений. Как видно из графика, практически четыре смесителя в каскаде объемом 20 м³ каждый или пять смесителей в каскаде объемом каждый 15 м³ приводят к минимальному значению функции U , пропорциональной затратам на оборотные средства и амортизационные отчисления.

Таким образом, предлагаемая методика расчета каскада аппаратов идеального смешения позволяет снизить локальные концентрации SO₂ в их зависимости от времени до значений, не превышающих допускаемую концентрацию

C_0^* по регламенту, и определять при этом число смесителей в каскаде и их объем, обеспечивающие наименьшую стоимость, учитывающую амортизационные отчисления от капитальных затрат и оборотные средства.

Обычно 5–7 реакторов идеального смешения также устанавливают в каскад, чтобы резко снизить их суммарный объем по сравнению с одним реактором [4–6].

В нашем случае замене одного смесителя объемом $V_1 = 540 \text{ м}^3$ на пять смесителей, установленных в каскад с общим объемом 75 м^3 приводит к снижению суммарного объема в 7,2 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большаков, Г. Ф. Сероорганические соединения нефти / Г. Ф. Большаков. – Новосибирск: Наука, 1986 г. – 244 с.

2. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии : учеб. пособие. Часть 2. Моделирование гидромеханических процессов / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симонова. – Волгоград : ВолгГТУ, 1991. – 121 с.

3. Голованчиков, А. Б. Моделирование процесса усреднения концентрации компонентов в аппаратах с мешалками / А. Б. Голованчиков // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2013. – № 7. – С. 17–19.

4. Кафаров, В. В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В. В. Кафаров. – Москва : Химия, 1968. – 379 с.

5. Тябин, Н. В. Методы кибернетики в реологии и химической технологии: учеб. пособ. / Н. В. Тябин, А. Б. Голованчиков. – Волгоград: Волгоградская правда, 1983. – 103 с.

6. Голованчиков, А. Б. Моделирование гидромеханических и тепло массообменных процессов в аппаратах и реакторах: монография / А. Б. Голованчиков, Н. А. Дулькина, Ю. В. Аристова. – Волгоград: ВолгГТУ, 2013. – 140 с.

УДК 66.061.35

А. Б. Голованчиков, К. В. Чёрикова, Г. Г. Русакова, Д. А. Курбатова **РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО РАСХОДА ЭКСТРАГЕНТА** **С УЧЕТОМ КАПИТАЛЬНЫХ ЗАТРАТ И ОБОРОТНЫХ СРЕДСТВ**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tchyorickowa.xenia@yandex.ru

Предложен алгоритм расчета расхода экстрагента, минимизирующего отчисления от стоимости насадочной экстракционной колонны. Рассмотрены варианты расчетов через высоту и число теоретических тарелок, и число единиц переноса и высоту насадки эквивалентную единице переноса.

Ключевые слова: расход экстрагента, насадка, экстракционная колонна, число теоретических тарелок, число единиц переноса, высота насадки эквивалентная теоретической тарелке и единице переноса.

A. B. Golovanchikov, K. V. Chyrikova, G. G. Rusakova, D. A. Kurbatova

CALCULATION OF THE OPTIMUM EXPENDITURE OF THE EXTRACENT **WITH ACCOUNTING CAPITAL EXPENDITURES AND CURRENT MEANS**

Volgograd State Technical University

An algorithm is proposed for calculating the consumption of the extractant, which minimizes the deduction from the cost of the packed extraction column. Variants of calculations through the height and number of theoretical plates are considered, and the number of transfer units and the height of the nozzle is equivalent to the unit of transfer.

Keywords: extractant consumption, nozzle, extraction column, number of theoretical plates, number of units of transfer, nozzle height equivalent to theoretical plate and transport unit.

Обычно при расчетах насадочных экстракционных колонн по типовому алгоритму определяют минимальный расход экстрагента, который завышают на 20÷30 % и принимают за его рабочий расход [1–5]. Такой запас по расходу экстрагента делают на основании длительной эксплуатации промышленных экстракторов, хотя он не отражает современного соотношения стоимости колонн с новыми динамическими или даже резонирующими насадочны-

ми телами и перспективными жидкими растворами, используемыми в качестве экстрагентов.

При расчете ректификационных колонн такой учет частично проводится с помощью функции минимизации объема колонны U_p :

$$U_p = (R + I) \cdot N, \quad (1)$$

где R – флегмовое число; N – суммарное число теоретических тарелок в укрепляющей и исчерпывающей частях колонны. Но и в этом случае

в функции минимизации объема колонны U не учитываются энергозатраты на перекачивание флегмы, а ее влияние отражается в расчете объема колонны косвенно через пропорциональность флегмового числа и площади сечения.

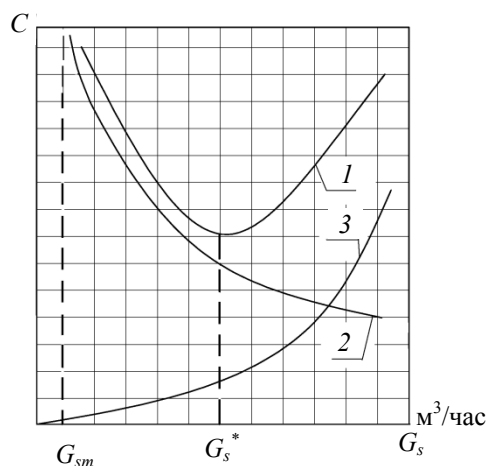


Рис. 1. Качественная зависимость себестоимости (1) единицы продукции при экстракции от капитальных затрат (2) и оборотных средств (3) при изменении расхода экстрагента

Целью работы является разработка алгоритма расчета оптимального расхода экстрагента, учитывающего его влияние на объем колонны (а значит, на амортизационные отчисления от капитальных затрат) и регенерацию и подачу экстрагента в колонну (то есть на оборотные средства).

Поэтому функцию минимизации и предлагается искать в виде:

$$u = V_k + \alpha \cdot G_s \quad (2)$$

где V_k — объем колонны; G_s — расход экстрагента; α — весовой коэффициент, связывающий амортизационные отчисления от капитальных затрат со стоимостью оборотных средств идущих на регенерацию экстрагента и его подачу в колонну (рис. 1).

В табл. 1 приведены параметры насадочной экстракционной колонны, рассчитанные по типовому алгоритму. Расход экстрагента на 20 % превышает минимальный расход в формуле (1), минимизирующей амортизационные отчисления на капитальные затраты, связанные с объемом колонны, и оборотные средства связанные с регенерацией и подачей экстрагента в колонну.

Таблица 1

Исходные и справочные данные и расчетные параметры насадочной экстракционной колонны для экстрагирования фенола из сточной воды бензолом

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4	5
Исходные данные				
1	Производительность по исходному раствору (сточной воде)	$\text{м}^3/\text{час}$	G_f	10
2	Концентрация извлекаемого компонента (фенола) в сточной воде	$\text{кг}/\text{м}^3$	x_f	4,8
3	Концентрация извлекаемого компонента (фенола) в рафинате	$\text{кг}/\text{м}^3$	x_r	0,24
4	Начальная концентрация фенола в экстрагенте	$\text{кг}/\text{м}^3$	G_s	0,2
5	Температура раствора в колонне	$^{\circ}\text{C}$	t	25
Справочные данные				
1	Массив равновесных концентраций фенола в экстрагенте (бензоле)	$\text{кг}/\text{м}^3$	y^*	см. табл. 2
2	Массив рабочих концентраций фенола в сточной воде (исходном растворе)	$\text{кг}/\text{м}^3$	x	см. табл. 2
3	Равномерный интервал разбиения концентрации извлекаемого компонента в исходном растворе	$\text{кг}/\text{м}^3$	Δx	0,2
4	Порозность насадки — колец Рашига	$\text{м}^3/\text{м}^3$	ε	0,76
5	Удельная поверхность насадки	$\text{м}^2/\text{м}^3$	σ	140
6	Динамическая вязкость сплошной фазы — сточной воды	$\text{Па}\cdot\text{с}$	μ	0,001
7	Наружный диаметр колец Рашига	м	d_k	0,035

Продолжение табл. 1

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина	
1	2	3	4	5	
8	Плотность сплошной фазы (сточной воды)	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	ρ_c	980	
9	Плотность дисперсной фазы – капель экстрагента (капель бензола)	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	ρ_d	900	
Расчетные параметры					
№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина	
				штатный алгоритм $K_{не}=1,2$	формула (1)
1	Равновесная концентрация извлекаемого компонента, в экстрагенте, соответствующая его начальной концентрации в сточной воде	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	y_s^*	29,6	
2	Равновесная концентрация извлекаемого компонента, в экстрагенте, соответствующая концентрации извлекаемого компонента в рафинате	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	y_r^*	2,64	
3	Минимальный расход экстрагента	$\text{м}^3/\text{час}$	G_{sm}	1,55	
Результаты расчетов через число теоретических тарелок и высоту насадки, эквивалентную одной теоретической тарелке					
1	Рабочий расход экстрагента	$\text{м}^3/\text{час}$	G_s	1,86	2,03
2	Коэффициент избытка экстрагента	–	$K_{из}$	1,2	1,308
3	Концентрация извлекаемого в экстрагенте на выходе из колонны	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$y_{\text{э}}$	24,7	22,67
4	Число теоретических тарелок	–	ЧТТ	11,51	7,35
5	Среднее значение тангенса угла наклона равновесной линии	–	m	5,91	
6	Высота насадки эквивалентная одной теоретической тарелке	м	$h_{\text{эм}}$	0,551	0,506
7	Общая высота насадки	м	H_t	6,35	3,71
8	Скорость захлебывания	$\text{м}/\text{с}$	W_3	$1,38 \cdot 10^{-2}$	0,013
9	Рабочая скорость сплошной фазы – сточной воды, движущейся сверху вниз	$\text{м}/\text{с}$	W_c	$1,033 \cdot 10^{-2}$	0,01
10	Расчетный диаметр колонны	м	D_a	0,585	0,594
11	Объем колонны	м	V_a	1,71	1,03
12	Поверхность насадки в колонне	м^2	F_t	239,1	144
13	Средняя движущая сила по дисперсной фазе	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Δy_t	3,13	4,3
14	Коэффициент массопередачи по дисперсной фазе	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$	K_{yt}	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$
15	Весовой коэффициент соотношения капитальных затрат и оборотных средств в формуле (1)	–	α	–	2,3
16	Функция минимизации затрат (формула 1)	–	u	–	5,694
Результаты расчетов через число единиц переноса и высоту насадки эквивалентную единице переноса					
1	Рабочий расход экстрагента	$\text{м}^3/\text{час}$	G_s	1,861	1,892
2	Коэффициент избытка экстрагента	–	$K_{из}$	1,2	1,22
3	Концентрация извлекаемого в экстрагенте на выходе из колонны	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$y_{\text{э}}$	24,7	24,3
4	Число единиц переноса	–	ЧЕП	7,23	10,64
6	Высота насадки эквивалентная одной единице переноса	м	h_e	0,579	0,574

Окончание табл. 1

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина	
				штатный алгоритм $K_{ue}=1,2$	формула (1)
7	Общая высота насадки	м	H_e	4,188	6,11
9	Рабочая скорость сплошной фазы - сточной воды, движущейся сверху вниз	м/с	W_e	1,033	1,027
10	Расчетный диаметр колонны	м	D_e	0,585	0,586
11	Объем колонны	м	V_e	1,126	1,652
12	Поверхность насадки в колонне	м ²	F_e	157,7	231,3
13	Средняя движущая сила по дисперсной фазе – каплям бензола	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	Δy_e	3,52	3,69
14	Коэффициент массопередачи по дисперсной фазе	$\frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \text{с}}$	K_{ye}	$2,28 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$
15	Весовой коэффициент соотношения капитальных затрат и оборотных средств в формуле (1)	—	α	—	2,3
16	Функция минимизации затрат (формула 1)	—	u	—	6,0

Пример приводится для экстрагирования толуола из водного раствора бензолом при 20 °С. Данные по равновесию приведены в табл. 2 [6,7].

Таблица 2

Равновесные данные

№ точки равновесия	1	2	3	4	5	6	7	8
Концентрация диоксана в воде, $x, \frac{\text{кгА}}{\text{м}^3 G_s}$	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4
Концентрация диоксана в бензоле, $y_p, \frac{\text{кгА}}{\text{м}^3 G_s}$	0	2,1	4,8	5,6	7,1	8,3	9,0	9,2
№ точки равновесия	9	10	11	12	13	14	15	16
Концентрация диоксана в воде, $x, \frac{\text{кгА}}{\text{м}^3 G_s}$	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0
Концентрация диоксана в бензоле, $y_p, \frac{\text{кгА}}{\text{м}^3 G_s}$	9,4	9,8	10,6	11,5	12,9	14,1	15,3	16,7
№ точки равновесия	17	18	19	20	21	22	23	24
Концентрация диоксана в воде, $x, \frac{\text{кгА}}{\text{м}^3 G_s}$	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0	4,2	4,4	4,6
Концентрация диоксана в бензоле, $y_p, \frac{\text{кгА}}{\text{м}^3 G_s}$	19,7	20,4	21,1	23,2	24,3	25,6	27,8	28,7

Особенность примененного алгоритма расчетов является то, что табличная зависимость по равновесию не описывается алгебраическим уравнением, а используется непосредственно в программе с применением метода кусочной линейной аппроксимации на каждом заданном интервале [7; 8].

Для удобства сравнения основных технологических и геометрических расчетных параметров сведены в табл. 3.

Как видно из представленных в табл. 2 и 3 данных технологических и геометрических параметров, даже при типовом алгоритме расчета насадочных экстракционных колонн, когда коэффициент избытка экстрагента $K_{ue} = 1,2$, диаметры колонн и число теоретических тарелок остаются одинаковыми $D_a = 0,585$ м, а вот высота насадки разнится на 50 % (высота $H_t = 6,35$ м, рассчитанная через ЧТТ против высоты $H_e = 4,19$ м рассчитанная через ЧЕП).

Таблица 3

**Сравнение основных технологических и геометрических расчетных параметров
насадочной экстракционной колонны (извлечение бензолом толуола из сточных вод)**

№	Наименование параметра	Размерность	Величина			
			Типовой расчет $K_{из}=1,2$		К _{из} рассчитан с учетом функции минимизации - формуле (1)	
			ЧТТ	ЧЕП	ЧТТ	ЧЕП
1	Рабочий расход экстрагента	$м^3/час$	1,861	1,861	2,03	1,892
2	Коэффициент избытка экстрагента	—	1,2	1,2	1,308	1,22
3	Концентрация извлекаемого компонента в экстрагенте на выходе	$кг/м^3$	24,7	24,7	22,67	24,3
4	Общая высота насадки	$м$	6,35	4,19	3,71	6,11
5	Диаметр колонны	$м$	0,585	0,585	0,594	0,586
6	Объем колонны	$м^3$	1,71	1,126	1,03	1,652
7	Поверхность насадки в колонне		239,1	157,7	144	231,3
8	Средняя движущая сила по дисперсной фазе – каплям бензола	$кг/м^3$	3,13	3,52	4,3	3,69
9	Коэффициент массопередачи по дисперсной фазе	$кг/м^2с$	$1,69 \cdot 10^{-5}$	$2,04 \cdot 10^{-5}$	$2,28 \cdot 10^{-5}$	$1,48 \cdot 10^{-5}$
10	Функции минимизации затрат (формула 1)	—	—	—	5,694	6,0

Соответственно и поверхность насадки в 1,5 раза больше, то же касается и объема колонны. Поэтому стандартную насадочную экстракционную колонну надо брать со следующими размерами: диаметр $D_c = 0,6$ м, а высота насадки 6,35 м.

Расчеты по формуле (2), оптимизирующей затраты на амортизационные отчисления и оборотные средства в себестоимости продукции, дают совершенно иные результаты.

Диаметр колонны, рассчитываемый через ЧТТ, несколько увеличивается, но остаются

меньше ближайшего стандартного значения $D = 0,6$ м. Коэффициент избытка экстрагента, рассчитываемый через ЧЕП, также несколько увеличивается и становится равным $K_{из} = 1,22$ против типового значения $K_{из} = 1,2$; а при расчете через ЧТТ он должен быть повышен с величины 1,2 до 1,308, то есть почти на 10 %. Это приводит к значительному снижению высоты насадки ($H_t = 3,75$ м при расчете через ЧТТ по сравнению $H_e = 6,11$ м при расчете через ЧЕП) и более чем в 1,5 раза уменьшению объема колонны.

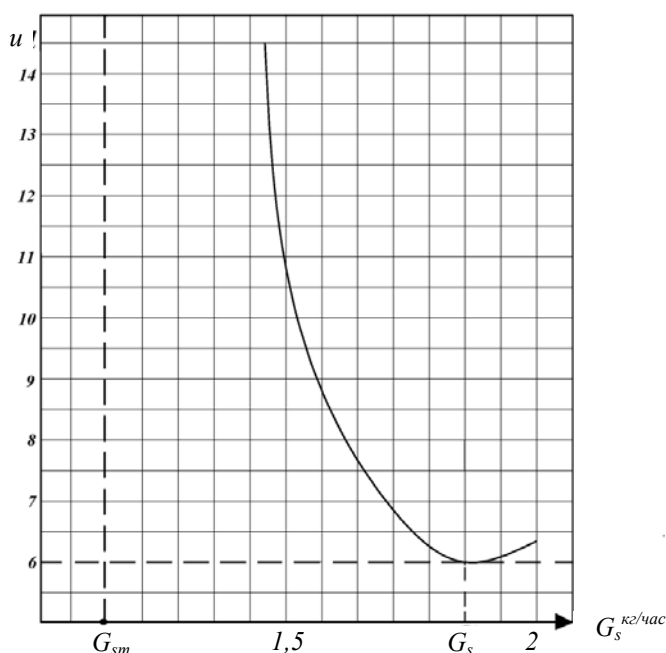


Рис. 2. Зависимость функции минимизации затрат u на амортизационные отчисления и оборотные средства от расхода экстрагента при расчетах по формуле (1) через ЧЕП и ВЭП

Необходимо особо подчеркнуть сильное влияние расхода экстрагента на функцию минимизации затрат u . Это видно из рис. 2 по крутой исходящей ветви графика зависимости $u = u(G_s)$. Даже небольшое отклонение расхода экстрагента от оптимального значения приводит к значительному росту функции u .

В итоге из четырех вариантов расчетов, представленных в табл. 3, рекомендуется выбрать колонну диаметром $D_k = 0,6$ м с высотой насадки $H_e = 6,11$ м и расходом экстрагента $G_s = 1,89$ м³/час, соответствующего его коэффициенту избытка $K_{из} = 1,22$, близкому к его значению $K_{из} = 1,2$ в типовом алгоритме.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии : учебное пособие / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков ; под ред. П. Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М. : Альянс, 2013. – 576 с.

2. Дж. Перри. Справочник инженера-химика. Т. 2. Системы газ-жидкость ; под ред. Н. М. Жаворонкова, П. Г. Романкова. – Ленинград : Химия, 1968. – 504 с.

3. Основные процессы и аппараты химической технологии : пособие по проектированию / под ред. Ю. И. Дытнерского. – 4-е изд., стер. – М. : Альянс, 2008. – 494 с.

4. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – М. : ООО ИД «Альянс», 2008. – 750 с.

5. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник. Т. 2 / А. С. Тимонин. – Калуга : Изд. Н. Бочкаревой, 2003. – 884 с.

6. Проскуряков В. А. Очистка сточных вод в химической промышленности / В. А. Проскуряков, Л. И. Шмидт. – Л. : Химия, 1977. – 464 с.

7. Голованчиков, А. Б. Расчет экстракционных аппаратов для выщелачивания синигрина из семян горчицы / А. Б. Голованчиков, К. В. Черикова, Н. В. Шибитова, Н. С. Шибитов // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (190) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – (Серия «Актуальные проблемы управления, вычислительной техники и информатики в технических системах»). – С. 16–21.

8. Голованчиков, А. Б. Применение ЭВМ в химической технологии и экологии: учебное пособие. Ч. 4. Массообменные процессы / А. Б. Голованчиков, Б. В. Симон. – Волгоград : ВолгГТУ, 1997. – 117 с.

УДК 620.97

О. С. Атрашенко

ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ АУТОНОМНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Камышинский технологический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: olgapasmenko@yandex.ru

Возрастает актуальность автономных систем электроснабжения от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) при отсутствии централизованного питания. Это связано с высокой стоимостью технологического подсоединения к электросетям, которое включает в себя комплекс технических и документальных этапов. В статье приведены основные компоненты энергосистемы на основе ВИЭ. Для уменьшения себестоимости выработки экологически чистой электроэнергии и потерь при преобразовании рода тока, предлагается отказаться от ступени преобразования – инвертора. Авторами предлагается использовать комплексную систему выработки, накопления и расходования энергии, генерируемой возобновляемыми источниками. Электроснабжение постоянным током предлагается внедрить для жилищно-коммунального сектора. Приведены примеры бытовых электропотребителей, способные работать на постоянном токе без потерь технических характеристик. В статье выделены достоинства системы постоянного тока и задачи, которые необходимо решить для ее эффективного развития.

Ключевые слова: технологическое подсоединение к электросетям, автономные источники, постоянный ток, бытовые потребители.

О. S. Atrashenko

THE PROSPECTS OF CREATION OF SYSTEM OF POWER SUPPLY OF THE DIRECT CURRENT FOR AUTONOMOUS POWER SUPPLY

Kamyshin institute of technology (branch)

Volgograd State Technical University

The relevance of autonomous systems of power supply from the renewables in the absence of the centralized food increases. It is connected with the high cost of technological connection to power supply networks which includes a complex of technical and documentary stages. The main components of a power supply system on the basis of RES are given in article. For reduction of cost of development of the environmentally friendly electric power and losses when transforming a sort of current, it is offered to refuse a transformation step - the inverter. Authors offer to use the complex system of development, accumulation and expenditure of the energy generated by renewable sources. Power supply by a direct current is offered to be introduced for the housing-and-municipal sector. The examples of household electroconsumers capable to work at a direct current without loss of technical characteristics are given. In article advantages of system of a direct current and a task which need to be solved for her effective development are allocated.

Keywords: technological connection to power supply networks, autonomous sources, a direct current, household consumers.

Введение

Подключение потребителя к сети централизованного электроснабжения может быть связано с прокладкой новых линий электропередач и установке дополнительной подстанции.

Плата за технологическое присоединение к электрическим сетям на территории различных регионов определяется в соответствии с п. 14 «Методических указаний по определению размера платы за технологическое присоединение к электрическим сетям», утвержденных приказом Федеральной службы по тарифам РФ от 30.11.2010 № 365-э/5.

Правила подключения к энергосети регламентируются постановлением Правительства РФ «О внесении изменений в некоторые акты Правительства РФ по вопросам совершенствования порядка технологического потребления электроэнергии» от 21 апреля 2009 года.

Альтернативным решением подключения к сети электроснабжения может послужить автономная установка на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ). Изучая законодательные акты РФ о стимулировании ВИЭ, складывается впечатление, что созданы все условия для увеличения генерации «зеленой» электроэнергии. Но стремление наращивать выработку электроэнергии от возобновляемых источников совершенно не поддерживается Минэнерго РФ, поэтому достижение намеченных целей находится под большим вопросом [1].

Накопление и хранение электроэнергии возможно только на постоянном токе в химических аккумуляторах, а преобразование тока в переменный с помощью инвертора, сопровождается потерей энергии до 40 % от полученной.

В таком случае энергосистема состоит из источника электрической энергии (солнечная батарея, ветрогенератор или микро-гидроэлектростанция); Аккумуляторная батарея (АБ); инвертор (преобразователь постоянного тока в переменный); контроллер заряда АБ (предотвращение перезаряда, часто встроен в инвертор; распределительное оборудование; нагрузка.

Себестоимость электроэнергии стандартной системы электроснабжения от ВИЭ при мощности 3–5 кВт составляет 17,5 руб/кВт·ч. Дополнительным дорогостоящим оборудованием в автономной системе является инвертор и аккумуляторные батареи (30 % от общей стоимости автономной установки).

Накопитель энергии является ключевым компонентом в силу непостоянства возобновляемого ресурса. Технологии хранения энергии с применением суперконденсаторов способны компенсировать проблему прерывистости возобновляемых источников энергии путем быстрого аккумулярования генерируемой прерывистой энергии, с последующей возможностью сделать ее доступной в большом количестве по требованию.

Преобразование постоянного тока, выработанного нетрадиционными источниками в переменный выполняется с помощью инверторов. Промышленные инверторы – дорогостоящее оборудование, его исключение из схемы электроснабжения, позволит снизить стоимость энергосистемы и уменьшить потери электроэнергии за счет отсутствия ступени преобразования (рис. 1). Такое решение является альтернативным решением построения системы электроснабжения на основе возобновляемых источников энергии.



Рис. 1. Электроснабжение бытовых потребителей постоянным током

Система электроснабжения на постоянном токе бытовых потребителей включает в себя:

электрогенерирующий источник (солнечная батарея, ветрогенератор или выпрямитель с пита-

нием от промышленной электросети в ночные часы провала нагрузок), гибридный контроллер заряда и аккумуляторы [2].

При анализе современной литературы и научных статей была найдена информация о разработке пилотного проекта для проведения технико-экономического сравнения схем электроснабжения на переменном и постоянном токе для двух однотипных домов офисно-бытовой техникой. Информации о его дальнейшей реализации и результатах исследования нет [3].

Большинство современных бытовых приборов имеют небольшой встроенный или внешний трансформатор, который преобразует переменный 220-вольтный ток из розетки в постоянный ток низкого напряжения. Конечно, в каждой квартире существует несколько мощных потребителей – пылесос, стиральная машинка, электрический чайник и прочая кухонная техника – однако они находятся в явном меньшинстве.

Наглядным примером применения системы электроснабжения на постоянном токе является автодом. В большинстве случаев техника автодома – низковольтные устройства и приборы питаются от сети 12 В (или 24 В) постоянного тока, система снабжена накопительной аккумуляторной батареей. Техника имеет малую мощность и весьма компактные габариты, что позволяет сэкономить место внутри жилого отсека без потери функциональности и укомплектовать автодом большим количеством полезных устройств.

Рассмотрим основные потребители в домашнем хозяйстве, питание которых можно осуществлять от постоянного тока.

В качестве источника тепла и горячего водоснабжения, возможно использование индукционного котла отопления. Принцип работы индукционных котлов основан на трансформации электромагнитной энергии, которую производит индукционная катушка, в тепловую. Индукционные котлы функционируют при низком напряжении либо постоянном токе.

Для эффективного освещения в современных домах используют светодиодные лампы. Светодиод питается напряжением постоянного тока, которое лежит в пределах 3÷4 В, при токе в 10÷30 мА. Светодиодные лампы-ретрофиты типоразмера MR16 выпускаются с питанием от напряжения 12 В, поддерживают питание как переменным, так и постоянным током. Практика показывает, что питание светодиодных ламп

MR16 от постоянного тока обеспечивает более стабильную работу и более высокий КПД по сравнению с питанием от переменного тока, позволяет избавиться от пульсаций светового потока.

Компьютерная техника, зарядные устройства, телевизоры – техника, оснащенная импульсными блоками питания, отлично работает на постоянном токе. В импульсном блоке основу составляет инверторная система. После выпрямления напряжения образуются прямоугольные импульсы с высокой частотой, подаются на фильтр выхода низкой частоты. Некоторые конструкции блоков имеют переключатели, удваивающие напряжение, для подключения к сети с разным номиналом напряжения (115 и 230 В).

В современной технике, такой как кондиционеры, стиральные машины, холодильники, находят применение инверторные двигатели. В основу работы двигателей этого типа положен принцип инвертирования тока. Инвертор преобразует переменный ток сети в постоянный, а затем создает переменный ток нужной частоты, который определяет частоту вращения электромотора. Инверторный двигатель безразличен к форме питающего напряжения.

В основе пылесосов, фенов, блендеров, миксеров, мясорубок, а также множества электроинструментов лежит универсальный коллекторный двигатель. Универсальными коллекторными двигателями называются они потому, что могут работать как при переменном, так и постоянном токе. Направление магнитного поля ротора и статора одновременно меняется при смене полярности, двигатель вращается в том же направлении.

Для защиты сети, конечно, необходимо использовать коммутационную аппаратуру.

Экспериментальная часть исследования

Для практического подтверждения работоспособности и сохранения технических характеристик бытовых электроприемников на постоянном токе был использован экспериментальный стенд (входное питание на переменном токе частотой 50 Гц, регулируемое однофазное напряжение 0÷220 В; максимальный ток промышленной частоты 10А; выходное напряжение постоянного тока 0–220 В, максимальная мощность потребления на постоянном токе 2 кВт). Схема работы и внешний вид которого приведены на рис. 2.

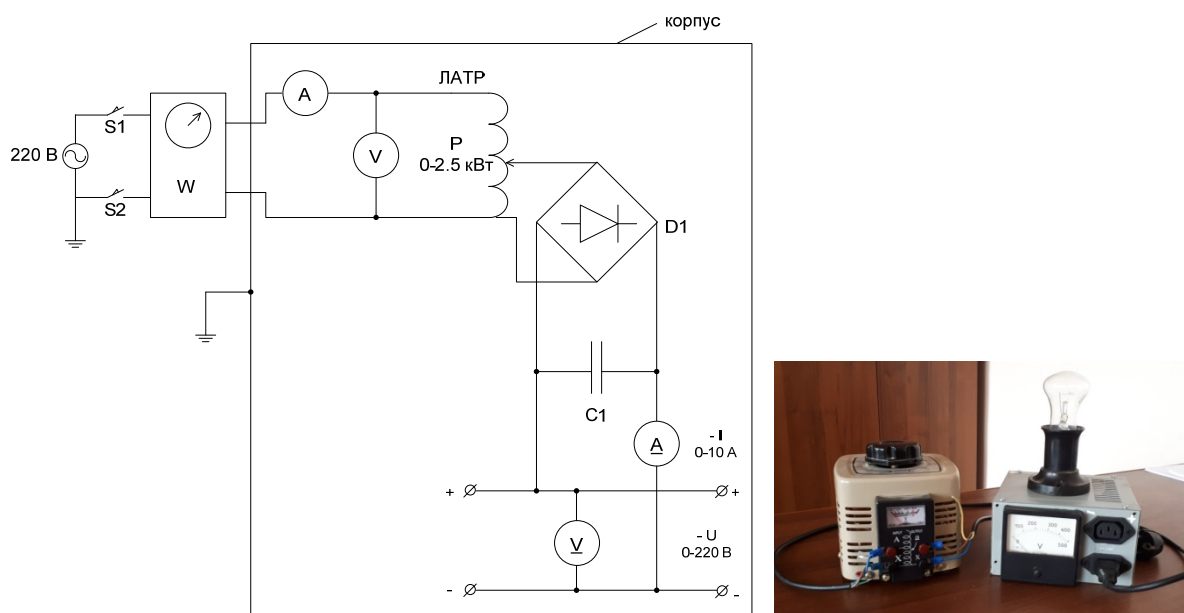


Рис. 2. Схема и внешний вид экспериментального стенда



Рис. 3. Результаты эксперимента



Рис. 4. Результаты опыта нагревания жидкости

В соответствии с программой проведения экспериментов опробована работа миксера Браун, который показал свою работоспособность на постоянном токе с развитием до 825 оборотов/мин. Что в принципе позволяет выполнить его функции. Однако на переменном токе напряжением 220 В, он развивал обороты 1073. По результатам эксперимента с нагревательными приборами (кипятильник, чайник) можно сделать вывод, что род тока не влияет на скорость закипания жидкости. Результаты приведены на рис. 3 и 4.

Также была проверена работа универсального зарядного устройства для телефона и mp3-плеера: рабочее напряжение на постоянном токе 60–110 В. Также был подключен компьютер к установке постоянного тока. Рабочее напряжение для него составило 220 В [4].

Заключение

До настоящего момента проекты по применению возобновляемых источников энергии и развития системы электроснабжения постоянного тока, далеки от реальности. Энергоэффективные сети доказывают актуальность развития данной отрасли.

Применение сетей постоянного напряжения позволит: уменьшить потери на 10–20 % за счет

отказа от инвертора; более эффективно использовать возобновляемые источники электроэнергии; согласовать работу источников и накопителей постоянного напряжения, не требующих взаимной синхронизации; эффективно управлять графиками нагрузки; повысить электробезопасность сетей постоянного тока.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности [Текст]: постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 года № 449.

2. Калентьева, Н. А. Эффективное сбережение энергоресурсов - одно из ключевых звеньев реформирования ЖКХ в России / Н. А. Калентьева // Материалы международной научной конференции «Экономическая наука и практика». – Чита, 2012. – С. 198–201.

3. Яковлев, Г. Н. Применение постоянного тока в электроснабжении социально-бытового сектора экономики с целью снижения потерь электроэнергии / Г. Н. Яковлев // Энергосовет. – 2011. – № 6 (19). – С. 65–66.

4. Атрашенко, О. С. Исследование возможности питания бытовых приборов постоянным током / О. С. Атрашенко, А. Г. Сошинов, В. С. Галушак, С. А. Петренко // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017 : матер. VIII междунар. молодежной науч.-техн. конф. (г. Самара, 2–6 октября 2017 г.). В 3 т. Т. 1 / отв. ред.: Е. М. Шишков : Vol. 1 / ФГБОУ ВО «Самарский гос. техн. ун-т», АО «Системный оператор единой энергетической системы», ПАО «Россети» [и др.]. – Самара, 2017. – С. 84–85.

УДК 66.045.122

А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО ДИАМЕТРА ТРУБ С УЧЕТОМ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: natasha292009@yandex.ru

Предлагается методика расчета оптимального диаметра трубок в трубном пучке кожухотрубного теплообменника на примере расчета его технологических и геометрических параметров при утилизации тепла дымовых газов, идущего на нагревание воды. Показано, что при учете затрат энергии, связанной с прокачиванием нагреваемой воды через трубы и дымовых газов через межтрубное пространство, то есть суммарное гидравлическим сопротивлением трубного и межтрубного пространства и зависимых от внутреннего диаметра труб в минус пятой степени, и затратами на обслуживание, ремонт, очистку поверхности труб от термических загрязнений, линейно зависящих от числа труб, функция минимизации этих суммарных затрат имеет экстремум, соответствующий оптимальному диаметру труб.

Ключевые слова: диаметр труб, гидравлическое сопротивление, капитальные затраты, оборотные средства, соотношение затрат энергии, функция минимизации общих затрат.

A. B. Golovanchikov, N. A. Prokhorenko

CALCULATION OF THE OPTIMAL DIAMETER OF PIPES, TAKING INTO ACCOUNT ENERGY AND RESOURCE SAVING

Volgograd State Technical University

A method is proposed for calculating the optimal diameter of tubes in a tube bundle of a shell-and-tube heat exchanger using as an example the calculation of its technological and geometrical parameters when recovering heat from flue gases going to heat water.

It is shown that when taking into account the cost of energy associated with pumping heated water through pipes and flue gases through the annulus, that is, the total hydraulic resistance of the pipe and annular space and dependent on the internal diameter of pipes minus fifth degree, and the cost of maintenance, repair, cleaning the surface of pipes from thermal contamination linearly dependent on the number of pipes; the function of minimizing these total costs has an extremum corresponding to the optimal diameter of the pipes.

Keywords: pipe diameter, hydraulic resistance, capital costs, working capital, the ratio of energy costs, the function of minimizing total costs.

Известные типовые методы расчетов массо-обменных аппаратов: ректификационных колонн, абсорберов, адсорберов, экстракторов, ионообменников позволяют оптимизировать амортизационные отчисления на капитальные затраты, связанные со стоимостью колонны, и оборотные средства, связанные с энергозатратами, ремонтом и обслуживанием технологического процесса [1–4].

Целью работы является определение оптимального диаметра труб в трубном пучке кожухотрубного теплообменника с учетом энергозатрат на течение в трубах и межтрубном пространстве холодного и горячего теплоносителя, амортизационных отчислений за капитальные затраты и оборотных средств за обслуживание и ремонт теплообменника.

В учебном пособии [4] аналогичная задача приводится в качестве примера для определения оптимального диаметра газопровода, учитывающего затраты энергии на перекачивание газа, стоимость самого трубопровода, центробежного или осевого вентилятора, а также оборотные средства, связанные с ремонтом и обслуживанием.

В этом примере показано, что функция минимизации при турбулентном течении стоимости общих затрат описывается уравнением:

$$u_3 = \frac{A}{d_e^5} + B \cdot d_e \cdot \quad (1)$$

Несложно показать, что последняя функция имеет минимум, из которого оптимальный внутренний диаметр определяется в виде:

$$d_e^* = \left(\frac{5 \cdot A}{B} \right)^{\frac{1}{6}}. \quad (2)$$

Очевидно, что и для кожухотрубного теплообменника с общей длиной труб:

$$L = n_t \cdot h_t,$$

где n_t – число труб в трубном пучке; h_t – высота труб, связь между стоимостью энергозатрат и суммой капитальных затрат и оборотных средств может быть записана в виде уравнения (1), которое приводится к виду:

$$I_3 = \frac{a}{d_e^5} + d_e, \quad (3)$$

где $I_3 = \frac{u_3}{B}$; $a = \frac{A}{B}$.

$$\text{Тогда} \quad d_e^* = (5 \cdot a)^{\frac{1}{6}}. \quad (4)$$

Для ламинарного потока в трубах:

$$I_3 = \frac{a}{d_e^4} + d_e,$$

а для переходного режима в трубах:

$$I_3 = \frac{a}{d_e^{4,75}} + d_e,$$

и соответственно для ламинарного потока:

$$d_e^* = (4 \cdot a)^{0,2},$$

для турбулентного потока:

$$d_e^* = (4,75 \cdot a)^{\frac{1}{5,75}}$$

Опыт эксплуатации промышленных кожухотрубных теплообменников показывает что оптимальный внутренний диаметр трубок в трубном пучке лежит в пределах от 20 до 40 мм. При больших затратах на ремонт и обслуживание и стоимости самого теплообменника (когда он выполнен из специальных дорогих металлов) растет коэффициент B в уравнении (1) по сравнению с коэффициентом A , коэффициент a в уравнении (4) уменьшается, соответственно снижается d_e^* . И наоборот повышение стоимости электроэнергии приводит к повышению и коэффициента A в уравнении (1) и коэффициента a в уравнении (4) и увеличению оптимального диаметра d_e^* .

Полагая средний оптимальный диаметр трубок $d_e^* = 0,025$ м, найдем ориентировочное значение коэффициента a , решая относительно него уравнение (4):

$$a = \frac{(d_e^*)^6}{5} \approx 10^{-10} \text{ м}^6.$$

Ниже представлены расчеты кожухотрубного теплообменника, предназначенного для утилизации тепла дымовых газов водой.

В табл. 1 приведены исходные и справочные данные и основные технологические и геометрические расчетные параметры одноходового кожухотрубного теплообменника, в котором дымовые газы подают в межтрубное пространство, а нагреваемую воду в трубы трубного пучка. В табл. 2 приведены основные технологические и геометрические расчетные параметры кожухотрубного теплообменника в зависимости от внутреннего диаметра труб.

Таблица 1

**Исходные и справочные данные и расчетные параметры кожухотрубного теплообменника,
предназначенного для утилизации тепла дымовых газов водой**

Наименование параметра	Размер- ность	Обозначение		Вели- чина
		в литературе	в программе	
1	2	3	4	5
Исходные данные				
Производительность по дымовым газам	кг/час	$\dot{G}_o$	$\dot{G}_o$	1000
Начальная температура дымовых газов	°C	$t_{oн}$	$t_{oн}$	280
Конечная температура дымовых газов	°C	$t_{oк}$	$t_{oк}$	180
Начальная температура нагреваемой воды	°C	$t_{хн}$	$t_{хн}$	10
Конечная температура нагреваемой воды	°C	$t_{хк}$	$t_{хк}$	80
Справочные данные				
Среднее давление дымовых газов	ата	p	p	1,1
Средняя молекулярная масса дымовых газов	кг/кмоль	m	m	33,2
Плотность воды (хладагента) при 0 °C	кг/м ³	ρ_x	ρ_{ox}	990
Вязкость дымовых газов при 0 °C	Пас	μ_o	ν_{io}	$1,95 \cdot 10^{-5}$
Вязкость воды при 20 °C	Пас	μ_x	ν_{ix}	10^{-3}
Температурный коэффициент дымовых газов	1/град	α_o	α_o	0,0015
Температурный коэффициент вязкости воды	1/град	α_x	α_x	0,0019
Удельная теплоемкость дымовых газов	кДж/кг·К	C_o	C_o	1,07
Удельная теплоемкость воды	кДж/кг·К	C_x	C_x	4,19
Коэффициент объемного расширения дымовых газов	1/град	ϵ_o	ϵ_o	0,0037
Коэффициент объемного расширения воды	1/град	ϵ_x	ϵ_x	0,000046
Теплопроводимость дымовых газов	Вт/м·К	χ_o	l_o	0,028
Теплопроводимость хладагента воды	Вт/м·К	χ_x	l_x	0,675
Термическое сопротивление	(Вт/м ² ·К) ⁻¹	r_s	r_s	0,0004
Коэффициент отношения энергозатрат к капитальным затратам и оборотным средствам	м ⁶	a	a	10^{-10}
Высота труб трубного пучка	м	h_t	ht	4
Число труб	шт	z	z	1
Толщина стенки труб	м	δ_c	d_c	0,03
Общие расчетные параметры				
Производительность по нагреваемой воде	кг/час	$\dot{G}_x$	$\dot{G}_x$	3648,1
Средняя температура нагреваемой воды в трубах	°C	t_x	tx	45
Средняя движущая сила	°C	Δt	dt	184,6
Средняя температура горячего теплоносителя в межтрубном пространстве	°C	t_o	to	229,6
Вязкость дымовых газов при средней температуре	Пас	μ_o	ν_{io}	$2,75 \cdot 10^{-5}$
Плотность дымовых газов при средней температуре и давлении	кг/м ³	ρ_{io}	$\rho_{o\partial}$	0,857
Вязкость воды при средней температуре	Пас	μ_x	ν_{ix}	0,0006

Таблица 2

Основные расчетные параметры кожухотрубного теплообменника, зависящие от внутреннего диаметра труб

№	Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Внутренний диаметр труб $d_в$, м						
				0,015	0,020	0,025	0,030	0,035	0,040	0,045
1	Число труб	—	n	160	148	175	204	247	218	282
2	Диаметр кожуха	м	d_k	0,617	0,745	0,965	1,207	1,502	1,6	1,992
3	Площадь теплопередачи	м ²	F	35	41,4	60,5	83,2	116	116,2	168,1
4	Коэффициент теплопередачи	Вт/м ² ·К	K_t	46,1	38,8	26,6	19,3	13,9	13,85	9,6
5	Число Рейнольдса для газов	—	Re_o	42827,6	34830,4	2412,6	17557,6	12680,1	12485	8759
6	Число Рейнольдса для воды в трубах	—	Re_x	870,1	704,4	475,4	339,3	240,3	238,5	163,6
7	Функция минимизации затрат	—	$И_3$	$14,7 \cdot 10^{-2}$	$5,12 \cdot 10^{-2}$	$3,52 \cdot 10^{-2}$	$3,41 \cdot 10^{-2}$	$3,69 \cdot 10^{-2}$	$4,1 \cdot 10^{-2}$	$4,55 \cdot 10^{-2}$

Как видно из приведенных в табл. 2 данных, функция минимизации затрат соответствует трубам с внутренним диаметром $d_в = 30$ мм, для наглядности зависимость функции минимизации затрат, связанных с энергопотребле-

нием, амортизационными отчислениями от стоимости теплообменника с оборотными средствами, связанными с эксплуатационными расходами и ремонтом, представлены в виде графика на рис. 1.

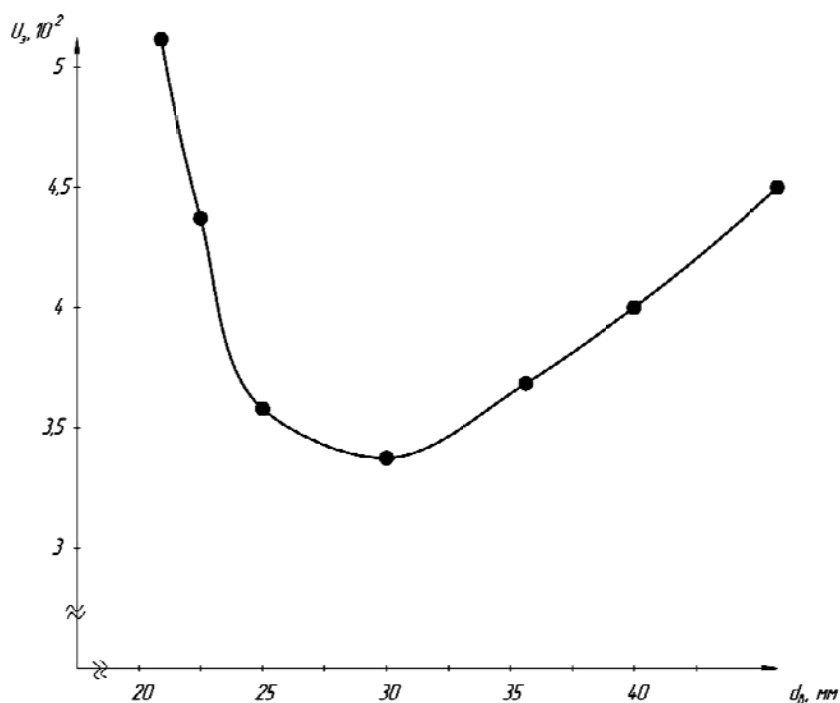


Рис. 1. Зависимость функции минимизации суммарных затрат на электроэнергию, амортизационные отчисления и оборотные средства от внутреннего диаметра труб, формула (3)

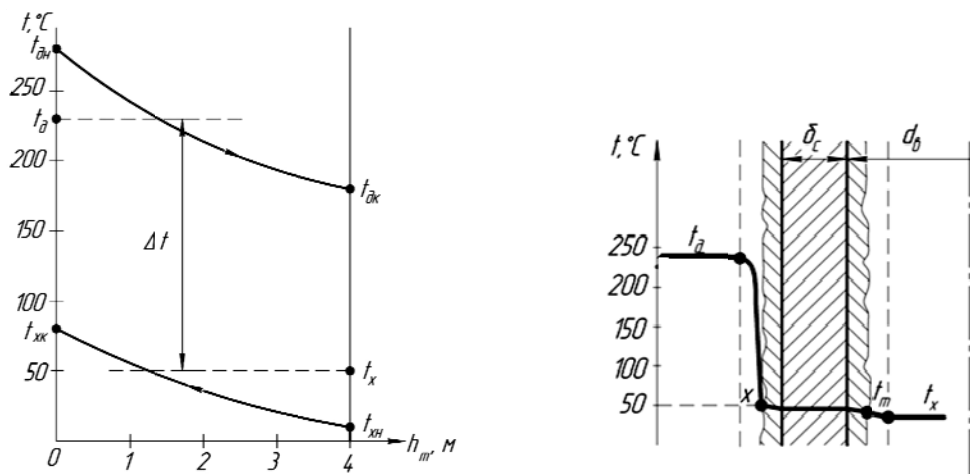


Таблица 3

**Расчетные параметры кожухотрубного теплообменника
при оптимальном внутреннем диаметре труб $d_\delta = 30$ мм**

№	Наименование параметра	Размер- ность	Обозначение		Вели- чина
			в литературе	в программе	
1	2	3	4	5	
1	Внутренний диаметр трубы	м	d_δ	$d\delta$	0,003
2	Внутренний диаметр кожуха	м	D_κ	$d\kappa$	1,207
3	Боковая поверхность одной трубы	м ²	f_l	fl	0,408
4	Число труб в трубном пучке	—			
5	Число Рейнольдса для воды в трубах трубного пучка	—	Re_x	Rex	339,3
6	Площадь сечения межтрубного пространства, в котором движется поток дымовых газов	м ²	S_m	Sm	1
7	Эквивалентный диаметр межтрубного пространства	м	D_δ	de	0,174
8	Число Рейнольдса для дымовых газов в межтрубном пространстве	—	Re_δ	$Re\delta$	17557,6
9	Число Прандтля для дымовых газов	—	Pr_δ	$Pr\delta$	1,052
10	Число Прандтля для холодного теплоносителя воды в трубах Re критическое	—	Pr_x	Prx	3,86
11	Число Грасгофа для холодного теплоносителя в трубах при $Re_x = Re_n$	—	Gr_x	Grx	55661,9
12	Число Нуссельта для холодного теплоносителя	—	Nu_x	Nux	83,2
13	Коэффициент теплоотдачи для холодного теплоносителя	Вт/м ² ·К	d_x	dx	1872,8
14	Удельная тепловая мощность для холодного теплоносителя	Вт/м ²	q_x	qx	3376,1
15	Температура термических отношений на внутренней стенке трубы со стороны холодного теплоносителя	°С	t_w	tw	46,6
16	Температура термических отношений на внутренней стенке со стороны горячего теплоносителя дымовых газов	°С	x	x	48,2
17	Число Нуссельта для горячего теплоносителя	—	Nu_g	Nug	169,5
18	Коэффициент теплоотдачи для горячего теплоносителя	Вт/м ² ·К	α_g	alg	27,1
19	Удельная тепловая мощность горячего теплоносителя	Вт/м ²	q_g	qg	3780,2

Результаты расчетов технологических и геометрических параметров кожухотрубного теплообменника, предназначенного для утилизации дымовых газов при рассчитанном оптимальном внутреннем диаметре труб приведены в табл. 3. Расчеты проводились по модифицированному алгоритму, нивелирующему скачки зависимостей числа Нуссельта от чисел Рейнольдса, Прандтля и Грасгофа, а также отношения чисел Прандтля к Прандтлю стенки трубы на границе ламинарного ($Re = 2320$) и переходного режима течения в трубах, а также на границе ($Re = 10000$) переходного и турбулентного режима течения [4–7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованчиков, А. Б. К вопросу о расчетах оптимального флегмового числа ректификационной колонны /

А. Б. Голованчиков, Н. А. Меренцов, Н. А. Прохоренко, М. В. Топилин // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – Волгоград : ВолгГТУ, 2018. – № 3 (24). – С. 14–24.

2. Голованчиков, А. Б. Расчет оптимального расхода абсорбента с учетом затрат на амортизацию и оборотные средства / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, А. А. Коберник // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – Волгоград : ВолгГТУ, 2018. – № 3 (24). – С. 27–31.

3. Голованчиков, А. Б. Моделирование адсорбера непрерывного действия с учетом энерго- и ресурсосбережения / А. Б. Голованчиков, О. А. Залипаева, А. А. Коберник // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – Волгоград : ВолгГТУ, 2018. – № 3 (24). – С. 36–42.

4. Павлов, К. Ф. Примеры и задачи по курсу процессы и аппараты химической технологии / К. Ф. Павлов, П. Г. Романков, А. А. Носков. – 10-е изд., перераб. и доп. – Москва : Альянс, 2013. – 576 с.

УДК 623.44

Т. В. Копейкина

БОРЬБА С ОБРАЗОВАНИЕМ ГОЛОЛЕДА НА ПРОВОДАХ ЛЭП

Камышинский технологический институт (филиал) ВолгГТУ

E-mail: kopeikina.tania@yandex.ru

В настоящей статье приведена информация по анализу существующих способов борьбы с образованием гололеда на ЛЭП. Рассматривается природа образования наледи на проводах. Отмечается, что на данный момент способы борьбы с гололедом на ЛЭП объединены в три группы: химические, механические и электрические методы воздействия. Отражены основные ключевые мероприятия, влияющие на эффективное удаление образования гололеда на ЛЭП. Указаны основные направления, по которым целесообразно вести дальнейшие разработки и исследования. Сделан вывод о необходимости дальнейших исследований для эффективного и безопасного удаления наледи с проводов ЛЭП. Также уделяется внимание целесообразности применения того или иного метода борьбы с гололедом.

Ключевые слова: ЛЭП, провода, способы, защита, эксплуатация, колебания, лед, переменный ток, постоянный ток.

T. V. Kopeykina

COMBATING THE FORMATION OF ICE ON THE WIRES OF POWER LINES

Kamyshin technological Institute (branch)

Volgograd State Technical University

This article provides information on the analysis of existing methods to combat the formation of halide on power lines. The nature of formation of ice on wires is considered. It is noted that at the moment the methods of halide control on power lines are combined into three groups: chemical, mechanical and electrical methods of exposure. The main key measures affecting the effective removal of halogen formation on power lines are reflected. The main directions on which it is expedient to conduct further development and research are specified. The conclusion about the need for further research for effective and safe removal of ice from the wires of power lines. Attention is also paid to the appropriateness of a method of combating halide.

Keywords: power lines, wires, methods, protection, operation, oscillations, ice, alternating current, direct current.

Как известно, гололед образуется при намерзании переохлажденных капель дождя, мороси или тумана при температуре от 0 до

минус 5 °С на поверхности земли и различных предметов, в том числе проводах высоковольтных линий электропередачи. Толщина гололеда

на них может достигать 60÷70 мм, существенно утяжеляя провода. Простые расчеты показывают, что, например, провод марки АС-185/43 диаметром 19,6 мм километровой длины имеет массу 846 кг; при толщине гололеда 20 мм она увеличивается в 3,7 раза, при толщине 40 мм – в 9 раз, при толщине 60 мм – в 17 раз. При этом общая масса линии электропередачи из восьми проводов километровой длины возрастает соответственно до 25, 60 и 115 тонн, что приводит к обрыву проводов и поломке металлических опор.

Отложение гололеда (изморози) на линиях электропередачи могут вызвать: разрегулировку проводов и грозозащитных тросов и их сближение между собой; сближение проводов и тросов при их подскоке вследствие не одновременного сброса гололеда; пляску проводов; обрыв проводов и тросов; разрушение опор; перекрытие линейной изоляции ВЛ при таянии вследствие значительного снижения льдоразрядных характеристик изоляторов по сравнению с влагоразрядными характеристиками, по которым обычно выбирается необходимый уровень линейной изоляции.

Подобные аварии приносят значительный экономический ущерб, на их устранение уходит несколько дней и затрачиваются огромные финансовые и трудовые средства. Таким образом, вопрос плавки гололеда требует пристального внимания и взвешенного решения при выборе средств по устранению наледи.

Рассмотрим известные способы устранения наледи, применимые к вопросу гололедообразования на ЛЭП и применяющиеся на данный момент.

Известны механические, электрические и химические способы удаления льда с проводов линий электропередачи.

Механические способы заключаются в применении специальных приспособлений, обеспечивающих удаление льда с проводов. Недостатком таких устройств является низкая производительность и возможность повреждения и деформации проводов в процессе удаления гололеда, что приводит к обрывам сети и сопровождается ускоренным износом проводов.

Химические способы заключаются в нанесении на провода специальных веществ, предотвращающих образование льда или обеспечивающих его разрушение. Процесс нанесения характеризуется большой трудоемкостью. Кроме того, такие вещества недолговечны, поэтому

в течение всего гололедного сезона нуждаются в периодическом обновлении.

Электрические способы удаления льда заключаются в нагреве или встряхивании проводов импульсами тока, обеспечивающими плавку льда или предотвращение его образования.

В линиях значительной длины и сечения из-за относительно большой их индуктивности напряжение источника переменного тока при частоте $F = 50$ Гц, а соответственно и его мощность должны быть в 5÷10 раз больше по сравнению с источником постоянного тока той же силы. Поэтому считается, что экономически более выгодно плавить наледь постоянным током, хотя для этого нужны мощные высоковольтные выпрямители. Переменный ток применяют обычно на высоковольтных линиях напряжением 110 кВ и ниже, а постоянный – выше 110 кВ. Лед и снег можно расплавить теплотой электрического тока, для чего требуется увеличить электрическую нагрузку на провода. Требуемый эффект можно получить быстрее, если включить ЛЭП на короткое замыкание. Традиционный способ борьбы с гололедом, осуществляемый посредством так называемой плавки при коротком замыкании линий электропередачи и отключением от нее всех потребителей, бывает малоэффективным, неудобным, дорогим и опасным. При большой протяженности линии и большом индуктивном сопротивлении плавка гололеда переменным током требует очень высоких напряжений источника плавки и очень больших реактивных мощностей. Для плавки гололеда постоянным током разработаны специальные выпрямительные агрегаты ВУКН-1200-14000. Эти агрегаты подключают к источнику переменного тока напряжением до 10 кВ и дают выпрямленный ток напряжением до 14 кВ. Два таких агрегата, соединенных параллельно, могут обеспечить плавку гололеда ЛЭП 220 кВ протяженностью около 100÷120 км. К недостаткам агрегата относится довольно высокая стоимость самого агрегата и дополнительного оборудования, необходимого для его эксплуатации.

Применение скин-эффекта для удаления гололеда на ЛЭП является сравнительно новым и мало изученным способом удаления наледи. Название эффекта происходит от английского слова *skin* – кожа. Скин-эффект состоит в том, что токи высокой частоты в отличие от постоянного тока не распределяются равномерно по сечению проводника, а концентрируются

в очень тонком слое его поверхности, толщина которого при частоте $f > 10$ кГц составляет уже доли миллиметра, а сопротивление проводов возрастает в сотни раз. Электромагнитные колебания высокой частоты могут распространяться в свободном пространстве (при излучении антенной) и в волноводах, например, в так называемых длинных линиях, по которым электромагнитная волна скользит, словно по рельсам. Такой длинной линией может служить пара проводов линии электропередачи. Чем больше сопротивление проводов линии, тем большая часть энергии электромагнитного поля, бегущей вдоль линии волны, преобразуется в тепло. Именно этот эффект и положен в основу нового способа предотвращения гололеда на линиях электропередачи.

В случае ограниченных размеров линии или какого-либо высокочастотного препятствия, например емкости, в линии помимо падающей будет распространяться и отраженная волна, энергия которой также будет преобразовываться в тепло по мере ее распространения от препятствия к генератору.

Разогрев линий электропередачи токами высокой частоты позволит предотвращать образование гололеда на проводах, поскольку можно нагреть их до $10\div 20$ °С, не дожидаясь образования плотного льда.

Одним из мероприятий по предупреждению «пляски» является увеличение расстояний между проводами и между проводами и тросами, при которых вероятность замыкания при «пляске» весьма мала. Эти расстояния выбирают в соответствии с ПУЭ. Механический способ требует очень много времени и значительных трудозатрат, из-за чего в большинстве случаев признается нецелесообразным. Защита ЛЭП от гололеда, зачастую вызывающего обрыв проводов, производится с помощью специальных устройств. Это ограничители гололедообразования. Такие устройства подвешиваются на провода с подветренной стороны и мешают образованию льда, который может стать причиной их обрыва. Ограничитель гололедообразования и колебаний типа ОГК (ограничитель) представляет собой комплексное устройство для защиты проводов и грозозащитных тросов линий электропередачи напряжением $10\div 220$ кВ от сверхрасчетного гололеда и повреждений, вызываемых усталостью материала при вибрации и пляске, и является в настоящее время наиболее часто используемым многофункцио-

нальным устройством, обеспечивающим надежную защиту ВЛ от атмосферных воздействий и связанных с ними явлений.

Ограничитель выполняется в виде двух грузов, установленных на консолях гибкого элемента из 19-жильного оцинкованного тросика. Посередине элемента установлен зажим для крепления ограничителя к проводу. Грузы из круглой стали выполнены в виде полукруглости с консолями разной длины. Верхняя консоль, предназначенная для крепления гибкого элемента, короче нижней консоли.

Другое мероприятие – это применение рациональных конструкций линейной арматуры, гирлянд изоляторов и узлов крепления их к опорам, обеспечивающим необходимую шарнирность сопряжения всех элементов и снижающих их износ при «пляске». При эксплуатации ЛЭП возникает также вибрация проводов и тросов; она появляется при ветрах. Вероятность вибраций возрастает вместе с увеличением высоты подвеса проводов и тросов. Так как вибрация сопровождается обычно перегибами проводов и тросов в местах закреплений, они влекут за собой значительные перенапряжения в металле. В конечном итоге вибрации приводят к разрушению проводов и их отрыву. Снизить опасность, связанную с вибрацией проводов, возможно установкой на каждом проводе или тросе по обе стороны от места их подвеса специальных устройств – виброгасителей (демпферов), которые имеют чугунные грузы; их масса приводит к уменьшению вибрации, и применение их повышает срок службы проводов и тросов. Систематические осмотры проводов и своевременный ремонт их во многом способствуют тому, чтобы избежать повреждение проводов в результате вибрации.

Использование механических колебаний на ЛЭП является одним из способов по удалению гололеда на ЛЭП. Известно, что при возникновении опасности обрыва проводов ЛЭП из-за их обледенения отключают высоковольтное переменное напряжение. После чего к двум проводам ЛЭП подключают импульсный источник постоянного электрического тока, вырабатывающий ток величиной, достаточной для возбуждения колебаний проводов с амплитудой, минимально достаточной для удаления обледенения [4]. Ее значение предварительно определяется экспериментально-теоретическим путем. Для уменьшения энергозатрат ток на проводах в одном и противоположных направ-

лениях пропускают периодически с частотой, кратной частоте собственных колебаний обледеневших проводов, закрепленных на двух соседних опорах, то есть пролетах ЛЭП. Возникающий при этом резонанс позволит раскачать провода до необходимых амплитуд с наименьшими энергозатратами. Кроме этого, длительность пропуска тока должна быть кратной половине периода собственных колебаний проводов, что уменьшит влияние их сил инерции на развитие колебательного процесса.

С целью создания в слоях льда более высоких знакопеременных растягивающих и сжимающих напряжений, возникающих от изгиба обледеневших проводов, постоянный ток необходимо пропускать по проводам, не лежащим в одной горизонтальной плоскости. Это также позволит более эффективно использовать силы тяжести обледеневших проводов для повышения интенсивности их колебаний.

В настоящее время разработан макет устройства, моделирующий линию электропередачи в масштабе 1:100 и генератор импульсов, выполненный на базе программируемого логического контроллера. Устройство работает следующим образом: трансформатор преобразует питающее напряжение до нужной величины; блок силовой электроники выпрямляет полученное от трансформатора напряжение и формирует импульсы тока требуемой величины, формы и частоты; система управления, представляющая собой программируемый логический контроллер, обрабатывает информацию с внешних датчиков, задает требуемую форму и частоту импульсов тока для блока силовой электроники и управляет работой системы в целом (осуществляет расчеты всех необходимых параметров, производит включение и отключение устройства);

В устройстве предусматривается возможность подключения к системе мониторинга состояния сети, с целью обеспечения централизованного управления работой нескольких устройств внутри одной сети.

Использование механических колебаний для разрушения льда, а не нагрева, как это делается в настоящее время, позволит, как утверждают разработчики, существенно уменьшить

время, необходимое для очистки линии от льда, и энергию, затрачиваемую на очистку.

Гололед вызывает дополнительные механические нагрузки на все элементы ВЛ. При значительных гололедных отложениях возможны обрывы проводов, тросов, разрушения арматуры, изоляторов и даже опор ВЛ. Гололед может откладываться по фазным проводам достаточно неравномерно. Гололед является одной из причин «пляски» проводов, способной привести к их схлестыванию. На небольших участках ВЛ производится, как правило, механическое удаление гололеда. Основным методом борьбы с гололедом при эксплуатации протяженных ВЛ является его плавка за счет нагревания проводов протекающим по ним током. Существует достаточно большое количество схем плавки гололеда, определяемых схемой электрической сети, нагрузкой потребителей, возможностью отключения линий и другими факторами.

Поэтому в настоящее время наиболее распространенным способом борьбы с гололедом на проводах ЛЭП является плавка гололеда переменным или постоянным током большой величины (в зависимости от сечения провода) в течение длительного периода времени (время плавки достигает 100 минут).

Следует отметить, что плавка гололеда должна проводиться в районах интенсивного гололедообразования с частой пляской проводов. В других случаях применение плавки гололеда должно обосновываться технико-экономическими расчетами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дьяков, А. Ф. Предотвращение и ликвидация гололедных аварий в электрических сетях / А. Ф. Дьяков, А. С. Засыпкин, И. И. Левченко. – Пятигорск: Изд-во РП «Южэнерготехнадзор», 2000.
2. Каганов, В. И. Колебания и волны в природе и технике. Компьютеризированный курс. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008.
3. Левченко, И. И. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах / И. И. Левченко, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев, Е. И. Сацук. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
4. Борьба с гололедом – Эксплуатация воздушных линий электропередачи // Энергетика: оборудование, документация. – Режим доступа: URL: http://forca.ru/instrukcii-po-ekspluatatsii/vl/ekspluatatsiya-vozdushnyh-linii-elektroperedachi_4.html (дата обращения 10.10.2011).

УДК 621.928.37

В. О. Яблонский, Э. Кофи Куаме, Н. Джерайом

**ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО ГИДРОЦИКЛОНА
ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СТОЧНЫХ ВОД
ПРОИЗВОДСТВА СУСПЕНЗИОННОГО ПОЛИВИНИЛХЛОРИДА**

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: everest58@mail.ru

Выполнено численное моделирование поля концентраций частиц твердой фазы при разделении сточных вод производства суспензионного поливинилхлорида, обладающих нелинейновязкопластическими реологическими свойствами, в цилиндрическом гидроциклоне. Дифференциальное уравнение конвективной диффузии решено совместно с уравнением движения частицы твердой фазы численным методом. Установлено влияние пластических свойств суспензии на показатели разделения.

Ключевые слова: суспензионный поливинилхлорид, сточные воды, нелинейновязкопластическая жидкость, пластические свойства, псевдопластическая жидкость, разделение, цилиндрический гидроциклон, фактор разделения, степень извлечения, предельное напряжение сдвига, число пластичности.

V. O. Yablonskii, E. Kofi Kuame, N. Jeraiom

**OPTIMIZATION OF WORKING REGIMES OF CYLINDRICAL HYDROCYCLONE
FOR SUSPENSIOUS POLIVINYLCHLORIDE DRAIN WATER SEPARATION**

Volgograd State Technical University

The numerical modelling of hard phase particles concentration field in the process of separation of suspensious polivinylchloride drain water with nonlinear viscoplastic rheological properties, in cylindrical hydrocyclone is carried out. Differential equation of convective diffusion is solved together with hard phase particle motion equation by numerical method. The influence of plastic properties of suspension on separation index is defined.

Keywords: suspensious polivinylchloride, drain water, nonlinear viscoplastic fluid, pseudoplastic fluid, plastic properties, separation, cylindrical hydrocyclone, separation factor, cleaning factor, bound shear stress, number of plasticity.

Цилиндрический гидроциклон – широко применяемый в химической и других отраслях промышленности аппарат для разделения неоднородных жидких систем. Простота устройства, надежность работы, возможность экономить производственные площади наряду с высокой эффективностью процессов разделения позволяют использовать гидроциклон для очистки реологически сложных жидкостей, обладающих высокой эффективной вязкостью.

Особый интерес представляет очистка вязкопластических жидкостей, обладающих предельным напряжением сдвига и нелинейностью реологических свойств, к которым относятся сточные воды производства суспензионного поливинилхлорида.

В работах [1; 2] в предположении применимости законов Стокса и Тодеса к осаждению дисперсной фазы в поле центробежных сил в гидроциклоне выявлена зависимость коэффициента осветления жидкости от режимных параметров процесса сепарирования. Разработанные методы расчета показателей разделительного процесса в гидроциклоне [3–8] базируются

на решении задач турбулентного переноса твердой фазы. В их основу положено уравнение радиального движения частиц в осесимметричном турбулентном потоке ньютоновской жидкости. В [3] моделирование движения частиц твердой фазы в гидроциклоне выполнялось на основе уравнений винтового движения сплошной среды, что ввиду сложной гидродинамики течения разделяемой среды в цилиндроконическом гидроциклоне приводит к существенным погрешностям. В работах [4; 5] рассмотрены принципы расчета турбулентного переноса частиц в гидроциклоне, основанного на использовании уравнения неразрывности потока твердой фазы. Подобный подход позволяет рассчитать как количество извлекаемой в гидроциклоне твердой фазы, так и ее характеристики (концентрацию, дисперсный состав) в любой точке аппарата. В работе [6] на основе уравнений Навье-Стокса проведено численное исследование структуры течения и сепарационных процессов в гидроциклоне. Для описания переноса количества движения дисперсной фазы используется теория многоскоростного контину-

ума. В настоящее время получено решение уравнения радиального движения частиц в различных конструкциях гидроциклонов с учетом действия на частицу силы инерции и ускорения Кориолиса [7; 8], что позволяет осуществить расчет распределения частиц дисперсной фазы различной степени крупности и определить их содержание в целевых продуктах разделения.

В работе [9] сделано заключение, что к многофазным гетерогенным системам применимо реологическое уравнение состояния неньютоновской жидкости, которое обычно записывают в виде закона Гершеля-Балкли.

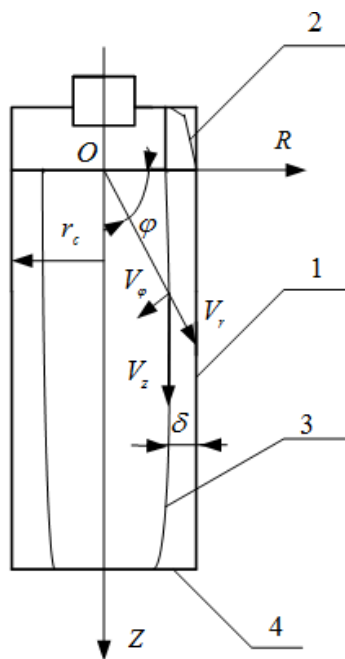


Рис. 1. Схема течения в цилиндрическом гидроциклоне: 1 – корпус гидроциклона; 2 – входной патрубок; 3 – дно гидроциклона; 4 – поверхность пленки жидкости

Гидроциклон (рис. 1) состоит из цилиндрического корпуса 1, имеющего радиус r_k , в который тангенциально подается разделяемая суспензия через входной патрубок 2, установлен

ный в его верхней части и цилиндрического дна 3. 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 4. Частицы твердой фазы под действием центробежной силы отбрасываются к стенке корпуса аппарата. Сгущенная фаза удаляется через разгрузочное устройство нижнего слива. Осветленная суспензия удаляется также через нижний слив.

В [10; 11] разработана математическая модель течения пленки нелинейновязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне, основанная на решении полных уравнений реодинамики, и проведено численное исследование течения. Описание разделительных процессов в гидроциклоне со свободно образующейся поверхностью нелинейновязкопластической жидкой фазы на основе решения полных уравнений реодинамики до сих пор не проведено и представляет значительный теоретический и прикладной интерес.

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

Математическая постановка задачи производится при следующих допущениях: частицы извлекаемого вещества распределены равномерно во входном патрубке гидроциклона, их концентрация при входе в гидроциклон равна C_0 ; режим течения суспензии ламинарный [12]; режим осаждения частиц твердой фазы ламинарный ввиду высокой эффективной вязкости неньютоновской дисперсионной среды.

Полагаем, что свойства нелинейновязкопластической жидкости описываются законом Гершеля-Балкли

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

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

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, $\text{Па} \cdot \text{с}^n$, r , ϕ , z – радиальная, окружная и осевая координаты соответственно.

Для математического моделирования поля концентраций при течении суспензии с неньютоновской дисперсионной средой в цилиндри-

ческом гидроциклоне используем дифференциальное уравнение конвективной диффузии в цилиндрических координатах, которое при равенстве нулю коэффициента молекулярной диффузии может быть записано следующим образом:

$$\operatorname{div}(\bar{V}_h c) = 0, \quad (2)$$

где c – концентрация частиц твердой фазы, кг/м^3 ; $\bar{V}_h$ – вектор скорости частиц твердой фазы.

Уравнение (2) может быть преобразовано к виду:

$$\bar{V}_h \operatorname{grad} c + c \operatorname{div} \bar{V}_h = 0. \quad (3)$$

Поскольку скорость частиц твердой фазы отлична от скорости неразрывного потока дисперсионной среды, и уравнение (3) принимает следующий вид:

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

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

где $V_{rh}(r, z)$ и $V_{zh}(r, z)$ – радиальная и осевая составляющие скорости частиц твердой фазы, м/с ; $V_{rl}(r, z)$ – радиальная составляющая скорости дисперсионной среды, м/с ; r, z – радиальная и осевая координаты, м ; индексы: h – частица твердой фазы, l – дисперсионная среда.

Данное уравнение решается совместно с уравнением движения частицы твердой фазы.

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

$$V_{rh} \frac{\partial V_{\phi h}}{\partial r} + V_{zh} \frac{\partial V_{\phi h}}{\partial z} = \frac{V_{\phi h} V_{rh}}{r} - \frac{3 K_{fp} \rho_l (V_{\phi h} - V_{\phi l}) |V_{\phi h} - V_{\phi l}|}{4 \rho_h d_h \Phi(B)},$$

где K_{fr}, K_{fp} – 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 ; ρ_h, ρ_l – плотности частиц твердой фазы и дисперсионной среды, кг/м^3 ; ϕ – окружная координата, град.

Коэффициент сопротивления при радиальном движении частицы в неньютоновской жидкости K_{fr} может быть вычислен с помощью эмпирической формулы [13]

$$K_{fr} = \frac{24 f_1(n)}{\operatorname{Re}_{nr}} + \frac{f_2(n)}{(\operatorname{Re}_{nr})^{f_3(n)}}, \quad (5)$$

где

$$f_1(n) = 3^{1,5(n-1)} \frac{2 + 29n - 22n^2}{n(n+2)(2n+1)},$$

Полагаем, что твердая фаза разделяемой суспензии является монодисперсной, что при проведении моделирования процесса разделения для наиболее мелкой фракции позволит добиться заданной степени сгущения 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} равна осевой составляющей скорости дисперсионной среды V_{zl} . Это допущение хорошо реализуется на практике ввиду того, что разделение в гидроциклонах сточных вод производства суспензионного поливинилхлорида, имеющих нелинейновязкопластическую дисперсионную среду, обладающую высокой эффективной вязкостью, протекает при больших значениях числа Fr (фактора разделения).

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

$$f_2(n) = 10.5n - 3.5, \quad f_3(n) = 0.32n + 0.13,$$

$\operatorname{Re}_{nr} = \frac{\rho_l (d_h)^n (V_{rh} - V_{rl})^{2-n}}{k}$ – локальное число Рейнольдса, характеризующее режим осаждения частиц твердой фазы.

Коэффициент сопротивления при окружном движении частицы K_{fp} вычисляется по аналогичным зависимостям, но в качестве характерной разности скоростей берется соответствующая разность скоростей частицы и жидкости в окружном направлении.

Коэффициент $\Phi(B)$, учитывающий стесненность осаждения частиц, вычисляется по зависимости, предложенной В. И. Соколовым [14]

$$\Phi(B) = 10^{-1,82(1-B)}, \quad (7)$$

где $B = 1 - \frac{c_0}{\rho_h}$ – часть единичного объема суспензии, занятая дисперсионной средой; c_0 – концентрация частиц твердой фазы во входном патрубке гидроциклона, кг/м^3 .

В соответствии с методом характеристик [15] система дифференциальных уравнений в частных производных (3,4) сводится к эквивалентной системе обыкновенных дифференциальных уравнений, которая решалась по методу Рунге-Кутты четвертого порядка с фиксированным шагом.

Течение нелинейновязкопластической жидкости в гидроциклоне характеризуется [10] числом пластичности Pl , центробежным числом Фруда Fr (фактором разделения), модифицированным числом Рейнольдса Re_n , параметром безразмерного расхода Q , а также показателем нелинейности кривой течения n . Осаждение час-

тицы в поле центробежных сил в неньютоновской дисперсионной среде характеризуется локальным числом Re_{nr} , изменяющимся вдоль траектории частицы.

На основании результатов моделирования полей составляющих скорости и давления при течении нелинейновязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне и последующей аппроксимации результатов, было выполнено моделирование разделения суспензий, обладающих нелинейновязкопластическими свойствами, в гидроциклоне, которое заключалось в численном решении полученной системы дифференциальных уравнений при граничном условии, задающем концентрацию частиц твердой фазы на входе в гидроциклон, для различных значений определяющих чисел подобия и реологических свойств дисперсионной среды при изменении их в широком диапазоне.

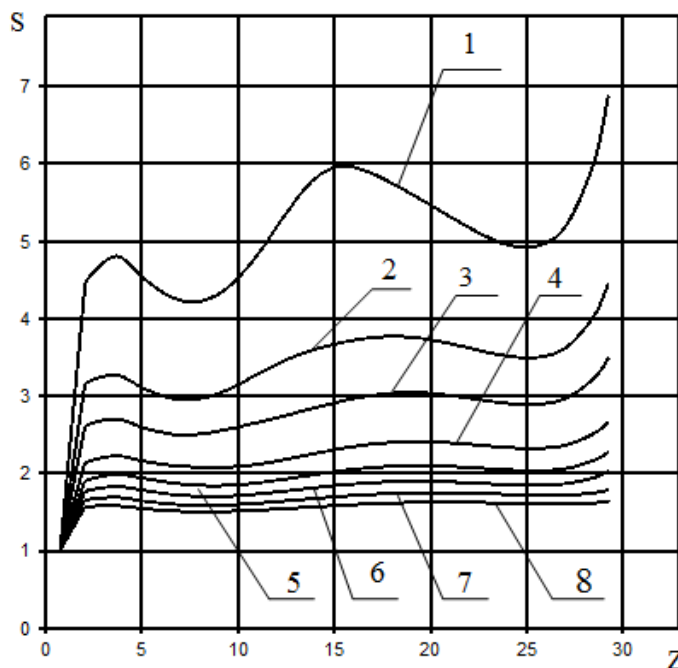


Рис. 2. Зависимости степени сгущения S частиц твердой фазы в цилиндрическом гидроциклоне от безразмерной осевой координаты $Z = z/rk$ при различных значениях числа Fr для значений $Pl = 5,097 \cdot 10^{-4}$, $Re_n = 4 \cdot 10^3$, $Q_0 = 1,928 \cdot 10^{-2}$, $n = 0,6$; $k = 1,65 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$:
1 – $Fr = 30$; 2 – $Fr = 40$; 3 – $Fr = 50$; 4 – $Fr = 70$; 5 – $Fr = 90$; 6 – $Fr = 110$;
7 – $Fr = 130$; 8 – $Fr = 150$

Результаты численного моделирования приведены на рис. 2, 3.

На рис. 2 приведены зависимости степени сгущения S частиц твердой фазы в цилиндрическом гидроциклоне от осевой координаты Z при различных значениях числа Fr для значений $Pl = 5,097 \cdot 10^{-4}$, $Re_n = 4 \cdot 10^3$, $Q_0 = 1,928 \cdot 10^{-2}$,

$n = 0,6$, $k = 1,65$. Из представленных зависимостей следует, что степень сгущения частиц твердой фазы возрастает с увеличением осевой координаты Z , что обусловлено выходом частиц твердой фазы на стенку корпуса гидроциклона. Со снижением числа Fr степень сгущения частиц твердой фазы увеличивается. Это

объясняется уменьшением толщины пленки жидкости.

На рис. 3 приведены те же зависимости, что на рис. 2 для значений $Pl = 8.495 \cdot 10^{-3}$ для тех же значений определяющих параметров. Из представленных зависимостей следует, что степень сгущения частиц твердой фазы возрастает с увеличением числа пластичности Pl (что

соответствует повышению предельного напряжения сдвига τ_0), особенно при высоких значениях числа Fr . Это является следствием возрастания аномалии неньютоновских свойств разделяемой среды и повышением наполненности радиального распределения окружной составляющей скорости с ростом числа Pl .

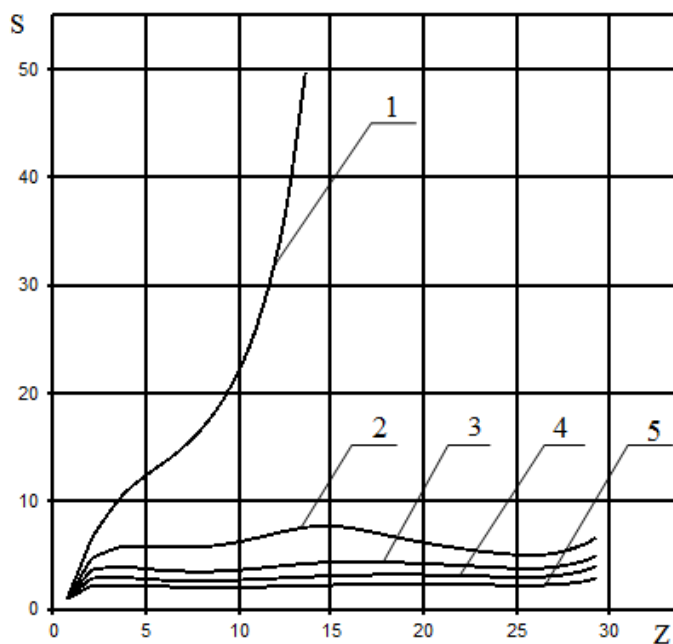


Рис. 3. Зависимости степени сгущения S частиц твердой фазы в цилиндрическом гидроциклоне от безразмерной осевой координаты $Z = z/rk$ при различных значениях числа Fr для значений $Pl = 8.495 \cdot 10^{-3}$; $Re_n = 4 \cdot 103$; $Q_0 = 1.928 \cdot 10^{-2}$; $n = 0.6$; $k = 1.65 \text{ Па} \cdot \text{с}^n$:
1 — $Fr = 30$; 2 — $Fr = 40$; 3 — $Fr = 50$; 4 — $Fr = 70$; 5 — $Fr = 150$

Таким образом, с использованием разработанной математической модели разделения суспензий с нелинейновязкопластической дисперсионной средой в цилиндрическом гидроциклоне установлено влияние числа Фруда и пластических свойств разделяемой среды на процесс разделения. При низких значениях числа пластичности и предельного напряжения сдвига наиболее эффективной является работа гидроциклона при малых значениях числа Fr . С повышением числа пластичности и предельного напряжения сдвига оптимальное значение числа Фруда увеличивается. Полученные результаты могут быть использованы для разработки методики инженерного расчета гидроциклонов для разделения суспензий, характеризующихся нелинейновязкопластическими свойствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Голованчиков, А. Б. Моделирование процессов разделения неоднородных жидкостных систем в гидроцикло-

нах с учетом критериев подобия / А. Б. Голованчиков, А. Е. Новиков, М. И. Ламскова и др. // Химич. и нефтегаз. машиностроение. — 2018. — № 2. — С. 34–38.

2. Семенов, Е. В. Расчет процесса разделения суспензии в гидроциклоне / Е. В. Семенов, А. А. Славянский, А. В. Карамзин // Химич. и нефтегаз. машиностроение. — 2017. — № 9. — С. 3–7.

3. Найдено, В. В. Применение математических методов и ЭВМ для оптимизации и управления процессами разделения суспензий в гидроциклонах / В. В. Найдено. — Горький. Волго-вятское кн. изд-во, 1976. — 287 с.

4. Кудрявцев, Н. А. Турбулентный перенос полидисперсной твердой фазы при разделении разбавленных суспензий в гидроциклоне / Н. А. Кудрявцев, В. В. Михотов // Теор. основы хим. технологии. — 1989. — Т. 23. — № 1. — С. 120–121.

5. Косой, Г. М. Массоперенос твердой фазы закрученным турбулентным потоком и расчет фракционного извлечения узких классов крупности в гидроциклоне / Г. М. Косой, В. В. Сапешко // Теорет. основы хим. технологии. — 1983. — Т. 17. — № 5. — С. 637–641.

6. Дик, И. Г. Моделирование гидродинамики и сепарации в гидроциклоне / И. Г. Дик, О. В. Матвиенко, Т. Неезе // Теорет. основы хим. технологии. — 2000. — Т. 34. — № 5. — С. 478–488.

7. Баранов, Д. А. Расчет сепарационных процессов в гидроциклонах / Д. А. Баранов, А. М. Кутепов, М. Г. Ла-

гуткин // Теорет. основы хим. технологии. – 1996. – Т. 30. – № 2. – С. 117–122.

8. Лагуткин, М. Г. Расчет разделяющей способности цилиндрического гидроциклона на основе детерминированного подхода / М. Г. Лагуткин, Д. А. Баранов, С. Ю. Булычев, Е. Ю. Баранова // Химич. и нефтегаз. машиностроение. – 2004. – № 5. – С. 3–6.

9. Вайнштейн, И. А. Об уравнениях кинетики разделения суспензий / И. А. Вайнштейн // Инж.-физ. журн. – 1983. – Т. 45. – № 4. – С. 602–608.

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

11. Яблонский, В. О. Гидродинамика нелинейновязкопластической жидкости в цилиндрическом гидроциклоне / В. О. Яблонский // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2015. – № 8. – С. 6–10.

12. Dyakowski T., Hornung G. Simulation of non-newtonian flow in a hydrocyclone // Chem. Eng. Res. and Des. A. 1994. V. 72. No. 4. P. 513–520.

13. Acharya A., Mashelkar R.A., Ulbrecht J. Flow of inelastic and viscoelastic fluids past a sphere // Rheol. Acta. 1976. V. 15. No. 9. P. 454–463.

14. Соколов, В. И. Центрифугирование / В. И. Соколов. – М.: «Химия», 1976. – 408 с.

15. Матвеев, Н. М. Дифференциальные уравнения / Н. М. Матвеев. – Минск. «Вышэйш. школа», 1976. – 366 с.

УДК 648.336.2: 648.336.23

М. Д. Романенко, А. Б. Голованчиков, Н. А. Прохоренко
ВАКУУМНАЯ СУШИЛКА С ПАРОВОЙ РУБАШКОЙ
И ФУНКЦИЕЙ РЕЦИКЛИНГА ПАРА

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: romanenko.mihail2009@yandex.ru

В работе представлена конструкция установки вакуумной сушилки с паровой рубашкой и функцией рециклинга пара, позволяющей сушить различные пищевые продукты и химическое сырье.

Ключевые слова: вакуумная сушилка, паровая рубашка, рециклинг пара.

M. D. Romanenko, A. B. Golovanchikov, N. A. Prohorenko

STEAM-JACKETED VACUUM DRYER AND STEAM RECYCLING FUNCTION

Volgograd State Technical University

The paper presents the design of a vacuum dryer with a steam jacket and a steam recycling function that allows drying various food products and chemical raw materials.

Keywords: vacuum dryer, steam jacket, steam recycling.

Актуальность работы состоит в создании конкурентоспособной, удобной в использовании и экономичной сушильной установки, которую можно легко внедрить в производство или использовать в малых цехах.

Целью данной работы является увеличение производительности установки вследствие уменьшения времени сушки, повышения равномерности сушки и, как следствие, качества высушенного сырья, за счет всестороннего нагрева, а также снижение удельной стоимости высушенного сырья за счет замкнутой системы нагрева.

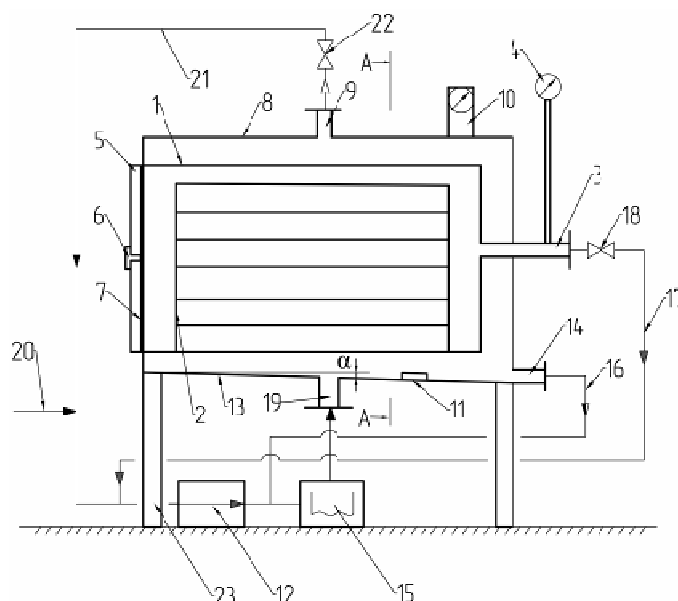
Вследствие разнообразия условий сушки существует много конструкций сушилок: по способу организации процесса (периодические непрерывные), по способу задания теплоносителя и т. д. [1]. Данная сушилка относится к вакуумным сушилкам периодического действия.

Техническое решение относится к техноло-

гическому оборудованию, предназначенному для переработки, к примеру, овощей, фруктов, пастообразных, вязких и высоковязких пищевых сред, текстиля, руды, окрашенных изделий и может быть использовано в пищевой, нефтехимической и других смежных областях промышленности.

Использование парогенератора позволяет повторно использовать теплоноситель в системе, а компрессор, одновременно осуществляющий разряжение в вакуумной камере и циркуляцию при избыточном давлении пара в замкнутой системе позволяет рационализировать и упростить конструкцию, получить температуру выше 100 °С, уменьшить время сушки, повысить равномерность сушки и, как следствие, качество готового сырья.

Схема вакуумной сушилки с паровой рубашкой и функцией рециклинга пара представлена на рисунке.



Вакуумная сушилка с паровой рубашкой и функцией рециклинга пара:
 1 – внутренняя вакуум-камера; 2 – стеллаж с полками; 3, 9, 14, 19 – штуцер; 4 – манометр; 5 – дверца; 6 – рычажный запор; 7 – резиновый уплотнитель; 8 – внешняя камера-контур; 10 – датчик контроля давления; 11 – биметаллический термореле; 12 – компрессор; 13 – коническое днище; 15 – парогенератор; 16, 17, 20, 21 – труба; 18, 22 – вентиль; 23 – ножка

Наиболее близкой конструкцией является установка для вакуумной сушки преимущественно для штабеля древесины, содержащая тележку с штабелем, установленную в герметичной теплоизолированной камере, снабженной закрывающейся крышкой и нагревательным элементом, систему охлаждения, вакуумный насос, систему конденсатоотвода и систему подачи воздуха, соединенные посредством трубопроводов и запорной арматуры с камерой, и контрольно-измерительные приборы, отличающаяся тем, что нагревательный элемент выполнен в виде П-образной оребренной снаружи трубы, размещенной горизонтально в нижней части камеры на всю ее длину, один конец которой соединен с топкой, а другой конец выведен наружу из камеры, при этом камера дополнительно снабжена теплоизоляцией коробчатого сечения, размещенной между П-образной трубой и стенками камеры с уклоном к топке, а над топкой и передней частью П-образной трубы установлен защитный экран [2].

К недостаткам относится невозможность многократно использовать теплоноситель (замкнутый цикл), малая удельная теплоемкость дымовых газов как теплоносителя, малая поверхность контакта внутрикамерного воздуха с нагревательной поверхностью, а также нерациональное расположение охлаждающей рубашки и топки, что приводит к нерациональ-

ному использованию теплоносителей, что в целом, в свою очередь, снижает производительность установки.

Вакуумная сушилка с паровой рубашкой и функцией рециклинга пара работает следующим образом.

Открывается крышка распашного типа 5 сушилки, укладывается на выдвижные полки 2 сырье, затем закрывают крышку 5 с помощью рычажного запора 6, плотное прижатие которого обеспечивается резиновым уплотнителем 7, прикрепленное к внутреннему торцу крышки. Включается компрессор 12, парогенератор 15, расположенные под сушилкой, при этом происходит первоначальный забор определенного объема производственного вторичного пара через трубу 20 по трубе 21 в компрессор 12 при давлении, равном давлению замкнутой системы сушильного шкафа и которого достаточно для совершения одного полного рабочего цикла сушки. После компрессора 12 пар и конденсат поступает в парогенератор 15, а после поступает во внешнюю камеру-контур 8 через штуцер 19, где обтекая вакуумную камеру 1 пар восходит к верхней части внешней камеры-контура 8 и через штуцер 9 по трубе 21 возвращается в компрессор 12, причем часть пара конденсируется снаружи на стенках вакуумной камеры 1 и изнутри внешней камеры-контура 8 и стекая вниз и накапливаясь на днище 13 через штуцер

14 по трубе 16 попадает напрямую в парогенератор 15, где смесь превращается снова в перегретый пар. Для задания вакуума в рабочей зоне сушки, то есть в вакуумной камере 1 происходит откачка воздуха с удаленной влагой сырья через штуцер 3 по трубе 17 с помощью компрессора 12.

Подана заявка на полезную модель РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии : учебник для вузов / А. Г. Касаткин. – 10-е изд., стер., дораб. : перепечатано с изд., 1973 г. – М. : ООО ТИД «Альянс», 2004. – 753 с., илл.
2. П. м. 2164649 Российская федерация, МПК F26B 5/04, F26B 9/06 Установка для вакуумной сушки / Гончарик А. В., Гончарик В. А., Гончарик П. В. ; заявитель и патентообладатель А. В. Гончарик, В. А. Гончарик, П. В. Гончарик – 2000121612/06; заяв. 27.03.2001; опубл. 27.03.2001, Бюл. № 9.

УДК 664.002.5:635.34:621.789

М. Д. Романенко, А. Б. Голованчиков, В. И. Водопьянов, В. В. Баринов

МЕТОДИКА ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ И ИНЖЕНЕРНЫЙ РАСЧЕТ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА*

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: romanenko.mihail2009@yandex.ru

В работе представлена методика упрочнения режущей кромки цилиндрического пустотелого сверла, а также приведен инженерный расчет толщины стенки сверла из условия прочности при кручении и предложен способ крепления сверла к шайбе для дальнейшего закрепления в патроне установки.

Ключевые слова: электромеханическое упрочнение (ЭМУ), безабразивная ультразвуковая финишная обработка (БУФО), цилиндрическое пустотелое сверло, установка для высверливания кочерыжек капусты.

M. D. Romanenko, A. B. Golovanchikov, V. I. Vodop'ianov, V. V. Barinov

METHOD OF SURFACE STRENGTHENING AND ENGINEERING CALCULATION OF CUTTING TOOL

Volgograd State Technical University

The paper presents the method of hardening the cutting edge of a cylindrical hollow drill, as well as an engineering calculation of the wall thickness of the drill from the condition of torsion strength and a method of attaching the drill to the washer for further fixing in the installation cartridge.

Keywords: electromechanical hardening (EMU), non-abrasive ultrasonic finishing (BUFO), cylindrical core drill, installation for drilling cabbage stalks.

Методика упрочнения

Методика упрочнения цилиндрического сверла заключается в предварительной обработке ЭМУ+БУФО его конца. Целью данной обработки является уменьшение шероховатости поверхности, а также уменьшение зернистости структуры стали, когда на границе зерен металла условия таковы, что коррозия может приобрести межкристаллитный характер. Увеличение размеров зерна приводит к увеличению скорости межкристаллитной коррозии [1].

Предел выносливости после электромеханического упрочнения (с различным расстоянием между треками белого слоя) для нормализованной стали 45 увеличился с 370 МПа (исходный материал) до 460 МПа (образец со «сплошным» белым слоем), то есть более чем на 20 %, а долго-

вечность для уровня напряжений выше 460 МПа возросла более чем в пять раз [2]. Это свидетельствует о рациональном использовании ЭМО технологии в упрочнении деталей в машиностроении, сельском хозяйстве, авиа- и других промышленных комплексах. Также стоит отметить, что технология БУФО позволяет получить более высокое качество (чистоту) поверхности металла и увеличить остаточные сжимающие напряжения, тем самым в совокупности значительно повлиять на показатель усталостной прочности [3].

Описание экспериментальной установки

Экспериментальная установка (рис. 1) состоит из ножек 1, стола 2, соединенного с верхней частью несущей конструкции 7 встык, блока

питания 4, раздвижных рельс 5, мультиметра 6, подвижной полки 14, на которой жестко закреплен электродвигатель 15, к валу которого прикреплен патрон 13, в котором зажато цилиндрическое сверло 11, выполненное в виде полой трубки 9 с режущими зубьями 8 на нижнем торце и щелевой прорезью 10, выполненной на боковой поверхности в верхней части полой трубки 5, напротив которой жестко закреплен стержень 12 с диагональным срезом и длиной, равной длине щелевой прорези 10. Конструкция установки разработана по аналогии с конструкцией, представленной в работе [4].

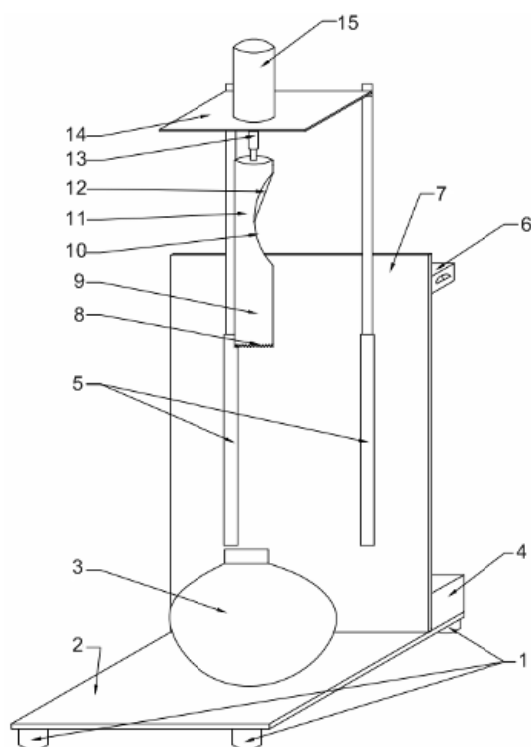


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:
1 – ножки; 2 – стол; 3 – кочан капусты; 4 – блок питания; 5 – подвижные рельсы; 6 – мультиметр; 7 – несущая конструкция; 8 – нижний торец с режущими зубьями; 9 – полая трубка; 10 – щелевая прорезь; 11 – цилиндрическое сверло; 12 – стержень с диагональным срезом; 13 – патрон; 14 – подвижная полка; 15 – электродвигатель [4]

Методика проведения эксперимента

На стол 1 поочередно укладываются кочаны капусты 3, зажимаются вручную и после включения электродвигателя 15 производится опускание подвижной полки 14. Под действием силы тяжести от собственного веса полки, электродвигателя с патроном и сверлом происходит высверливание кочерыжек. Каждая последующая кочерыжка выталкивает предыдущую по полой цилиндрической трубке вверх, где она направляется под определенным углом наружу

через щелевую прорезь 10 с помощью диагонально срезанного стержня 12.

Эксперимент показал работоспособность данной установки, а также полого цилиндрического сверла [5] и его модификации [6].

Расчет толщины стенки цилиндрического сверла

На рис. 2 представлена расчетно-пояснительная схема сверла, отображающая его основные конструктивные особенности, геометрию.

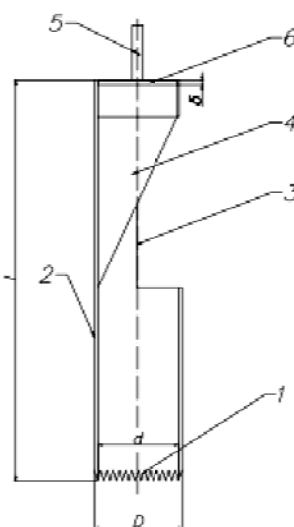


Рис. 2. Расчетно-пояснительная схема сверла:
1 – режущие зубья; 2 – цилиндрическая трубка; 3 – щелевой вырез; 4 – стержень с диагональным срезом; 5 – хвостовик; 6 – шайба [5]

Расчет толщины стенки производится на основе условия прочности при кручении:

$$\tau \leq [\tau].$$

Касательное напряжение выражается следующим образом:

$$\tau = \frac{T}{W_p},$$

где τ – касательное напряжение, МН/м^2 ; $[\tau]$ – допускаемое касательное напряжение, МН/м^2 ; T – максимальный крутящий момент, $\text{Н}\cdot\text{м}$; W_p – полярный момент сопротивления сечения, м^3 .

$$W_p = \frac{\pi D^3}{16} \left[1 - \frac{d^4}{D^4} \right] = \frac{\pi D^3}{16} - \frac{\pi d^4}{16D},$$

где D и d – внешний и внутренний диаметры сверла соответственно, м.

Условие прочности при кручении.

Допускаемое касательное напряжение находится по третьей теории прочности:

$$[\tau] = \frac{[\sigma]}{2},$$

где $[\sigma]$ – предел прочности при растяжении инструментальной стали У8 (650 МН/м^2).

Подставляя все выражения в условие прочности при кручении, получим [7]:

$$\begin{aligned} \frac{T \cdot 16D}{(\pi D^4 - \pi d^4)} &\leq [\tau] \\ 16TD &= \pi D^4 [\tau] - \pi d^4 [\tau], \\ \pi d^4 [\tau] &= \pi D^4 [\tau] - 16TD, \\ d &= \sqrt[4]{\frac{\pi D^4 [\tau] - 16TD}{\pi [\tau]}} = \sqrt[4]{\frac{3,14 \cdot 0,05^4 \cdot 325 \cdot 10^6 - 16 \cdot 2,4 \cdot 0,05}{3,14 \cdot 325 \cdot 10^6}} = 0,04976 \text{ м}, \\ \delta_{\text{теор}} &= \frac{D - d}{2} = \frac{0,05 - 0,04976}{2} = 0,00012 \text{ м} = 0,12 \text{ мм}, \end{aligned}$$

где $\delta_{\text{теор}}$ – теоретическая толщина стенки без учета прибавки на коррозию (c_1) и технологической прибавки (c_2).

Прибавка на коррозию находится из выражения:

$$\begin{aligned} c_1 &= P \tau_B \\ c_1 &= 0,04 \cdot 10 = 0,4 \text{ мм} \\ c_2 &= 0,5 \text{ мм} \\ \delta &= \delta_{\text{теор}} + c_1 + c_2 \end{aligned}$$

$$\delta = 0,12 + 0,4 + 0,5 = 1,02 \text{ мм},$$

где P – скорость коррозии за год (0,04), мм/год; τ_B – время эксплуатации (10), год; δ – результирующая толщина стенки с учетом поправок, мм.

$$\begin{aligned} \sigma_N &= N / A_{\text{шва}} = 60 / 7,81 \cdot 10^{-4} = 0,077 \text{ МПа}, \\ W_{\text{шва}} &= \sin 45^\circ (2\pi r)^2 k / 6 = 0,7 \cdot (2 \cdot 3,14 \cdot 0,02488)^2 \cdot 0,005 / 6 = 1,42 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2, \end{aligned}$$

где $W_{\text{шва}}$ – момент сопротивления шва по биссектрисе угла (45°), м^3 ;

$A_{\text{шва}} = 2\pi r k = 2 \cdot 3,14 \cdot 0,02488 \cdot 0,005 = 7,81 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ – площадь продольного сечения шва, м^2 ; r – внутренний радиус сверла, м; k – катет шва, м.

Касательное напряжение от кручения в сварном шве [8]

$$\begin{aligned} \tau &= T / W \\ \tau &= 50 / 1,42 \cdot 10^{-5} = 3,52 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

$$\sigma \leq [\sigma],$$

$$0,077 \leq 650 \text{ МПа},$$

$$\tau \leq [\tau],$$

$$3,52 \leq 325 \text{ МПа}.$$

Рассчитанные значения многим меньше допускаемых значений напряжений, прочность сварной конструкции обеспечена.

Способ крепления цилиндрического сверла

Данный вид сверла подразумевает крепление в патроне с помощью хвостовика, приваренного «встык» к цельной шайбе, которая приварена по замкнутому контуру к верхнему торцу сверла.

Экспериментально выявлена оптимальная толщина шайбы, равная 1,2 мм, диаметр хвостовика (стержня) – 8 мм.

Расчет на прочность сварного шва по замкнутому контуру от действия нормальной сжимающей силы, возникающей при вхождении сверла в кочан капусты производится в соответствии с следующим выражением.

Выводы

Разработана методика упрочнения режущих зубьев цилиндрического сверла. Представлены схема экспериментальной работоспособной установки и методика проведения на ней экспериментов, а также методики расчета толщины стенки, дан способ крепления сверла к хвостовику. Таким образом, были даны различные методики расчета цилиндрического сверла, отвечающего требованиям производительности и безопасности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Эванс, Ю. Р. Коррозия, пассивность и защита металлов / Ю. Р. Эванс. – Москва-Ленинград: Металлургиздат, 1941. – 886 с.
2. Электромеханическое упрочнение металлов и сплавов: монография / В. П. Багмутов, С. Н. Паршев, Н. Г. Дудкина, И. Н. Захаров, А. Н. Савкин, Д. С. Денисевич; ВолгГТУ. – Волгоград, 2016. – 460 с.

3. Абрамов, О. В. Ультразвуковая обработка металлов / О. В. Абрамов, И. Г. Хорбенко, Ш. Швегла ; под ред. О. В. Абрамова. – Москва : Машиностроение, 1984. – 280 с.

4. Приспособление для удаления и размельчения кочерыжек капусты, модель HWG-01 (опция к машине для шинковки капусты SZ-02) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://santehvalom.ru/catalog/pererabotka-plodov-i-ovoshchey/oborudovanie-dlya-rezki-ovoshchey-fruktoy/prisposoblenie-dlya-udaleniya-i-razmelcheniya-kocheryzhkek-kapusty-model-hwg-01-opciya-k-mashine-dlya-shinkovki-kapusty-sz-02>. – (Дата обращения: 12.02.2019).

5. П. м. 166433 Российская Федерация, МПК А23N15/00. Приспособление для удаления кочерыжек капусты / Голо-

ванчиков А. Б., Романенко М. Д., Романенко Д. И., Шишлянников В. В., Карев В. Н.; ВолгГТУ. – 2016.

6. П. м. 171857 Российская Федерация, МПК А23N15/00. Приспособление для удаления кочерыжек капусты / Голованчиков А. Б., Романенко М. Д., Романенко Д. И., Васильев П. С., Рева Л. С.; ВолгГТУ. – 2017.

7. Багмутов, В. П. Теоретические основы расчета вала на прочность и жесткость : учеб. пособие / В. П. Багмутов, А. А. Белов, О. В. Кондратьев, А. С. Столярчук. – Волгоград : ВолгГТУ, 2008. – 31 с.

8. Марочник сталей и сплавов / В. Г. Сорокин [и др.] ; под общ. ред. В. Г. Сорокина. – Москва : Машиностроение, 1989. – 640 с.

УДК 551.24.02

А. Б. Голованчиков, Минь Кыонг Доан, Н. В. Шибитова
АППРОКСИМАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ
МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ КВАДРАТОВ
И МЕТОДОМ НАИМЕНЬШИХ ОТНОСИТЕЛЬНЫХ КВАДРАТОВ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: pahp@vstu.ru

Проводится аппроксимация полученных экспериментальных результатов в зависимости относительной концентрации KMnO_4 в воде от времени в процессе ультрафильтрации при расчете параметров линеаризованного уравнения по методу наименьших квадратов (МНК) и методу наименьших относительных квадратов (МНОК).

Ключевые слова: ультрафильтрация, аппроксимация экспериментальных данных, метод наименьших квадратов (МНК), метод наименьших относительных квадратов (МНОК).

A. B. Golovanchikov, Minh Cuong Doan, N. V. Shibitova
THE APPROXIMATION OF EXPERIMENTAL DATA USING THE LEAST
SQUARES METHOD AND THE LEAST RELATIVE SQUARES METHOD

Volgograd State Technical University

An approximation of the experimental results is carried out depending on the relative concentration of KMnO_4 in water on time during the ultrafiltration process when calculating the parameters of the linearized equation using the least squares method (LSM) and the least relative squares method (LRSM).

Keywords: ultrafiltration, approximation of experimental data, least squares method (LSM), least relative squares method (OLS).

Одним из основных математических методов обработки опытных данных является метод наименьших квадратов (МНК). Численные параметры выбираются из условия минимума суммы квадратов отклонений измеренных значений от расчетных значений аппроксимирующей функции. Как показано в [1; 2], смысл этого условия заключается в том, что достоверность результатов аппроксимации, полученных с использованием этого условия тем выше, чем меньше сумма квадратов отклонений.

Известен другой метод для расчета коэффициентов линейного уравнения по экспериментальной зависимости выходных значений функций от входных значений аргумента, в котором минимизируется сумма квадратов относительных отклонений теоретических значений

функции от экспериментальных ее значений (МНОК) [3; 4].

Целью работы является сравнение отклонения при расчете параметров линейного уравнения зависимости относительной концентрации KMnO_4 в воде от времени при ультрафильтрации по методу наименьших квадратов (МНК) и методу наименьших относительных квадратов (МНОК).

В ходе выполнения экспериментального исследования были получены значения относительной концентрации KMnO_4 в воде от времени в процессе ультрафильтрации. Для исследования было произведено основных опытов $m = 8$, число параллельных опытов $n = 3$. Полученные экспериментальные данные представлены на рис. 1.

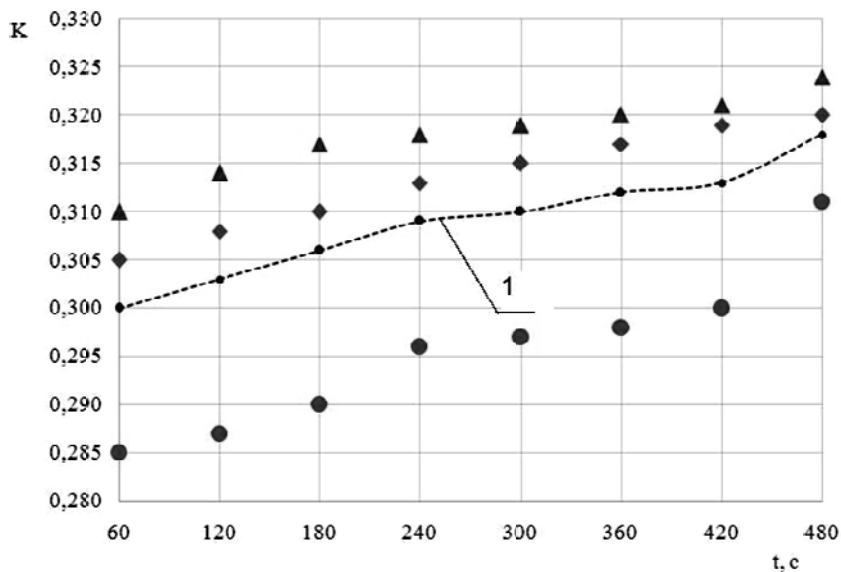


Рис. 1. Экспериментальные данные:

●, ▲, ◆ – экспериментальные данные; 1 – средние значения экспериментальных данных

Зависимость (1) можно представить в виде степенного уравнения:

$$K = A \cdot t^B \quad (1)$$

или в линеаризированном виде:

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

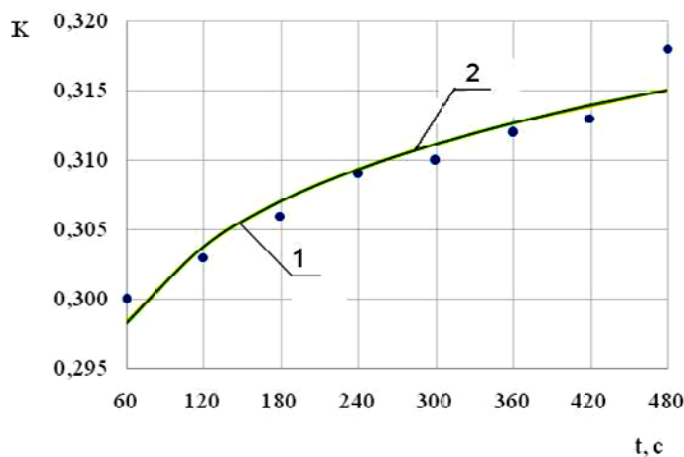
где $a = \ln(A)$, $b = \ln(B)$, $y = \ln(K)$, $x = \ln(t)$

Результаты расчетов коэффициентов формулы (1) для МНК и МНОК приведены в табл. 1, а графики соответствующих им уравнений представлены на рис. 2.

Таблица 1

Расчетные коэффициенты линейного уравнения зависимости относительной концентрации KMnO_4 в воде от времени по МНК и МНОК

Коэффициенты	МНК	МНОК
a	-1,209	-1,317
b	$2,608 \cdot 10^{-2}$	$2,627 \cdot 10^{-2}$
A	$2,98 \cdot 10^{-1}$	$2,678 \cdot 10^{-1}$
B	$2,608 \cdot 10^{-2}$	$2,627 \cdot 10^{-2}$

Рис. 2. Зависимость относительной концентрации KMnO_4 в воде от времени:

● – средние значения экспериментальных данных зависимости (1); 1 – теоретические данные, рассчитанные по МНК; 2 – теоретические данные, рассчитанные по МНОК

Значения коэффициентов корреляционного анализа обработки экспериментальных данных приведены в табл. 2.

Таблица 2

Критерии регрессионного анализа линейного уравнения по МНК и МНОК

№	Наименование параметра	Обозначение	Величина параметра		Табличное значение
			МНОК	МНК	
1	Воспроизводимость экспериментальных данных в параллельных опытах (критерий Кохрена)	G	0,178	0,178	0,5157
2	Адекватность уравнения регрессии экспериментальным данным (критерий Фишера)	F	0,0602	0,062	2,74
3	Значимость коэффициентов уравнения регрессии (критерий Стьюдента) по коэффициенту a по коэффициенту b	St t_a t_b	$t_a=6697$ $t_b=133,58$	$t_a=6149$ $t_b=132$	$t_a=2,12$ $t_b=2,12$
4	Корреляционная связь между функцией и аргументом, определяемая по коэффициенту корреляция	r	0,962	0,962	-

Как видно из материалов табл. 2, для обоих методов расчета уравнение (1) адекватно экспериментальным данным, а коэффициенты a и b этого уравнения значимы, но в МНОК значение критерия Фишера меньше аналогичного его значения, полученного МНК на $\delta_\phi = -2,9\%$.

Для коэффициентов a и b это отклонение

составляет: $\delta_{ia} = 8,9\%$, $\delta_{ib} = 1,2\%$. То есть даже при небольших изменениях функции $y = y(x)$ МНОК приводит к более точным расчетным параметрам a и b в уравнении (2) и соответственно коэффициентов A и B в уравнении (1).

Локальные значения относительных отклонений выходного параметра K от времени представлены в табл. 3.

Таблица 3

Сравнение отклонения теоретических от экспериментальных данных по МНК и МНОК

δ	1	2	3	4	5	6	7	8	$ \delta_{cp} $
по МНК, %	-0,5434	0,2686	0,4507	0,1156	0,2675	0,3145	0,1829	-1,046*	0,3986
по МНОК, %	-0,5639	0,2608	0,4505	0,1208	0,2768	0,3272	0,1986	-1,028*	0,4033

* – звездочкой отмечены наибольшие отклонения

Здесь еще более наглядно видно преимущество МНОК по сравнению с МНК, связанное с наибольшим отклонением теоретического значения K от экспериментального $\delta_K^* = -1,7\%$. Однако среднее значение отклонений по абсолютной величине оказывается выше $\delta_{ср} = 1,18\%$.

Таким образом, даже при небольших изменениях выходной величины, изменяющейся от 0,3 до 0,318, то есть в 1,06 раза, видно преимущество МНОК по сравнению с МНК, связанное при проверке адекватности с меньшими значениями расчетного критерия Фишера и большими значениями расчетного критерия Стьюдента по сравнению с их табличными значениями, хотя оба метода в рассматриваемом случае приводит к адекватным линеаризованным урав-

нениями (2) и значимым в них обоих коэффициентами a и b .

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Щиголев, Б. М. Математическая обработка наблюдений. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1962. – 344 с.
2. Линник, Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1958. – 336 с.
3. Голованчиков, А. Б. Метод интерполирования экспериментальных данных при определении реологических свойств жидкостей / А. Б. Голованчиков, Н. В. Тябин // ИФЖ. – Том XLI, № 1. – 1981. – С. 70–73.
4. Тябин, Н. В. Методы кибернетики в реологии и химической технологии: учебное пособие / Н. В. Тябин, А. Б. Голованчиков. – Волгоград: Волгоградский политехнический институт, 1983. – 104 с.

УДК 637.138

И. В. Мгебришвили, И. Ф. Горлов**, Е. М. Витальева****РАЗРАБОТКА НИЗКОЗАТРАТНОЙ ТЕХНОЛОГИИ
СГУЩЕНИЯ БАХЧЕВЫХ КУЛЬТУР**

**Волгоградский государственный технический университет
**Поволжский научно-исследовательский институт производства
и переработки мясомолочной продукции*

E-mail: ira-06@inbox.ru

В статье проанализирована проблема обеспечения продовольственной безопасности РФ. Обоснована необходимость получения наполнителей, из бахчевых культур арбуза и дыни, с высоким содержанием питательных веществ, витаминов и продолжительным сроком хранения. Установлено положительное влияние испытуемых концентратов на структурно-механические свойства желе из молочной сыворотки. Выявлена оптимальная концентрации гелеобразователя в желе.

Ключевые слова: продовольственная безопасность, дефицит сырья, низкозатратная технология, арбуз, дыня, сгущение, желе из сыворотки, каррагинан, камедь рожкового дерева.

*I. V. Mgebrishvili, I. F. Gorlov, E. M. Vitalieva***THE DEVELOPMENT OF LOW-COST TECHNOLOGIES THE CONCENTRATION
OF THE PULP OF WATERMELON AND MELON**

**Volgograd State Technical University
**Volga Region Research Institute of Manufacture
and Processing of Meat-and-Milk Production*

The article analyzes the problem of food security of the Russian Federation. The necessity of obtaining fillers from the pulp of watermelon and melon, with a high content of nutrients, vitamins and a long shelf life. The positive effect of the tested concentrates on the structural and mechanical properties of whey jelly was established. The optimal concentration of gelling agent in jelly was revealed.

Keywords: food security, shortage of raw materials, low cost technology, watermelon, melon, concentration, whey jelly, carrageenan, gum carob.

Обеспечение продовольственной безопасности РФ – глобальная проблема государственного масштаба, – неотъемлемым условием решения, которой является диверсификация отечественного рынка на импортозамещение продовольственного сырья и продуктов. Принимая во внимание напряженную, на данный момент, внешнеполитическую обстановку, обозначенная проблема приобретает особую актуальность. В связи с этим одной из первоочередных задач РФ является развитие АПК. Дефицит традиционного сырья создает необходимость рационализации способов его использования и поиска новых альтернативных сырьевых источников, способных обеспечить высокое качество готовой продукции.

Основная внутренняя проблема отечественной пищевой промышленности – сильная импортозависимость, связанная с доминированием импортной продукции, в том числе и на рынке исходного сырья для производства пищевых ингредиентов. Большинство пищевых

добавок и ингредиентов, в том числе различных наполнителей, которые производятся российскими компаниями, изготавливаются из импортного сырья. Таким образом, необходимым становится использование новых технологий, современного оборудования и инновационных разработок для формирования собственной сырьевой базы [1].

В Волгоградской области имеются значительные сырьевые ресурсы, которые могут быть вовлечены в производство продуктов питания, в частности молочной продукции, в качестве источников физиологически функциональных пищевых нутриентов. Комбинирование молочного сырья с растительным дает возможность замены традиционных искусственных пищевых добавок на натуральные сырьевые ингредиенты, проявляющие необходимые функционально-технологические свойства. Данный факт приобретает особое значение ввиду следующих тенденций мирового рынка пищевых добавок и ингредиентов.

Во-первых, это отказ от производства искусственных добавок в пользу натуральных.

Во-вторых, рост популярности сектора низкокалорийных продуктов и, как следствие, рост спроса на инновационные полезные ингредиенты и добавки. И наконец, активное развитие сферы Research & Development – исследования и разработки с целью внедрения новых пищевых технологий.

Таким образом, в свете вышеперечисленных тенденций развития науки в области пищевой промышленности, можно сделать вывод об актуальности постановки задачи по разработке низкокзатратных технологий переработки сырьевых пищевых ресурсов Волгоградской области.

На сегодняшний день Волгоградская область – крупнейший регион по производству бахчевой продукции. Ежегодно здесь выращивается 300–360 тыс. тонн бахчевых культур. Этим производством занимаются практически во всех сельскохозяйственных зонах области. По данным администрации Волгоградской области, в 2018 году бахчевыми культурами было занято 43,7 тыс. га. Крупными производителями данного вида продукции являются Быковский – 96,2 тыс. тонн, Николаевский – 14,3 тыс. тонн, Серафимовичский – 69,2 тыс. тонн и Иловлинский – 19,9 тыс. тонн районы области. В современных экономических условиях бахчеводство является высокодоходным производством. Экономический анализ деятельности сельскохозяйственных предприятий показывает, что на протяжении десяти лет производство бахчевых культур являлось прибыльным делом. Рентабельность отрасли составляет от 8,4 % до 28,5 %, исключая годы, когда по причине погодных условий производители недополучали урожай бахчевой продукции [2].

Ввиду столь широкого возделывания в регионе Южного Поволжья бахчевых культур арбуза и дыни, авторами предложена низкотемпературная технология сгущения данного растительного сырья, позволяющая получать наполнители с высоким содержанием питательных веществ, витаминов и продолжительным сроком хранения, которые впоследствии будут использованы в рецептуре желе из молочной сыворотки.

Основные этапы экспериментального исследования выполнены в ФГБОУ ВО «Волгоградский государственный технический университет» на кафедрах «Технология пищевых производств», «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности», «Процессы и аппараты химических и пищевых производств», комплексной аналитической лаборатории ГНУ НИИММП и на производственном предприятии ООО «Ласточка».

Материал исследования составляли:

- сырьевые ингредиенты животного происхождения: творожная сыворотка по ГОСТ 34352-2017;
- сырьевые ингредиенты растительного происхождения: мякоть арбуза и дыни;
- пищевые ингредиенты, стабилизаторы и гелеобразователи: каррагинан Gelcarin GP379 (FMC, США), камедь рожкового дерева (FMC, США).
- экспериментально выработанные образцы сывороточного желе.

Производство концентратов бахчевых культур осуществлялось в лабораториях кафедр «Промышленная экология и безопасность жизнедеятельности» и «Технология пищевых производств». Концентраты вырабатывали методом сгущения с последующей сушкой в сублимационной сушилке КВСС-1. Для установления оптимальной дозы загустителя в желе использовали вибрационный вискозиметр марки SV-100.

При изготовлении концентрата арбуза наблюдали следующую динамику изменений массы мякоти в процессе сгущения (рис. 1).

Изменение объема арбузного пюре зависит от продолжительности сгущения, а также от того, на каком этапе происходит процесс, то есть в начале сгущения удаляется свободная влага, которая характеризуется как наиболее быстро удаляемая. В дальнейшем происходит замедление процесса, так как удаляется уже механическая влага.

В табл. 1 представлены данные, описывающие изменение массы сгущенного арбузного концентрата в процессе сублимационной сушки.

Изменение массы арбузного сгущенного концентрата зависит от степени сгущения и продолжительности сушки.

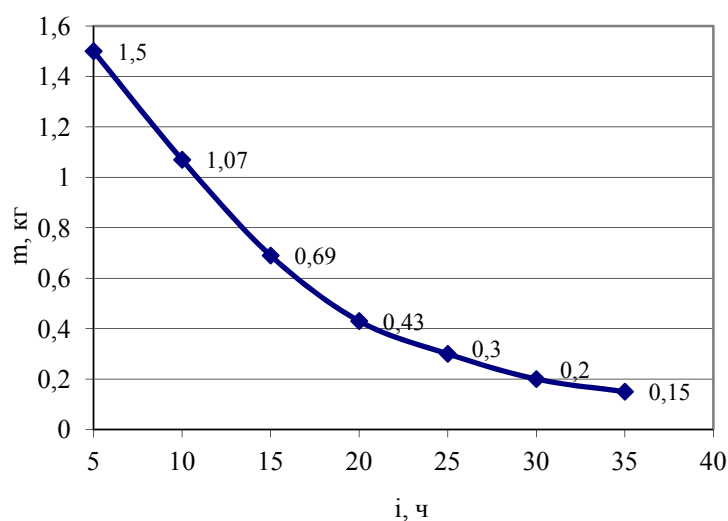


Рис. 1. Динамика изменения массы арбузного пюре в процессе сгущения

Таблица 1

Изменение массы арбузного концентрата в процессе сушки

Продолжительность сушки, ч	Температура сушки, °C	масса арбузного пюре $m_{a.л.}$, г	
		начальная	начальная
2,5	– 30	130	105

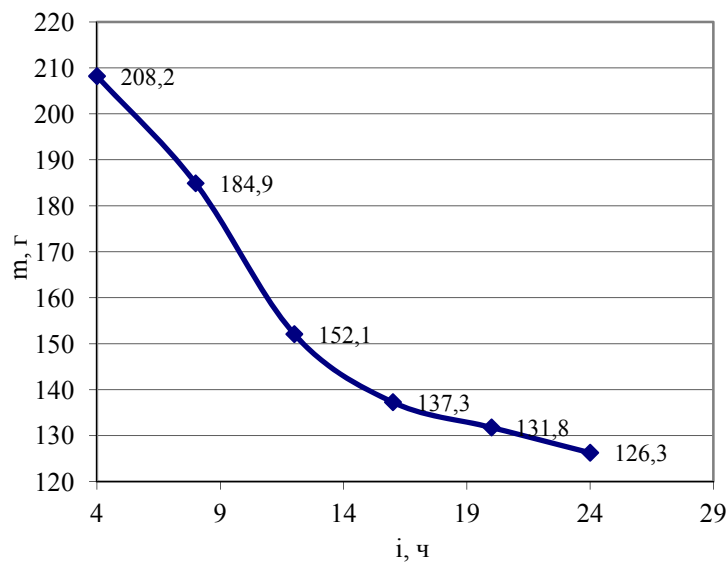


Рис. 2. Динамика изменения массы дынного пюре в процессе сушки

На рис. 2 представлена динамика изменения массы дынного пюре в процессе сублимационной сушки. Изменение массы дынного пюре в процессе сублимационной сушки происходит аналогично изменению массы арбузного пюре при сгущении.

Общеизвестно, что такие бахчевые культуры, как арбуз и дыня, содержат в большом количестве клетчатку и пектиновые вещества. В связи с этим было сделано предположение, что использование в качестве наполнителей концентратов арбуза и дыни не только добавит

продукту профилактические свойства, но и позволит минимизировать концентрацию каррагинана, а также максимально использовать вторичное сырье [3].

Количество каррагинана, необходимого для производства желе из молочной сыворотки, колеблется в пределах $0,02 \div 0,1$ %. Для оптимизации концентрации каррагинана было произведено три образца желе без наполнителей со следующими концентрациями каррагинана: 0,05 %, 0,075 % и 0,1 % и определена динамическая вязкость каждого образца.

В результате образцы с концентрацией 0,05

и 0,075 % при температуре около 20 °C имели коэффициент динамической вязкости воды 0,15 Па·с, то есть не определялись как вязкая система. Соответственно только образец с концентрацией 0,1 % каррагинана идентифицировался как вязкая система.

Далее было произведено два образца желе с наполнителями, которые содержали клетчатку и пектиновые вещества, что улучшило структурно-механические свойства желе. Соответственно концентрация каррагинана в этих образцах была уменьшена до 0,075 %, что дало возможность получить результаты, представленные на рис. 3.

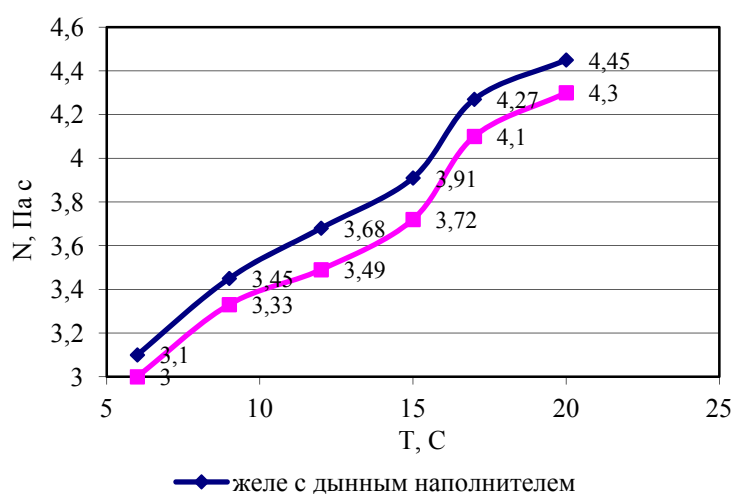


Рис. 3. Влияние арбузного и дынного наполнителей на вязкость образцов желе с концентрацией каррагинана 0,075 %

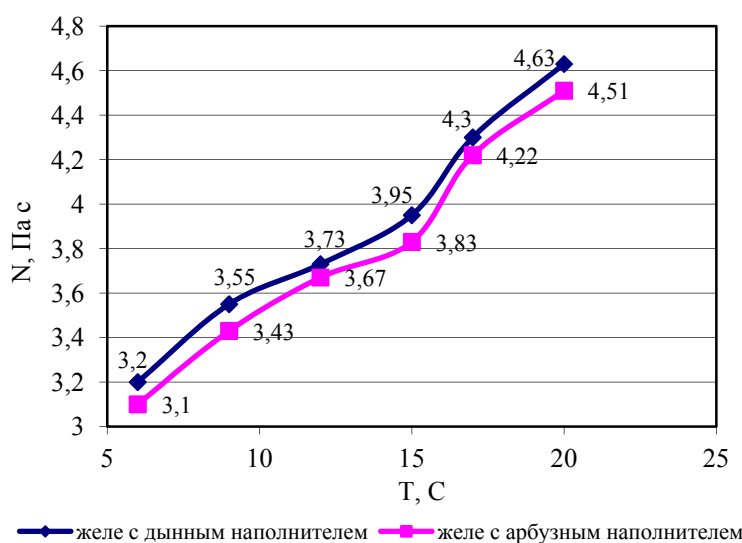


Рис. 4. Влияние арбузного и дынного наполнителей на вязкость образцов желе с концентрацией смеси гелеобразователей 0,025 %

На следующем этапе экспериментальных исследований для максимальной минимизации концентрации гелеобразователя, также исследовали возможность использования в качестве желирующего агента камеди рожкового дерева. Данный вид структурообразователя в сочетании с каррагинаном проявляет синергетические свойства и усиливает действие последнего. Аналогично с предыдущим опытом было выработано два модельных образца желе: с арбузным и с дынным концентратом. Концентрация смеси гелеобразователей, то есть каррагинана и камеди рожкового дерева, в этих образцах была уменьшена до 0,025 %. При этом были получены значения коэффициентов динамической вязкости, наилучшим образом соответствующие структуре желе (рис. 4).

При сравнении значений коэффициентов динамической вязкости у образцов желе с концентрацией каррагинана 0,075 % и концентрацией желирующей смеси 0,025 % видно, что данные двух опытов практически идентичны при существенном снижении доли гелеобразователя во втором случае.

Таким образом, для производства наполнителей с высоким сроком хранения и низкой себестоимостью целесообразно использовать низ-

котемпературную технологию получения концентратов бахчевых культур, разработанную на основании полученных результатов исследований. Для улучшения структурно-механических свойств сывороточных желе рационально использовать смесь гелеобразователей – каррагинана и камеди рожкового дерева. Это позволит уменьшить долю вносимого структурообразователя до 0,025 %.

Полученные экспериментальные данные будут использованы для разработки технологий производства сложносоставных десертных продуктов со вкусами арбуза и дыни.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Ингредиенты пищевой промышленности России [Электронный ресурс]. – [2019]. Режим доступа : <https://sfera.fm/articles/myasnaya/ingredyenty-pishchevoi-promyshlennosti-rossii>
2. Аграрии Волгоградской области закладывают основу продовольственной безопасности [Электронный ресурс]. – [2018]. – Режим доступа : <https://ksh.volgograd.ru/current-activity/cooperation/news/203185/>
3. Мгебришвили, И. В. Анализ влияния концентратов бахчевых культур на структурно-механические свойства поликомпонентного молочного десерта [Электронный ресурс] / И. В. Мгебришвили // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского гос. аграрного ун-та (Научный журнал КубГАУ). – 2014. – № 6 (100). – Режим доступа : <http://ej.kubagro.ru/2014/06/pdf/41.pdf>.

УДК 636.085.522.55

*М. М. Русакова, Г. Г. Русакова, Е. Д. Парахневич, Д. В. Парахневич,
Л. В. Мазина, Е. В. Губицкая, А. Ф. Цыбенко*

ЛОГИСТИЧЕСКАЯ ЦЕПЬ ПРОИЗВОДСТВА СЕМЯН САРЕПТСКОЙ ГОРЧИЦЫ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: pebg@vstu.ru

Производство семян сарептской горчицы предусматривает выполнение целого комплекса научно-обоснованных технических мероприятий, направленных на получение их максимального количества при наименьших затратах.

Ключевые слова: сарептская горчица, производство, хранение.

*M. M. Rusakova, G. G. Rusakova, E. D. Parakhnevich, D. V. Parakhnevich,
L. V. Mazina, E. V. Gubitskaya, A. F. Tsybenko*

LOGISTICS CHAIN IS PRODUCTION SAREPTA MUSTARD

Volgograd State Technical University

Production sarepta mustard stipulates performance of a complex science-based technical measures aimed at obtaining the maximum yield at the lowest cost.

Keywords: sareptana mustard, production, storage

Введение

Существует около 40 видов горчицы, но самые популярные – белая, черная и сарептская.

В России выращивают два вида горчицы:

сизую (сарептскую) и белую [4; 7; 15–17]. Черная горчица в нашей стране не находит промышленного применения. Сарептская горчица является пряно-масличной культурой [8; 9].

Среди масличных культур сарептская горчица по посевным площадям занимает четвертое место после подсолнечника, сои и льна масличного. Площадь посева сарептской горчицы в России составляет 250 тыс. га. На долю Поволжья приходится 187 тыс. га или 72 %. Основные площади сконцентрированы в небольшом количестве областей, а именно (тыс. га): Волгоградской – 144,7; Саратовской – 37,7; Ростовской – 10,8; Курганской – 13,2; Новосибирской – 13,7; Омской – 4,9 и Республике Башкортостан – 3,6. В Волгоградском регионе горчица является традиционной масличной культурой [6; 8; 11]. Посевы горчицы реагируют на погодные условия, внесение удобрений, подготовку почвы [6; 12–14; 17].

Семена горчицы являются сложной многокомпонентной смесью разного класса химических соединений. В своем составе они содер-

жат свободные жирные кислоты, триглицериды, белки, углеводы, фосфолипиды, альдегиды, кетоны, ферменты, витамины, тиогликозиды и целый ряд других неидентифицированных соединений [3; 10].

Химический состав семян горчицы зависит от многих факторов: сорта семян, степени зрелости, географической зоны произрастания, климатических условий, состава почвы, используемых удобрений и других экологических факторов [2; 3; 10; 11; 18; 19].

Цель исследования

Построить логистическую цепь производства семян сарептской горчицы, предусматривающую выполнение комплекса научно-обоснованных технических мероприятий для получения их максимального количества с наименьшими затратами [4–7; 13; 14; 17].

Таблица

Последовательность основных стадий производства, хранения и подготовки семян горчицы для переработки

ПРОИЗВОДСТВО СЕМЯН ГОРЧИЦЫ											
ПОДГОТОВКА К ПРОИЗВОДСТВУ		ПРОИЗВОДСТВО									
Место в севообороте Основная обработка почвы Предпосевная обработка семян Очистка поля от сорняков гербицидами Внесение удобрений		Сроки посева Глубина заделки семян Инкрустация Техника посева Борьба с вредителями и болезнями									
ПОДГОТОВКА К ХРАНЕНИЮ											
Очистка и сушка семян											
Оценка качества поступающей массы семян											
Семенной материал на следующий год		МАТЕРИАЛ НА ПЕРЕРАБОТКУ									
Взвешивание Механизированная разгрузка семенной массы <table><tr><td>Влажность семян до 10 %</td><td>Влажность семян выше 10 %</td></tr><tr><td>Очистка</td><td>Очистка</td></tr><tr><td colspan="2">Хранение</td></tr></table> Вентилирование подогретым воздухом для сушки и охлаждения <table><tr><td>Очистка</td><td>Хранение</td></tr></table>		Влажность семян до 10 %	Влажность семян выше 10 %	Очистка	Очистка	Хранение		Очистка	Хранение	Активная вентиляция Вентилирование наружным воздухом Вентилирование подогретым воздухом Сушка семян в барабанной сушилке Транспорт с семенами Отбор проб и лабораторный анализ Взвешивание Разгрузка семян Первая очистка семян —▶ сор в отвал	
		Влажность семян до 10 %	Влажность семян выше 10 %								
		Очистка	Очистка								
		Хранение									
		Очистка	Хранение								
		Сушка									
		Фракционирование									
		Вторая очистка семян мелкой фракции ↓ Сор в отвал	Вторая очистка семян крупной фракции ↓ Сор в отвал								
		Взвешивание очищенных семян									
		Хранение очищенных семян									
СЕМЕНА В ПРОИЗВОДСТВО											

Материалы и методы исследования

Материалами и методами исследования при выполнении данной работы являлось изучение многочисленных источников информации по методам производства семян сарептской горчицы, часть из которых приведена в списке литературы.

Результаты исследования и их обсуждение

В таблице приведена логистическая цепь технологических стадий производства семян сарептской горчицы, их хранения и подготовки для переработки.

При производстве семян горчицы с наименьшими затратами следует соблюдать технологические особенности каждой стадии, в том числе:

Место в севообороте

Лучшие предшественники – пар и озимые после пара, зернобобовые, оборот пласта многолетних трав.

Недопустимо размещать посевы по крестовым культурам (горчица, рапс, сурепица, редька, турнепс и др.) раньше, чем через 5...6 лет, так как это ведет к накоплению вредителей и болезней, а также засорению падалицей. Крайне нежелательные предшественники – просо и однолетние травы.

Горчица является отличным медоносом и предшественником для зерновых и кормовых культур, особенно, если выращивать ее ширококорядным способом. Она выполняет фитосанитарную роль в севообороте: уменьшает корневые гнили у ячменя и пшеницы, способствует улучшению структуры почв и повышению их плодородия. При хорошем развитии горчица легко справляется с сорняками. Замечено, что даже поле, засоренное пыреем ползучим и горчаком, освобождается до некоторой степени от этих злостных сорняков.

Основная обработка почвы

В задачу основной обработки почвы входит уничтожение сорняков, придание пахотному слою оптимального сложения, накопление и сбережение влаги, предотвращение ветровой и водной эрозии.

Основную обработку почвы под горчицу на семенных участках проводят дифференцированно с учетом конкретных условий. При раз-

мещении горчицы по зерновым предшественникам после их уборки проводят качественное лушение стерни на глубину 6÷8 см.

Если поля засорены однолетними сорняками, то по мере их появления лушение повторяют на 8÷10 и 12÷14 см с последующей осенней вспашкой на 25÷27 см (до 30).

При засорении полей многолетними сорняками применяют систему улучшенной зяби, включающую в себя раннее дисковое лушение на 6÷8 см, лемешное лушение на 10÷12 см плугом-лушительщиком (после отрастания сорняков) и осеннюю вспашку на 25÷27 см (до 30). При сильном засорении посевов эффективна послойная обработка с применением гербицидов группы 2,4 Д. Их вносят после лушения стерни по отросшим розеткам сорняков при температуре не ниже 12÷14 °С и норме расхода 2÷3 кг/га. Вспашку зяби проводят на 25÷27 см (до 30 см) не раньше, чем через 10÷15 суток после опрыскивания гербицидами.

Положительное значение для горчицы имеет дополнительное углубление пахотного слоя, особенно на солонцеватых почвах с применением трехъярусной вспашки или вспашки с почвоуглубителями.

В степных районах, где почвы подвержены ветровой эрозии используют систему плоскорезных обработок с оставлением на поверхности поля стерни. Эта система включает 1÷2 мелких обработки почвы культиваторами-плоскорезами и безотвальное рыхление плоскорезами-глубокорыхлителями. Их проводят в те же сроки, что и систему улучшенной зяби или послойные обработки. Если после 1-го или 2-го мелкого рыхления многолетние сорняки хорошо отрастают (5÷6 листьев), то их обрабатывают гербицидом группы 2,4 Д также, как это делается при подготовке зяби. На полях, подверженных водной и ветровой эрозии, основную обработку почвы обязательно сочетают с противоэрозионными мероприятиями (обработка плоскорезами с оставлением стерни, вспашка поперек склонов и т. д.).

На полях возделывания горчицы в зимний период проводят снегозадержание снегопахом-валкователем.

Отклонение средней глубины обработки почвы от заданной при лушении не должно превышать 2 см. Верхний слой почвы после рыхления должен быть мелкокомковатым, а по-

верхность обработанного поля – слитной и ровной. Лущение проводят поперек направления движения уборочных агрегатов со скоростью не более 10 км/ч.

Отклонение от заданной глубины при вспашке не должно превышать $\pm 5\%$ на ровных участках и $\pm 10\%$ на неровных. Ширина и толщина пластов должна быть одинакова, растительные остатки и удобрения полностью запаханы, а гребни пластов должны иметь равную высоту. Не допускаются высокие свальные гребни, глубокие развальные борозды между отдельными проходами, а также скрытые огрехи.

Внесение удобрений

Минеральные удобрения являются одним из основных факторов формирования высокого урожая семян горчицы. Это связано с повышенным выносом из почвы элементов минерального питания. На формирование 1 т семян горчица потребляет $55\div 60$ кг азота, $25\div 30$ кг фосфора и $25\div 35$ кг калия, а кальция, магния, бора и серы – в 3,5 раза больше, чем зерновые культуры.

Минеральные удобрения вносят под основную обработку почвы.

Благодаря способности высокой усвояющей корневой системы, горчица хорошо использует удобрения из почвы и дает значительные приросты урожая семян, более высокие, чем другие культуры.

Если удобрения не вносили под основную обработку, их следует внести весной при посеве из расчета N 20-40 P 20÷40 кг/га, а на почвах бедных калием вносят K 40÷60 кг/га.

Для повышения семенной продуктивности и содержания эфирного масла в семенах горчицы целесообразно использовать удобрения содержащие серу (до 30 кг/га в пересчете на серу).

На участках с повышенной кислотностью ($pH < 6$) под вспашку вносят известковую муку из расчета $1,0\div 1,5$ т/га.

На бедных микроэлементами почвах (дерново-подзолистые, лесные, песчаные и др.) вносят до $30\div 50$ кг/га серы и $2\div 3$ кг/га борной кислоты.

Наиболее эффективный прием – внесение гранулированного суперфосфата или аммофоса во время сева в количестве $20\div 50$ кг/га.

Горчица положительно отзывается и на органические удобрения. Однако их следует вносить под предшествующую культуру в дозе $30\div 40$ т/га, так как прямое применение навоза под горчицу увеличивает количество сорняков и затягивает созревание культуры.

Рекомендуемые оптимальные дозы минеральных и органических удобрений могут быть изменены в каждом хозяйстве с учетом агрохимических картограмм и планируемой урожайности горчицы.

Предпосевная обработка почвы

Главной целью предпосевной обработки почвы под горчицу является тщательное выравнивание поверхности поля, уничтожение всходов сорняков и сохранение влаги на глубине заделки семян и, таким образом, создание оптимальных условий для высококачественного посева, обеспечивающего дружные всходы. Допосевная обработка зяби должна быть минимальной, ее проводят по «спелой» почве с учетом весеннего состояния пашни, условий весны.

Высококачественная зябь позволяет ограничиться весной одной предпосевной культивацией на глубину $4\div 5$ см. Культивацию следует проводить поперек вспашки или под углом к ней.

На невыровненной зяби перед предпосевной культивацией проводят обработку почвы выравнителями или культиваторами в агрегате с боронами.

Для борьбы с однолетними злаковыми и некоторыми двудольными сорняками применяют гербициды трефлан или нитран в количестве $3\div 4$ кг/га до посева с немедленной заделкой в почву культиваторами.

Посев. Оптимальным сроком посева горчицы принято считать устойчивое прогревание почвы на глубине заделки семян $+8\div +10$ °С. Этот период обычно совпадает с посевом ранних колосовых культур. Сельскохозяйственная наука и многолетняя практика показывают, что урожай горчицы при раннем сроке посева, как правило, на $15\div 25\%$ выше, чем при позднем (через 20 дней).

Однако на сильно засоренных полях целесообразно проводить культивацию после массового прорастания сорняков, а горчицу сеять в средние сроки.

Растения горчицы сарептской с увеличением площади питания значительно увеличивают семенную продуктивность за счет ветвей второго и последующих порядков. При рядовом посеве основной урожай семян обеспечивается за счет центральной ветви, а при широкорядном – за счет увеличения числа ветвей первого и последующих порядков.

На хорошо подготовленных и чистых от сорняков полях лучшие результаты дает рядо-

вой посев с междурядьями 15 см при норме 1,5÷2,0 млн всхожих семян на 1 га (8÷10 кг/га). На орошаемых участках и при хорошем запасе влаги в почве целесообразно увеличить норму высева до 2,5÷3 млн всхожих семян на 1 га (9÷12 кг/га). В зонах недостаточного увлажнения Поволжья и Ростовской области, особенно при малых запасах осенне-зимней влаги и сильном засорении полей сорняками, а также на семеноводческих посевах предпочтение следует отдавать ширококрядному способу с междурядьями 45÷70 см при норме 1 млн всхожих семян на 1 га (4÷5 кг/га).

Посев горчицы осуществляют сеялками, проводя замену в редукторе шестерен, соответственно, на шестерни, предназначенные для вала туковых аппаратов. Можно применять овощные сеялки.

Важное значение имеет глубина заделки семян, которая зависит от типа почвы и степени увлажнения ее верхнего слоя. При раннем сроке сева, когда верхний слой почвы еще влажный, глубина заделки семян не должна превышать 3...4 см, по мере пересыхания верхнего слоя допускается глубина посева 5...6 см на тяжелых почвах и даже до 7÷8 см на легких, если на этой глубине имеется влага.

Для получения дружных всходов обязательно до или после посевное прикатывание кольчато-зубчатыми катками.

Уход за посевами

При образовании плотной почвенной корки эффективно довсходовое боронование поперек рядов посева легкими боронами или ротационной мотыгой при скорости движения агрегата 5÷6 км/ч.

При загущенных посевах и массовом появлении сорняков на участках обычного рядового посева применяется боронование всходов. Его следует выполнять в фазе 3÷5 настоящих листьев. При раннем проведении этой работы посевы изреживаются вследствие уничтожения и присыпания всходов почвой, а запаздывание с этим приемом не дает желаемого эффекта, так как растения сорняков успевают хорошо укорениться. Боронование должно выполняться при сухой погоде во второй половине дня, когда растения горчицы теряют тургор и меньше повреждаются. Скорость движения агрегатов не должна превышать 3÷5 км/ч. Для уменьшения глубины хода (и повреждения культурных

растений) зубья борон должны быть направлены косым срезом вперед.

Культивацию междурядий на ширококрядных посевах следует начинать в фазе 3÷4 настоящих листьев. Обычно проводится 1÷2 обработки на глубину 5÷6 см. Для первой культивации применяются в каждом междурядии две односторонние плоскорежущие лапки и в центре одна стрельчатая. Вторая культивация при необходимости выполняется до начала стеблевания растений. При междурядной обработке нельзя допускать повреждения растений.

Защита растений горчицы от вредителей и болезней

Решающим условием получения высоких урожаев семян является их защита от вредителей и болезней.

Наиболее опасными вредителями горчицы сарептской являются крестоцветные блошки, рапсовый пилильщик, рапсовый цветоед, рапсовый листоед, капустная тля, скрытнохоботник, капустная моль, крестоцветный клоп и др.

К числу наиболее распространенных болезней горчицы относятся: мучнистая и ложная мучнистая роса, белая ржавчина и фузариоз.

Нередки случаи, когда из-за несвоевременного выполнения защитных мероприятий посевы культуры полностью уничтожались такими вредителями, как крестоцветные блошки и листогрызущие гусеницы.

Для защиты растений от вредителей и болезней важно сочетать агротехнические, химические и биологические мероприятия.

К агротехническим мерам относится постоянное уничтожение сорной растительности на краях полей, обочинах дорог, межах, залежах и в лесополосах; соблюдение чередования культур в севообороте; глубокая зяблевая вспашка с предварительным лущением стерни; оптимальные сроки посева; уничтожение пожнивных остатков и падалицы крестоцветных растений.

Из биологических мер эффективно применение против гусениц и ложногусениц листогрызущих вредителей (пилильщиков, моли, листоедов, белянок и др.) таких биологических препаратов, как эктобактерин-3 и битоксибациллин в дозе 3 кг препарата на гектар посевов.

Наиболее экономичным и эффективным способом защиты всходов горчицы сарептской от крестоцветных блошек является посев семенами, инкрустированными перед посевом од-

ним из следующих препаратов: 35 % текучей пасты (т. пс.) адифура (25÷30 л/т); 35 % т. пс. брифура (15 л/т); 35 % т. пс. дейфура (15 л/т) или 35 % т. пс. фурадана (15 л/т). Обработка семян предохраняет всходы горчицы в течение 7÷10 дней от повреждений крестоцветными блошками. Инкрустацию семян производится в день посева.

При обнаружении на погонном метре рядка 20 и более жуков блошки, посев следует опрыскнуть 40 %-ным концентратом эмульсии (к.э.) метафоса (0,75÷1,5 л/га) или 18 %-ным смачивающимся порошком (с.п.) вофатокса (1,5÷2,0 кг/га).

В период вегетации против клопов, листогрызущих гусениц, капустной моли, рапсового пилильщика, горчичной белянки и листоеда, а также против рапсового цветоеда, скрытнохоботника и тлей посевы до цветения опрыскивают одним из препаратов: карбофос карате, метафос, суми-альфа, метилпаратион, фастак, децис.

Опрыскивание проводят машинами с нормой расхода рабочего раствора 200÷300 л/га. Авиационную обработку выполняют самолетами с расходом рабочей жидкости 50÷100 л/га.

Не следует проводить опрыскивания поля при скорости ветра более 3 м/с. Эту работу лучше всего выполнять ранним утром, вечером, ночью или в пасмурные дни, когда отсутствуют восходящие потоки воздуха. Обработку поля наземной техникой следует начинать с подветренной стороны при движении агрегата под углом около 45° к направлению ветра.

Для защиты растений от ложной мучнистой росы эффективно применять 80 %-ный с.п. поликарбоцина (12,4 кг/га) и препарат 80 %-ный с.п. цинеба (1,8÷3,6 кг/га д.в.), против мучнистой росы 1 %-ный раствор коллоидной серы (20 кг/га).

При работе с препаратами необходимо строго соблюдать инструкции по технике безопасности.

Уборка урожая [5]

Горчицу убирают как двухфазным (раздельным) способом, так и прямым комбайнированием. Оптимальным сроком скашивания растений в валке является фаза желто-зеленого стручка, когда около половины стручков на растении приобретут лимонно-желтый оттенок, нижние и средние листья центральной ветви опадут, а семена в нижних стручках центральной ветви приобретут свойственную сорту желтую окраску. Влажность семян в этот период

достигает 30...40 %. Для скашивания используют любые жатки, позволяющие убирать растения в валке, избегая растрескивания стручков. Высота среза не должна быть ниже 15...20 см.

Обмолачивают валки по мере их подсыхания при влажности семян 8÷12 %. Обмолот лучше проводить в утренние, вечерние и ночные часы, чтобы уменьшить потери от осыпания семян. Для обмолота используют зерновой комбайн, дооборудованный специальным приспособлением для обмолота мелкосемянных и крупных культур. Это приспособление позволяет снизить потери семян с 14,3 (без приспособления) до 1,6 %, а их дробление с 3,2 до 0,6 %.

Комбайн необходимо герметизировать, нанося пенополиуретан на места возможной утечки семян.

Для подбора валков жатку комбайна оборудуют полотенно-транспортным подборщиком. Рабочая скорость комбайна – 5÷6 км/ч, число оборотов вала молотильного барабана не должно превышать 400÷600 в мин, зазор в деке на входе 22÷35 мм, а на выходе 10÷13 мм; частота оборотов вентилятора – 340÷440 в мин; жалюзи верхнего регистра должны быть открыты на 2/3, нижнего – на 1/3, а удлиителя решета – почти полностью.

Уборку горчицы прямым комбайнированием проводят при наступлении полной спелости семян и влажности не более 10 %. Для этого используют зерновые комбайны, отрегулированные на уборку мелкосемянных культур при сниженной частоте оборотов молотильного барабана до 400÷600 в мин, вентилятора – до 340÷440 оборотов в мин. При прямом комбайнировании уменьшаются потери семян, которые происходят при подборе валков и повреждении горчицы осадками при раздельном способе уборки.

При возделывании горчицы на зеленый корм или силос скашивание растений следует проводить в начале цветения. Для этого используют кормо- и силосоуборочные комбайны и косилку-подборщик. При уборке на сенаж применяют валковые косилки-плющилки. Высота скашивания не более 5 см.

Очистка и сортировка семян. Очистка семян горчицы начинается в потоке с обмолотом. Для очистки товарных семян применяются передвижные зерноочистительные агрегаты или стационарные зерноочистительные агрегаты. Все эти машины требуют специального оборудования для очистки мелкосемянных культур и подбора соответствующего режима

работ. У зерноочистительных машин уменьшают число колебаний решетного стана до $325 \div 350$ в минуту.

Для первичной очистки вороха горчицы используют разделительные (B_1 и B_2) и подсевные (B и Γ) решета с круглыми и продолговатыми отверстиями, которые подбирают в зависимости от размера семян. Чаще применяют решета следующих размеров (мм):

B_1	B_2	B	Γ
$\emptyset 1,8 \div 2,0$	$\emptyset 2,25 \div 2,6$	$\emptyset 1,0 \div 1,2$	$0,9 \div 1,0$

После первичной очистки семена сдают на заготовительные предприятия.

Семенной материал повторно очищают и сортируют при установке решет следующих размеров (мм):

B_1	B_2	B	Γ
$\emptyset 1,7$	$\emptyset 2,0 (2,25)$	$1,0$	$\emptyset 1,1 \div 1,2$

Обычно применяют машины, имеющие набор решет для мелкосемянных культур. Если семена горчицы засорены овсюгом, семенной материал пропускают через триера с ячейками диаметром $2,5 \div 3,0$ мм. При необходимости проводится сортировка на пневматических столах, а также на электромагнитной машине. Хорошие результаты на очистке дает использование зерноочистительных агрегатов с семяочистительной приставкой. При влажности семян более 12 % необходима их сушка. Семенной материал сушат в сушилках при температуре теплоносителя не более $35 \div 40$ °С.

В соответствии с государственным стандартом на сортовые и посевные качества семян горчицы [2], всхожесть должна быть (не менее): для семян I класса – 85 %, II и III класса – 90 %.

Семена горчицы, производимые специализированными семеноводческими хозяйствами, должны быть не ниже второй репродукции, по сортовой чистоте не ниже третьей категории (97,0 %), а по посевным качествам – не ниже требований третьего класса: чистота – 99 %, содержание семян других растений (штук на 1 кг) – не более 720, в том числе семян сорняков – не более 400; всхожесть – не менее 90 %. Влажность семян, закладываемых на кратковременное хранение, не должна быть выше 12 %, а страхового фонда – не более 8 %. Семена дол-

жны храниться в мешках при высоте штабеля не более шести рядов мешков.

Операции очистки семян от посторонних примесей и снижения влажности семян до безопасных величин создают условия для устойчивого сохранения качества семян при последующем хранении. После хранения технологическая переработка включает операции повторной очистки семян от примесей, а также фракционирование (кондиционирование) семян по размерам и влажности. Наибольшее значение для масличных семян, которые перерабатываются с предварительным отделением низкомасличных семенных оболочек от высокомасличного ядра, имеет операция кондиционирования.

Выводы

Построена логистическая цепь производства семян сарептской горчицы, предусматривающая выполнение комплекса научно-обоснованных технических мероприятий для получения их максимального количества с наименьшими затратами.

Получение максимального количества семян сарептской горчицы с наименьшими затратами, требует тщательного последовательного выполнения основных технологических операций производства, хранения и подготовки семян горчицы для переработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- ГОСТ 9139-71 Семена горчицы. Промышленное сырье. Требования при заготовках и поставках. Технические условия. – М.: Стандартиформ, 2010.
- ГОСТ 9670-89 Семена горчицы. Сортовые и посевные качества. Технические условия. – М.: Издательство стандартов, 1990.
- Дублянская, Н. Ф. Химический состав современных сортов сарептской горчицы / Н. Ф. Дублянская // Масложировая промышленность. – 1959. – № 9. – С. 9–11.
- Жуковский, П. М. Горчица сарептская / П. М. Жуковский // Культурные растения и их сородичи. – Л., 1964. – С. 401–402.
- Захаров, Н. С. Уборка зерновых и масличных культур / Н. С. Захаров, С. В. Захаров, В. В. Сячин, И. Ф. Поляков. – Сталинград: Областное книго-издательство, 1938. – 46 с.
- Интенсивная технология возделывания горчицы сарептской: рекомендации / Ф. Л. Козловцев, В. М. Кононов, А. С. Кушнир, Д. А. Страхов [и др.]. – М.: Россельхозиздат, 1987. – 30 с.
- Каталог мировой коллекции ВИР. Горчица сарептская / Под ред. С. Н. Кутузовой. – СПб., 1996. – Вып. 683. – № 6. – С. 40–71.

8. *Космодемьянский, М. П.* Сарептская горчица / М. П. Космодемьянский, Е. Н. Кулина. – Волгоград: Нижне-Волжское изд., 1967. – 186 с.
9. *Минкевич, И. А.* Масличные культуры / И. А. Минкевич, В. Е. Борковский. – М.: Гос. изд. с/х л-ры, 1953. – 414 с.
10. Обзор по биохимическим и физиологическим свойствам семян горчицы: Отчет о НИР / ВНИИЖ; Руководитель темы П. П. Демченко – Л.: 1992. – С. 2–29.
11. *Поликаркина, К. И.* Физические и биологические свойства семян горчицы, выращенных в условиях Сталинградской области: автореф. дисс... канд. техн. наук / К. И. Поликаркина. – Одесса, 1958. – 16 с.
12. *Поляков, И. Ф.* Сарептская горчица / И. Ф. Поляков. – Сталинград: Библиотечка колхозника, 1938. – 20 с.
13. Практическое руководство по возделыванию горчицы сарептской в Краснодарском крае. – Краснодар, 1995. – 21 с.
14. Рекомендации по возделыванию горчицы сарептской сорта Донская 8 / В. Г. Шурупов, Ф. И. Горбаченко, В. Г. Картамышев, Е. В. Картамышева. – Ростов н/Д, 1995. – 12 с.
15. *Сазанова, Л. В.* Культура сарептской горчицы / Л. В. Сазанова. – М.: Сельхозгиз, 1955. – 87 с.
16. *Сахаров, Н.* Горчица / Н. Сахаров. – Саратов: ОГИЗ, 1931. – 20 с.
17. *Шурупов, В. Г.* Горчица сарептская / В. Г. Шурупов, Е. В. Картамышева. – Ростов н/Д: СКНЦ ВШ, 1997. – 56 с.
18. *Щербаков, В. Г.* Биохимия и товароведение масличного сырья / В. Г. Щербаков. – М.: Пищевая промышленность, 1979. – 335 с.
19. *Kerk, I. T. O.* Variation and Inheritance of Erucic Acid Content in Brassica juncea / I.T.O. Kerk, C.I. Hurstona // Z. of Lanzuch. t, V.90, 1983. – P. 331-33.

ТРАНСПОРТ

УДК 621.436.1

И. А. Кустов, Е. А. Федянов

УТОЧНЕНИЕ ОСНОВАННОЙ НА ПОНЯТИИ УДЕЛЬНОЙ РАБОТЫ МЕТОДИКИ АПРИОРНОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА ДВИГАТЕЛЯ ОТКЛЮЧЕНИЕМ ЦИЛИНДРОВ

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: tig@vstu.ru

Обоснована необходимость учета механических потерь в отключаемых цилиндрах при оценке эффективности метода отключения части цилиндров многоцилиндрового дизеля. На примере дизеля КАМАЗ 740.50-260 по известной методике, базирующейся на понятии удельной работы, получены сравнительные расчетные данные об эффективности метода отключения цилиндров на различных скоростных и нагрузочных режимах. Показано, что при учете механических потерь в отключаемых цилиндрах прогнозируемый выигрыш в расходе топлива уменьшается и область скоростных и нагрузочных режимов, на которых возможна работа с отключением части цилиндров, суживается.

Ключевые слова: метод отключения цилиндров, механические потери, удельный эффективный расход топлива.

I. A. Kustov, E. A. Fedyanov

REFINING THE METHOD BASED ON THE CONCEPT OF SPECIFIC WORK FOR ESTIMATE OF THE EFFECTIVENESS VARIABLE DISPLACEMENT ENGINE DISCONNECTING THE CYLINDERS

Volgograd State Technical University

The necessity of taking into account the mechanical losses in the switched-off cylinders when evaluating the efficiency of the method of switching-off part of the cylinders of multi-cylinder diesel is substantiated. On the example of KAMAZ 740.50-260 diesel engine according to the known technique based on the concept of specific work, comparative calculated data on the effectiveness of the method of disconnecting cylinders at different speed and load conditions are obtained. It is shown that taking into account the mechanical losses in the switched-off cylinders, the predicted gain in fuel consumption decreases and the area of speed and load modes, in which it is possible to work with the disconnection of part of the cylinders, narrows.

Keywords: cylinder shut-off method, mechanical losses, specific effective fuel consumption.

Априорная оценка эффективности применения регулирования фактического рабочего объема многоцилиндрового двигателя внутреннего сгорания отключением части цилиндров при работе на неполных нагрузках представляет значительный интерес, так как позволяет предварительно оценить целесообразность применения указанного способа регулирования для конкретной модели двигателя в заданных условиях эксплуатации. В работах, выполненных в Российском университете дружбы народов [1; 2], для оценки изменения величины удельного

расхода топлива как следствия регулирования рабочего объема отключением цилиндров, используется методика, основанная на понятии удельной работы, т. е. работы, совершаемой двигателем за один оборот коленчатого вала в расчете на единицу его рабочего объема:

$$L_{es} = L_e / (i_w \cdot V_h), \quad (1)$$

где L_{es} – удельная работа, L_e – полная работа, совершаемая двигателем за один оборот вала, i_w – число работающих цилиндров двигателя, V_h – рабочий объем одного цилиндра. Полная

работа, совершаемая двигателем за один оборот вала, связана с величиной эффективного крутящего момента соотношением:

$$L_e = 2\pi \cdot M_e. \quad (2)$$

Когда работают все цилиндры

$$L_{es} = L_e / (i \cdot V_h), \quad (3)$$

где i – общее число цилиндров двигателя.

Методика предполагает наличие многопараметровых характеристик двигателей [3], в которых значения эффективного крутящего момента или эффективной мощности пересчитаны с использованием формул (2) и (3) в значения удельной работы. Пример такой многопараметровой характеристики приведен на рис. 1.

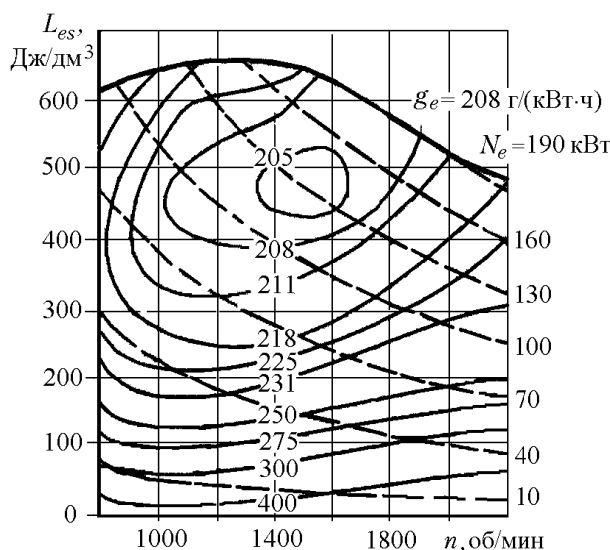


Рис. 1. Универсальная многопараметровая характеристика полноразмерного дизеля КАМАЗ 740.50-260, построенная в координатах $L_{es} - n$

При отключении части цилиндров на режиме с заданными значениями частоты вращения и эффективного крутящего момента оставшиеся в работе цилиндры должны производить удельную работу

$$L_{es} = 2\pi \cdot M_e / (i_w \cdot V_h). \quad (4)$$

Зная при заданном числе работающих цилиндров требуемую величину удельной работы, по многопараметровой характеристике определяют величину удельного эффективного расхода топлива. Так, например, в работе [1] для восьмицилиндрового дизеля КАМАЗ 740.50-260 с помощью рассмотренной выше методики получено, что если при частоте вращения $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$ обеспечивать крутящий момент $M_e = 170 \text{ Н·м}$, оставляя в работе только четыре цилиндра, то удельный расход топлива будет

на 18,4 % меньше, чем в случае работы на том же режиме на всех восьми цилиндрах.

Рассмотренная выше методика позволяет, по нашему мнению, правильно прогнозировать значения удельных расходов топлива при работе двигателя с отключением части цилиндров только в том случае, когда отключение цилиндров производится полностью, то есть с остановкой в них поршней. Принципиально такое отключение возможно в двигателях, имеющих специальную конструкцию коленчатого вала с соединительными управляемыми муфтами. В силу сложности, громоздкости и, главное, малой надежности таких конструкций практического применения они не находят. При проведении большинства известных исследований [3] с применением рассматриваемого метода отключение цилиндров осуществлялось прекращением подачи топлива и в некоторых случаях остановкой привода клапанов. При таком способе отключения движение поршней сохраняется и, соответственно, необходимо затрачивать работу на преодоление трения. Если в отключенных цилиндрах клапаны открыты или приводятся, как и в работающих цилиндрах, то к потерям на трение добавляются затраты работы на газообмен. Обозначим приведенные к единице рабочего объема всего двигателя затраты работы на преодоление трения и газообмен через L_{rs} . Значение L_{rs} связано с работой L_e , совершаемой двигателем за один оборот вала при условии, что задействованы все цилиндры, очевидным соотношением

$$L_{rs} = L_e (1/\eta_{\text{мех}} - 1) / (i \cdot V_h), \quad (5)$$

где $\eta_{\text{мех}}$ – механический КПД двигателя.

Для того чтобы, задействовав только i_w цилиндров двигателя, обеспечить на его выходном валу требуемый крутящий момент M_e , действующие цилиндры должны произвести работу большую, чем это следует из формулы (4), на величину, компенсирующую затраты энергии на трение и газообмен в отключенных цилиндрах. С учетом указанной компенсации удельная работа задействованных цилиндров должна быть

$$L_{es} = 2\pi M_e / (i_w \cdot V_h) + L_{rs} (1 - i_w) / i_w. \quad (6)$$

Если при отключении цилиндров привод клапанов останавливается или переводится в особый режим, то значение L_{rs} для отключаемых цилиндров должно быть определено на основе экспериментальных данных или, при возможности, расчетным путем.

Для оценки влияния механических потерь в отключенных цилиндрах на показатели дизеля сравним расчетные значения удельных эффективных расходов топлива g_e , полученные без учета этих потерь и с их учетом, предполагая, что величина потерь в отключенных цилиндрах такая же, как в работающих. Значения механического КПД при различных частотах вращения коленчатого вала дизеля были приняты согласно литературным данным [4]. В табл. 1 и 2 в качестве примера приведены результаты

расчетов значений g_e для различных частот вращения коленчатого вала дизеля КАМАЗ 740.50-260 при неизменной нагрузке $M_e = 170$ Н·м. В этих же таблицах даны значения относительной величины Δg_e уменьшения удельного расхода топлива при различном числе отключенных цилиндров. Значения, приведенные в первой таблице, получены без учета затрат работы на трение и газообмен в отключенных цилиндрах, а во второй – с учетом.

Таблица 1

Расчетные значения удельного расхода топлива в дизеле КАМАЗ 740.50-260 с различным числом работающих цилиндров, полученные без учета затрат энергии на механические потери в отключенных цилиндрах

i_w	g_e , г/(кВт·ч)				$\overline{\Delta g_e}$, %			
	Частота вращения, мин ⁻¹							
	1000	1300	1600	1900	1000	1300	1600	1900
2	209	207	208	210	22,6	24,7	27,8	30,5
4	227	229	235	247	15,9	16,7	18,4	18,2
6	249	260	265	275	7,8	5,4	8	9
8	270	275	288	302	0	0	0	0

Из сопоставления данных, приведенных в табл. 1 и 2, следует, что с учетом затрат энергии на компенсацию механических потерь в отключенных цилиндрах снижение расхода топлива оказывается меньшим, чем это прогнозировалось расчетом без учета таких затрат. Например, на выбранном в качестве примера

режиме: $M_e = 170$ Н·м, $n = 1600$ мин⁻¹, расчетное снижение удельного расхода топлива при отключении четырех цилиндров, полученное с учетом потерь на трение, составит 14,9 % (табл. 2), в то время как без учета механических потерь снижение удельного расхода топлива прогнозировалось на 18,4 % (табл. 2).

Таблица 2

Расчетные значения удельного расхода топлива в дизеле КАМАЗ 740.50-260 с различным числом работающих цилиндров, полученные с учетом затрат энергии на механические потери в отключенных цилиндрах

i_w	g_e , г/(кВт·ч)				Δg_e , г/(кВт·ч)			
	Частота вращения, мин ⁻¹							
	1000	1300	1600	1900	1000	1300	1600	1900
2	—	—	—	—	—	—	—	—
4	231	235	245	255	14,4	14,5	14,9	15,6
6	260	265	285	295	3,7	3,6	1,0	2,3
8	270	275	288	302	0	0	0	0

Отсутствие значений в первой строке табл. 2 указывает на то, что с учетом затрат энергии на компенсацию механических потерь в отключенных цилиндрах дизель КАМАЗ 740.50-260 не способен развивать крутящий момент в 170 Н·м, работая только двумя цилиндрами. Таким обра-

зом, учет механических потерь в отключенных цилиндрах не только уточняет возможную величину снижения расхода топлива, но и позволяет правильно оценить границы области нагрузочных режимов, в которой двигатель может работать с отключением части цилиндров.

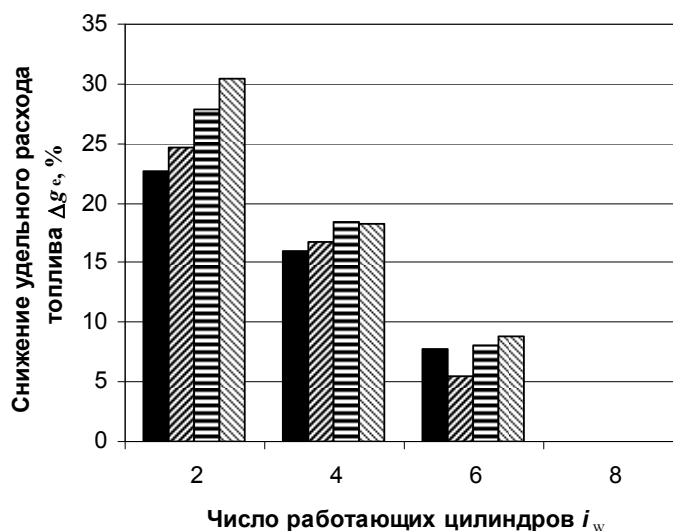


Рис. 1. Снижение расчетного удельного эффективного расхода топлива без учета механических потерь в отключенных цилиндрах:

■ – 1000 мин⁻¹; ▨ – 1300 мин⁻¹; ▩ – 1600 мин⁻¹; ▪ – 1900 мин⁻¹

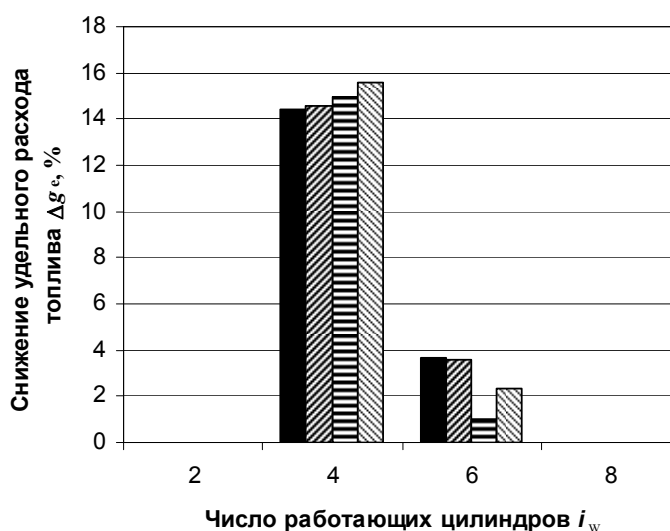


Рис. 2. Изменение расчетного удельного эффективного расхода топлива с учетом механических потерь в отключенных цилиндрах:

■ – 1000 мин⁻¹; ▨ – 1300 мин⁻¹; ▩ – 1600 мин⁻¹; ▪ – 1900 мин⁻¹

Еще один важный вывод, который следует из сопоставления данных, приведенных в табл. 1 и 2, заключается в различном характере изменения величины удельного расхода топлива в зависимости от числа отключаемых цилиндров. Без учета механических потерь относительная величина снижения удельного расхода топлива практически линейно нарастает при увеличении числа отключаемых цилиндров (рис. 1). Если учитывать механические потери, то эффект по топливной экономичности зависит от числа отключаемых цилиндров существенно нелинейно (рис. 2).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Повышение экономичности режимов малых нагрузок дизеля КАМАЗ-740 изменением его рабочего объема / Н. Н. Патрахальцев, И. А. Никишин, И. А. Петруня // Грузовик. – 2013. – № 5 – С. 31–34.
2. Оценка возможности повышения экономичности автомобиля регулированием рабочего объема двигателя / Н. Н. Патрахальцев, И. А. Петруня, Р. О. Камышников, Э. А. Савастенко // Автомобильная промышленность. – 2014. – № 6. – С. 10–12.
3. Автомобильные двигатели / М. Г. Шатров, К. А. Морозов, И. В. Алексеев и др.; под ред. М. Г. Шатрова. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 464 с.
4. Теория автомобильных и тракторных двигателей / И. М. Ленин, д-р техн. наук проф. – Москва: Машиностроение, 1969. – 368 с.

УДК 656.078

*Д. Д. Сильченков, Р. Р. Санжапов, Ю. М. Чижикова, М. О. Соболевский***РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ ЗА СЧЕТ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ
ОРГАНИЗАЦИИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: xdimanx.vstu@mail.ru

В статье проведен анализ сложности пересечения участка ул. Ополченская (в районе Тракторного рынка) и доказана целесообразность его совершенствования. Предложена модель новой схемы организации дорожного движения на данном пересечении. Даны оценки снижения числа ДТП и расхода топлива.

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

*D. D. Silchenkov, R. R. Sanzhapov, Yu. M. Chizhikova, M. O. Sobolevsky***SOLUTION OF THE PROBLEM OF RESOURCE SAVING
AT THE EXPENSE OF AN ORGANIZATION OF ROAD TRAFFIC****Volgograd State Technical University**

The article analyzes the complexity of the intersection of the street. Opolchenskaya (in the area of the tractor market) and proved the feasibility of its improvement. A model of a new traffic management scheme at this intersection is proposed. Estimates are given of reducing the number of accidents and fuel consumption.

Keywords: intersection, traffic management, road safety.

Актуальность исследования состоит в следующем. Рассматриваемый участок ул. Ополченская является центром притяжения людей ввиду нахождения вблизи центров тяготения людей: вещевого рынка, продуктивно-хозяйственный рынок, торговый комплекс «Привоз». В выходные дни на участке наблюдаются значительные транспортные и пешеходные потоки. Дополнительно отягощают ситуацию при-

паркованные автомобили по краям улиц и на разделительных островках, что негативно сказывается на пропускной способности улиц.

На рис. 1 представлено исследуемый участок УДС с указанием подходов, на которых исследовалась интенсивность движения и состав транспортного потока, а в табл. 1 представлены интенсивности дорожного движения на данном участке УДС.



Рис. 1. Рассматриваемый участок улично-дорожной сети

После проведения натурных исследований были установлены причины возникновения заторовых ситуаций на участке ул. Ополченская:

1) большие пешеходные потоки (до 2500 чел/час в выходные дни), часть пешеходов не со-

блюдает правила дорожного движения и переходят улицу в неполюженном месте;

2) отсутствие организованных парковочных мест;

3) через участок УДС проходит высокая ин-

тенсивность общественного транспорта: автобусов малой вместимости – до 150 авт/час, автобусы большой вместимости – до 40 авт/час, троллейбусы – до 15 авт/час.;

4) недостаточная, при сегодняшнем уровне,

интенсивности общественного транспорта длина остановочного пункта;

5) расположение на кольце конечного пункта маршрутов пригородного транспорта – 198, 197, 124 б и др.

Таблица 1

Интенсивность движения транспортных потоков на улице Ополченская

Подход к перекрестку	Тип транспортного средства	Направление движения			
		Прямо	Направо	Налево	Разворот
1 подход	Легковой	586	76	120	179
	Грузовой	10	0	0	0
	Микроавтобусы	102	0	0	0
	Автобусы	80	0	0	0
	Троллейбусы	15	0	0	0
	Приведенная интенсивность, авт/ч	1041	76	120	179
2 подход	Легковой	485	0	240	0
	Грузовой	10	0	0	0
	Микроавтобусы	120	0	0	0
	Автобусы	80	0	0	0
	Троллейбусы	15	0	0	0
	Приведенная интенсивность, авт/ч	985	0	240	0
3 подход	Легковой	260	0	100	0
	Грузовой	8	0	0	0
	Микроавтобусы	60	0	20	0
	Автобусы	20	0	20	0
	Троллейбусы	0	0	0	0
	Приведенная интенсивность, авт/ч	446	0	210	0

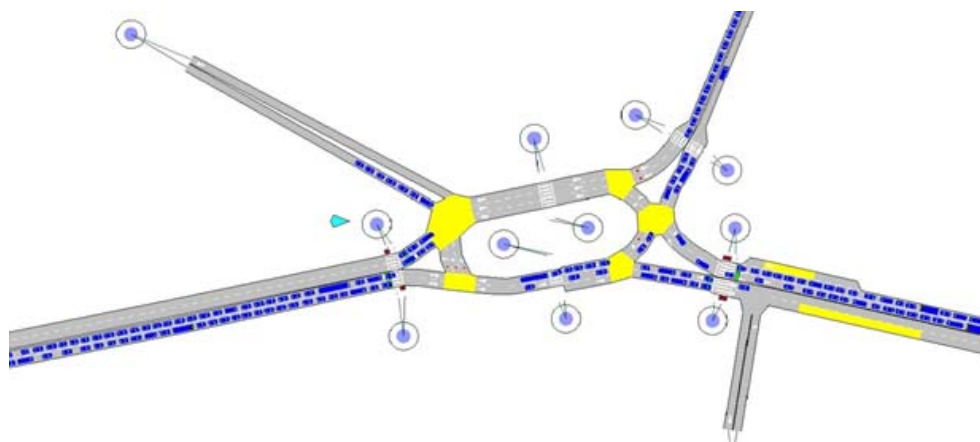


Рис. 2. Модель дорожного движения на рассматриваемом участке

Для наглядности была построена модель дорожного движения на участке УДС в программном комплексе Aimsun, показанная на рис. 2.

Для устранения причин возникновения заторовых ситуаций на участке ул. Ополченская (в районе тракторного рынка) предлагаются

следующие мероприятия:

1. Перенести пешеходный переход в место, где улица Шурухина значительно уже.

На рис. 3 показано местоположение предлагаемого пешеходного перехода, оборудованного светофором.

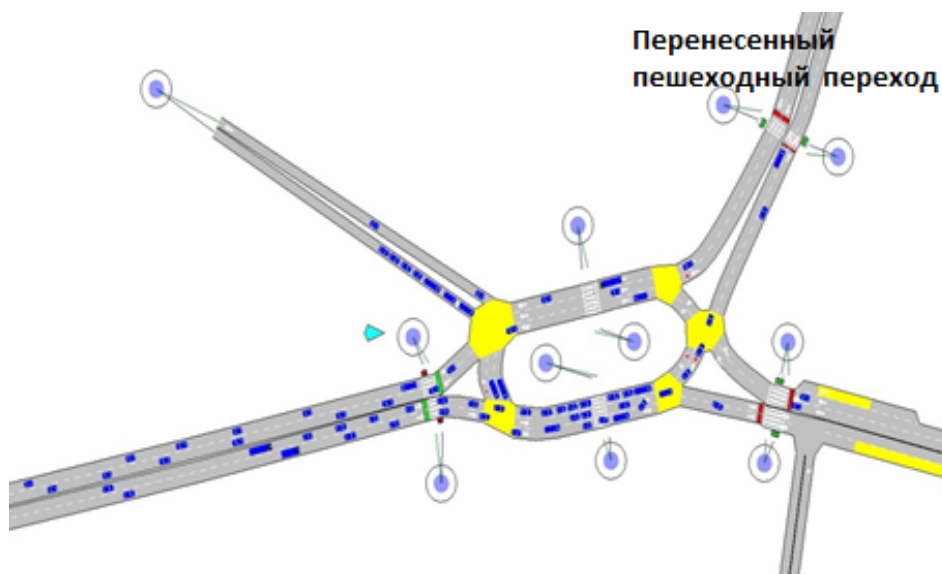


Рис. 3. Предлагаемое место пешеходного перехода

Для повышения эффективности мероприятия предлагается поставить ограждения вдоль улицы, для того чтобы пешеходы не смогли нарушать правила дорожного движения.

2. Строительство наземной парковки.

При помощи построенной парковки увеличится пропускная способность за счет освобождения правого ряда улицы от транспортных средств, остановленных в неположенном месте.

3. Увеличение длины остановочного пункта.

В ходе исследования было установлено, что автобусам малой вместимости и троллейбусам, подъезжающим к остановке «Тракторный рынок» в сторону пр. Ленина, не хватает места для остановки для посадки-высадки пассажиров. Было замечено, что автобусы останавли-

ваются на полосах движения для посадки и высадки пассажиров, тем самым препятствуют автомобилям, которые движутся по данной полосе. Длина существующего остановочного пункта «Тракторный рынок» в сторону пр. Ленина составляет 18 метров, что недостаточно для реальной интенсивности общественного транспорта, проходящего на этом участке.

Для решения этой проблемы предлагается увеличить длину остановочного пункта до 30 м.

Также необходимо скоординировать расписание автобусов и троллейбусов для удобства пассажиров и для устранения очередей общественного транспорта у остановочного пункта.

На рис. 4 показана модель дорожного движения на ул. Ополченская после предлагаемых мероприятий.

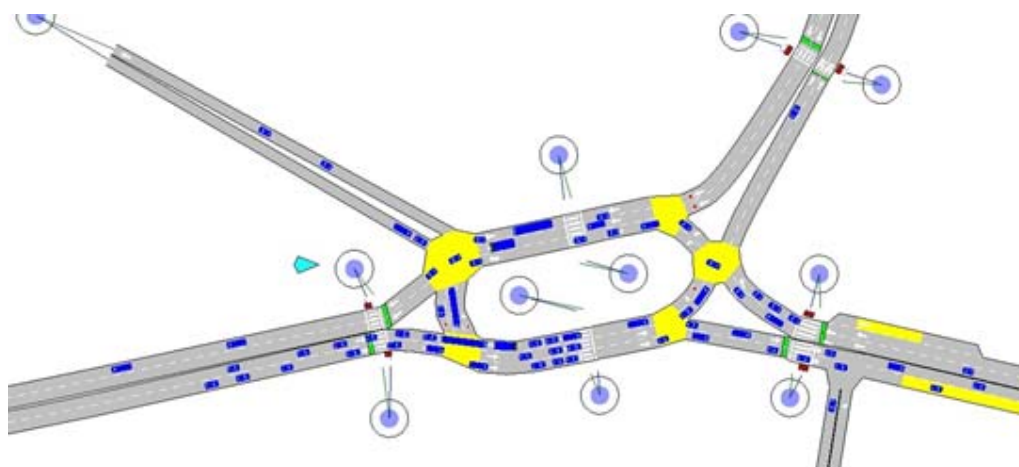


Рис. 4. Модель дорожного движения на рассматриваемом участке УДС после реализации мероприятий

На основании предложенных выше мероприятий по повышению безопасности дорожного движения была составлена таблица со

значениями вероятностей снижения числа ДТП (ДТП с пострадавшими) от реализации каждого мероприятия.

Таблица 2

Таблица значений вероятности снижения ДТП

Мероприятия по повышению безопасности движения по элементам и характерным участкам дорог	Вероятность снижения числа ДТП, в долях единицы	
	Общего числа ДТП	ДТП с пострадавшими
Установка знаков, нанесение разметки	0,44	0,34
Установка пешеходных ограждений	0,20	0,27
Светофорное регулирование пешеходного движения	0,21	0,10
Восстановление дорожного покрытия	0,44	0,59

Была рассчитана средняя вероятность снижения числа ДТП и ДТП с пострадавшими в год от реализации предлагаемых мероприятий по формуле (1).

$$P = \frac{\sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{1-p_n} - 1 \right)}{1 + \sum_{n=1}^N \left(\frac{1}{1-p_n} - 1 \right)}, \quad (1)$$

где p_n – вероятность снижения числа ДТП (ДТП с пострадавшими) от внедрения одного меро-

приятия; N – число мероприятий по повышению безопасности дорожного движения.

Средняя вероятность снижения числа ДТП с пострадавшими составит:

$$P = 0,66.$$

Средняя вероятность снижения общего числа ДТП составит:

$$P = 0,58.$$

Нами была составлена табл. 3 для оценки эффективности предлагаемых решений.

Таблица 3

Сравнительная таблица схем ОДД

Критерий	Средние результаты до моделирования УДС	Предлагаемая схема ОДД
Средняя задержка из Aimsun	60	20
Средняя скорость	33	42
Вероятность снижения общего числа ДТП	–	0,66
Вероятность снижения числа ДТП с пострадавшими	–	0,58

Также для определения эффективности предложенных решений был произведен сравнительный расчет снижения часового расхода топлива по формуле:

$$G = \sum_{i=1}^N r_i * \Delta t_i * N_i, \quad (2)$$

где G – часовой расход топлива, л/час; r_i – средний расход топлива i типа транспортного средства в час на холостом ходу, л/час; Δt_i – снижение времени задержек для i типа транспортного средства; N_i – интенсивность каждого i типа транспортного средства.

$$\begin{aligned} G &= (1 \cdot 0,006 \cdot 2046) + (2 \cdot 0,006 \cdot 18) + \\ &+ (1,5 \cdot 0,006 \cdot 282) + (2 \cdot 0,006 \cdot 180) = \\ &= 12,3 + 0,2 + 2,5 + 2,2 = 17,2 \end{aligned}$$

Исходя из полученных цифр можно сделать вывод, что часовой расход топлива на данном участке снизится на 17,2 литра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Автомобильные дороги и улицы [Электронный ресурс] : Гос. Стандарт РФ от 11.10.1993 № 221. – Режим доступа: Справ.-правовая система «Консультант Плюс».
2. Климовштейн, Г. И. Организация дорожного движения: учебник для вузов / Г. И. Климовштейн, М. Б. Афанасьев. – 5-е изд. перераб. и доп. – Москва : Транспорт, 2001. – 106 с.
3. Коноплянко, В. И. Организация и безопасность дорожного движения : учебник для вузов / под ред. В. И. Коноплянко. – Москва : Транспорт, 1991. – 183 с.
4. Сильченко, Д. Д. Применение современных методов проектирования при организации дорожного движения : учеб. пособие / Д. Д. Сильченко, Р. Р. Санжапов, А. В. Шустов ; ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – 95 с.

УДК 629.086

*Р. Р. Янборисов, В. А. Авдоши, С. В. Ганзин, Р. Р. Санжапов***ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СТАНДАРТНОГО ВИДЕОРЕДА
ТРАНСПОРТНОГО ПОТОКА ДЛЯ АНАЛИЗА СООТВЕТСТВИЯ
СОСТОЯНИЯ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ
ТРЕБОВАНИЯМ БЕЗОПАСНОСТИ ДОРОЖНОГО ДВИЖЕНИЯ****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: radik_yanborisov@mail.ru

В данной статье рассмотрены возможности использования видеокомпьютерного сканирования, обеспечивающие объективное и достоверное получение информации о транспортно-эксплуатационном состоянии автомобильных дорог, для определения степени соответствия фактических потребительских свойств, параметров и характеристик дорог требованиям безопасности дорожного движения.

Ключевые слова: видеокомпьютерное сканирование, состояние дорожного покрытия, безопасность дорожного движения.

*R. R. Yanborisov, V. A. Avdoshin, S. V. Ganzin, R. R. Sanzhapov***POSSIBILITIES OF USING A STANDARD TRAFFIC FLOW
VIDEO SEQUENCE FOR ANALYZING THE COMPLIANCE
OF A ROAD CONDITION WITH ROAD SAFETY REQUIREMENTS****Volgograd State Technical University**

This article discusses the possibility of using video computer scanning, providing objective and reliable information about the transport and operational condition of roads, to determine the degree of compliance with the actual consumer properties, parameters and characteristics of roads to road safety requirements.

Keywords: video computer scan, road surface condition, road safety.

Введение

Повышение безопасности дорожного движения - одна из целей внедрения видеокомпьютерного сканирования транспортных потоков на автомобильных дорогах. Разработка и совершенствование интеллектуальных транспортных систем способствует снижению смертности на дорогах в первую очередь за счет обеспечения безопасности функционирования транспортного средства в системе «водитель–автомобиль–дорога–среда», учитывающая взаимодействия всех элементов в системе, при этом оценка состояния дороги до сих пор остается наиболее трудозатратной и сложной.

Актуальность статьи состоит в том, что предполагаемые подходы к оценке транспортно-эксплуатационного состояния дороги позволят более быстро и экономично оценить соответствие дороги требованиям безопасности за счет своевременного обнаружения и контроля дефектов дорожного покрытия с помощью системы видеокомпьютерного сканирования.

В ходе работ по оценке состояния покрытий автомобильных дорог осуществляют сбор, ана-

лиз и оценку информации по следующим показателям, параметрам и характеристикам:

- состояние дорожного покрытия (наличие, вид, расположение и характеристика дефектов);
- дорожная разметка, ее соответствие проектной документации, отклонение геометрии нанесенной разметки от требований ГОСТ 51256-2018, степень износа дорожной разметки.

Методика проведения оценки состояния покрытий автомобильных дорог включает проведение видео-сканирования транспортного потока в прямом и обратном направлении.

При этом, ширина видеозахвата будет зависеть:

- от фокусного расстояния камеры.
- от чувствительного элемента матрицы.

Данная методика основана на визуальном контроле траектории движения автомобиля и дает косвенную оценку состояния дороги.

Методика включает следующие шаги.

Шаг 1. Исходный видеоматериал разделяется по кадрам для точного определения траектории движения автомобиля.

Шаг 2. По раскадровке, на каждом кадре, определяется отклонение автомобиля от центра полосы движения. При определении алгоритма расчета наличия дефектов покрытия, на тестовом участке заранее определяются положение дефектов. На основании рассчитанной траектории и положения повреждений дорожного по-

лотна устанавливается взаимосвязь этих параметров, которая затем включается в алгоритм расчета поиска дефектов.

На рис. 1 показано смещение автомобиля (l_i) со своей полосы при наличии повреждения покрытия на своей полосе движения. Зеленым цветом выделены дефекты дорожного полотна.

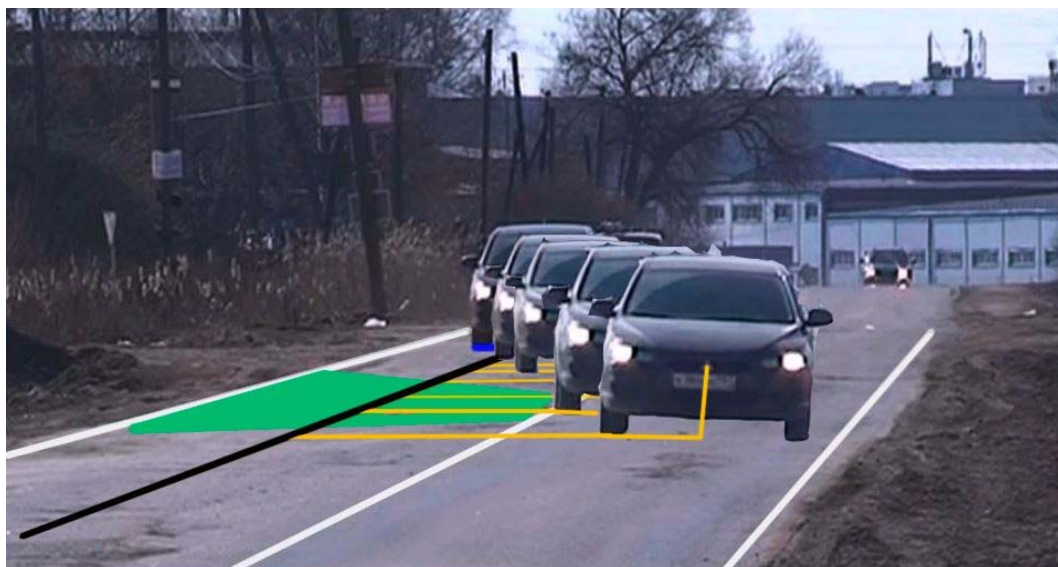


Рис. 1. Траектория движения автомобиля при объезде повреждения дороги

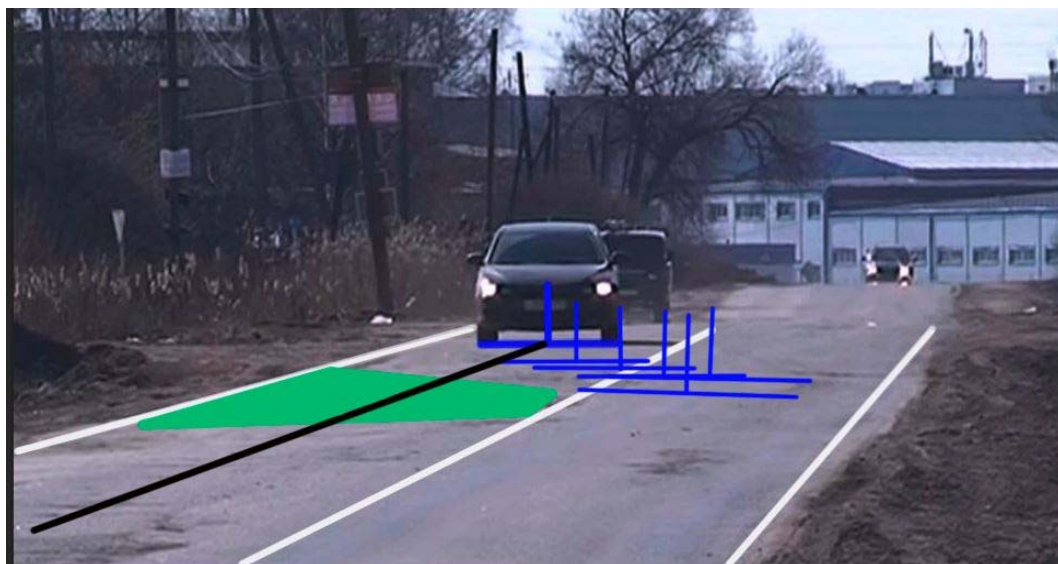


Рис. 2. Траектория смещения

На рис. 2 показана траектория смещения автомобиля со своей полосы из-за повреждений дорожного полотна

На рис. 3 показаны сравнение траектории автомобиля при различных видах повреждений.

Синим цветом выделены основные габариты

автомобиля, розовым цветом обозначены границы отклонения траектории движения автомобиля от середины полосы при колебности, желтым цветом показаны отклонения при объезде повреждения на каждом створе, превышающие допустимые, зеленым – дефекты дорожного полотна.

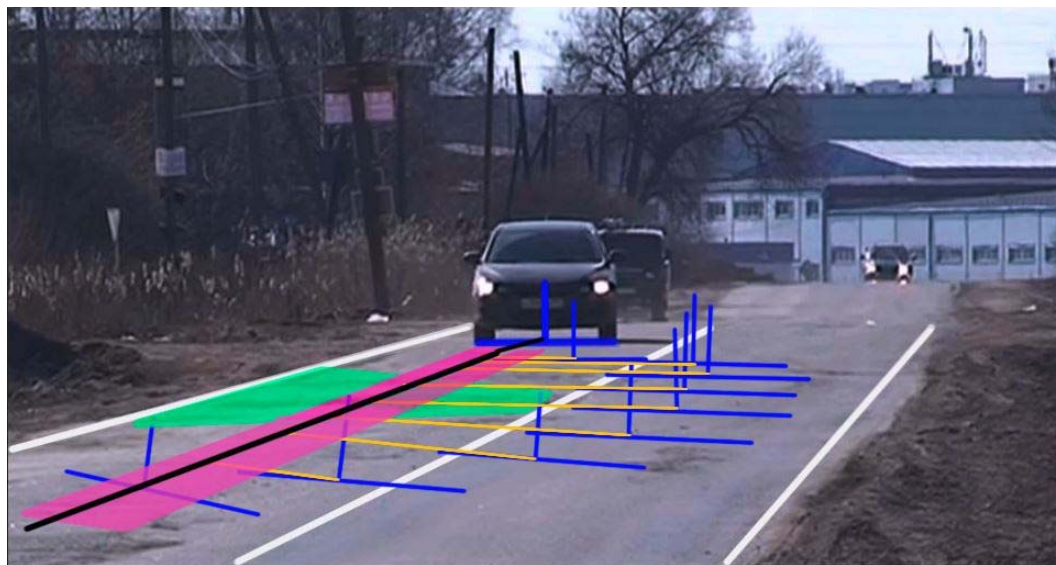


Рис. 3. Траектория смещения автомобиля со своей полосы из-за повреждений дорожного полотна

Шаг 3. Определяется среднее отклонение от прямолинейной траектории по данным проезда не менее тридцати автомобилей в каждом створе измерений (l_{cp}).

$$l_{cp} = \frac{\sum l_i}{n}. \quad (1)$$

Далее рассчитывается среднеквадратическое отклонение траектории движения автомобиля на оцениваемом участке дороги по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (l_i - l_{cp})^2}{n}}, \quad (2)$$

где l_i – положение i -го автомобиля от оси дороги до оси автомобиля; l_{cp} – среднее отклонение от прямолинейной траектории; n – количество зафиксированных отклонений.

На основании полученных значений l_{cp} и S можно сделать вывод о случайности или неслучайности траектории движения автомобиля, а также об отклонениях отдельного автомобиля от нее. Такой подход позволяет определить тип повреждения и степень опасности для безопасности дорожного движения, а также автоматизировать поиск дефектов дорожного покрытия

по видеосканированию транспортного потока.

На примере рис. 1 проиллюстрируем методику оценки транспортно-эксплуатационного состояния дороги. В таблице приведены результаты обработки движения отдельного автомобиля при помощи описанной выше методики. В первом столбце указывается номер створа сканируемого автомобиля. Во втором столбце указывается количество зафиксированных отклонений. В третьем столбце указывается среднее отклонение от прямолинейной траектории. В четвертом столбце указывается квадрат отклонения автомобиля от средней траектории.

Исходя из расчетов можно сделать следующие выводы: примерный интервал среднеквадратичного отклонения S для определения наличия колеяности, находится в следующих границах: для легковых [1,35...3,10], для грузовых и автобусов [1,25...2,25], а для единичных дефектов дорожного покрытия среднеквадратичное отклонения S может принимать значения меньше 0,5, а l_{cp} – 3...4 м. Однако для получения более точных значений требуются дальнейшие исследования.

Результаты обработки геометрии траектории автомобиля

Номер створа движения i -го автомобиля, n	Положение автомобиля от оси дороги до оси автомобиля, l_i	Среднее отклонение от прямолинейной траектории, l_{cp}	Отклонение автомобиля $(l_i - l_{cp})^2$, м ²
1	0,25	0,7	0,101
2	0,30		0,089
3	0,30		0,089
4	0,35		0,078
5	0,35		0,078

Окончание таблицы

Номер створа движения i -го автомобиля, n	Положение автомобиля от оси дороги до оси автомобиля, l_i	Среднее отклонение от прямолинейной траектории, l_{cp}	Отклонение автомобиля $(l_i - l_{cp})^2$, м ²
6	0,40	0,7	0,067
7	0,50		0,045
8	0,50		0,045
9	0,60		0,022
10	0,70		0
11	-0,80		0,34
12	-0,85		0,35
13	-0,90		0,4
14	-1		0,4
15	-1,10		0,402
16	-1,20		0,425
17	-1,15		0,414
18	-1,10		0,402
19	-1		0,38
20	-1		0,38

Таким образом, данная методика позволяет не только обнаружить повреждения дорожного покрытия, но и определить характер повреждений. Значимость данной методики усиливает тот факт, что колеиность, как фактор безопасности дорожного движения, включена в новую редакцию ГОСТ Р 50597-2017.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дороги автомобильные общего пользования. Дорожные покрытия. Методы измерения геометрических размеров повреждений [Электронный ресурс]: ГОСТ 32825-2014. – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200117775>.
2. Устройства для анализа и оценки состояния дорож-

ного покрытия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://moluch.ru/conf/tech/archive/7/2149/>

3. ГИС ПАНОРАМА - Проекты. Дорожное хозяйство. Программно-аппаратный комплекс видеопаспортизации дорог «СВПД» [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <https://gisinfo.ru/projects/29.htm>

4. Программное обеспечение. Программно-измерительный комплекс «Дорога-2007» («Дорога-ПРО») [Электронный ресурс]: – Режим доступа: <http://rdt.ru/taxonomy/term/8>

5. Программное обеспечение. Программно-аппаратный комплекс «Видео» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://rdt.ru/taxonomy/term/8>

6. ДорТехПроект+. Диагностика автодорог [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://dtproekt.ru/index.php/7/2149/>

7. Чванов, В. В. Методы оценки и повышения безопасности дорожного движения с учетом условий работы водителя / В. В. Чванов. – М.: ИНФРА – М, 2010. – 416 с.

Редактор РИО, ответственный за выпуск:
В. В. Свитачева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77–64543 от 22 января 2016 г.
Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель:

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

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ)
Телефон: гл. редактор – (8442) 23-00-76
E-mail: rector@vstu.ru

Темплан 2019 г. Поз. № 21ж. Дата выхода в свет 27.03.2019 г. Формат 60 x 84 1/8.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 7,90. Уч.-изд. л. 7,60.

Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ №
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены РИО ИУНЛ ВолГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.
Отпечатано в типографии ИУНЛ ВолГТУ
400005, г. Волгоград, пр. В. И. Ленина, 28, корп. 7.