

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 2 (39)
2022



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ





Издается
с января 2004 г.

ISSN 2500-0586

Главный редактор журнала

В. И. Лысак – академик РАН,
д-р техн. наук, профессор

Редакционная коллегия:

И. И. Артюхов – д.т.н., проф., СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
Е. В. Балакина – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. В. Баранов – д.ф.-м.н., проф.,
РГУ нефти и газа, г. Москва
А. Б. Голованчиков – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. Е. Городецкий – д.т.н., проф., ИПМаш
РАН, г. Санкт-Петербург
А. П. Дармания – д.т.н., проф. ВГАУ,
г. Волгоград
А. М. Иванов – д.т.н., проф.,
МГТУ (МАДИ), г. Москва
А. В. Келлер – д.т.н., проф. НАМИ, г. Москва
В. В. Коротяев – д.т.н., проф., ИТМО,
г. Санкт-Петербург
Г. О. Котиев – д.т.н., проф., МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. А. Львов – д.т.н., проф., СГТУ
им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
Мертен Клеменс – д.т.н., проф.,
университет г. Штутгарт, Германия
В. А. Марков – д.т.н., проф., МГТУ
им. Н. Э. Баумана, г. Москва
А. Е. Новиков – д.т.н., проф., ВолгГТУ
Б. В. Скворцов – д.т.н., проф., СНИУ
им. академика С. П. Королева, г. Самара
Е. А. Федянов – д.т.н., проф., ВолгГТУ
В. Т. Фомичев – д.т.н., проф., ВолгГТУ
А. Н. Шилин – д.т.н., проф., ВолгГТУ

Ответственный секретарь
П. С. Васильев – к.т.н., доц., ВолгГТУ

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

Тел. издательства ВолгГТУ:

+7 (8442) 24-84-08

+7 (8442) 24-84-05

e-mail: zavrio@vstu.ru

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

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

№ 2 (39)

Июнь

2022

УЧРЕДИТЕЛЬ:

**ФГБОУ высшего образования
«Волгоградский государственный технический
университет»**

Периодичность: четыре раза в год

Адрес редакции:

РФ, 400005, Волгоград, пр. В.И. Ленина, 28

Гл. редактор: телефон: +7 (8442) 23-00-76

e-mail: rector@vstu.ru

Отв. секретарь: телефон: +7 (8442) 24-84-31

e-mail: pahp@vstu.ru

Официальный сайт Учредителя: www.vstu.ru

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Волгоградского государственного технического университета

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

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

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

Статьи печатаются бесплатно



Published since
January 2004 г.

ISSN 2500-0586

Editor-in-chief

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

Editorial Board:

I. I. Artuchov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU., Saratov
E. V. Balakina – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. V. Baranov – D. Sc. (Physical and Math.),
Prof., Gubkin University, Moscow
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. E. Gorodetskij – D. Sc. (Engineering),
Prof., IPME, St. Petersburg
A. P. Darmanyan – D. Sc. (Engineering),
Prof. VSAU, Volgograd
A. M. Ivanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
MADI, Moscow
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering), Prof.,
NAMI, Moscow
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
ITMO University, St. Petersburg
G. O. Kotiev – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
SSTU., Saratov
M. Clemens – D. Sc. (Engineering), Prof.,
University of Stuttgart, Germany
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
BMSTU, Moscow
A. E. Novikov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. V. Skvortsov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
Samara University, Samara
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof.,
VSTU, Volgograd
B. T. Fomichev – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering),
Prof., VSTU, Volgograd

Executive Secretary
P. S. Vasilyev – PhD, Associate Prof.

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

VSTU Publisher tel.:

+7 (8442) 24-84-08

+7 (8442) 24-84-05

e-mail: zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,

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

Energo- i resursosberezhenie:

Promyshlennost' i transport

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

Journal is registered in the Federal Service for supervision
of communications, information technology and mass media
(Roscomnadzor) registration certificate:
ПН .N° (ФЦ77-64543, registration date: 22 January 2016

№ 2 (39)
June
2022

FOUNDER:

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

Periodicity: four times per year

Editorial office address:

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

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

Official website: www.vstu.ru

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

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

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

*When reprint the materials, the citation to the journal «Energo- i
resursosberezhenie: promyshlennost' i transport» is obligatory*

The articles are published for free.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

- | | |
|-----------------------|---------------------|
| Аль-Сумайдаи Ф. Р. 50 | Кутейников П. Д. 23 |
| Балясников И. В. 38 | Ляшенко М. В. 45 |
| Барашков И. С. 31 | Меренцов Н. А. 12 |
| Васильев П. С. 6 | Мустафа М. Н. 31 |
| Голованчиков А. Б. 12 | Рева Л. С. 6 |
| Дементьев С. С. 23 | Удиванов Е. С. 45 |
| Ежиков А. А. 6 | Шагарова А. А. 16 |
| Иванова И. С. 16 | Шайхуллин А. М. 41 |
| Искалиев А. И. 45 | Шеховцов В. В. 45 |
| Карьялайнен А. Э. 41 | Шилин А. Н. 31 |
| Клементьев Е. В. 45 | Шурак А. А. 12 |
| Климанова В. А. 12 | |

AUTHOR INDEX

- | | |
|------------------------|----------------------|
| Al-Sumaidae F. R. 50 | Lyashenko M. V. 45 |
| Baljasnikov I. V. 38 | Merentsov N. A. 12 |
| Barashkov I. S. 31 | Mustafa M. N. 31 |
| Demytyev S. S. 23 | Reva L. S. 6 |
| Golovanchikov A. B. 12 | Shagarova A. A. 16 |
| Iezhikov A. A. 6 | Shajhullin A. M. 41 |
| Iskaliev A. I. 45 | Shekhovtsov V. V. 45 |
| Ivanova I. S. 16 | Shilin A. N. 31 |
| Karjalajnen A. Je. 41 | Shurak A. A. 12 |
| Klementyev E. V. 45 | Udivanov E. S. 45 |
| Klimanova V. A. 12 | Vasilyev P. S. 6 |
| Kuteynikov P. D. 23 | |

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

<i>Васильев П. С., Рева Л. С., Ежиков А. А.</i> Повышение эффективности работы утилизаторов тепла отходящих газов на основе технологии капельного кипения.....	6
<i>Голованчиков А. Б., Шурак А. А., Меренцов Н. А., Климанова В. А.</i> Моделирование работы кожухотрубного теплообменника типа «конденсатор-нагреватель» с учетом энерго- и ресурсосбережения.....	12
<i>Шагарова А. А., Иванова И. С.</i> Анализ работы инерционных пылеуловителей в производстве технического углерода.....	16
<i>Дементьев С. С., Кутейников П. Д.</i> Многофункциональная система мониторинга воздушных линий электропередачи.....	23
<i>Шилин А. Н., Мустафа М. Н., Барашков И. С.</i> Морфологический анализ датчиков для низкочастотного вибропреобразователя на основе эффекта левитации.....	31

Часть 2. ТРАНСПОРТ

<i>Балясников И. В.</i> Интеграция сенсорного обеспечения автомобиля как способ снижения энергопотребления.....	38
<i>Карьялайнен А. Э., Шайхуллин А. М.</i> Сложности динамического расчета пневматической антиблокировочной тормозной системы.....	41
<i>Удиванов Е. С., Ляшенко М. В., Шеховцов В. В., Клементьев Е. В., Искалиев А. И.</i> Вибрации в конструкциях автомобилей скорой медицинской помощи.....	45
<i>Аль-Сумайдаи Ф. Р.</i> Повышение эффективности торможения автомобиля увеличением мощности насосных потерь в автомобильном двигателе.....	50
К сведению авторов.....	55

CONTENTS

Part I. INDUSTRY

<i>Vasilyev P. S., Reva L. S., Iezhikov A. A.</i> Improving the efficiency of waste gas heat recovery units based on drop boiling technology.....	6
<i>Golovanchikov A. B., Shurak A. A., Merentsov N. A., Klimanova V. A.</i> Simulation of the operation of a shell and tube heat exchanger of the type «condenser-heater» taking into account energy and resource saving.....	12
<i>Shagarova A. A., Ivanova I. S.</i> Analysis of inertial dust collectors operation in the production of carbon black.....	16
<i>Dementyev S. S., Kuteynikov P. D.</i> Multifunctional monitoring system for overhead power lines.....	23
<i>Shilin A. N., Mustafa M. N., Barashkov I. S.</i> Morphological analysis of sensors for a low-frequency vibroconverter based on the levitation effect.....	31

Part II. TRANSPORT

<i>Baljasnikov I. V.</i> Car sensor integration as a way to reduce energy consumption.....	38
<i>Karjalainen A. Je., Shajhullin A. M.</i> Difficulties of dynamic calculation of pneumatic anti-lock braking system.....	41
<i>Udivanov E. S., Lyashenko M. V., Shekhovtsov V. V., Klementyev E. V., Iskaliev A. I.</i> Vibrations in ambulance vehicle design.....	45
<i>Al-Sumaidae F. R.</i> Increasing the efficiency of vehicle braking by increasing the power of pump losses in the engine.....	50

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 66.048.911

П. С. Васильев, Л. С. Рева, А. А. Ежиков

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ УТИЛИЗАТОРОВ ТЕПЛА ОТХОДЯЩИХ ГАЗОВ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ КАПЕЛЬНОГО КИПЕНИЯ*

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

Обоснована необходимость рационального использования вторичных энергетических ресурсов при создании безотходных технологий за счет утилизации тепла отходящих газов. Указаны преимущества технологии капельного кипения с точки зрения инженерного проектирования. Представлены описание конструкции и основы методики расчета эффективного утилизатора тепла отходящих газов, работающего по технологии капельного кипения. Приведен пример расчета и детально проанализированы полученные результаты.

Ключевые слова: вторичные энергетические ресурсы, котел-утилизатор, капельное кипение, псевдооживление, энергоэффективность.

P. S. Vasilyev, L. S. Reva, A. A. Iezhikov

IMPROVING THE EFFICIENCY OF WASTE GAS HEAT RECOVERY UNITS BASED ON DROP BOILING TECHNOLOGY

Volgograd State Technical University

The necessity of rational use of secondary energy resources in the creation of non-waste technologies due to the utilization of heat from exhaust gases is substantiated. The advantages of drop boiling technology from the point of view of engineering design are indicated. A description of the design and the basis of the methodology for calculating an efficient exhaust gas heat exchanger operating using drop boiling technology is presented. An example of calculation is given and the results obtained are analyzed in detail.

Keywords: secondary energy resources, waste heat boiler, drip boiling, fluidization, energy efficiency.

В мировом промышленном комплексе доля потребления тепловой энергии составляет около 70–75 % от общего энергопотребления. Большинство промышленных предприятий получают тепловую энергию от ТЭЦ, вырабатывающих ее за счет сгорания топлива.

При создании безотходных производств особое значение приобретает утилизация вторичных энергетических ресурсов, рациональное использование которых способствует значительному снижению эксплуатационных затрат на топливо и максимальному уменьшению теплового загрязнения окружающей среды. Например, для нефтеперерабатывающих заводов

вторичные энергетические ресурсы составляют 85 % от первичных, поставляемых с ТЭЦ, и их повторное использование в разы дешевле по отношению к непосредственному использованию первичных ресурсов. В таких производствах роль утилизаторов тепла, как правило, выполняют теплообменные аппараты, называемые котлами-утилизаторами, в которых осуществляется процесс кипения [1; 2].

При этом наиболее сложной и актуальной задачей является утилизация тепла отходящих газов, так как в этом случае интенсивность теплового процесса, обуславливающая размеры и стоимость теплообменного оборудования, в ос-

© Васильев П. С., Рева Л. С., Ежиков А. А., 2022.

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

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

новном определяется заведомо низкой интенсивностью теплоотдачи со стороны газа.

Поиск конструкторско-технологического решения данной задачи и представляет собой цель настоящей работы.

Одним из современных и наиболее эффективных способов повышения интенсивности теплоотдачи является капельное кипение – испарение в режиме кипения жидкости, периодически подаваемой на поверхность теплообмена в виде капель. Для капельного кипения воды под атмосферным давлением максимальные значения температурного напора составляют 140–160 °С, коэффициента теплоотдачи 90–100 кВт/(м²·К), а удельного теплового потока 10–12 МВт/м² [3–5].

Это обстоятельство позволяет вести инженерное проектирование теплообменных аппаратов, работающих по технологии капельного

кипения, при условии постоянства удельного теплового потока и переменной температуры поверхности теплообмена. В свою очередь, это позволяет поддерживать высокую интенсивность теплового процесса, обеспечивающую уменьшение размеров и стоимости технологических аппаратов с газовыми теплоносителями.

Кроме того, для капельного кипения практически полностью отсутствует тепловая инерционность процесса, в связи с чем он не сопровождается такими нежелательными технологическими последствиями, как резкое падение коэффициента теплоотдачи, перегрев поверхности теплообмена, паровой взрыв [5].

В качестве эффективного утилизатора тепла отходящих газов, работающего по технологии капельного кипения, предлагается теплообменный аппарат, схема конструкции которого показана на рис. 1 [6]. При этом использование

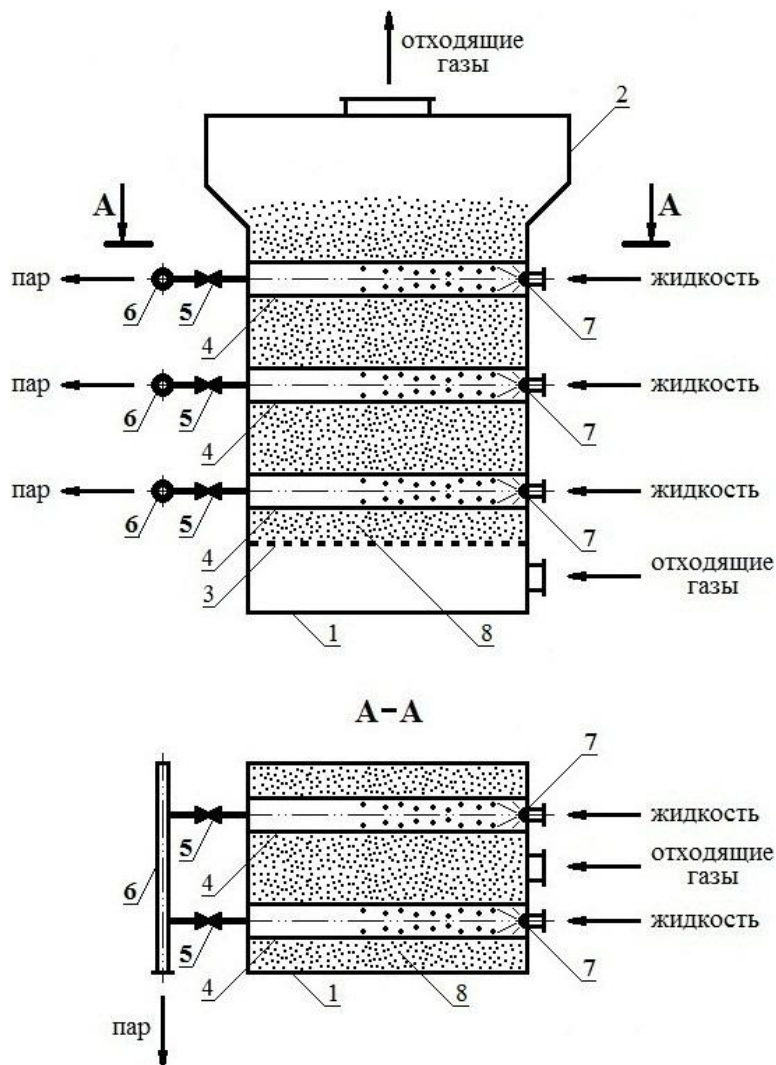


Рис. 1. Схема конструкции теплообменного аппарата для утилизации тепла отходящих газов, работающего по технологии капельного кипения [6]:

1 – вертикальный корпус; 2 – расширение; 3 – газораспределительное устройство; 4 – теплообменная труба; 5 – дроссельное устройство; 6 – паровой коллектор; 7 – распыливающая форсунка; 8 – слой мелкозернистого материала

псевдооживленного слоя мелкозернистого материала в межтрубном пространстве аппарата позволяет повысить интенсивность теплоотдачи со стороны газа [7; 8].

$$t_{cm,x,min} = 1,2 \cdot t_{kun}, \quad (1)$$

$$t_{cm,x,max} = 0,9 \cdot t_{kun} + \sqrt{\frac{(t_{kun} - t_{x,h}) \cdot (t_{cm,x,min} - t_{kun})}{9,671 \cdot 10^{13} \cdot Ra_{min} \cdot Oh^{6,100} \cdot Re_x^{0,317} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{-1,165} \cdot \left(\frac{W_a}{W_\kappa}\right)^{-2,198}}}, \quad (2)$$

где t_{kun} – температура кипения жидкости; $t_{x,h}$ – начальная температура жидкости; Ra_{min} – число Рэлея при $t_{cm,x,min}$; Oh – число Онезорге; Re_x – число Рейнольдса; R_a – среднее арифметическое отклонение профиля поверхности теплообмена; S_m – средний шаг неровностей профиля поверхности теплообмена по средней ли-

Температура поверхности теплообменных труб со стороны кипящей жидкости должна поддерживаться в диапазоне от $t_{cm,x,min}$ до $t_{cm,x,max}$ [5]:

нии; W_a – работа адгезии; W_κ – работа когезии.

Периодичность подачи капель через распыливающие форсунки рассчитывается как $\tau_n = 1,2 \cdot \tau_\kappa$, где τ_κ – время испарения капель единичной подачи жидкости, определяемое из уравнения [3]:

$$Ho = 2,256 \cdot 10^{-29} \cdot Ra^{-1,933} \cdot Oh^{-11,572} \cdot Re_x^{-0,231} \cdot \left(\frac{t_{kun} - t_{x,h}}{t_{cm,x} - t_{kun}}\right)^{0,243} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{1,025} \cdot \left(\frac{W_a}{W_\kappa}\right)^{-2,370}, \quad (3)$$

где Ra – число Рэлея при $t_{cm,x}$.

Поверхность теплопередачи F_m рассчитывается исходя из тепловой нагрузки аппарата, периодичности подачи капель жидкости τ_n и диа-

метра пятна их контакта с поверхностью теплообмена при кипении d_n , определяемого из уравнения (при коэффициенте плотности укладки капель на поверхности 0,4) [4]:

$$\Gamma = 14,829 \cdot Ra^{0,045} \cdot Oh^{0,498} \cdot Re_x^{0,127} \cdot \left(\frac{t_{kun} - t_{x,h}}{t_{cm,x} - t_{kun}}\right)^{0,019} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{-0,024} \cdot \left(\frac{W_a}{W_\kappa}\right)^{0,312}. \quad (4)$$

Коэффициент теплоотдачи при капельном кипении определяется из уравнения [5]:

$$Nu_x = 2,924 \cdot 10^9 \cdot Ra^{0,906} \cdot Oh^{3,688} \cdot Re_x^{-0,073} \cdot \left(\frac{t_{kun} - t_{x,h}}{t_{cm,x} - t_{kun}}\right)^{-0,106} \cdot \left(\frac{S_m}{R_a}\right)^{-0,138} \cdot \left(\frac{W_a}{W_\kappa}\right)^{0,700}. \quad (5)$$

Скорость движения отходящих газов в межтрубном пространстве аппарата должна обеспечивать псевдооживление расположенного в нем слоя мелкозернистого материала. При этом для обеспечения максимальной интенсивности теплоотдачи рабочая скорость w_2 должна поддерживаться в диапазоне скоростей от $w_{2,min}$ до $w_{2,max}$, определяемых из уравнений [7; 8]:

$$Re_{z,min} = \frac{Ar}{18 + 5,22 \cdot \sqrt{Ar}}, \quad (6)$$

$$Re_{z,max} = \frac{0,5 \cdot Ar}{18 \cdot \varphi_n^2 + \sqrt{\frac{\varphi_n \cdot \varphi_\phi}{3} \cdot Ar}}, \quad (7)$$

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

Рабочая порозность псевдооживленного слоя мелкозернистого материала также рассчитывается с учетом реальной гидродинамической обстановки в аппарате:

$$\varepsilon = \left(\frac{\sqrt{\frac{\varphi_n \cdot \varphi_\phi}{12} \cdot Re_z} + \sqrt{\frac{\varphi_n \cdot \varphi_\phi}{12} \cdot Re_z^2 + 18 \cdot \varphi_n^2 \cdot Re_z}}{\sqrt{Ar}} \right)^{0,42}, \quad (8)$$

где Re_z – число Рейнольдса при w_z .

Коэффициент теплоотдачи при газовом псевдооживлении складывается из конвективной и лучистой составляющей [7; 8]:

$$\alpha_z = \alpha_{z,k} + \alpha_{z,l}, \quad (9)$$

$$\alpha_{z,k} = 3,27 \cdot \lambda_z^{0,5} \cdot \left(\frac{\mu_z}{\rho_z}\right)^{0,154} \cdot (c_{pч} \cdot \rho_z)^{0,5} \cdot \left(\frac{\rho_z}{\rho_z}\right)^{0,077} \cdot d_z^{-0,231}, \quad (10)$$

$$\alpha_{z,l} = 41,391 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon_z \cdot \varepsilon_{cm} \cdot (273 + t_{cm,z})^3, \quad (11)$$

где ρ_z , μ_z , λ_z – соответственно плотность, вязкость и теплопроводность газа; d_z , ρ_z , $c_{pч}$ – соответственно диаметр, плотность и теплоемкость частиц мелкозернистого материала; ε_z и ε_{cm} – степень черноты частиц мелкозернистого материала и стенки теплообменных труб соответственно; $t_{cm,z}$ – температура поверхности теплообменных труб со стороны газа.

Исходя из практических рекомендаций [8], трубный пучок аппарата комплектуется при заданном диаметре теплообменных труб D таким образом, чтобы расстояние между трубами было равно двум их диаметрам, а расстояние от труб до стенок корпуса – диаметру. Такая компоновка обеспечивает порозность трубного пучка равную 0,913. При этом фиктивная площадь сечения межтрубного пространства связана с поверхностью теплопередачи следующим образом:

$$F_\phi = \frac{3 \cdot F_m}{\pi \cdot m}, \quad (12)$$

где m – число горизонтальных рядов труб в коридорном трубном пучке. Тогда ширина и длина сечения межтрубного пространства аппарата определяются соответственно:

$$B = 3 \cdot n \cdot D, \quad (13)$$

$$A = \frac{F_\phi}{B}, \quad (14)$$

где n – число труб в одном горизонтальном ряду коридорного трубного пучка.

Аналогичным образом определяется и высота трубного пучка:

$$H = 3 \cdot m \cdot D. \quad (15)$$

В таблице приведены основные исходные, справочные данные и результаты модельного расчета утилизатора тепла отходящих газов, в трубном пространстве которого осуществляется процесс капельного кипения воды под атмосферным давлением, а в межтрубном – псевдооживления слоя мелкозернистой огнеупорной керамики. Расчет производился численно на ЭВМ по приведенным выше основным зависимостям (1)–(15) при условии соблюдения равенства удельных тепловых потоков со стороны горячего и холодного теплоносителей.

Из таблицы видно, что для утилизатора тепла отходящих газов, работающего по технологии капельного кипения, необходимая поверхность теплопередачи не превышает 10 м^2 , при этом габариты аппарата не превышают $2,5 \text{ м}$.

При прочих равных условиях, но без использования псевдооживления, на ту же производительность был рассчитан классический кожухотрубчатый теплообменник, для которого необходимая поверхность теплопередачи составила 70 м^2 при длине труб 6 м и диаметре кожуха $0,9 \text{ м}$.

Сравнивая полученные результаты, можно сказать, что предлагаемая конструкция утилизатора тепла отходящих газов в несколько раз более эффективна по сравнению с классической.

Исходные, справочные данные и результаты модельного расчета утилизатора тепла отходящих газов, работающего по технологии капельного кипения

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
1	2	3	4
<i>Исходные данные</i>			
1. Производительность по отходящим газам	кг/ч	G_z	10000
2. Начальная температура отходящих газов	°C	$t_{z,n}$	950
3. Конечная температура отходящих газов	°C	$t_{z,k}$	250
4. Наружный диаметр теплообменных труб	мм	D	250
5. Число труб в одном горизонтальном ряду коридорного трубного пучка	-	n	2
6. Число горизонтальных рядов труб в коридорном трубном пучке	-	m	3
<i>Справочные данные</i>			
1. Температура кипения воды	°C	$t_{кип}$	100
2. Начальная температура воды	°C	$t_{x,n}$	20

Окончание таблицы

1	2	3	4
3. Диаметр капель воды при распыливании через форсунки	мм	d_k	3
4. Линейная скорость подачи капель воды на поверхность теплообмена	м/с	w_k	2,37
5. Среднее арифметическое отклонение профиля поверхности теплообмена	мкм	R_a	2,3
6. Средний шаг неровностей профиля поверхности теплообмена по средней линии	мкм	S_m	170
7. Работа адгезии для воды на поверхности теплообмена	Дж/м ²	W_a	0,10
8. Работа когезии для воды на поверхности теплообмена	Дж/м ²	W_k	0,12
9. Диаметр частиц огнеупорной керамики	мм	$d_{\text{ч}}$	1
10. Коэффициент удельной поверхности частиц огнеупорной керамики	-	φ_n	1,18
11. Коэффициент формы и шероховатости поверхности частиц огнеупорной керамики	-	$\varphi_{\text{ф}}$	1,27
12. Термическое сопротивление загрязнений поверхности теплообмена со стороны кипящей воды	(м ² ·К)/кВт	r_3	0,18
13. Тепловые потери в окружающую среду	%	Π	3
<i>Расчетные параметры</i>			
1. Тепловая нагрузка аппарата	кВт	Q	2235
2. Расход испаряемой воды (получаемого пара)	кг/ч	G_x	3100
3. Минимально допустимая температура поверхности теплообменных труб со стороны кипящей воды	°С	$t_{\text{см,х, min}}$	120,0
4. Максимально допустимая температура поверхности теплообменных труб со стороны кипящей воды	°С	$t_{\text{см,х, max}}$	210,5
5. Рабочая температура поверхности теплообменных труб со стороны кипящей воды	°С	$t_{\text{см,х}}$	147,5
6. Время испарения капель воды единичной подачи	с	τ_k	2,43
7. Периодичность подачи капель воды через распыливающие форсунки	с	τ_n	2,92
8. Диаметр пятна контакта капель кипящей воды с поверхностью теплообмена	мм	d_n	6,36
9. Коэффициент теплоотдачи при капельном кипении	кВт/(м ² ·К)	α_x	19,12
10. Поверхность теплопередачи	м ²	F_m	9,42
11. Минимально допустимая скорость движения отходящих газов в аппарате	м/с	$w_{z, \text{min}}$	1,46
12. Максимально допустимая скорость движения отходящих газов в аппарате	м/с	$w_{z, \text{max}}$	4,16
13. Рабочая скорость движения отходящих газов в аппарате	м/с	w_z	2,22
14. Рабочая порозность псевдооживленного слоя частиц мелкозернистой огнеупорной керамики	м ³ /м ³	ε	0,67
15. Рабочая температура поверхности теплообменных труб со стороны газового псевдооживления	°С	$t_{\text{см,з}}$	244,5
16. Конвективная составляющая коэффициента теплоотдачи при газовом псевдооживлении	кВт/(м ² ·К)	$\alpha_{z, \text{к}}$	0,88
17. Лучистая составляющая коэффициента теплоотдачи при газовом псевдооживлении	кВт/(м ² ·К)	$\alpha_{z, \text{л}}$	0,04
18. Коэффициент теплоотдачи при газовом псевдооживлении	кВт/(м ² ·К)	α_z	0,92
19. Средняя движущая сила процесса теплопередачи	°С	$\Delta t_{\text{ср}}$	403,6
20. Коэффициент теплопередачи	кВт/(м ² ·К)	K	0,59
21. Фиктивная площадь сечения межтрубного пространства аппарата	м ²	$F_{\text{ф}}$	3,00
22. Длина сечения межтрубного пространства аппарата	м	A	2,03
23. Ширина сечения межтрубного пространства аппарата	м	B	1,48
24. Высота трубного пучка	м	H	2,21
25. Масса загружаемого в аппарат слоя мелкозернистой огнеупорной керамики	т	M	7,06
26. Гидравлическое сопротивление псевдооживленного слоя	кПа	ΔP	21,09

На рис. 2 и 3 приведены графики зависимости габаритов межтрубного пространства аппарата и массы загружаемого в аппарат слоя мел-

козернистой огнеупорной керамики от наружного диаметра теплообменных труб соответственно.

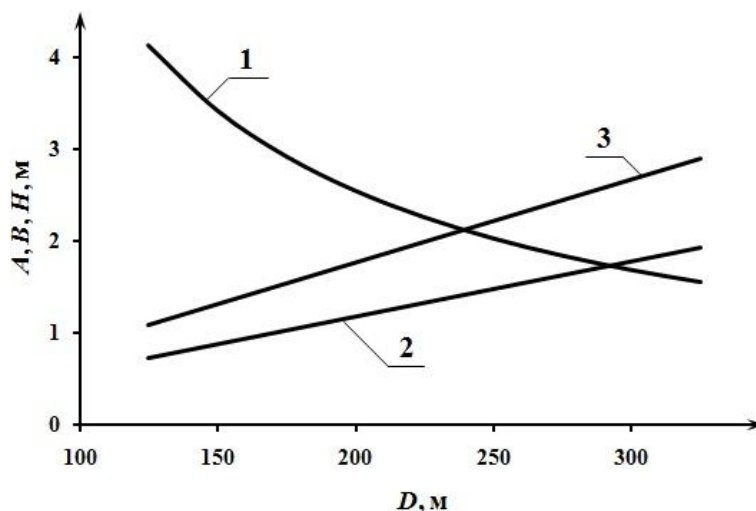


Рис. 2. Графики зависимости габаритов межтрубного пространства теплообменного аппарата для утилизации тепла отходящих газов, работающего по технологии капельного кипения, от наружного диаметра теплообменных труб:

$$1 - A = f(D); 2 - B = f(D); 3 - H = f(D)$$

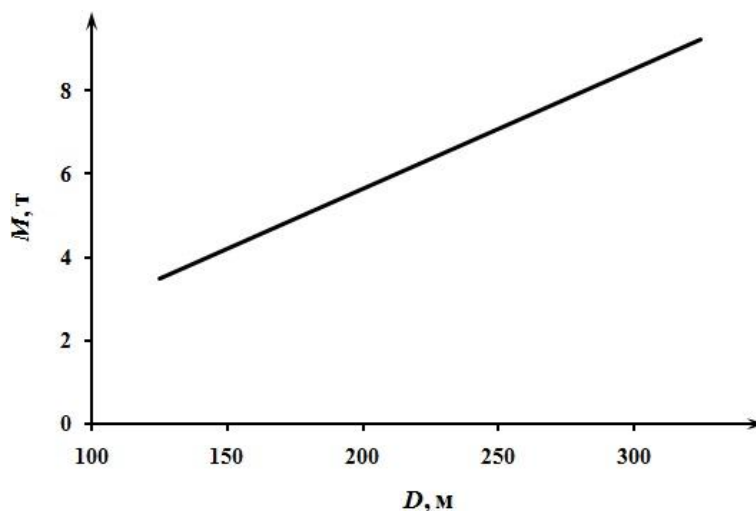


Рис. 3. График зависимости массы загружаемого в аппарат слоя мелкозернистой огнеупорной керамики от наружного диаметра теплообменных труб $M = f(D)$

Из рис. 2 следует, что габариты аппарата, наиболее оптимальные с точки зрения компактности и технологичности изготовления его конструкции, соответствующие максимально близким друг к другу значениям длины, ширины и высоты межтрубного пространства, обеспечиваются при диаметре теплообменных труб $D = 225-275$ мм; а из рис. 3 — что при этом масса загружаемого в аппарат слоя мелкозернистого огнеупорного материала составляет соответственно 6,34–7,78 т.

Таким образом, полученные результаты по-

зволяют вести инженерное проектирование оптимальных конструкций эффективных утилизаторов тепла отходящих газов, работающих по технологии капельного кипения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Энергоэкономические аспекты химико-технологических систем: учеб. пособие / С. Н. Михайлов [и др.]. — Казань: КГТУ, 2000. — 114 с.
2. Теплоэнергетика и теплотехника: справочник. Кн. 4. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника / под общ. ред. В. А. Григорьева, В. М. Зорина. — 2-е изд., перераб. — Москва: Энергоатомиздат, 1991. — 588 с.

3. Определение времени испарения кипящей на поверхности нагрева капли / П. С. Васильев [и др.] // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 5. – С. 121–126.

4. Определение площади пятна контакта кипящей на поверхности нагрева капли жидкости / П. С. Васильев [и др.] // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19, № 13. – С. 116–123.

5. Экспериментальное исследование теплоотдачи при кипении капли жидкости на поверхности нагрева / П. С. Васильев [и др.] // Вестник технологического университета. –

2017. – Т. 20, № 22. – С. 28–33.

6. Пат. № 206081 РФ, МПК В01D1/22. Рева Л. С., Васильев П. С., Рева С. Л., Голованчиков А. Б., Шурак А. А., Ежиков А. А. – заявл. 16.03.2021; опубл. 19.08.2021.

7. Аэров, М. Э. Гидравлические и тепловые основы работы аппаратов со стационарным и кипящим зернистым слоем / М. Э. Аэров, О. М. Тодес. – Ленинград: Химия, 1968. – 247 с.

8. Расчеты аппаратов кипящего слоя: справочник / под ред. И. П. Мухленова, Б. С. Сажина, В. Ф. Фролова. – Ленинград: Химия, 1986. – 352 с.

УДК 697.932

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

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ КОЖУХОТРУБНОГО ТЕПЛООБМЕННИКА
ТИПА «КОНДЕНСАТОР-НАГРЕВАТЕЛЬ»
С УЧЕТОМ ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ**

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: a-shurak2@mail.ru

Приведены результаты моделирования и оптимизации кожухотрубного теплообменника по критерию приведенных затрат, включающему в себя капитальные затраты, оборотные средства и энергетические затраты. Определены оптимальные конструктивные и технологические параметры процесса, представлены функции изменения суммарных годовых затрат от диаметра и длины труб трубного пучка.

Ключевые слова: моделирование, оптимизация, капитальные затраты, оборотные средства, теплообмен, конденсатор, теплопередача.

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

**SIMULATION OF THE OPERATION OF A SHELL AND TUBE
HEAT EXCHANGER OF THE TYPE «CONDENSER-HEATER»
TAKING INTO ACCOUNT ENERGY AND RESOURCE SAVING**

Volgograd State Technical University

The results of modeling and optimization by the criterion of reduced costs, including capital costs, working capital and energy costs, are presented. The optimal design and technological parameters of the process are determined, and the functions of the change in the total annual costs from the diameter and length of the tube bundle pipes are presented.

Keywords: modeling, optimization, capital costs, working capital, heat transfer, condenser, heat transfer.

Растущие экологические требования, предъявляемые к теплообменным аппаратам, в том числе кожухотрубным, создают условия, при которых необходима модернизация уже установленного на производствах оборудования, а рост цен на энергоносители способствует разработке аппаратов, в которых суммарные затраты сведены к минимуму [1; 2].

Теплообменные аппараты типа «нагреватель-конденсатор» получили широкое распространение в химической промышленности, особенно в органическом синтезе для предварительного подогрева реакционных масс [3–5].

Целью работы является определение оптимального диаметра и длины труб в трубном

пучке кожухотрубного теплообменника в зависимости от критерия приведенных затрат.

В табл. 1 приведены исходные и справочные данные для расчета одноходового кожухотрубного теплообменника, в котором конденсация водяных паров проходит в межтрубном пространстве, а подогрев органической жидкости (70 %-ного водного раствора глицерина) осуществляется в трубах трубного пучка.

После проведения расчетов при различных значениях длин труб трубного пучка были получены значения основных геометрических и экономических параметров, представленные в табл. 2.

Таблица 1

Исходные и справочные данные кожухотрубного теплообменника типа «конденсатор-нагреватель» [3]

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
Исходные данные			
Производительность по нагреваемой жидкости	кг/час	G	5000
Температура стирола на входе в трубное пространство	°С	t_n	20
Температура стирола на выходе из трубного пучка	°С	t_k	100
Давление греющего пара	ат.	p_d	2
Температура греющего пара	°С	t_d	119,6
Справочные данные			
Удельная теплота конденсации греющего пара	кДж/кг	r_0	2710
Теплоемкость раствора глицерина	кДж/(кг·К)	C	1,452
Плотность раствора глицерина при средней температуре	кг/м ³	ρ	181
Вязкость раствора глицерина при средней температуре	Па·с	μ	0,0225
Теплопроводность раствора глицерина	Вт/(м·К)	λ	0,352

Таблица 2

Расчетные параметры кожухотрубного теплообменника типа «конденсатор-нагреватель» в зависимости от длины труб трубного пучка

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина			
			1	2	3	4
Длина труб трубного пучка	м	L	1,5	2	4	6
Диаметр кожуха	м	D_k	0,716	0,604	0,522	0,411
Количество труб трубного пучка	шт.	n	320	218	80	47
Общие потери давления трубного пучка	ат.	P_0	1	1,331	1,461	2,192
Мощность насоса	кВт	N	0,12	0,16	0,176	0,264
Внутренний расчетный диаметр труб трубного пучка	м	d_g	0,015	0,015	0,02	0,02
Общие годовые затраты	руб./год	$C_{об}$	3857	4167	4805	5556

Основными экономическими параметрами были выбраны годовые затраты на: стоимость электроэнергии (связаны со стоимостью теплообменника, насосов и компрессоров); оборотные средства (связаны с ремонтом и обслуживанием оборудования).

Суммарные общие годовые затраты рассчитывались как:

$$C_{об} = C_e + C_{ак} + C_{ос},$$

где C_e – годовые затраты на стоимость электроэнергии; $C_{ак}$ – годовые затраты связанные со стоимостью теплообменника, насосов и компрессоров; $C_{ос}$ – годовые затраты на оборотные средства, связанные с ремонтом и обслуживанием.

Годовая стоимость электроэнергии рассчитывалась по следующей формуле:

$$C_e = \frac{24 \cdot n_p \cdot N \cdot c_l}{\eta},$$

где $n_p = 300$ – число рабочих дней в году; N – мощность насоса; c_l – стоимость 1 кВт·ч электроэнергии; η – КПД насосов, компрессоров и вентиляторов.

Годовые затраты на амортизационные отчисления, связанные со стоимостью теплообменника, насосов и компрессоров:

$$C_{ак} = 1,3 \cdot A_k \cdot \rho \cdot \pi \cdot \delta_c \cdot (n \cdot L \cdot d_g + 2 \cdot D_k \cdot L),$$

где A_k – стоимость амортизационных отчислений за 1 кг массы теплообменника в год; δ_c – толщина стенки труб трубного пучка.

Годовые затраты на оборотные средства, связанные с ремонтом и обслуживанием:

$$C_{ос} = C_{ак} \cdot \left(\frac{A_{ос}}{A_k} \right),$$

где $A_{ос}$ – стоимость оборотных средств за 1 кг массы в год.

По результатам табл. 2 построен график зависимости общих затрат от длины труб трубного пучка, причем диаметр труб трубного пучка определялся из стандартизированного ряда (рис. 1).

Из графика, представленного на рис. 1, и данных табл. 2 видно, что наиболее выгодным с точки зрения энерго- и ресурсосбережения является теплообменник с длиной труб $l = 1,5$ м.

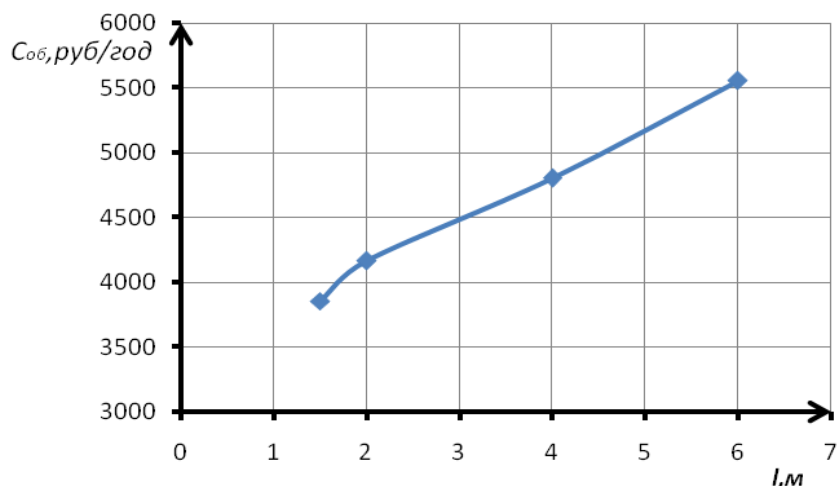


Рис. 1. График зависимости оптимальных годовых затрат от длины труб трубного пучка

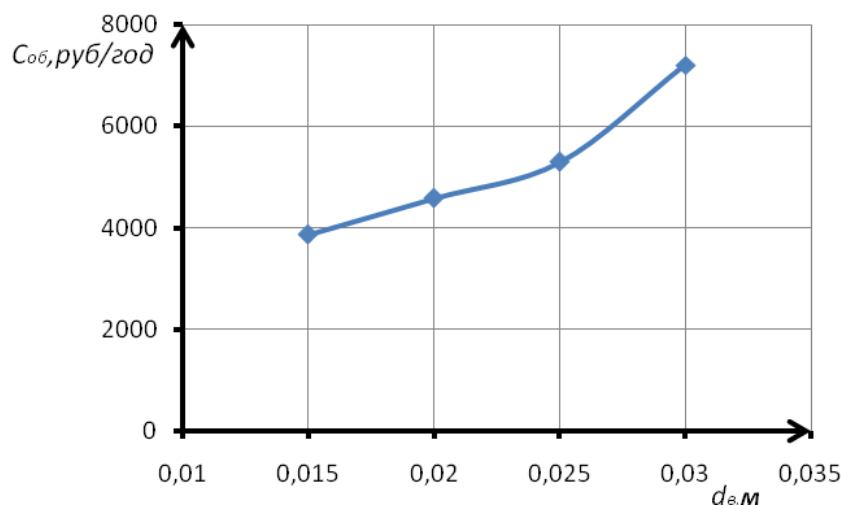


Рис. 2. График зависимости оптимальных годовых затрат от диаметра труб трубного пучка

В табл. 3 представлены основные технологические и экономические расчетные параметры для оптимального теплообменника, а на рис. 2 дана графическая интерпретация изменения

общего годовых оборотных средств кожухотрубного теплообменника типа «конденсатор-нагреватель» в зависимости от внутреннего диаметра труб трубного пучка.

Таблица 3

**Расчетные параметры оптимального кожухотрубного теплообменника
типа «конденсатор-нагреватель»**

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
Диаметр кожуха	м	D_k	0,716
Задаваемая поверхность теплопередачи	m^2	F_c	24,2
Расчетная поверхность теплопередачи	m^2	F	24,1
Коэффициент теплопередачи	Вт/($m^2 \cdot K$)	K_t	157,7
Число труб в трубном пучке	-	n	320
Общее гидравлическое сопротивление	ат	Δp_0	1
7. Общая мощность насосов и компрессоров	кВт	N_0	0,12
8. Годовая стоимость электроэнергии	руб./год	C_e	2066
9. Амортизационные отчисления на капитальные затраты (трубопровод, насосы и компрессоры)	руб./год	$C_{ак}$	1047
10. Стоимость оборотных средств за ремонт и обслуживание	руб./год	$C_{ос}$	744
11. Доля стоимости электроэнергии в общих годовых затратах	-	O_e	0,53
12. Доля стоимости амортизации на капитальные затраты	-	$O_{ак}$	0,27
13. Доля стоимости оборотных средств	-	$O_{ос}$	0,2

Таким образом, результаты моделирования теплообменника типа «конденсатор-нагреватель» для нагревания 70 %-ного водного раствора глицерина по критерию приведенных затрат, включающего в себя капитальные затраты, оборотные средства и энергетические затраты, показали, что наилучшим исполнением одноходового кожухотрубного теплообменника по функция минимизации общих затрат является теплообменник со следующими параметрами: $l = 1,5$ м; $d_e = 0,015$ м; $n = 320$; $K_t = 156,72$ Вт/($m^2 \cdot K$).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, И. А. Физические основы и промышленное применение интенсификации теплообмена. Интенсификация теплообмена: монография / И. А. Попов, Х. М. Махья-

нов, В. М. Гуреев; под общ. ред. Ю. Ф. Гортышова. – Казань: Логос, 2012. – 559 с.

2. Голованчиков, А. Б. Моделирование теплового процесса в кожухотрубном теплообменнике типа «нагреватель-конденсатор» с учетом продольной теплопроводности / А. Б. Голованчиков, С. А. Анцыперов, С. Б. Воронцова // Известия Волгоградского государственного технического университета. – 2017. – № 1 (196). – С. 7-14.

3. 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. чл.-корр. АН России П. Г. Романкова. – 14-е изд., стереотипное. – Москва: ООО ИД «Альянс», 2007. – 576 с.

4. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Г. С. Борисов [и др.]; под ред. Ю. И. Дытнерского. – 4-е изд. – Москва: Альянс, 2008. – 272 с.

5. Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учеб. для вузов / А. Г. Касаткин. – 14-е изд., стер. – Москва: Альянс, 2008. – 750 с.

УДК 661.666.4:66.074.2

А. А. Шагарова, И. С. Иванова

АНАЛИЗ РАБОТЫ ИНЕРЦИОННЫХ ПЫЛЕУЛОВИТЕЛЕЙ В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕХНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: shagarang@mail.ru

Отмечены перспективы развития альтернативных производственных процессов и пылеулавливающего оборудования производства технического углерода. С целью оптимального выбора конструкции пылеуловителя для систем аспирации технического углерода представлен вариант решения задачи с использованием аппаратов со встречными закрученными потоками (ВЗП). Приведены результаты расчетов для определения эффективности улавливания циклонов и аппаратов ВЗП, выполнен сравнительный анализ эффективности их работы и проанализированы полученные результаты. Показано, что использование в производстве технического углерода аппаратов ВЗП позволит существенно повысить общую эффективность пылеулавливания, уменьшить металлоемкость, снизить энергозатраты и повысить эксплуатационную надежность. Это приведет к увеличению экономичности производства при одновременном повышении его безопасности и экологичности.

Ключевые слова: технический углерод, пылеуловитель, эффективность улавливания пыли, циклон, аппарат со встречными закрученными потоками.

A. A. Shagarova, I. S. Ivanova

ANALYSIS OF INERTIAL DUST COLLECTORS OPERATION IN THE PRODUCTION OF CARBON BLACK

Volgograd State Technical University

The prospects for the development of alternative production processes and dust-trapping equipment for the production of carbon black are noted. In order to optimally select the design of the dust collector for carbon black aspiration systems, an option for solving the problem using devices with counter-swirling flows (CSF) is presented. The results of calculations for determining the effectiveness of capturing cyclones and CSF devices are given, a comparative analysis of the effectiveness of their work is performed and the results obtained are analyzed. It is shown that the use of CSF devices in the production of technical specifications will significantly increase the overall efficiency of dust collection, reduce metal consumption, reduce energy costs and increase operational reliability. This will lead to an increase in the production efficiency while increasing its safety and environmental friendliness.

Keywords: carbon black, dust collector, dust collection efficiency, cyclone, device with counter-swirling flows.

В настоящее время технический углерод является наиболее востребованным материалом как в нашей стране, так и за рубежом.

Анализ современного состояния многоступенчатой технологии получения технического углерода позволил выделить ряд характерных особенностей производства [1]:

- многотоннажное (мировое производство более 13 млн т/год);
- многоассортиментное (более 120 марок продукта);
- монофункциональное (оборудование не может использоваться для получения других продуктов);
- экологически напряженное (ПДК 4 мг/м³).

Общая технологическая схема получения технического углерода представлена на рис. 1.

Рынок технического углерода в значительной степени характеризуется высокой специализацией и разнообразием применения [2].

Свыше 90 % всего потребления техническо-

го углерода приходится на резиновую промышленность, причем почти 70 % поглощает шинная отрасль. Другие области применения технического углерода весьма многочисленны. Его используют в производстве различных сортов бумаги (копировальной, альбомной, фотографической и др.), картриджей, штемпельной краски, крема для обуви, парфюмерных и гримировальных красок, туши. Технический углерод необходим для изготовления разных сортов лаков, пигмента при производстве чернил, в химической и цементной промышленности, в сельском хозяйстве для производства удобрений и инсектоfungицидов, в дорожном строительстве, в производстве пластмасс, в электропромышленности и пр. [2].

К одному из современных способов производства технического углерода относится печной метод получения нанодисперсного углерода термоокислительным пиролизом углеводородного сырья.

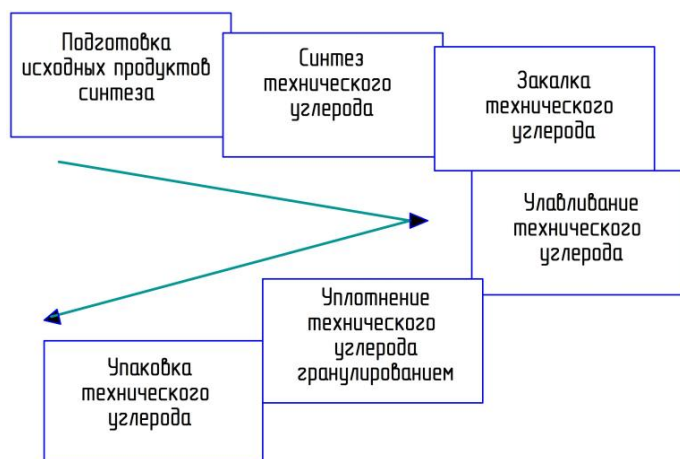


Рис. 1. Общая технологическая схема получения технического углерода

Одной из ключевых проблем решения вопроса об обеспечении экологической безопасности производства является разработка эффективных методов и оборудования для улавливания дисперсного углерода из аэрозольных потоков с одновременным извлечением из них целевого продукта.

Процесс получения различных марок технического углерода протекает с образованием огромного объема аэрозоля, представляющего собой сложную дисперсную систему, состоящую из полидисперсных агрегатов, взвешенных в газовой среде.

Диапазон дисперсности технического углерода оценивается средним диаметром глобулярных частиц и составляет от 10 до 150 нм, удельная поверхность от 80 до 350 м²/г. В настоящее время наблюдается тенденция дальнейшего расширения диапазона дисперсности и структурности технического углерода.

Эффективное улавливание дисперсного углерода из аэрозольных потоков представляет собой сложную техническую задачу, а ее решение требует проведения комплекса научно-исследовательских, экспериментальных, опытно-конструкторских работ.

Выбор оптимальной конструкции пылеуловителя способствует снижению нагрузки на системы доулавливания и аспирации, повышению экологической безопасности и эффективности производства технического углерода.

На заводах технического углерода применяют установки фильтрации аэрозолей с предварительным осаждением целевого продукта в циклонах СК-ЦН-34. Циклоны-концентраторы СК-ЦН-34 конструкции АО «НИИОГАЗ» (Россия) используются в системах транспорта технического углерода, системах очистки ды-

мовых газов и аспирации технологического оборудования.

Одним из прогрессивных аэродинамических способов интенсификации процессов улавливания высокодисперсной пыли и повышения эффективности работы пылеуловителей является применение закрученных газовых потоков в вихревых аппаратах ВЗП.

Целью настоящей работы является проведение сравнительного анализа эффективности работы этих аппаратов в системах пылеулавливания и аспирации производства техуглерода.

Принципиальные схемы инерционных пылеуловителей показаны на рис. 2.

В отличие от большинства других конструкций циклонов, в которых подвод газового потока осуществляется по касательной, в циклоне СК-ЦН-34 газ подается по спирали Архимеда (рис. 2, а).

К числу серьезных недостатков в работе циклона, приводящих к снижению его эффективности на практике, относятся: подсос газов через бункер и забивание бункера дисперсным углеродом, который относится к сильно слипающимся дисперсным материалам; низкая эффективность улавливания пыли микронных размеров, несущей наибольшую экологическую опасность.

Повышение эффективности сепарации мелкодисперсной пыли с помощью традиционных циклонных аппаратов сопряжено с ростом гидравлического сопротивления и ростом энергозатрат на очистку газового потока.

В связи с этим представляет интерес появившийся в последние годы новый тип инерционных пылеуловителей – вихревые пылеулавливающие аппараты со встречными закрученными потоками (ВЗП) (рис. 2, б), имеющие

повышенную эффективность инерционной сепарации пылевых частиц микронного разме-

ра, приближающуюся к эффективности фильтров [3–6].

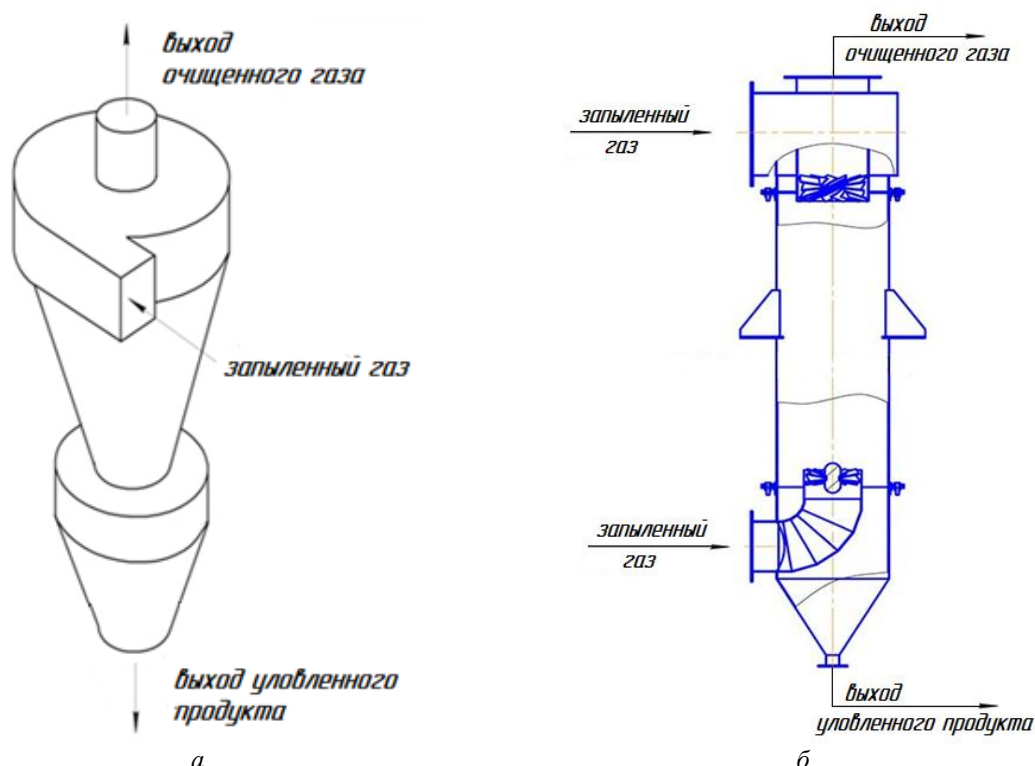


Рис. 2. Принципиальные схемы инерционных пылеуловителей:
а – циклон СН-ЦН-34; б – аппарат ВЗП

Характерной особенностью аппаратов ВЗП является подача запыленного газа по двум вводам одновременно: первичный поток по осевой патрубку в нижней части аппарата, снабженной завихрителем, вторичный поток – по патрубку, расположенному в верхней части аппарата, где находится также осевой вывод очищенного газа. Вращение потоков внутри аппарата имеет одно направление.

За последние десятилетия приобретен значительный опыт экспериментальных и теоретических исследований эффективности работы аппаратов ВЗП в сравнении с циклонами различного конструктивного исполнения, позволяющий выделить основные преимущества этих аппаратов:

- высокая степень улавливания частиц тонкодисперсной пыли (менее 5 мкм);
- слабая чувствительность эффективности пылеулавливания к колебаниям нагрузки по газу, концентрации пыли в газе и подсосам воздуха в бункерную часть аппарата;
- меньшие потери давления в аппарате по сравнению со всеми видами циклонов при одинаковых нагрузках;

– возможность регулирования процесса пылеулавливания путем изменения соотношения расходов газа по каналам;

– меньшие габаритные размеры в плане, чем у циклонов равной производительности.

Оптимальный выбор конструкции пылеуловителя систем аспирации технического углерода возможен только при известном дисперсном составе его аэрозоля, поступающего на очистку.

Для расчета использовался усредненный на основании литературных данных [1] дисперсный состав аэрозоля технического углерода марки N550 и учитывались конструктивные характеристики пылеуловителей.

Методика и алгоритм расчета аппарата ВЗП подробно изложены в работе [7], позволяющие аналитически рассчитывать группу аппаратов ВЗП, и численно определять фракционную (локальную) эффективность улавливания первичного и вторичного газовых потоков на основании исходной дифференциальной кривой распределения частиц по размерам.

Для расчета циклона (батареи циклонов) использовалась стандартная методика, изложенная в работе [8].

Исходные данные представлены в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

Исходные и справочные данные к расчету

Наименование параметра	Размерность	Обозначение	Величина
<i>Исходные данные</i>			
1. Производительность по очищаемому газу	м ³ /ч	q_v	18000
2. Начальная концентрация частиц пыли в газе	г/кг	X_n	400
3. Требуемая степень очистки	-	η	0,98
4. Распределение частиц по фракциям в запыленном газе	г	c	см. рис. 3
5. Распределение диаметров частиц по фракциям в запыленном газе	мкм	d	
<i>Справочные данные</i>			
1. Плотность газа	кг/м ³	ρ	0,84
2. Плотность частиц пыли	кг/м ³	ρ_m	1800
3. Вязкость газа	Па·с	μ	$2,63 \cdot 10^{-5}$

Полученные результаты расчетов представлены в виде графических зависимостей.

Анализ графических зависимостей, представленных на рис. 4, показывает:

– одиночный циклон СК-ЦН-34 обеспечивает степень очистки $\eta = 0,3$;

– для требуемого коэффициента очистки $\eta = 0,98$ необходимо установить число циклонов в батарее $k = 556$, диаметром 0,1 м.

Поскольку рекомендуемое значение циклонных элементов, размещенных в одном аппарате не должно превышать 96 шт., необходимо установить 6 мультициклонов.

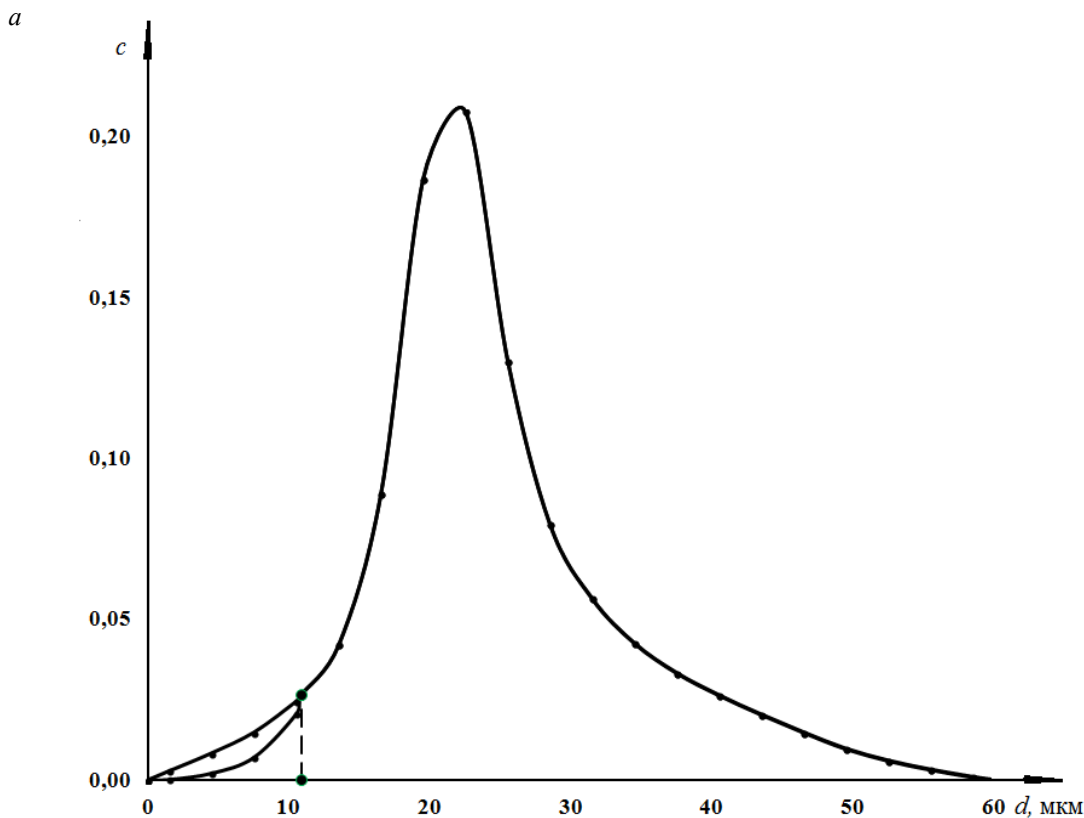


Рис. 3. Графики зависимости относительной массовой концентрации частиц пыли от их диаметра $c = f(d)$:

a – пылеуловитель СК-ЦН-34 (номинальный диаметр уловленных частиц $d_0 = 10,8$ мкм);
б – аппарат ВЗП (номинальный диаметр уловленных частиц $d_0 = 9,4$ мкм) (см. также с. 20)

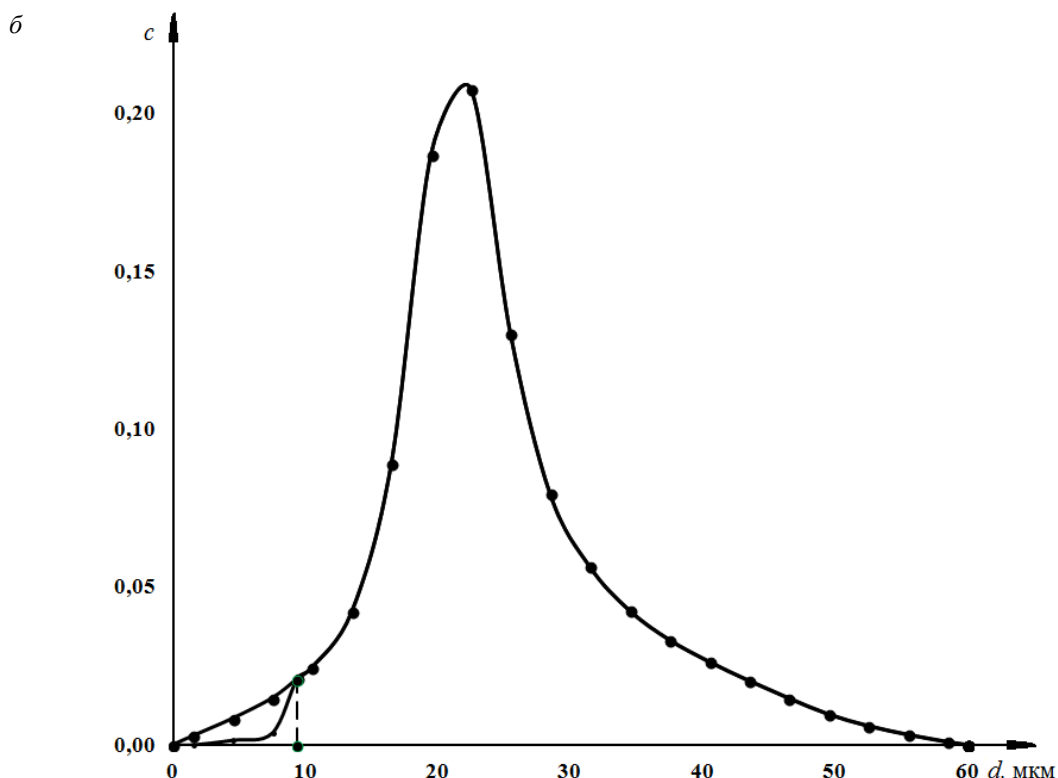
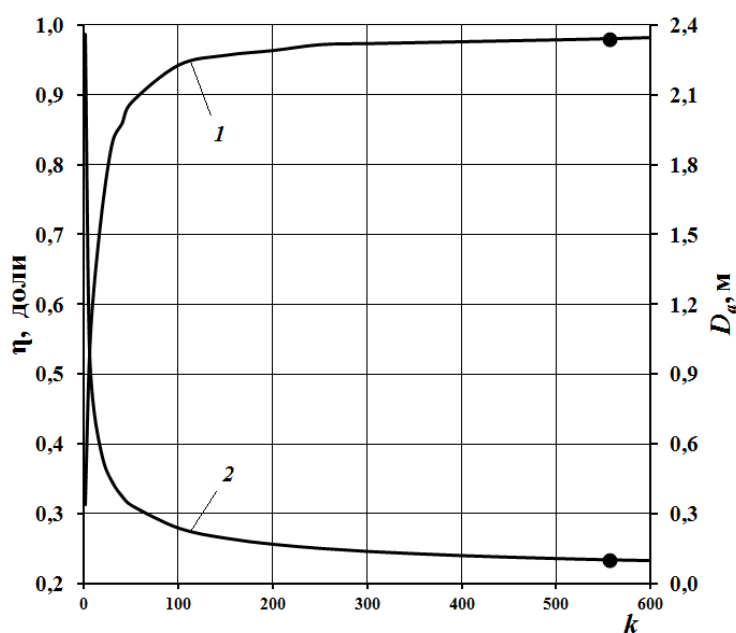


Рис. 3. Окончание

Рис. 4. График зависимости эффективности пылеулавливания в циклоне СК-ЦН-34 от количества (1 – $\eta = f(k)$) и диаметра циклона (2 – $D_c = f(k)$)

Результаты расчета аппарата ВЗП показывают, что для обеспечения требуемой степени очистки достаточно установить один аппарат диаметром 1 м.

Для последующего анализа введена дополнительная безразмерная величина относительного диаметра, представляющего отношение

номинальных диаметров частиц, уловленных в циклоне и аппарате ВЗП:

$$\Delta = d_{0ц} / d_{0ВЗП}$$

Номинальный диаметр частиц, уловленных в аппарате ВЗП $d_{0ВЗП}$, принимается постоянной величиной.

На рис. 5 показаны зависимости относительного диаметра уловленных частиц от количества циклонов в батарее $\Delta = f(k)$ и эффективности пылеулавливания $\Delta = f(\eta)$.

Анализ графических зависимостей показывает, что если отношение $\Delta \rightarrow 1$, то количество циклонов увеличивается (рис. 5, а), а эффективность пылеулавливания составляет: для одиночного циклона СК-ЦН-34 – 0,3, для аппарата ВЗП – 0,98 (рис. 5, б).

Таким образом, для требуемой степени очистки можно определить соотношение номинальных диаметров уловленных частиц для циклона и ВЗП. Например, при $\eta = 0,7$ номинальный диаметр уловленных частиц в циклоне в 3 раза больше, чем для аппарата ВЗП. При фиксированном значении $d_{0ВЗП} = 9,4$ мкм значение номинального диаметра уловленных частиц в циклоне составит $d_{0Ц} = 28,2$ мкм.

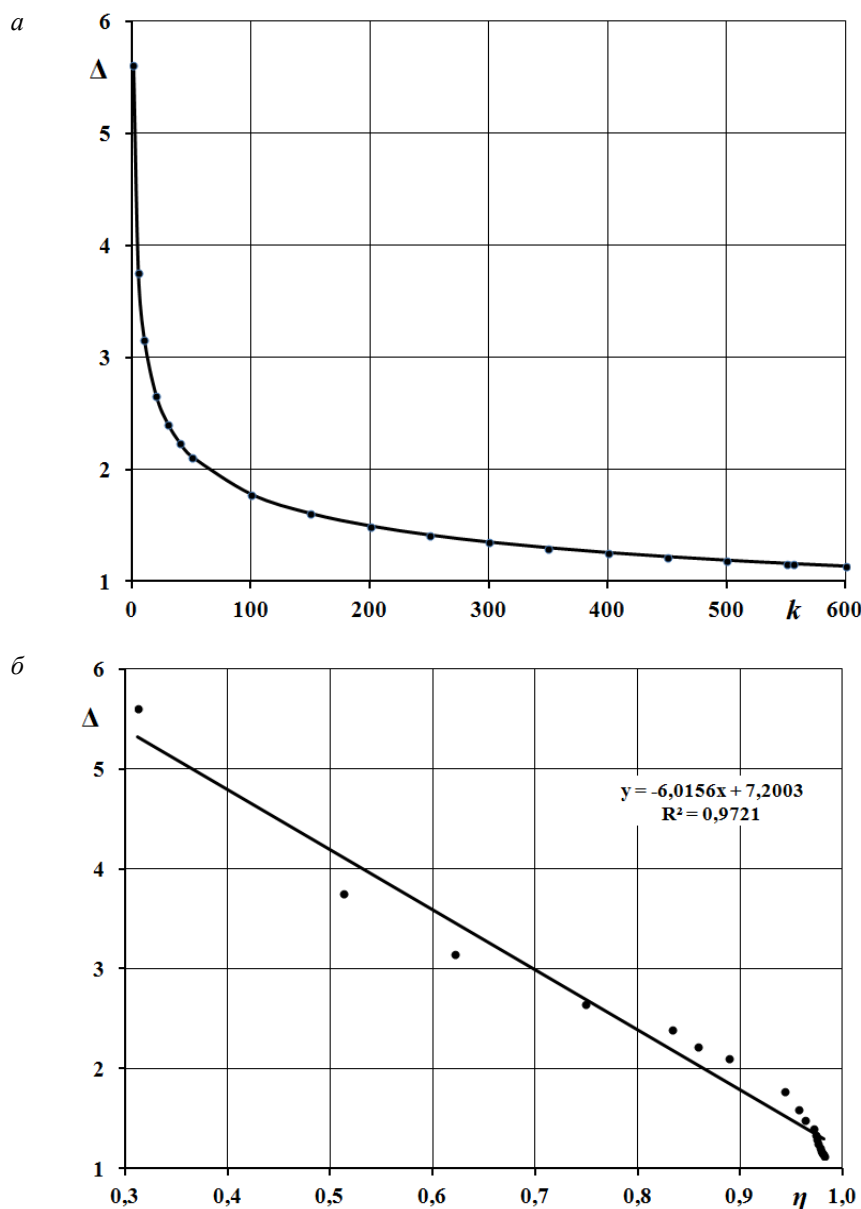


Рис. 5. Зависимости относительного диаметра уловленных частиц от количества циклонов в батарее $\Delta = f(k)$ (а) и эффективности пылеулавливания $\Delta = f(\eta)$ (б)

Проведенные расчеты показывают, что аппараты ВЗП являются хорошей альтернативой циклонам СК-ЦН-34, установленным в технологической схеме системы аспирации и пыле-

улавливания в производстве технического углерода. Сравнительные показатели эффективности работы инерционных пылеуловителей представлены в табл. 2.

Данные табл. 2 показывают, что аппарат ВЗП способен обеспечить высокую эффективность пылеулавливания ($\eta = 0,98$) тонкодис-

персной пыли в широком диапазоне изменения нагрузок по газу и дисперсной фазе.

Таблица 2

Сравнительные показатели эффективности работы инерционных пылеуловителей

Параметр	Обозначение	Размерность	Групповой циклон К-ЦН	Аппарат ВЗП
Число аппаратов	n	шт.	6	1
Номинальный диаметр уловленных частиц	d_0	мкм	10,8	9,4
Общая эффективность улавливания частиц	η	-	0,98	0,98
Гидравлическое сопротивление	Δp	Па	3900	795
Масса (общая)	m	кг	15730	650

Таким образом, использование в производстве технического углерода аппаратов ВЗП позволит существенно повысить общую эффективность пылеулавливания, уменьшить металлоемкость, снизить энергозатраты и повысить эксплуатационную надежность. Это приведет к увеличению экономичности производства при одновременном повышении его безопасности и экологичности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шопин, В. М. Дисс. ... д-ра техн. наук / В. М. Шопин. – Омск: ИППУ СО РАН, 2014.
2. Ивановский, В. И. Технический углерод: процессы и аппараты / В. И. Ивановский. – Омск: ОАО «Техуглерод», 2004. – 228 с.
3. Лазарев, В. А. Циклоны и вихревые пылеуловители: справочник / В. А. Лазарев. – Нижний Новгород: Фирма ОЗОН НН, 2006. – 320 с.

4. Азаров, В. Н. Пылеуловители со встречными закрученными потоками. Опыт внедрения / В. Н. Азаров. – Волгоград: РПК «Политехник», 2003. – 136 с.

5. Кнышенко, Ю. В. Методика расчетно-экспериментального прогноза эффективности вихревого пылеуловителя / Ю. В. Кнышенко // Техническая механика. – 2012. – № 4. – С. 59–66.

6. Мисюля, Д. И. Сравнительный анализ технических характеристик циклонных пылеуловителей / Д. И. Мисюля, В. В. Кузьмин, В. А. Марков // Труды БГТУ. Химия и технология неорганических веществ. – 2012. – № 3. – С. 154–163.

7. Васильев, П. С. Модернизация систем улавливания и аспирации производства пылящего технического углерода [Электронный ресурс] / П. С. Васильев, Е. Г. Бакулашова // Химическая безопасность: электронный журнал. – 2020. – Т. 4, № 2. – С. 212–225. – Режим доступа: URL: <http://chemsafety.ru/index.php/chemsafety/issue/view/10/9>.

8. Тимонин, А. С. Инженерно-экологический справочник. Том 1 / А. С. Тимонин [и др.]. – Москва–Вологда: Инфра-Инженерия. – 2019. – 917 с.

УДК 621.315.1

*С. С. Дементьев¹, П. Д. Кутейников²***МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА
ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**¹Волгоградский государственный технический университет²Национальный исследовательский университет

«Московский энергетический институт»

e-mail: c165tc34@yandex.ru¹, suhanov.pavel@inbox.ru²

Возможность обеспечения качественного бесперебойного электроснабжения в значительной степени определяется надежностью воздушных линий электропередачи (ВЛ). Воздушные линии склонны к возникновению многочисленных аварий, связанных с обрывом проводов по причине гололедообразования. На сегодняшний день диагностика гололедных отложений на проводах выполняется визуально. Существующие системы мониторинга воздушных линий предназначены для использования исключительно в гололедный период и имеют небольшое количество функциональных возможностей. В статье предлагается концепция многофункциональной измерительной системы, призванной обеспечить выполнение диагностики гололедообразования, перегрузки линии, деградации материала проводов, световой маркировки пролетов линии для воздушных судов, отпугивание птиц. Это достигается посредством применения в составе измерительной системы сигнальных шаров-маркеров, оснащенных датчиками изменения кривой провисания проводов или же используемых в качестве оптических меток положения проводов. В статье описывается два варианта технической реализации данной измерительной системы с учетом применения одного или нескольких шаров-маркеров среди совокупности шаров, устанавливаемых исключительно для маркировки пролета ВЛ. Делается вывод о перспективе внедрения предлагаемой измерительной системы на особо ответственных участках воздушных линий с целью последующей трансформации классической электрической сети в «интеллектуальную» систему электроснабжения.

Ключевые слова: надежность электроснабжения, аварийные режимы линий электропередачи, мониторинг воздушных линий, обледенение линий электропередачи, световая маркировка ЛЭП, интеллектуальные сети.

*S. S. Dementyev¹, P. D. Kuteynikov²***MULTIFUNCTIONAL MONITORING SYSTEM FOR OVERHEAD POWER LINES**¹Volgograd State Technical University²National Research University

“Moscow Power Engineering Institute”

The ability to provide high-quality uninterrupted power supply is largely determined by the reliability of overhead power lines (OHL). Overhead power lines are prone to numerous accidents associated with wire breaks due to ice formation. Today, the diagnostics of ice sediments on wires is performed visually. Existing monitoring systems for overhead power lines are intended for use exclusively in ice deposit conditions and have a small amount of functionality. The article proposes a concept of a multifunctional measuring system designed to provide diagnostics of ice formation, line overload, degradation of wire material, light marking of line spans for aircrafts, and bird scaring. This is achieved through the use of signal ball-shaped markers as part of the measuring system, equipped with sensors for changing the curve of the sagging of the wires or used as optical markers of the position of the wires. The article describes two options for the technical implementation of this measuring system, taking into account the use of one or more marking balls among the set of balls installed exclusively for marking the overhead line span. A conclusion is made about the prospect of introducing the proposed measuring system on especially critical sections of overhead lines with the aim of subsequent transformation of the classic electrical network into a “smart” power supply system.

Keywords: reliability of power supply, emergency modes of power lines, monitoring of overhead lines, icing of power lines, light marking of OHL, smart grids.

В настоящее время основные тенденции в развитии Единой энергетической системы России подразумевают «цифровизацию» в той или иной степени процессов генерации, передачи и потребления электроэнергии, что в первую очередь включает в себя повсеместное

внедрение активно-адаптивных электрических сетей. Суть данной технологии, получившей за рубежом наименование Smart Grid (дословно «интеллектуальная сеть»), заключается в снижении физической уязвимости всех составляющих энергосистемы путем ее оснащения

средствами автоматической идентификации рисков аварийных возмущений и организации предупреждения неисправностей [5]. Очевидно, что в России эффективное внедрение технологии Smart Grid требует учета многих специфических факторов функционирования электрических сетей в наших условиях.

Так, одной из главных особенностей Единой энергосистемы являются значительные расстояния, охватываемые воздушными линиями электропередачи (ВЛ), общая протяженность которых составляет более 500 тыс. км. Именно в силу большого удаления объектов генерации и потребления электроэнергии друг от друга электрические сети, образуемые высоковольтными ВЛ, зачастую обладают магистральной топологией, что приводит к трудности их резервирования.

Таким образом, объективно низкая конструкционная надежность воздушных линий, обусловленная непрерывным климатическим воздействием (гололед, ветер, осадки, солнечная радиация), в совокупности с их высокой степенью износа за последние десятилетия (около 50 % от общего числа ВЛ изношены более чем на 90 %) становятся причиной частой повреждаемости электрических сетей и недоотпуска электроэнергии [3].

С учетом всего перечисленного можно прийти к выводу о том, что обеспечение безаварийной эксплуатации воздушных линий является сложной задачей, решение которой тем не менее имеет важнейшее значение для нормального функционирования социальной и производственной инфраструктуры. Именно поэтому возникающие на ВЛ аварии требуют скорейшего устранения, однако в осенне-зимний период сложные метеоусловия и ухудшение состояния дорог практически полностью исключают быстрое завершение ремонтно-восстановительных работ.

По мере физического и морального устаревания все большая доля неисправностей ВЛ приходится на неблагоприятные климатические условия, к числу которых следует в первую очередь отнести формирование гололедно-изморозевых отложений на проводах и грозозащитных тросах. Так, согласно статистическим данным более 50 % от общего количества

повреждений на линиях Единой энергосистемы приходится именно на гололедные аварии, а продолжительность вызванных ими перебоев электроснабжения достигает 60 % от общей длительности всех аварийных отключений за год.

Между тем следует отметить, что на сегодняшний день диагностика гололедных отложений на проводах ВЛ осуществляется визуально силами оперативно-выездных бригад [1; 4], несмотря на существование широкого спектра измерительных устройств и систем данного предназначения. Их классификация, опубликованная в [5], приведена ниже на рис. 1. Анализируя принцип действия и особенности функционирования данных средств измерений, в особенности наиболее распространенных (*тензометрических систем* (рис. 2), реализующих контроль гололедных отложений путем их прямого «взвешивания» за счет размещения тензодатчика в точке подвеса гирлянды изоляторов к траверсе опоры ЛЭП; *систем локационного зондирования* (рис. 3) на основе устройств импульсной рефлектометрии и реализующих диагностику гололедных отложений исходя из величины затухания посылаемого в линию высокочастотного сигнала) можно прийти к выводу об их достаточно узкой применимости, заключающейся исключительно в обнаружении гололедных отложений и потому практически неиспользуемых для иных целей в промежутки времени, предшествующих периоду гололедообразования и следующих за ним.

Разработанная в рамках исследования измерительная система призвана обеспечить выполнение следующих функций:

- контроль интенсивности гололедообразования на проводах ВЛ в режиме реального времени;
- диагностика механического износа, наличия остаточных деформаций и деградации материала проводов;
- контроль температурного режима эксплуатации ЛЭП, перегрузки линии по току и соответствующая сигнализация;
- маркировка проводов для пилотов воздушных судов;
- визуальное отпугивание птиц и предотвращение их столкновения с проводами.

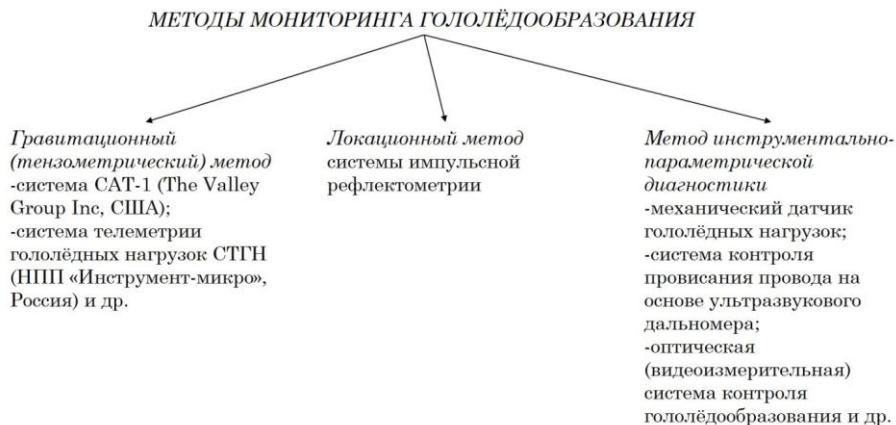


Рис. 1. Классификация методов мониторинга гололедообразования на ВЛ



Рис. 2. Монтаж тензометрического датчика в месте подвеса фазного провода

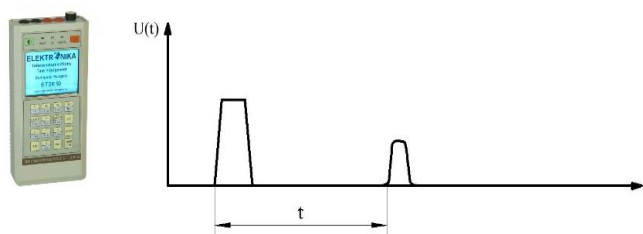


Рис. 3. Рефлектометр и общий вид рефлектограммы

Первый вариант данной системы, структурная схема которой изображена на рис. 4, содержит закрепленный на проводе («пропущенный» сквозь провод вблизи начала пролета) яр-

кий пластиковый шар 1 (рис. 5), армированный стекловолокном и стойкий к атмосферным осадкам, ультрафиолетовому излучению и выцветанию.

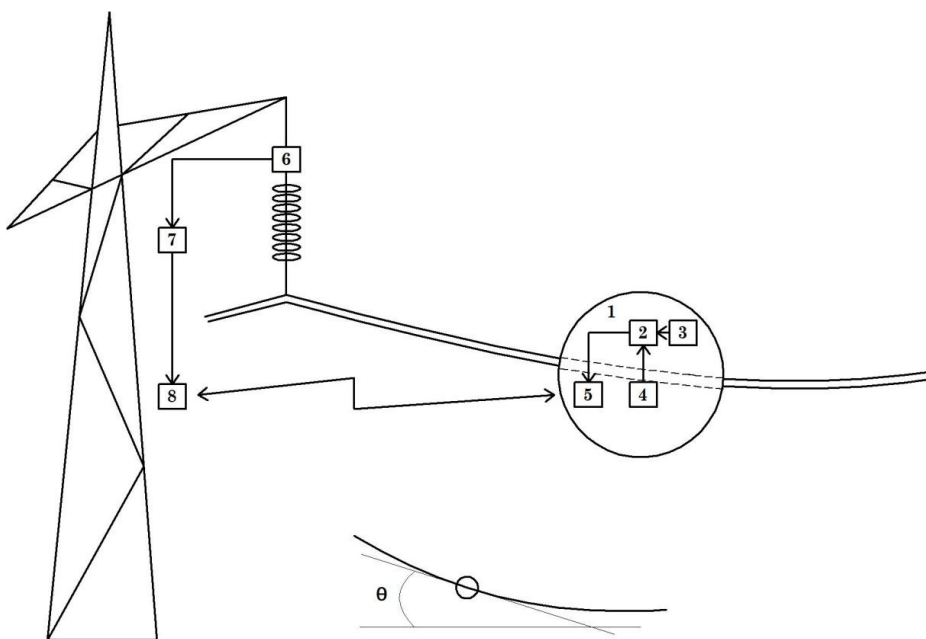


Рис. 4. Структурная схема измерительной системы по первому варианту

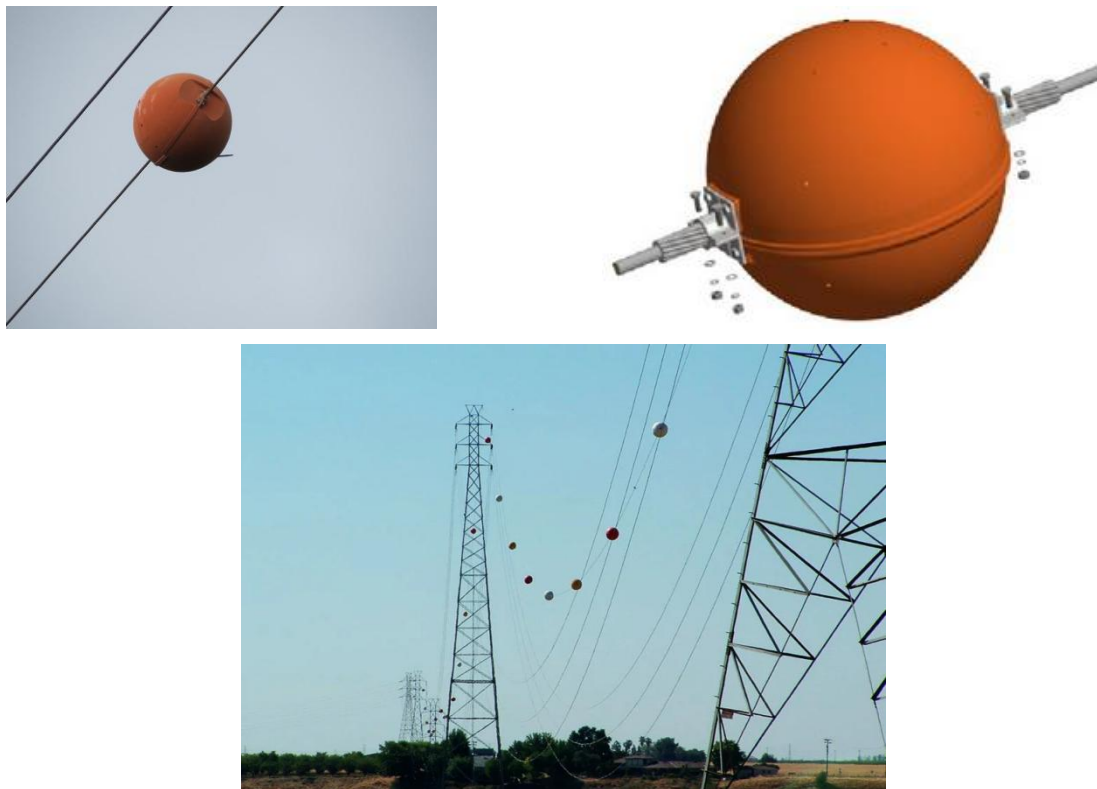


Рис. 5. Сигнальные шары-маркеры на проводах ВЛ

Внутри изготовленного из двух полусфер шара содержатся микроконтроллер 2, трехосевой инклинометр (датчик наклона) 3, датчик температуры провода 4, устройство беспроводной передачи информации 5. В результате увеличения механической и/или температурной деформации угол отклонения шара 1 вследствие провисания провода также изменяется, что фиксируется инклинометром 3. Управляющая программа, исполняемая микроконтроллером 2, выполняет расчет толщины гололедной муфты эквивалентной цилиндрической формы исходя из показаний инклинометра 3 с поправкой на фиксируемую датчиком 4 температуру провода для «выделения» деформации, вызванной исключительно нарастанием гололеда на проводе, но не его нагревом. Размещаемый на опоре ЛЭП терминал измерений включает в себя тензодатчик 6, закрепленный в точке подвеса к траверсе гирлянды изоляторов. Тензодатчик 6 выполняет непосредственное измерение веса гололедных отложений, а полученная информация аккумулируется микроконтроллером 7, соединенным с устройством беспроводного приема данных 8, связанным в единую сеть с размещаемым в шаре 1 устройством 5, например, bluetooth-каналом.

Второй вариант данной системы, приведен-

ный на рис. 6, содержит закрепленный вблизи середины пролета шар 1. Данные о величине нагрева провода аккумулируются терминалом, размещаемым на опоре ЛЭП, который включает в себя тензодатчик 2, совмещенный с датчиком температуры провода 3 и размещаемый между гирляндой изоляторов и проводом, а также камеру видеонаблюдения 4, снабженную инклинометром 5 и соединенную с платой видеозахвата 6, предназначенной для ввода изображения в память одноплатного компьютера 7. Оптическая ось камеры видеонаблюдения 4 пересекает точку крепления шара 1, координаты смещения которого фиксируются с высокой точностью посредством видеорегистрации. Зафиксированная по координатам шара 1 величина провисания провода коррелируется с величиной его нагрева для «выделения» исключительно механической деформации и расчета веса отложений. Показания инклинометра 5 позволяют нивелировать влияние случайных отклонений камеры видеонаблюдения 4 в пространстве на точность фиксируемых координат шара 1. Одноплатный компьютер 7 совмещен с микроконтроллером 8, управляющая программа которого выполняет сбор данных с датчиков 2, 3, 5 и передачу в буфер обмена программного обеспечения компьютера 7.

В обоих вариантах системы передача полученной информации на диспетчерские посты компании-оператора диагностируемой ВЛ осуществляется посредством модемов сотовой связи (не показаны на рис. 4, 5) либо путем осна-

щения каждого установленного на опоре терминала измерений беспроводными приемопередатчиками с возможностью «эстафетной» пересылки данных от одного приемопередатчика к другому.

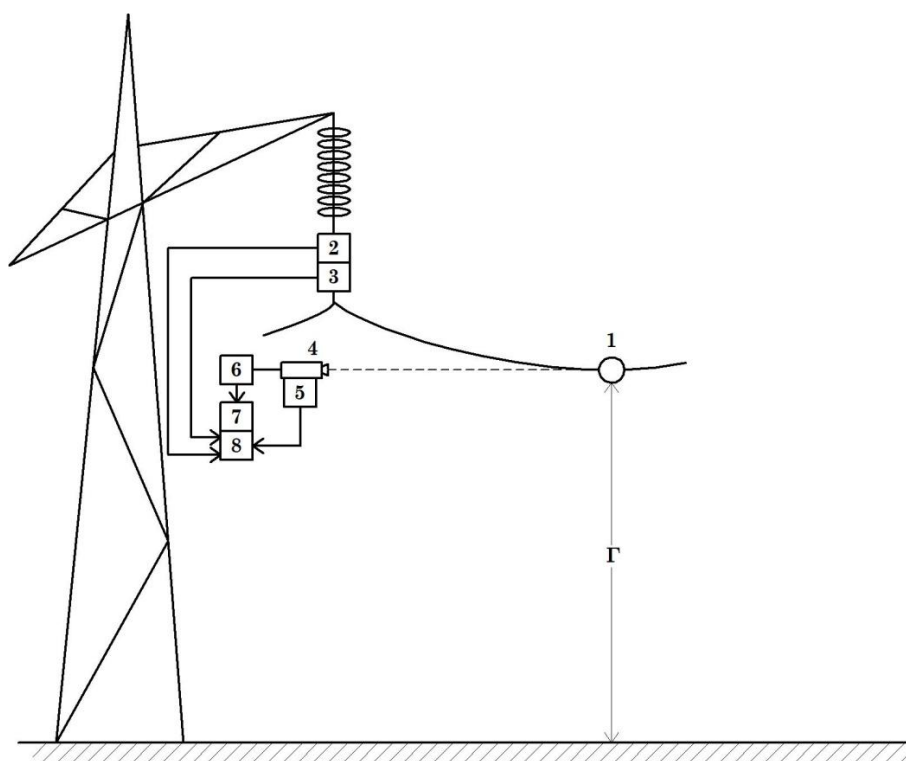


Рис. 6. Структурная схема измерительной системы по второму варианту

Электропитание компонентов измерительной системы может осуществляться от встроенных литий-ионных аккумуляторов или их комбинации с устройствами отбора мощности от ЛЭП, солнечными панелями и ветрогенераторами, а также их совокупности.

Принцип функционирования системы в обоих предлагаемых вариантах исполнения подразумевает независимое измерение одной и той же величины – веса гололедных отложений (толщины гололедной муфты эквивалентной цилиндрической формы) – прямым (при помощи тензодатчика) и косвенным (по показаниям инклинометра, размещаемого в шаре, или по данным видеорегистрации координат смещения шара) методами. Сравнение этих данных, их анализ на предмет расхождения полученных результатов делает возможным оценку степени износа проводов ЛЭП, так как увеличение расхождения результатов прямого и косвенного измерений однозначно свидетельствует о деградации материала провода, наличии остаточных деформаций, а также, например, перетяги-

ванию (проскальзыванию) провода из одного соседнего пролета в другой. Помимо этого, использование одного тензодатчика на несколько комплектов шаров, снабженных датчиками, по первому варианту системы, либо на несколько комплектов шар-видеокамера по второму варианту, делает возможным уточнение текущих механических характеристик материала провода (например, модуля упругости) и коррекцию их значений, установленных в качестве исходных при загрузке программного обеспечения указанных комплектов средств измерений.

Анализ функционирования предлагаемой системы выполняется с учетом следующих исходных данных:

- одноцепная воздушная линия номинальным напряжением 110 кВ;
- двухстоечные опоры 2ПСБ 110-1 (высота точки крепления гирлянды изоляторов к траверсе $h = 16,5$ м);
- провод АС-70/11 (сечение $F = 79,3$ мм², диаметр $d_{пр} = 11,4$ мм, удельный вес $G_{пр} = 2,705$ Н/м, модуль упругости $E = 8,25 \cdot 10^4$ Н/мм², темпера-

турный коэффициент линейного удлинения $\alpha = 19,2 \cdot 10^{-6}$ град⁻¹, допустимые напряжения – при среднегодовой температуре $\sigma_{\text{доп.ср}} = 90$ Н/мм², низшей температуре $\sigma_{\text{доп.мин}} = 120$ Н/мм², наибольшей нагрузке $\sigma_{\text{доп.макс}} = 120$ Н/мм²);

- длина пролета $l = 130$ м;
- длина гирлянды изоляторов $\lambda = 1,3$ м;
- V район по гололеду (нормативная толщина гололедной муфты эквивалентной цилиндрической формы $b_{\text{норм}} = 30$ мм);
- IV район по ветровому давлению (нормативное ветровое давление $W_{\text{норм}} = 800$ Па);
- ненаселенная местность (минимальная температура $t_{\text{мин}} = -40$ °С, наибольшая $t_{\text{макс}} = 40$ °С, среднегодовая $t_{\text{ср}} = 0$ °С, температура гололедообразования $t_{\text{гол}} = -5$ °С).

Расчет деформации провода ВЛ при изменении условий гололедообразования и нагрева будем вести, решая уравнение состояния провода [2]:

$$\sigma_p - \frac{\gamma_p^2 l^2 E}{24\sigma_p^2} = \sigma_{\text{и}} - \frac{\gamma_{\text{и}}^2 l_{\text{и}}^2 E}{24\sigma_{\text{и}}^2} - \alpha E (t_p - t_{\text{и}}),$$

где $\sigma_{\text{и}}$, $\gamma_{\text{и}}$, $t_{\text{и}}$ – напряжение в материале провода, удельная нагрузка и температура в исходном режиме (в рассматриваемом случае с учетом исходных данных в режиме наибольших нагрузок); σ_p , γ_p , t_p – напряжение в материале провода, удельная нагрузка и температура в рассматриваемом режиме; l_p – расчетная длина пролета. При этом расчетное значение стрелы провеса [2]:

$$f_p = \frac{\gamma_p l^2}{8\sigma_p}$$

и соответствующая ему величина габарита до земли [2]:

$$\Gamma = h - \lambda - f_p.$$

Считая, что кривая провисания провода соответствует параболе, проходящей через три точки ($x_1 = 0, y_1 = h - \lambda$; $x_2 = 0,5l, y_2 = \Gamma$; $x_3 = l, y_3 = y_1$), коэффициенты уравнения a_1, a_2, a_3 :

$$y(x) = a_1 x^2 + a_2 x + a_3 \quad (1)$$

найдем, решив систему линейных уравнений:

$$\begin{cases} a_1 x_1^2 + a_2 x_1 + a_3 = y_1, \\ a_1 x_2^2 + a_2 x_2 + a_3 = y_2, \\ a_1 x_3^2 + a_2 x_3 + a_3 = y_3, \end{cases}$$

при этом угол отклонения θ шара (см. рис. 4) на расстоянии x_0 от начала пролета вычислим, исходя из геометрического смысла производной функции (1), т. е.

$$\theta = \arctg(2a_1 x_0 + a_2).$$

В результате вычислений по описанной выше методике были получены представленные на рис. 7 графики зависимостей изменения угла поворота шара от толщины гололедной муфты $\theta(b)$ при его подвесе на удалении $x_0 = 3$ м от начала пролета, а также габарита до земли $\Gamma(b)$.

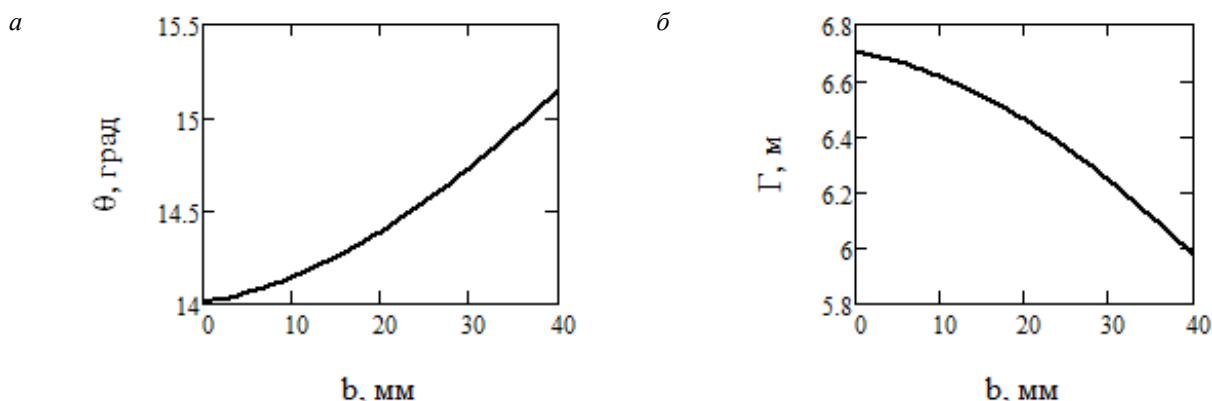


Рис. 7. Изменение угла поворота шара (а) по первому варианту системы и смещение шара по вертикали (б) по второму варианту при нарастании толщины b гололедной муфты эквивалентной цилиндрической формы

Рис. 8 содержит изображение аналогичных графических зависимостей, полученных при расчете характеризующих провисание параметров (угла наклона θ и габарита до земли Γ) при разогреве провода ВЛ протекающими токами

и окружающей средой. Эти зависимости показывают возможность применения измерительной системы в обоих исполнениях для мониторинга перегрузок ВЛ по току.

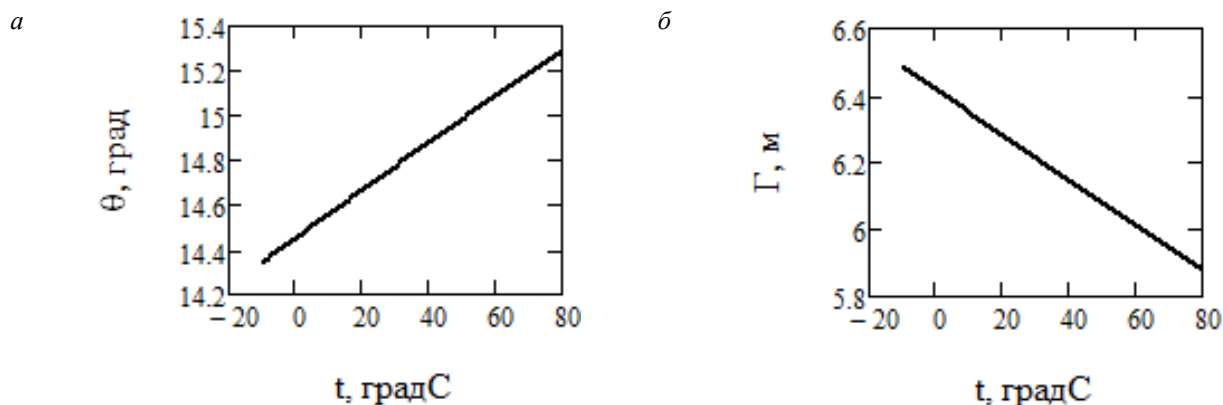


Рис. 8. Изменение угла поворота шара (а) по первому варианту системы и смещение шара по вертикали (б) по второму варианту при изменении температуры провода

На рис. 9 представлено изображение совокупности шаров-маркеров, размещаемых в пролете ВЛ. При реализации измерительной системы по первому варианту требуется оценить, на каком расстоянии от начала пролета следует устанавливать шар-маркер, снабженный датчиками, в черед остальных исключительно маркерных шаров.

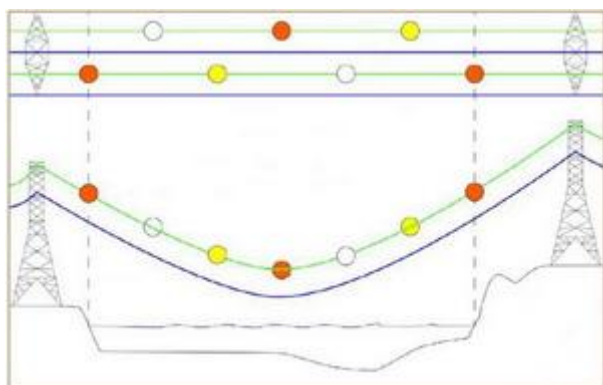


Рис. 9. Шары-маркеры в пролете ВЛ

С этой целью был выполнен анализ изменения чувствительности показаний инклинометра, размещаемого внутри шара, по мере удаления точки подвеса последнего от начала пролета. График изменения чувствительности средства измерений S_θ , т. е. отношения изменения выходного показания θ датчика к вызывающему его изменению измеряемой величины – нарастанию толщины гололедной муфты на $\Delta b = 5$ мм – показан на рис. 10.

Как следует из вида данного графика, чувствительность измерительного шара-маркера снижается по мере удаления точки его подвеса от начала пролета, следовательно, в совокупности размещаемых на проводе ВЛ шаров-маркеров (см. рис. 9) измерительный шар должен быть

установлен ближе к началу пролета. Для дальнейших расчетов величину абсциссы точки крепления измерительного шара примем равной $x_0 = 3$ м.

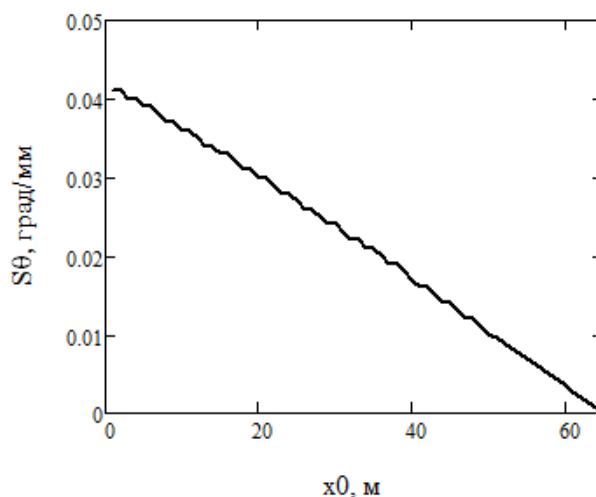


Рис. 10. Изменение чувствительности измерительного шара-маркера при удалении точки его подвеса от начала пролета

Увеличение отклонения показаний тензодатчика и измерительного шара по первому варианту системы (показаний, сформированных по данным видеорегистрации, по второму варианту), как отмечалось выше, свидетельствует о деградации материала провода, на котором установлен шар. Иллюстрацией этого служат изображенные на рис. 11 графики следующих зависимостей:

- отклонения величины угла наклона θ при девиации модуля упругости и коэффициента температурной деформации провода (отклонении от нормативного значения на $\Delta = 5...25$ %) при наличии гололедной муфты толщиной 15 мм и температуре -40°C (рис. 11, а);

• отклонения результатов видеорегистрации габарита провода до земли Γ при девиации модуля упругости и коэффициента температурной деформации провода (отклонении от

нормативного значения на $\Delta = 5...25\%$) при наличии гололедной муфты толщиной 15 мм и температуре $-40\text{ }^\circ\text{C}$ (рис. 11, б).

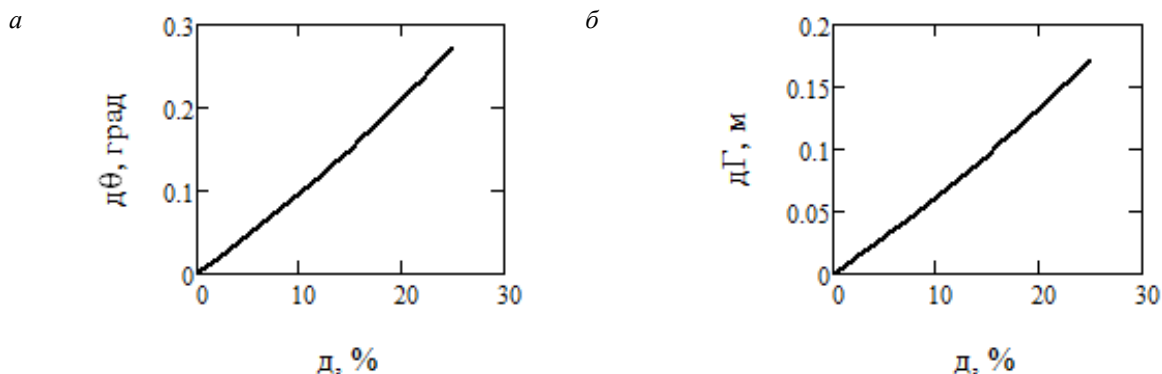


Рис. 11. Отклонение показаний инклинометра (а) и результатов видеорегистрации (б) при деградации материала провода

При этом отклонение механических характеристик провода выражается более явно именно в гололедный период, что обуславливает наличие в составе измерительной системы тензодатчика и подтверждается приведенным на рис. 12 графиком, аналогичным изображенному на рис. 11, а, но полученному исходя из предположения об отсутствии гололедных отложений и разогреве провода до температуры свыше $40\text{ }^\circ\text{C}$. Как видно из рис. 12, отклонения угла поворота θ в этом случае меньше более чем в 2 раза.

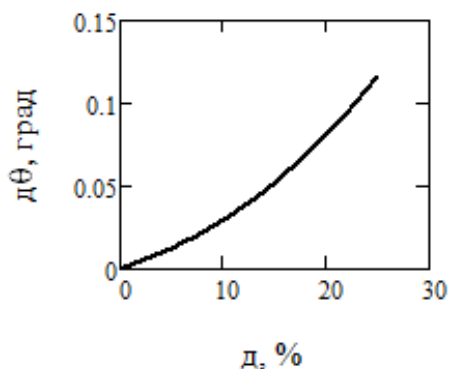


Рис. 12. Отклонение показаний инклинометра при деградации материала провода и его провисании, вызванном температурной деформацией

Таким образом, в рамках исследования была предложена многофункциональная эффективная измерительная система, не имеющая на сегодняшний день прямых аналогов. В силу того, что световая маркировка ВЛ выполняется на особо ответственных пролетах, например, при переходах через водные преграды, горные ущелья, на пересечениях с инженерными коммуникациями и т. д. [1; 5], то и мониторинг со-

стояния проводов на данных участках трасс линий также представляет собой крайне важный аспект их безопасной эксплуатации. Реализация описываемой измерительной системы в различной конфигурации, в частности, монтаж одного тензодатчика на несколько измерительных шаров или комплектов из видеокамеры и сигнального шара, открывает возможность для гибкой адаптации системы под нужды конкретного заказчика в том числе с учетом срока эксплуатации линий, находящихся в его ведении. Кроме того, это позволяет непрерывным образом отслеживать степень изношенности линий электропередачи, актуализировать информацию о механических характеристиках проводов. В конечном счете внедрение предлагаемой измерительной системы может рассматриваться в качестве первого шага на пути к формированию интеллектуальных электрических сетей нового поколения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Мониторинг воздушных линий электропередачи, эксплуатируемых в экстремальных метеоусловиях [Текст] / В. Я. Башкевич [и др.]. – Саратов: СГТУ, 2013 с. – 244 с.
2. Вихарев, А. П. Проектирование механической части ЛЭП [Текст]: учеб. пособ. / А. П. Вихарев, А. В. Вычегжанин, Н. Г. Репкина. – Киров: ВятГУ, 2009. – 140 с.
3. Дубровин, И. Износ электросетевой инфраструктуры в России. Масштабы и перспективы [Электронный ресурс] / И. Дубровин // Информационное агентство REGNUM. – Режим доступа: <https://regnum.ru/news/2348996.html>. – (Дата обращения: 17.05.2022).
4. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах [Текст] / И. И. Левченко [и др.]. – М.: МЭИ, 2007. – 448 с.
5. Приборы контроля и диагностики в электроэнергетике [Текст]: учеб. пособ. / А.Н. Шилин [и др.]. – Волгоград: ВолгГТУ, 2017. – 131 с.

УДК 621.317.39

*А. Н. Шилин, М. Н. Мустафа, И. С. Барашков***МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ДАТЧИКОВ
ДЛЯ НИЗКОЧАСТОТНОГО ВИБРОПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ
НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА ЛЕВИТАЦИИ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: eltech@vstu.ru

Проведен морфологический анализ бесконтактных датчиков передвижения по шести критериям. Проведен разбор конструкции вибропреобразователя для дальнейшей установки рассмотренных датчиков. Рассказаны основные подробности проведения морфологического анализа датчиков на основе парного анализа.

Ключевые слова: матрица смежности, индекс варианта, критерий, датчик, анализ.

*A. N. Shilin, M. N. Mustafa, I. S. Barashkov***MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF SENSORS FOR A LOW-FREQUENCY
VIBROCONVERTER BASED ON THE LEVITATION EFFECT****Volgograd State Technical University**

A morphological analysis of non-contact movement sensors was carried out according to six criteria. The design of the vibration transducer was analyzed for further installation of the considered sensors. The main details of the morphological analysis of sensors based on paired analysis are described.

Keywords: adjacency matrix, variant index, criterion, sensor, analysis.

Введение

В настоящее время для практического решения задач вибрационной диагностики в различных областях деятельности человека – сейсмологии и гидроэнергетике необходимы приборы с диапазоном частоты от 0,01 до 20 Гц. Для диагностики тихоходного оборудования гидрогенераторов ГЭС используются инерционные электромеханические преобразователи. В последних разработках таких преобразователей используется электромагнитный подвес с параметрической обратной связью, позволяющей управлять жесткостью колебательной системы и соответственно, метрологическими характеристиками преобразователя [1–2]. В этих преобразователях подвижная часть закрепляется на гибкой диафрагме, которая является источником сухого трения, которое ограничивает метрологические характеристики, а именно порог чувствительности и ограниченную низкочастотную границу частотного диапазона. Ограничения этих характеристик связаны с фундаментальной проблемой механических систем, а именно с наличием трения в трущихся парах. Решение этой проблемы возможно за счет использования эффекта левитации, который полностью исключает сухое трение. Левитация представляет собой устойчивую подвеску объектов без механической

связи [3] с помощью магнитных сил. Этот физический эффект используется в различных приложениях в науке, технических системах и технологиях [4]. Основное преимущество применения эффекта левитации это решение фундаментальной проблемы механических систем, именно исключение сухого трения, что позволяет повысить коэффициент полезного действия и улучшить динамические характеристики систем. Кроме того, при использовании эффекта левитации в системах отсутствуют износ. На основе эффекта левитации был разработан низкочастотный преобразователь колебаний [5].

**Конструкция преобразователя
на основе эффекта левитации**

Разработанный преобразователь содержит чувствительный элемент 1 (рис. 1, а) и электронную систему управления 2 (рис. 1, б). В корпусе 3 чувствительного элемента 1 размещен цилиндрический постоянный магнит 4, находящийся внутри двух жестко закрепленных в корпусе 3 кольцевых постоянных магнитов 5 и катушки 6 с возможностью перемещения по оси OZ. Расположение магнитов выполнено таким образом, что наружная поверхность каждого конца цилиндрического магнита 4 и внутренняя поверхность кольцевого магнита 5, расположенного напротив этого конца, имеют одноименные полюса. Такое расположение маг-

нитов исключает радиальное перемещение цилиндрического магнита 4 при произвольном расположении корпуса 3 относительно направления действия сил тяжести. В корпусе 3 установлен датчик перемещения 7 цилиндрического магнита относительно корпуса. Датчик состоит из расположенных на одной оптической оси элементов: светодиода 8, конденсора 9, объектива 10 и многоэлементного фотоприемника 11. На цилиндрическом магните 4 закреплена шторка 12, перекрывающая световой поток светодиода 8. Конденсор 9 и объектив 10 позволяют получить изображение шторки 12 в плоско-

сти фотоприемника 11. Многоэлементный фотоприемник 11 подключен через усилитель сигналов 13 к микроконтроллеру 14, который выполняет функцию регулятора системы стабилизации. Один из выходов микроконтроллера 14 соединен с блоком отображения информации 15, а другой выход – цифроаналоговым преобразователем 16, который через усилитель тока 17 соединен с обмоткой электромагнитной системы 6.

Перед началом работы с помощью микроконтроллера 14 задается ток в катушке 6, магнитное поле которой перемещает постоянный

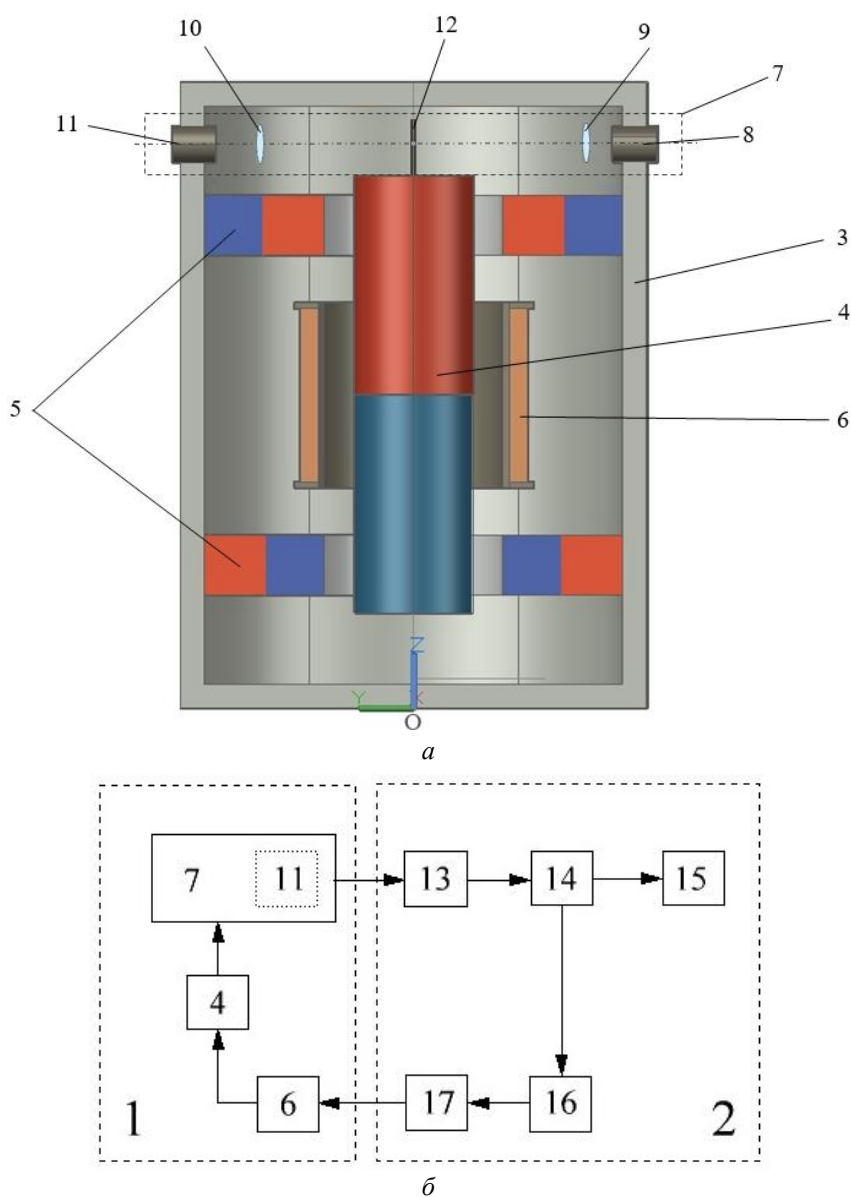


Рис. 1:

a – конструкция преобразователя; *б* – блок-схема системы управления преобразователя: 1 – чувствительный элемент; 2 – электронная схема обработки информации; 3 – корпус; 4 – цилиндрический постоянный магнит; 5 – кольцевые постоянные магниты; 6 – катушка; 7 – датчик перемещений; 8 – светодиод; 9 – конденсор; 10 – объектив; 11 – фотоприемник; 12 – шторка; 13 – усилитель сигналов; 14 – микроконтроллер; 15 – устройство отображения информации; 16 – цифроаналоговый преобразователь; 17 – усилитель тока

цилиндрический магнит 4 в центр катушки. При работе корпус 3, закрепленный на контролируемом объекте, воспринимает его вибрации, а постоянный цилиндрический магнит 4 вместе со шторкой 12, представляющие собой инертную массу, стремятся к сохранению состоянию покоя. Инертная масса 4 и 12 совершает колебательное движение относительно катушки 6. При этом, взаимодействие постоянного цилиндрического магнита 4 с постоянными кольцевыми магнитами 5 обеспечивает центрирование постоянного цилиндрического магнита 4 при его движении вдоль оси OZ катушки 6. Колебательное движение цилиндрического магнита 4 и соответственно шторки 12 осуществляет изменение светового потока от светодиода 8, который с помощью многоэлементного фотоприемника 11 преобразуется в цифровой сигнал, пропорциональный перемещению цилиндрического магнита 4 со шторкой 12. Такой бесконтактный датчик перемещений имеет меньшие потери на сухое трение и обладает линейной функцией преобразования.

С помощью микроконтроллера 14 осуществляется цифровая обработка сигнала, поступающего на вход через усилитель сигнала 13 от фотоприемника 11. Этот сигнал ошибки положения постоянного цилиндрического магнита 4 относительно середины катушки 6 преобразуется микроконтроллером 14, выполняющим функции пропорционального и дифференцирующего звеньев, поступает через усилитель тока 17 в обмотку катушки 6. Магнитное поле катушки 6, взаимодействуя с постоянным цилиндрическим магнитом 4, перемещает постоянный цилиндрический магнит 4 к центру катушки 6. Сигнал с другого выхода микроконтроллера 14, пропорциональный амплитуде колебаний объекта, подается на вход устройство отображения информации 15.

Методика выбора датчика положения магнита преобразователя

Одним из основных элементов электромеханического преобразователя колебаний является датчик перемещения груза в магнитном поле, который оказывает большое влияние на точность измерения. В настоящее время существует большое разнообразие датчиков перемещения, которые имеют свои преимущества и недостатки. В настоящее время существуют различные типы датчиков: вихретоковый; индуктивный; емкостной; на основе эффекта Холла; оптический; лазерный и ультразвуковой.

Наибольшее распространение в магнитных подвесах получили оптические датчики и датчики Холла. Основным недостатком датчиков, а именно вихретокового, индуктивного, емкостного и на основе эффекта Холла является влияние на их работу электромагнитного поля подвеса. Недостаток ультразвукового датчика – недостаточная точность измерения. Основными преимуществами для решения этой задачи обладают оптические и лазерные датчики, а именно высокая точность и отсутствие влияния на работу датчиков электромагнитного поля подвеса. Кроме того, в оптическом датчике возможно использование в качестве приемника излучения многоэлементного фотоприемника, позволяющего представлять информацию в цифровой форме.

Практически сложно выбрать датчик, который бы удовлетворял всем требованиям задачи. Поэтому необходим обоснованный выбор типа и конструкции датчика. Для этого необходимо предварительно выбрать критерии выбора датчика для конкретной задачи.

Чтобы выбрать технические решения из множества вариантов и с множеством параметров и характеристик, целесообразно использовать морфологические методы анализа [6–9].

Индивидуальные экспертные методы, которые дополняются определенной математической обработкой результатов, включают в себя метод парного сопоставления и метод расстановки приоритетов. Самым простым и наиболее широко используемым методом является парное сравнение. Результаты такого обследования представлены в соответствующих матрицах.

На основе анализа особенности и условий работы электромеханического преобразователя на основе эффекта левитации выявлены основные критерии выбора:

K_1 – точность;

K_2 – надежность;

K_3 – быстродействие;

K_4 – взаимовлияние датчика и магнитного поля левитрона;

K_5 – чувствительность;

K_6 – электромагнитная совместимость.

В поставленной задаче в столбец и строку (табл. 1) записываются параметры датчиков перемещения. На пересечении столбца и строки ставится коэффициент предпочтения 1,5; 1,0; 0,5, который показывает важность критерия или датчика при парном сравнении.

Таблица 1

Матрица смежности по параметрам

Индекс критерия	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6	Σ	β_j	β'_j
K_1	1	1,5	1,5	0,5	0,5	0,5	5,5	27,75	0,1443
K_2	0,5	1	0,5	0,5	0,5	0,5	4,5	22,75	0,1183
K_3	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	3,5	18,75	0,0975
K_4	1,5	1,5	1,5	1	1,5	1	6,5	44,5	0,2315
K_5	1,5	1,5	1,5	0,5	1	1,5	7,5	41,5	0,2159
K_6	1,5	1,5	1,5	1	0,5	1	6,5	37	0,1925
Всего	-	-	-	-	-	-	-	192,25	1

Из результатов анализа следует, что наиболее важным критерием отбора является взаимовлияние датчика и магнитного поля левитрона, поскольку этот параметр определяет нормальное функционирование преобразователя. Рассмотрим методику выбора датчика перемещения с учетом частных критериев $K_1, K_2 \dots K_6$ из семи вариантов $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6, X_7$. Каж-

дому варианту соответствует тип преобразователя, а именно X_1 – оптический датчик, X_2 – датчик Холла, X_3 – индуктивный датчик, X_4 – емкостной датчик, X_5 – индукционный (вихретоковый) датчик, X_6 – трансформаторный датчик, X_7 – триангуляционный датчик. Данные датчики изображены на рис. 2.

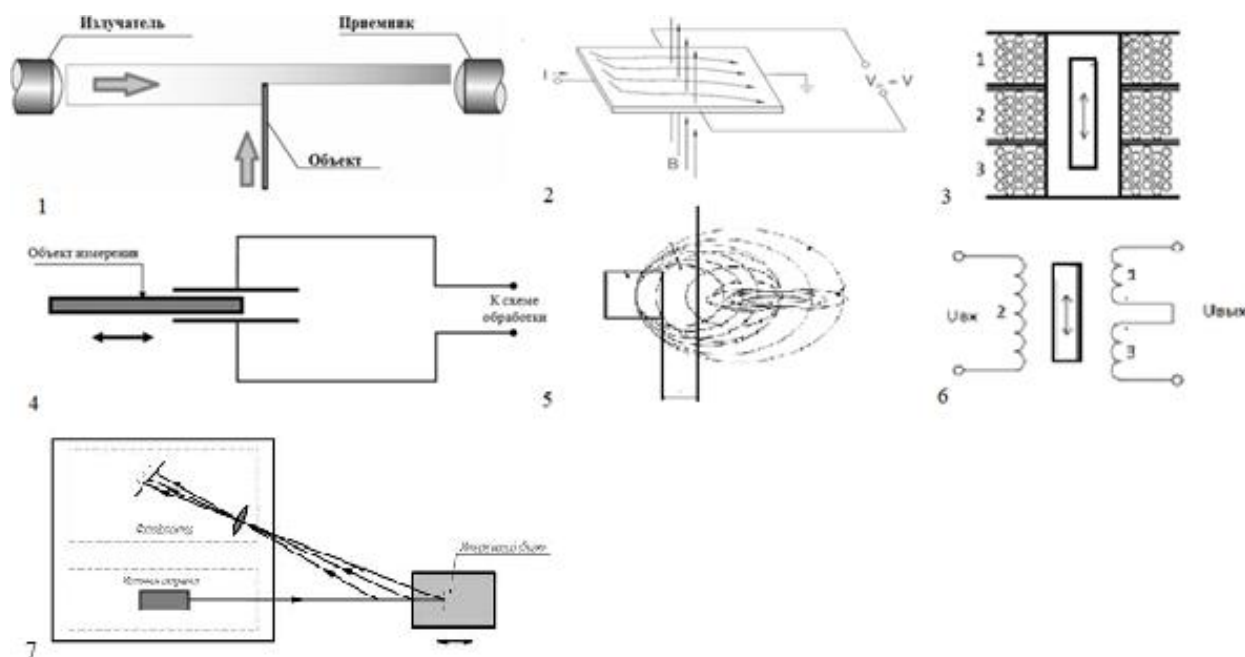


Рис. 2. Рассматриваемые датчики:

1 – оптический; 2 – датчик Холла; 3 – индуктивный; 4 – емкостной; 5 – индукционный (вихретоковый); 6 – трансформаторный; 7 – триангуляционный

Оценка по вышеуказанному способу проводится с использованием комплексных приоритетов $P_{i \text{ ном}}$ по формуле

$$P_{i \text{ ном}} = \sum_{j=1}^n \beta'_j P_{ij}, \quad (1)$$

где β'_j – относительный приоритет (значимость) j -го критерия; P'_{ij} – относительный приоритет i -го варианта по j -му критерию; n – количество критериев ($n = 6$).

Каждое устройство (датчик) может иметь преимущество по каким либо критериям в сравнении с другими и поэтому на втором этапе выполняется морфологический анализ датчиков по каждому критерию, т. е. какой датчик в большей степени удовлетворяет этому критерию. На том этапе для каждого критерия создаются квадратные матрицы (табл. 2–7).

Таблица 5

Матрица смежности по четвертому критерию

Индекс варианта	Матрица смежности по четвертому критерию							Σ	P_{i4}	P'_{i4}
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7			
X_1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	9,5	64	0,1997
X_2	0,5	1	1	0,5	1	1	0,5	5,5	35,5	0,1108
X_3	0,5	1	1	0,5	1	1	0,5	5,5	35,5	0,1108
X_4	0,5	1,5	1,5	1	1,5	1,5	0,5	8	50,5	0,1576
X_5	0,5	1	1	0,5	1	1	0,5	5,5	35,5	0,1108
X_6	0,5	1	1	0,5	1	1	0,5	5,5	35,5	0,1108
X_7	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	9,5	64	0,1997
Всего	-	-	-	-	-	-	-	-	320,5	1

Таблица 6

Матрица смежности по пятому критерию

Индекс варианта	Матрица смежности по пятому критерию							Σ	P_{i5}	P'_{i5}
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7			
X_1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	10	68,5	0,216088
X_2	0,5	1	1	1,5	1	0,5	0,5	6	37,5	0,118297
X_3	0,5	1	1	1,5	1	0,5	0,5	6	37,5	0,118297
X_4	0,5	0,5	0,5	1	0,5	0,5	0,5	4	26,5	0,083596
X_5	0,5	1	1	1,5	1	0,5	0,5	6	37,5	0,118297
X_6	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	0,5	8	50,5	0,159306
X_7	0,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	9	59	0,18612
Всего	-	-	-	-	-	-	-	-	317	1

Таблица 7

Матрица смежности по шестому критерию

Индекс варианта	Матрица смежности по шестому критерию							Σ	P_{i6}	P'_{i6}
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7			
X_1	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	9,5	64	0,200627
X_2	0,5	1	1	0,5	1	1,5	0,5	6	37,75	0,118339
X_3	0,5	1	1	1	0,5	1,5	0,5	6	38,25	0,119906
X_4	0,5	1,5	1	1	1,5	1,5	0,5	7,5	47,75	0,149687
X_5	0,5	1	1,5	0,5	1	1,5	0,5	6,5	40,75	0,127743
X_6	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1	0,5	4	26,5	0,083072
X_7	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1	9,5	64	0,200627
Всего	-	-	-	-	-	-	-	-	319	1

Аналогично проводится анализ датчиков по другим критериям, а результаты анализа сводятся в табл. 8.

Комплексный показатель (приоритет) затем рассчитывается для каждого из вариантов $P_{i\text{ном}}$ (табл. 8), который определяется как сумма про-

изведений относительных приоритетов объекта и относительных приоритетов критериев. В последней строке указываются комплексные приоритеты, полученные путем сложения продуктов элементов первого столбца и следующих столбцов таблицы.

Таблица 8

Матрица приоритетов по каждому варианту

Критерии значимости P_j^*	Относительный приоритет по каждому варианту						
	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7
0,1443	0,214734	0,139498	0,119122	0,139498	0,119122	0,083072	0,184953
0,1183	0,201893	0,108044	0,126972	0,159306	0,118297	0,083596	0,201893
0,0975	0,200627	0,111285	0,118339	0,092476	0,118339	0,158307	0,200627
0,2315	0,1997	0,1108	0,1108	0,1576	0,1108	0,1108	0,1997
0,2159	0,216088	0,118297	0,118297	0,083596	0,118297	0,159306	0,18612
0,1925	0,200627	0,118339	0,119906	0,149687	0,127743	0,083072	0,200627
Комп. приор.	0,21269	0,11773	0,11672	0,13133	0,11493	0,113347	0,18962

Вариант, получивший наивысшую оценку $P_{i \text{ ном}}$, является наилучшим для заданной задачи. В нашем случае это $P_{1 \text{ ном}} = 0,21269$. Поэтому преобразователь под номером 1 (вариант X_1 – оптический датчик) использован в преобразователе.

Вариант реализации оптического датчика

Принцип работы оптического датчика сравнительно прост источник света направляет поток излучения на приемник Источник, приемник и левитирующий элемент расположены на одной оптической оси таким образом, что элемент частично прерывает поток излучения. Поэтому полученное количество потока излучения является мерой для определения положения элемента. Существуют и другие оптические методы, основанные на эффекте отражения. Лазерные датчики по своей физической природе относятся к классу оптических датчиков. Источник излучения (лазерный диод) проектирует пятно света на цель, а отражение пятна фокусируются через объектив на приемник излучения. Если мишень меняет свое положение относительно контрольной точки, то меняется и положение отраженного светового пятна на приемнике. Электронная схема определяет положение пятна на приемном элементе и после обработки сигнала выдает результат измерения в дискретной форме. Необходимо отметить, что нестабильность размера и формы пятна оказывает отрицательное влияние на точность измерения положения элемента.

Выводы

Таким образом, использование морфологического анализа позволяет обоснованно с учетом всех преимуществ и недостатков датчиков положения выбрать наилучший вариант для конкретной задачи. Датчик положения инерционного элемента – магнита оказывает большое влияние на точность измерения амплитуды колебаний.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. П. м. 95832 РФ. МПК G01H 11/02. Устройство для измерения вибраций / Седов М. Н., Шилин А. Н. ; ГОУ ВПО ВолгГТУ. – 2010.
2. Шилин, А. Н. Моделирование вибропреобразователя с электромагнитным подвесом / А. Н. Шилин, М. Н. Седов // Приборы. – 2008. – № 12. – С. 41–44.
3. Sun Y., Xie S., Xu J., Lin G. A Robust Levitation Control of Maglev Vehicles Subject to Time Delay and Disturbances: Design and Hardware Experimentation // MDPI Applied Sciences. February 2020. Vol. 10. Issue 1179. PP. 1-17.
4. Annadurai A. A Demonstration for Pedagogy to Realize Maglev Technologies // International Journal of Emerging Engineering Research and Technology. June 2014. Vol. 2. Issue 3. PP. 152-157.
5. П.м. 203751 Российская Федерация. МПК G01H11/00. Устройство для измерения вибраций / Шилин А. Н., Аввакумов В. Е., Мустафа М. Н. ; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2021.
6. Одрин, В. М. Метод морфологического анализа технических систем / В. М. Одрин. – М. : ВНИИПИ, 1989. – 312 с.
7. Саати, Т. Л. Принятие решений при зависимости и обратных связях: Аналитические сети / Т. Л. Саати. – М. : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. – 360 с.
8. Шилин, А. Н. Морфологический синтез оптико-электронных систем измерения размеров нагретых деталей / А. Н. Шилин, И. А. Шилина (И. А. Коптелова) // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 3. – С. 51–61.
9. Моисеева, Н. К. Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа / Н. К. Моисеева, М. Г. Карпунин. – М. : Высш. шк., 1988. – 192 с.

УДК 629(114.4+077)

И. В. Балясников

**ИНТЕГРАЦИЯ СЕНСОРНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ
КАК СПОСОБ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ**

**Московский автомобильно-дорожный государственный
технический университет (МАДИ)**

e-mail: vova.75.vova@mail.ru

Перечислены системы активной безопасности, предназначенные для регулирования дистанции и бокового интервала. Проведен сравнительный анализ сенсорных устройств, используемых в таких системах. Обоснована интеграция различных датчиков в системах активной безопасности в целях снижения нагрузки на бортовую электросеть и расхода топлива.

Ключевые слова: система предотвращения столкновений; активный круиз-контроль; парковочный ассистент; парковочный автопилот; система удержания ряда; система помощи при перестроении; радар; лидар; инфракрасный датчик; стереокамера.

I. V. Baljasnikov

CAR SENSOR INTEGRATION AS A WAY TO REDUCE ENERGY CONSUMPTION

Moscow automobile and road construction state technical university (MADI)

The active safety systems designed to control the distance and lateral interval are listed. A comparative analysis of devices used in such systems is carried out. The integration of various sensors is justified in order to reduce the load on the on-board electrical network and fuel consumption.

Keywords: collision avoidance system; active cruise control; parking assistant; parking autopilot; lane-keeping system; blind spot assist; radar; lidar; infrared sensor; stereo camera.

На рубеже XX–XXI веков появились различные системы для регулирования дистанции и бокового интервала, такие как активный круиз-контроль (АКК, 1995–1998) и система предотвращения столкновений (СПС, 2003–2005), системы безопасной парковки (СБП) – парковочный ассистент (ПА, 1990-е гг.) и парковочный автопилот (ПАП, 2003–2006), система помощи при перестроении (СПП, 2000) и система удержания ряда (СУР, 2003) [1]. Научная школа А. А. Юрчевского, заложившая в 1970-х гг. в МАДИ базу для создания СПС на основе СВЧ-локаторов, в настоящее время занимается разработкой методов испытаний для систем автоматического экстренного торможения (САЭТ) [2; 3]. Регулирование дистанции [4; 5] является важным фактором для снижения напряженности в транспортном потоке [6] и повышения безопасности на пешеходных переходах [7; 8],

а также неотъемлемым элементом систем управления движением с высоким уровнем автоматизации [9–14]. В качестве устройств контроля расстояния до внешних объектов в перечисленных системах применяются радары, лидары, инфракрасные датчики, стереокамеры.

Радар включает передатчик с усилителем и антенной, который излучает радиосигнал (электромагнитные волны); ресивер с антенной, который принимает отраженный от объекта сигнал и преобразует его в электрический ток. Время, за которое радиопульс проходит путь до объекта и обратно, соответствует расстоянию $2R$ и равняется $2R/c$, где c – скорость распространения электромагнитной волны, равная скорости света, которая остается практически неизменной в любой среде, что дает преимущество по точности в сравнении с ультразвуковыми датчиками. Для АКК используются радары,

работающие на частоте 77 ГГц в диапазоне до 250 м. Радары на частоте 24 ГГц (диапазон до 20 м) обычно используются в СПС, СПП [15]. Для СУР и защиты пешеходов обычно применяются стереокамеры – двойные видеокамеры. Ультразвуковые датчики (>20 кГц) применяются в СБП (диапазон до 4 м). Их принцип действия аналогичен эхолоту: один преобразователь излучает ультразвуковые волны, а отраженные от объекта волны обнаруживаются другим (одним или более) [16]. Лидары дают возможность детектировать расстояние (принцип ранжирования), скорость (используя доплеровское смещение), различать множественные объекты по отдельности в широкой области обзора, а также производить с высокой точностью мониторинг полосы, поэтому применяются в АКК, СПС, СУР. Принцип действия аналогичен радарному: лидар направляет инфракрасный (ИК) свет на цель, переданный свет частично рассеивается, частично отражается от объекта и возвращается назад, изменяя свои свойства, что позволяет определить свойства цели. Ключевым компонентом лидара является высокомогущий лазерный диод, предназначенный для передачи ИК импульса длиной волны 850–950 нм. Принцип работы ИК систем ночного видения аналогичен лидарам: дорога освещается ИК светом, который, отражаясь от препятствий, возвращается назад к детектору. Отличие состоит в том, что вместо лазера и фотодиодного детектора требуется и излучатель, и детектор с широкой областью обзора на основе обычного плоского или трехмерного пиксельного сканирования. Многие системы ночного видения базируются на использовании света фар, но, так как излучение широкополосное, включающее видимый и инфракрасный диапазоны, требуется фильтр [17]. Радары обеспечивают надежную работу в сложных условиях (плотный туман, интенсивный дождь или снегопад, сильное задымление, ослепление солнечными лучами или фарами). Преимуществом лидаров и стереокамер является возможность распознавания образов, в том числе пешеходов, дорожных знаков и сигналов светофора, однако только при наличии соответствующего программного обеспечения. Ультразвуковые датчики восприимчивы к загрязнению.

Системы активной безопасности (САБ) играют важную роль в снижении смертности на дорогах. Помимо перечисленных выше систем для регулирования дистанции и бокового ин-

тервала, к ним относятся также антиблокировочная система (АБС), электронный контроль устойчивости (ЭКУ), система распознавания дорожных знаков (СРДЗ) и многие другие так называемые автомобильные ассистенты, или системы помощи водителю. Общими для многих САБ являются не только функциональность, но и использование в качестве входных данных от набора одних и тех же датчиков. В современных автомобильных электронных системах работают специализированные и оптимизированные для конкретного применения датчики, определяющие в реальном времени текущий статус или динамику автомобиля и его систем. Интеллектуальные датчики в свою очередь являются подсистемами по отношению к системам, для которых они выполняют свои измерения, при этом некоторые из них сами представляют собой сложные мультисенсорные блоки, объединяющие несколько датчиков, характеризующиеся несколькими входными и выходными интерфейсами. При введении новых функций датчики могут вводиться избыточно, и одной из центральных задач, решаемых ведущими поставщиками микроэлектроники, является оптимизация сенсорной архитектуры. Практически любой современный датчик – это, в сущности, микроконтроллер, дополненный сенсорными функциями, без которых его функционирование бессмысленно. По мере повышения требований к автомобилям и электронным системам привлекаются дополнительные датчики. Мультисенсорные модули – это актуальное направление в развитии автомобильных технологий. Цель оптимизации сенсорной архитектуры может быть сформулирована как создание целостной измерительной архитектуры, обеспечивающей информацию с высокой точностью и надежностью посредством аппаратно-программного узла, получающего первичные или обработанные сенсорные сигналы и передающего различным доменам обработанные сенсорные сигналы в том виде, в каком это необходимо для реализации автомобильных функций. Слияние и согласование сигналов позволяет не только решать измерительную задачу, но и повышать точность детектирования, а также уверенность интеллектуальной системы в правильности выполняемых ею действий. Некоторые сигналы можно использовать для вычисления переменных различными способами или посредством виртуальных датчиков. Это позволяет повышать

взаимозаменяемость сигналов и надежность измерений при утере одного из сигналов. Следующий шаг состоит в привлечении для обработки и слияния сенсорных сигналов извне автомобиля, например, сигналы от GPS и датчиков дорожной инфраструктуры (V2I), коммуникация автомобилей между собой (V2V). Иными словами, цель оптимизации сенсорной архитектуры – разработать матрицу соответствия датчиков автомобильным функциям, которая позволяет определять, какие сенсорные сигналы требуются для измерений, и подключать их в масштабируемые программные модули. Это допускает исключение избыточных датчиков и снижает стоимость внедрения новых автомобильных.

Более высокий уровень интеграции и снижение цены способствуют масштабированию радарной технологии, а также позволяют интегрировать ее с другими сенсорными технологиями, например, камерами. Система может быть дополнена датчиками для помощи в пробках, детектирования боковых ударов или автоматической парковки. Современные разработки позволяют объединить множество САБ посредством одного интегрального модуля со слиянием данных, и тем самым снизить системную цену. Интегрированная система на основе радара и камеры разработана для применения в широком спектре: полноскоростном АКК, адаптивном контроле фар, обнаружении дорожных знаков, предупреждении о переднем столкновении, защиты пешеходов, автоматическом торможении в ситуациях, когда водитель не реагирует на опасность. Ядром является электронно-сканирующий радар среднего и дальнего диапазона. Функции радарного детектирования интегрированы с видеокamerой и вычислительным блоком в одном компактном модуле, предназначенном для монтажа на ветровом стекле или зеркале заднего вида. Раздельные радарные системы традиционно монтируются за решеткой радиатора, но это зона, в которой после аварии может понадобиться ремонт радара. Система обнаружения пешеходов переднего обзора осуществляет слияние сенсорных данных от масштабируемой видеокamerы с данными радара на 24 ГГц. Если пешеход обнаружен перед автомобилем посредством камеры, и это подтверждено радаром, то применяются соответствующие алгоритмы расчета вероятности аварии. Стереокamеры разрабатывались для защиты пешеходов, но они мо-

гут предоставлять входные данные для предупреждения о смене полосы, при обнаружении дорожных знаков, а также для интеллектуального контроля фар.

Некоторые компании используют для контроля внимания водителя набор датчиков от систем помощи водителю. Система использует камеру, локализованную между ветровым стеклом и зеркалом заднего вида интерьера, весь набор данных от других датчиков, вычисляет риск недостаточного внимания со стороны водителя, индицирует его в виде графа и при необходимости выдает предупреждающие сигналы. Система мониторинга водителя может рассматриваться как гибридная функциональная надстройка без избыточности сенсорных технологий.

Интегрирование телематических услуг повышает безопасность, что эквивалентно подключению виртуальных ассистентов и интеллектуальных датчиков. Например, голосовая навигация позволяет предупреждать о поворотах, при этом руки остаются на рулевом колесе, а глаза не отвлекаются на согласование маршрута с картой. Оптимизация маршрута помогает водителям осуществлять навигацию, избегать пробок, снижать время работы на холостом ходу, лучше контролировать скоростной режим, что дополнительно приводит к экономии топлива до 5 %. Технология GPS позволяет получать и передавать любую сенсорную информацию. Компания General Motors впервые продемонстрировала V2V в 2005 году. Аббревиатура V2X объединяет компоненты V2V и V2I. Коммуникация осуществляется посредством так называемой специальной короткодиапазонной беспроводной коммуникации (Dedicated Short Range Communications, DSRC) на частоте 5,9 ГГц. Вхождение в поток нового транспортного средства эквивалентно подключению виртуального датчика к системам безопасности других автомобилей на дороге. По данным NHTSA, технология V2V позволяет снизить аварийность на 70 %, а V2I – на 15 % для тяжелых грузовиков и на 26–27 % для других автомобилей. Комбинированное использование V2V/V2I снижает аварийность более чем на 80 % [18].

Таким образом, интеграция датчиков в комбинированные сенсорные модули не только существенно повышает безопасность дорожного движения, но также приводит к уменьшению нагрузки на бортовую электросеть автомобиля и, как следствие, снижению расхода топлива.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малиновский, М. П. Эволюция систем управления АТС / М. П. Малиновский // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2014. – Вып. 4. – С. 22–31.
2. Иванов, А. М. Системы автоматического экстренного торможения: монография / А. М. Иванов, С. Р. Кристальный, Н. В. Попов – М.: МАДИ, 2018. – 180 с.
3. Новые методы испытаний систем автоматического экстренного торможения и опыт их применения / А. М. Иванов, С. Р. Кристальный, Н. В. Попов, М. А. Топорков, М. И. Исакова // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2018. – № 2 (121). – С. 146–155.
4. Малиновский, М. П. Прогнозирование процесса продольного сближения автотранспортных средств / М. П. Малиновский, Г. И. Гладов // Автомобильная промышленность. – 2009. – № 9. – С. 21–26.
5. Гладов, Г. И. Расчет дистанции сближения автотранспортных средств / Г. И. Гладов, М. П. Малиновский // Журнал автомобильных инженеров. – 2009. – № 2. – С. 30–33.
6. Малиновский, М. П. Психическая напряженность в транспортном потоке: причины, следствия, меры противодействия / М. П. Малиновский // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2018. – № 4. – С. 3.
7. Малиновский, М. П. О несостоятельности некоторых способов снижения аварийности на пешеходных переходах / М. П. Малиновский, А. Ю. Журавлева // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2016. – № 4. – С. 10.
8. Анализ эффективности действия систем автоматического экстренного торможения по отношению к незащищенным участникам дорожного движения / С. Р. Кристальный, Н. В. Попов, А. Н. Андреев, Д. В. Сидоров, А. Ч. Тилахун // Труды НАМИ. – 2022. – № 1 (288). – С. 26–34.
9. Гладов, Г. И. Предпосылки к разработке алгоритма для системы повышения устойчивости движения многозвенного автопоезда / Г. И. Гладов, М. П. Малиновский //

Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2007. – № 11. – С. 36–46.

10. Malinovsky, M. Concept of preventive motion control applied to buses and commercial vehicles / M. Malinovsky // Science journal of transportation. – 2016. – No. 7. – P. 153-159.
11. Малиновский, М. П. Предпосылки к разработке современных систем предупреждающего и автономного управления движением / М. П. Малиновский // Труды НАМИ. – 2017. – № 1. – С. 53–59.
12. Малиновский, М. П. Функциональный состав системы предупреждающего управления движением / М. П. Малиновский // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2017. – Вып. 2. – С. 121–128.
13. Малиновский, М. П. Парадигмы управления автотранспортным средством с высоким уровнем автоматизации / М. П. Малиновский // Труды НАМИ. – 2018. – № 1. – С. 51–60.
14. Малиновский, М. П. Концепция перспективной системы мониторинга усталости водителя / М. П. Малиновский, С. Е. Смолко // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. – Вып. 1. – С. 17–23.
15. Сысоева, С. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Ч. 6: Радары / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2007. – № 3 (68). – С. 67–76.
16. Сысоева, С. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Ч. 5: Ультразвуковые датчики / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2007. – № 2 (67). – С. 30–35.
17. Сысоева, С. Актуальные технологии и применения датчиков автомобильных систем активной безопасности. Ч. 7: Активные ИК системы: лидары, системы ночного видения, 3D-камеры / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2007. – № 4 (69). – С. 19–26.
18. Сысоева, С. Интеллектуальные автомобильные ассистенты и датчики. Функций – больше, «железа» – меньше / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2012. – № 1 (126). – С. 7–18.

УДК 629.36.023.1-597.5

А. Э. Карьялайнен, А. М. Шайхуллин

СЛОЖНОСТИ ДИНАМИЧЕСКОГО РАСЧЕТА ПНЕВМАТИЧЕСКОЙ АНТИБЛОКИРОВОЧНОЙ ТОРМОЗНОЙ СИСТЕМЫ

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)

e-mail: artem_karyalaynen@mail.ru

Перечислены основные причины применения пневматического тормозного привода на большегрузных автотранспортных средствах и его недостатки. Рассмотрен уровень развития отечественных научных школ в области тормозной динамики. Обобщены проблемы, возникающие при исследовании и расчете динамических свойств пневматического тормозного привода, в том при наличии антиблокировочной системы.

Ключевые слова: большегрузные автотранспортные средства; автопоезда; пневмоавтоматика; переходные процессы; диагностика; автоматизация

A. Je. Karjalainen, A. M. Shajhullin

DIFFICULTIES OF DYNAMIC CALCULATION OF PNEUMATIC ANTI-LOCK BRAKING SYSTEM

Moscow automobile and road construction state technical university (MADI)

The main reasons for the use of a pneumatic brake drive on heavy vehicles and its disadvantages are listed. The level of development of domestic scientific schools in the field of braking dynamics is considered. The problems that arise in the study and calculation of the dynamic properties of a pneumatic brake drive, including in the presence of an anti-lock system, are summarized.

Keywords: heavy vehicles; road trains; pneumoautomatics; transition processes; diagnostics; automation

На автотранспортных средствах большой грузоподъемности применяется пневматический тормозной привод, так как он имеет оптимальное соотношение массы транспортного средства с массой рабочего тела привода и аппаратов, сохраняет работоспособность системы при небольших утечках, что особенно важно в соединении звеньев автопоезда и использует неограниченное рабочее тело – атмосферный воздух. Динамика торможения зависит от переходных процессов, протекающих в пневматическом тормозном приводе и при взаимодействии с окружающей средой [1]. Однако пневматический тормозной привод обладает рядом недостатков:

- 1) большие габариты исполнительных механизмов;
- 2) ограниченное максимальное тормозное усилие;
- 3) значительная функциональная и структурная сложность;
- 4) недостаточное быстродействие;
- 5) невозможность реализации сложных алгоритмов управления ввиду недостаточной точности.

Динамический расчет пневматического тормозного привода в целом гидравлическому, однако на практике имеет ряд особенностей:

- 1) значительная сжимаемость воздуха;
- 2) высокая скорость течения воздуха;
- 3) различие процессов при затормаживании и растормаживании;
- 4) более сложные аналитические зависимости рабочих параметров;
- 5) существенно меньшее количество экспериментальных данных.

Исследованию динамики пневматического привода посвятили свои научные труды В. П. Автушко, В. Д. Балакин, Е. В. Герц, Л. В. Гуревич, В. Н. Дмитриев, Г. В. Крейнин, Р. А. Меламуд, Н. Ф. Метлюк и другие. В работах Е. В. Герц описываются газодинамические процессы, происходящие в пневматических приводах, отражающие теплообмен с окружающей средой, утечки воздуха и силы трения. На основе приведенной Е. В. Герц диаграммы функций давления разработан метод динамического расчета пневматического тормозного привода [2–4], позволяющий учесть перераспределение вертикальных реакций по осям [5], реакции в сцепном устройстве [6], продольный уклон, компоновку и загрузку транспортного средства [7]. Данный метод позволяет решать

такие задачи, как расчет времени срабатывания привода, построение тормозной диаграммы, расчет ускорительных каскадов, расчет параметров управляющих аппаратов при заданном быстродействии [8], повышение функциональной надежности и быстродействия тормозного крана [9].

В литературе освещены вопросы истечения сжатого воздуха в полость или атмосферу, но некоторые физические явления требуют дальнейших исследований. Для расчета расхода воздуха, истекающего через сопло в атмосферу, пользуются уравнением Сен-Венана–Ванцеля. Вводят коэффициент расхода, который определяют экспериментальным путем, а при проектировании новых пневмоэлементов применяют по аналогии с известными конструкциями. Значительно возрастает погрешность расчетов, так как нет данных для определения теоретического коэффициента расхода даже для такого простого элемента, как сопло [10]. В результате влияния силы трения на динамику исполнительных механизмов наблюдаются такие явления, как ухудшение точности позиционирования и быстродействия системы, Штрибек-эффект, прерывистое движение, упругость при относительном микросмещении, гистерезис силы трения, лаг трения, эффект залипания [11].

При исследовании динамики торможения транспортного средства с системой автоматического регулирования возникает вопрос выбора математической модели реализуемого коэффициента сцепления шины с опорной поверхностью. На сегодняшний день не существует математической модели, которая бы описывала изменение реализуемого коэффициента сцепления без известных экспериментальных данных о значениях реализуемых коэффициентов сцепления [12].

Практический интерес представляет также оценка влияния эксплуатационных неисправностей на выходные характеристики элементов пневматического тормозного привода с целью разработки методов его диагностирования [13].

Для создания эффективных антиблокировочных систем (АБС) с оптимальным алгоритмом функционирования электропневмомодуляторов разрабатывают математическую модель и программное обеспечение для исследования динамики пневматического тормозного привода в циклическом режиме работы [14].

Перечисленные проблемы создают сложности при реализации пневматической антибло-

кировочной системы (АБС). Работы по созданию отечественной АБС велись с 1976 г. в НИИ автомобильного электрооборудования и приборов и НИЦИАМТ для заводов ЗиЛ, МАЗ, КамАЗ, ЛиАЗ. Первые опытные образцы АБС с аналоговым блоком управления появились к 1981 г., однако разработчики выступили с предложением перейти на микропроцессорный блок управления [15]. Исследованию АБС посвятили свои научные труды А. Б. Гредескул, Г. М. Косолапов, А. А. Ревин, Б. С. Фалькевич, А. К. Фрумкин, Я. Е. Фаробин, А. С. Литвинов, Н. Ф. Метлюк, В. П. Автушко, Я. Н. Нефедьев, А. И. Попов, Д. А. Соцков, А. А. Юрчевский и другие.

Функциональные задачи АБС заключаются в формировании вектора управления, его воспроизведении (стабилизации) и предотвращении критических состояний [16]. Решение функциональной задачи АБС означает решение системы уравнений динамического объекта «колесо–дорога» с учетом качества управления и ограничения относительно входной величины – давления сжатого воздуха в тормозной камере [17].

Для адаптации к изменению свойств дорожного полотна при торможении необходимо определять коэффициент сцепления в режиме реального времени [18]. Наличие АБС является одним из основных факторов, влияющих на устойчивость движения [19], и ключевым компонентом современных систем управления с высоким уровнем автоматизации [20–21].

Качество АБС оценивается тормозной эффективностью, устойчивостью при торможении, способностью адаптироваться к дорожному покрытию, минимальной скоростью, ниже которой АБС не должна допускать блокирования колес, и экономичностью расхода рабочего тела [16]. В процессе эксплуатации АБС неизбежно изменение технического состояния тормозной системы, приводящее к ухудшению тормозных свойств. Важно выделить неисправности, оказывающие критическое влияние на работу АБС и тормозной системы в целом [22]. Наибольшее число отказов в тормозной системе грузового транспорта приходится на управляющие аппараты и на замерзание элементов пневмопривода, связанное с неисправностями блока подготовки воздуха [23]. При оценке качества АБС в лабораторных условиях важным является воссоздание реальных условий взаимодействия шины с поверхностью дороги [24].

Пневматическая АБС может быть реализована совместно с пневматическим [25], электропневматическим [26] или электропневмогидравлическим [27] тормозным приводом. Функциональному анализу и моделированию работы пневматического модулятора давления АБС посвящено относительно мало научных исследований [28–30]. Расчету запаса сжатого воздуха в ресиверах при работе АБС посвящены работы [31–32].

Проведенный анализ отечественных научных школ в области тормозных свойств подтверждает актуальность дополнительных исследований по динамике пневматических АБС, устанавливаемых на большегрузных автотранспортных средствах и автопоездах. Учитывая вышесказанное, можно заключить, что совершенствование существующих методов динамического расчета пневматического тормозного привода на сегодняшний день является актуальной задачей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Леонтьев, Д. Н.* Моделирование переходных процессов в пневматическом тормозном приводе автомобиля, который оборудован системой автоматического регулирования тормозного усилия / Д. Н. Леонтьев // Вісник СевНТУ. – 2013. – № 142. – С. 88–91.
2. *Малиновский, М. П.* Расчет быстродействия пневматического тормозного привода на колесных транспортных средствах специального назначения / М. П. Малиновский, В. Д. Ролдугин, Н. А. Кулешова // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2016. – Вып. 4. – С. 68–74.
3. *Малиновский, М. П.* Уточнения к интегральному методу расчета тормозных параметров автопоезда / М. П. Малиновский, С. Е. Смолко // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. – Вып. 4. – С. 55–63.
4. *Малиновский, М. П.* Проблема аппроксимации при расчете пневматического тормозного привода интегральным методом / М. П. Малиновский, Е. С. Смолко // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2020. – № 2. – С. 33–38.
5. *Малиновский, М. П.* Применение итерационного метода при расчете тормозных свойств седельного автопоезда с учетом перераспределения вертикальных реакций / М. П. Малиновский, Е. С. Смолко // Труды НАМИ. – 2020. – № 1 (280). – С. 36–47.
6. *Малиновский, М. П.* Оценка эффективности электропневматического тормозного привода автопоезда с применением итерационного метода / М. П. Малиновский, Е. С. Смолко // Автомобильная промышленность. – 2020. – № 7. – С. 27–32.
7. *Malinovsky, M. P.* Impact of longitudinal slope, layout and loading on the braking process of an articulated vehicle / M. P. Malinovsky, E. S. Smolko // Science Journal of Transportation. – 2020. – № 10. – С. 62–72.
8. *Малиновский, М. П.* Задачи, решаемые по диаграмме функций давления применительно к пневматическому

- тормозному приводу / М. П. Малиновский, Д. В. Лукьянов, А. А. Петров // Автомобиль. Дорога. Инфраструктура. – 2017. – № 2. – С. 6.
9. Пат. 2753483 РФ. Пневматический тормозной привод транспортного средства / М. П. Малиновский, Е. С. Смолко; МАДИ. – № 2020138101; заявл. 20.11.2020; опубл. 17.08.2021, Бюл. № 23. – 12 с.
10. Поливцев, В. П. Исследование процесса истечения сжатого воздуха через сопло в атмосферу / В. П. Поливцев, В. В. Поливцев // Вісник СевНТУ. – 2011. – № 119. – С. 71–76.
11. Киреева, В. А. Устойчивость следящего пневматического привода в зависимости от принятой модели трения / В. А. Киреева, К. А. Труханов // Гидравлика. – 2020. – № 11. – С. 93–111.
12. Методы расчета реализуемого коэффициента сцепления при качении колеса в тормозном режиме / А. Н. Туренко, С. И. Ломака, Л. А. Рыжих, Д. Н. Леонтьев, А. В. Быкадоров // Автомобильный транспорт (Харьков). – 2010. – № 27. – С. 7–12.
13. Федотов, А. И. Моделирование динамических процессов функционирования двухсекционного тормозного крана автомобиля с целью его диагностирования / А. И. Федотов // Журнал автомобильных инженеров. – 2014. – № 2 (85). – С. 11–15.
14. Автушко, В. П. Моделирование и расчет динамики электропневмомодулятора в циклическом режиме работы / В. П. Автушко // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2002. – № 3–4. – С. 123–131.
15. Ахметшин, А. М. Повышение активной безопасности перспективных грузовых автомобилей семейства ЗиЛ / А. М. Ахметшин, В. А. Рязанцев, Е. С. Берсенева // Известия Московского государственного промышленного университета. – 2013. – № 1. – С. 11–16.
16. Нефедьев, Я. Н. Адаптивная ABS / Я. Н. Нефедьев // Журнал автомобильных инженеров. – 2017. – № 2. – С. 22–27.
17. Ахметшин, А. М. Исследования процесса торможения автомобиля с ABS / А. М. Ахметшин, В. А. Рязанцев // Журнал автомобильных инженеров. – 2015. – № 1. – С. 16–19.
18. Малиновский, М. П. Повышение адаптивных свойств систем управления путем определения коэффициента сцепления бортовыми средствами в режиме реального времени / М. П. Малиновский // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2020. – № 1. – С. 43–51.
19. Гладов, Г. И. Предпосылки к разработке алгоритма для системы повышения устойчивости движения многозвенного автопоезда / Г. И. Гладов, М. П. Малиновский // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2007. – № 11. – С. 36–46.
20. Малиновский, М. П. Концепция перспективной системы мониторинга усталости водителя / М. П. Малиновский, С. Е. Смолко // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2019. – Вып. 1. – С. 17–23.
21. Малиновский, М. П. Парадигмы управления авто-транспортным средством с высоким уровнем автоматизации / М. П. Малиновский // Труды НАМИ. – 2018. – № 1. – С. 51–60.
22. Ревин, А. А. Диагностирование пневматической тормозной системы автомобиля с ABS по параметрам рабочего процесса / А. А. Ревин, В. В. Еронгаев // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2007. – № 7. – С. 26–31.
23. Курочкин, С. В. Новый подход к диагностированию пневматического привода тормозных систем / С. В. Курочкин // Автотранспортное предприятие. – 2013. – № 12. – С. 29–32.
24. Дыгало, В. Г. Оценка адекватности при моделировании тормозной динамики автомобиля с пневматической ABS / В. Г. Дыгало, В. В. Котов, А. А. Ревин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 10 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2013. – (Серия «Наземные транспортные системы»; Т. 6). – С. 13–16.
25. Христофоров, Е. Н. К вопросу улучшения устойчивости и управляемости при торможении / Е. Н. Христофоров, Н. Е. Сакович, В. И. Самусенко, М. Л. Букина // Конструирование, использование и надежность машин сельскохозяйственного назначения. – 2010. – № 1. – С. 23–26.
26. Клименко, В. И. Уточнение методики определения статической точности электропневматического тормозного привода и требований к его статической характеристике / В. И. Клименко, Н. Г. Михалевич // Автомобильный транспорт (Харьков). – 2009. – № 24. – С. 27–32.
27. Малиновский, М. П. Электропневмогидравлический тормозной привод и особенности его применения на тяжелых автопоездах специального назначения / М. П. Малиновский, Д. В. Лукьянов, А. А. Петров // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2018. – Вып. 2. – С. 54–61.
28. Леонтьев, Д. Н. Моделирование переходных процессов в пневматическом тормозном приводе автомобиля, который оборудован системой автоматического регулирования тормозного усилия / Д. Н. Леонтьев // Вісник СевНТУ. – 2013. – № 142. – С. 88–91.
29. Малиновский, М. П. Итерационный метод расчета антиблокировочного цикла / М. П. Малиновский // Автомобильная промышленность. – 2011. – № 5. – С. 33–35.
30. Малиновский, М. П. Проблема аппроксимации при расчете пневматического тормозного привода интегральным методом / М. П. Малиновский, Е. С. Смолко // Ремонт. Восстановление. Модернизация. – 2020. – № 2. – С. 33–38.
31. Малиновский, М. П. Расчет ресиверов для пневматического тормозного привода с антиблокировочной системой / М. П. Малиновский, Г. И. Гладов // Автомобильная промышленность. – 2015. – № 11. – С. 35–39.
32. Расчет питающей части пневматического тормозного привода автотранспортного средства с антиблокировочной системой / А. Н. Туренко, В. И. Клименко, Л. А. Рыжих, А. В. Крамской, А. А. Чебан // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2008. – № 41. – С. 51–54.

УДК 629.331

*Е. С. Удиванов, М. В. Ляшенко, В. В. Шеховцов, Е. В. Клементьев, А. И. Искалиев***ВИБРАЦИИ В КОНСТРУКЦИЯХ АВТОМОБИЛЕЙ
СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ****Волгоградский государственный технический университет**

e-mail: ts@vstu.ru

В статье рассматривается проблема снижения вибрационной нагрузки, действующей на сотрудников, пациентов и оборудование в конструкциях салона автомобиля скорой медицинской помощи. Объектом исследования являлся автомобиль скорой медицинской помощи класса С Ford Transit 2020 года выпуска. В статье описан метод измерения вибрации на выбранном маршруте с помощью анализатора шума и вибрации «Ассистент» в режиме «Общая транспортная вибрация». Представлены результаты измерений: спектры среднеквадратических значений вертикальных эквивалентных скорректированных ускорений в третьоктавных полосах частот в характерных точках салона автомобиля скорой медицинской помощи. Выполнен анализ полученных спектров вертикальных ускорений в характерных точках салона в зависимости от состояния дорожного покрытия на маршруте. Представлены выводы и рекомендации.

Ключевые слова: автомобиль, третьоктавные полосы частот, спектры вибраций, салон автомобиля скорой медицинской помощи.

*E. S. Udivanov, M. V. Lyashenko, V. V. Shekhovtsov, E. V. Klementyev, A. I. Iskaliev***VIBRATIONS IN AMBULANCE VEHICLE DESIGN****Volgograd State Technical University**

The article deals with the problem of reducing the vibration load acting on the staff, patients and equipment in the interior design of an ambulance. The object of the study was a C-class ambulance Ford Transit 2020. The article describes the method of vibration measurement on the chosen route with the help of noise and vibration analyzer "Assistant" in the mode "General transport vibration". The results of measurements are presented: spectra of RMS values of vertical equivalent corrected accelerations in three-octave frequency bands in characteristic points of the passenger compartment of an ambulance. The analysis of the obtained spectra of vertical accelerations at characteristic points of the passenger compartment depending on the state of the road surface on the route is performed. Conclusions and recommendations are presented.

Keywords: vehicle, third-octave frequency bands, vibration spectra, ambulance interior.

Введение

Скорая медицинская помощь оказывает экстренную помощь пациентам, зачастую находящимся в тяжелом состоянии дома, на улице, на территории предприятия или учреждения. Подвижной состав скорой медицинской помощи обеспечивается станциями, подстанциями и больницами, располагающими необходимым оборудованием, транспортом и кадрами [1].

Во время движения автомобиля скорой медицинской помощи на пациента и персонал действуют вредные вибрации, генерируемые работающим двигателем, ходовой частью и другими агрегатами автомобиля. Это усугубляется тем, что расстояние и время транспортировки могут быть существенными.

В настоящее время в качестве автомобилей скорой медицинской помощи достаточно часто используются машины, находящиеся в эксплуатации продолжительное время, а также переоборудованные машины, первоначально

не предназначенные для работы в службе скорой помощи. В этих случаях уровень вибрации в салоне часто превышает регламентируемый для специальных машин скорой медицинской помощи.

Длительное воздействие вибрации на организм человека может приводить к нарушению нормального функционирования нервной системы, снижению производительности труда, повышению раздражительности, негативному воздействию на опорно-двигательную систему, а также к дегенеративным изменениям позвоночника, нарушению функций сердечно-сосудистой системы и органов внутренней секреции. Вибрация негативно отражается на пациентах: например, при транспортировке пациента с искусственной вентиляцией легких одним из важных параметров является «триггер» – чувствительность к вдоху, а излишняя вибрация ошибочно определяется аппаратами искусственной вентиляции легких (ИВЛ) как

попытки вдоха, что может привести к нарушению режима работы аппарата ИВЛ. Негативное воздействие оказывается также на пациентов с травмами, когда важно правильное взаимное положение костных отломков и сохранение этого положения. Достаточно многочисленны случаи, когда от воздействия вибрации утяжелялось состояние пациентов с аневризмой сосудов головного мозга. Отмечаются случаи непроизвольного выхода конкрементов при мочекаменной болезни из-за чрезмерной вибрации.

Помимо воздействия на человеческий орга-

низм, чрезмерная вибрация негативно сказывается на состоянии медицинского оборудования. Медицинские работники неоднократно сталкиваются с крайне неподходящим в определенный момент механическим повреждением кислородных шлангов аппаратов ИВЛ и аппаратов для подачи газовых смесей, механическими поломками креплений (рис. 1) бактерицидных облучателей и дальнейшим повреждением этих облучателей и ламп внутри них, не говоря уже о систематических поломках системы электропитания салона автомобилей.



Рис. 1. Разбитый рециркулятор ОБР-1 после падения в результате поломки крепежей от чрезмерной вибрации

Цель исследования

Провести измерения уровней вибрации в салоне автомобиля скорой медицинской помощи и на основе результатов анализа сформулировать выводы и рекомендации.

Материалы и методы

Объект исследований – автомобиль скорой медицинской помощи класса «С» (реанимобиль) на базе Ford Transit 350 L3 H3 2020 года выпуска с длинной колесной базой и передним приводом (рис. 2) [1].

В табл. 1 представлены некоторые технические характеристики данного используемого для исследований автомобиля [2].



Рис. 2. Автомобиль скорой медицинской помощи на базе Ford Transit

Таблица 1

Технические характеристики автомобиля скорой медицинской помощи класса «С» (реанимобиль) на базе Ford Transit 350 L3 H3

Длина/ширина/высота, мм	5981/2474 (с зеркалами) /2481-2786
Колесная база, мм	3750
Двигатель	дизельный «Duratorq» (125 л.с.)
Коробка передач	механическая, 6-ступенчатая
Масса автомобиля, кг	3100/3500
Привод	передний

Режим движения автомобиля скорой медицинской помощи был максимально приближен

к реальным условиям и осуществлялся по маршруту в городе Волгоград, показанному на рис. 3.

Скорость движения по асфальтовому покрытию составляла 60 км/ч, по грунтовой дороге и бездорожью – 10...20 км/ч.

Измерения проводились с помощью анализатора шума и вибрации «АССИСТЕНТ» (рис. 4) [3] в режиме «Общая транспортная вибрация».

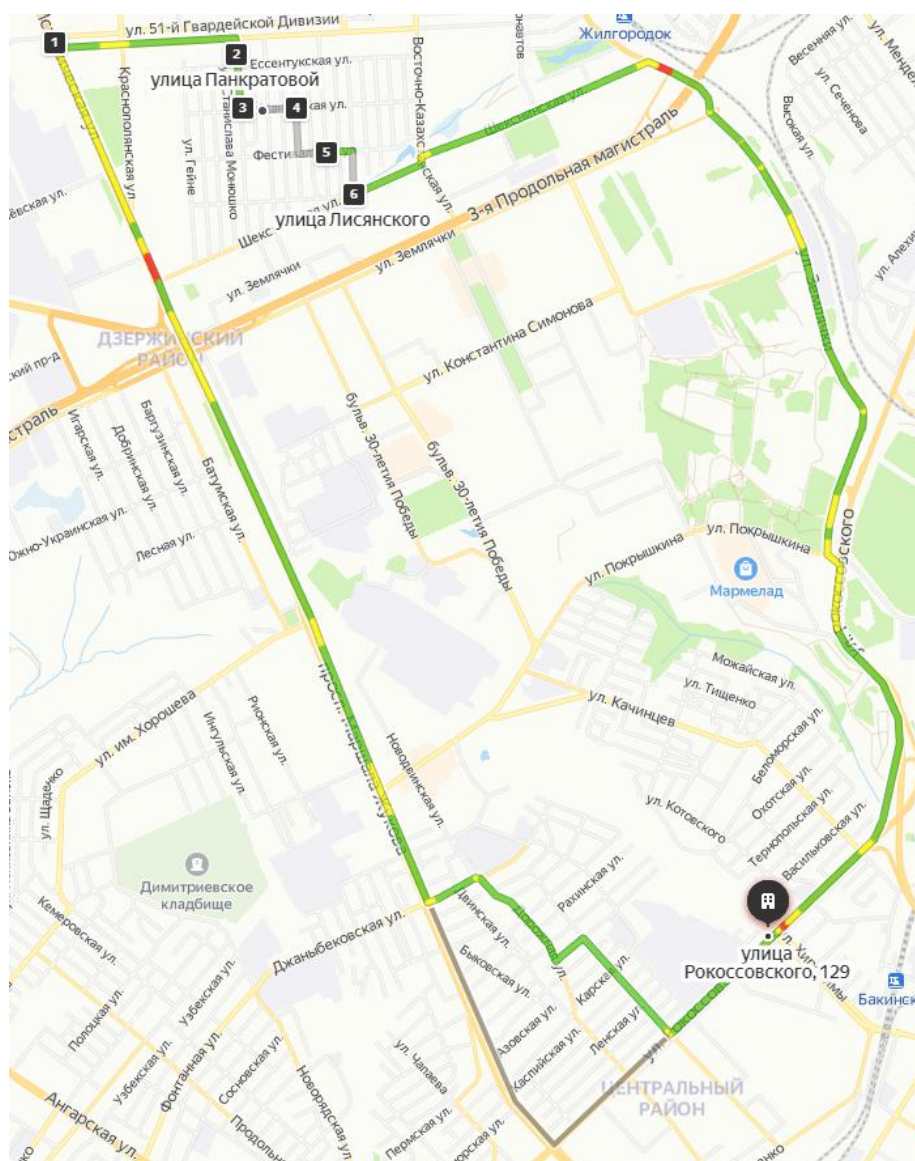


Рис. 3. Схема маршрута движения автомобиля скорой помощи при измерениях вибраций в салоне



Рис. 4. Анализатор шума и вибраций «АССИСТЕНТ»

На рис. 5 показаны контрольные точки расположения датчика измерительного оборудования.



Рис. 5. Расположение контрольных точек замера ускорений датчиком:

a – трехкомпонентный датчик; *б* – пример крепления датчика к полу; *в* – контрольные точки замера ускорений (1 – пол; 2 – станина; 3 – носилки (подголовник); 4 – сиденье врача, расположенное поперек продольной оси автомобиля; 5 – сиденье врача, расположенное вдоль продольной оси автомобиля; 6 – кушетка пациента); *г* – вид сиденья врача, расположенного поперек продольной оси автомобиля

Результаты и обсуждение

На рис. 6 представлены спектры среднеквадратических значений вертикальных эквивалентных скорректированных ускорений в третьоктавных полосах частот.

Как видно из представленных графиков, максимальные вертикальные ускорения при движении по бездорожью примерно в два раза превышают ускорения при дви-

жении по асфальтированной дороге на частотах до 20 Гц.

В соответствии с ГОСТ 12.1.012 – 2004 [4] получим скорректированное по частоте виброускорение, которое позволяет учитывать неоднозначность восприятия человеком широкополосного вибрационного спектра воздействий при движении по асфальтированной дороге со скоростью 60 км/ч.

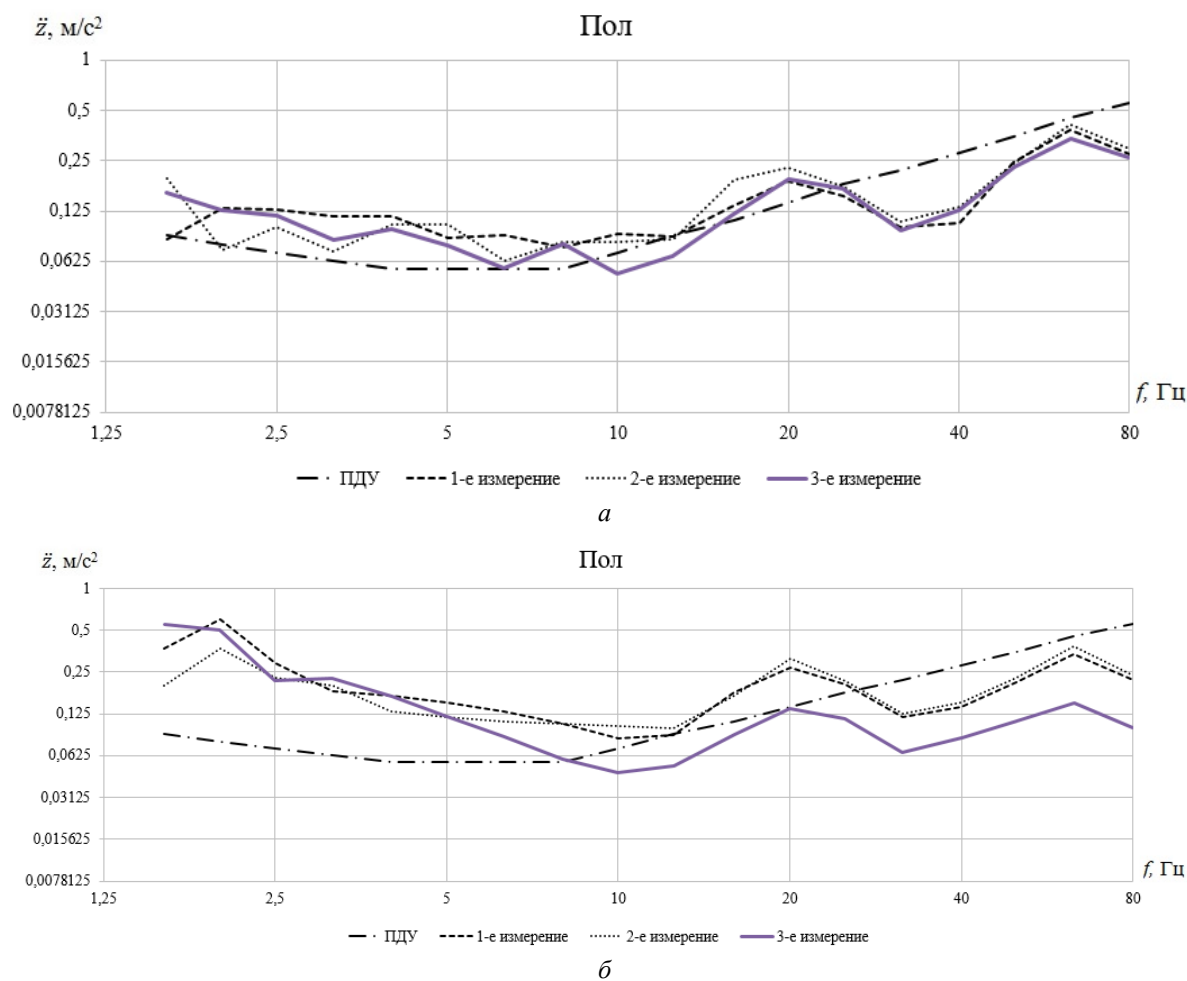


Рис. 6. Спектр вертикальных ускорений на полу:
 а – движение по асфальту; б – движение по бездорожью

Таблица 2

Виброускорения в замеренных точках, m/s^2

Пол			Станина			
1-е измерение	2-е измерение	3-измерение	1-е измерение	2-е измерение	3-измерение	
0,3399	0,3585	0,3087	0,4909	0,4376	0,4408	
Носилки (подголовник)			Сиденье врача поперек продольной оси автомобиля			
1-е измерение	2-е измерение	3-измерение	1-е измерение	2-е измерение	3-измерение	4-е измерение
0,4035	0,6024	0,4518	0,5246	0,2259	0,3163	0,2657

Заключение

На основе проведенного анализа результатов измерений можно сформулировать следующие пункты рекомендаций:

– проблема снижения вибраций на автомобилях скорой медицинской помощи имеет первостепенное значение как для обслуживающего персонала, работающего в ненормированном и зачастую длительном режиме, так и для перевозимых пациентов, для которых существует угроза здоровью, а иногда и жиз-

ни, что требует особого подхода при проектировании данного вида наземного медицинского транспорта;

– низкочастотные резонансы в диапазоне до 2,5 Гц на полученных спектрах вызваны, в первую очередь, вертикальными колебаниями автомобиля на подвеске, особенно при движении по бездорожью, что в свою очередь требует планомерного и глубокого совершенствования системы поддрессоривания ходовой части данной транспортной машины;

– дополнительно рекомендуется вторичное подрессоривание сидений, предназначенных для медицинского персонала, которое в исследуемом автомобиле отсутствует, что также способствует передаче низкочастотных вертикальных ускорений на тело условного сидящего человека;

– для того чтобы снизить долю высокочастотных ускорений, передаваемых в основном от двигателя к кузову, необходимо проработать конструкцию виброизолирующих опор силовой установки автомобиля;

– в целях повышения комфортабельности перевозки лежачих больных и снижения негативного влияния вибраций на их общее самочувствие и здоровье нужно обеспечить минимизацию передачи вредных воздействий через

специальные носилки и кушетки, где располагаются сами перевозимые пациенты, путем усовершенствования их общей конструкции и конструкции их составных элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Большая Медицинская Энциклопедия (БМЭ) / под ред. Б. В. Петровского. В 30 т. Т. 3. – 3-е изд. – М.: Сов. Энциклопедия, 1974–1989. – 632 с.
2. Брошюра. Ford Motor Company Limited. Брентвуд, Эссекс, Англия. 2014. 28 с.
3. Анализатор шума и вибрации «Ассистент». Руководство по эксплуатации. БЕЕК.438150-005РЭ. Г. Москва. 2014. 110 с.
4. ГОСТ 12.1.012–2004. «Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования». – Взамен ГОСТ 12.1.012 – 90 ; введ. 01.07.08. – М. : Стандартинформ, 2010. – 16 с. – (Межгосударственный стандарт). 23 с.

УДК 621.311

Ф. Р. Аль-Сумайдаи

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТОРМОЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЯ УВЕЛИЧЕНИЕМ МОЩНОСТИ НАСОСНЫХ ПОТЕРЬ В АВТОМОБИЛЬНОМ ДВИГАТЕЛЕ

Волгоградский государственный технический университет
e-mail: farqad485@gmail.com

Синхронизация открытия выпускного клапана и впускного клапана в конце такта выпуска и такта впуска может быть положительно использована для удвоения общих насосных потерь в двигателе внутреннего сгорания, а также даст возможность регулирования величины из этих потерь. Повышение давления в выпускном коллекторе вызовет увеличение давления во впускном коллекторе и внутри цилиндра в начале такта впуска, что приведет к удвоению работы, необходимой для второго такта. Наличие дополнительного клапана, установленного на выпускном коллекторе, обеспечит возможность регулирования суммарных насосных потерь и обеспечит возможность глушения звука от открытия выпускного клапана на короткий период в конце такта сжатия.

Ключевые слова: автомобиль, автоматизированная система управления, двигатель внутреннего сгорания, тормозной момент.

F. R. Al-Sumaidae

INCREASING THE EFFICIENCY OF VEHICLE BRAKING BY INCREASING THE POWER OF PUMP LOSSES IN THE ENGINE

Volgograd State Technical University

The synchronization of the opening of the exhaust valve and the intake valve at the end of the exhaust stroke and the intake stroke can be positively used to double the total pumping losses in an internal combustion engine, and will also make it possible to regulate the magnitude of these losses. An increase in pressure in the exhaust manifold will cause an increase in pressure in the intake manifold and inside the cylinder at the beginning of the intake stroke, which will double the work required for the second stroke. The presence of an additional valve installed on the exhaust manifold will provide the possibility of regulating the total pumping losses and will provide the possibility of muffling the sound from opening the exhaust valve for a short period at the end of the compression stroke.

Keywords: car, automated control system, internal combustion engine, braking torque.

Задача повышения эффективности и надежности тормозных систем автомобилей остается неизменно актуальной. Особенно сложным

оказывается решение этой задачи для автомобилей большой грузоподъемности. Сократить тормозной путь и снизить нагрузку на элемен-

ты основной тормозной системы можно, дополнительно используя для торможения двигатель, оснащенный специальными устройствами, которые во время торможения увеличивают в нем мощность насосных потерь. Процент насосных потерь в двигателе внутреннего сгорания оценивается в 12–15 % от общих механических потерь [1], и этот процент потерь зависит в основном от средней угловой скорости коленчатого вала, так как насосные потери значительно уменьшаются при уменьшении скорости вращения коленчатого вала. Поэтому для повышения тормозного момента при торможении двигателем требуется увеличивать насосные потери в нем не менее чем в 1,5–2 раза [2]. Наиболее известные шесть способов увеличения насосных потерь в двигателе внутреннего сгорания.

Выхлопной тормоз. В основе этого типа тормоза лежит увеличение потерь выхлопных газов. Закрытие выпускного коллектора клапаном выпускной заслонки повысит давление в выпускном коллекторе.

Выхлопной тормоз с ограничителем давления. Полное закрытие выпускного коллектора будет постепенно увеличивать давление внутри выпускного отверстия, но увеличение давления выше определенного предела приведет к непроизвольному открытию выпускного клапана. Непроизвольное открытие выпускного клапана может вызвать серьезные проблемы в двигателе внутреннего сгорания. Для устранения избыточного давления в выпускном коллекторе был добавлен клапан ограничения давления, как на рис. 2. Клапан ограничения давления не позволяет давлению в выпускном коллекторе превышать 3 бар.

Постоянный дроссель моторного тормоза. **Konstantdrossel** имеет в головке блока цилиндров независимый от привода газораспределительного механизма дополнительный маленький клапан (рис. 3), который при торможении открывается системой управления и постоянно удерживается в открытом положении за счет подачи сжатого воздуха в пневматический цилиндр 4. Это позволяет увеличить мощность механических потерь ДВС за счет использования части работы сжатия во время второго такта, поскольку наибольшее количество сжатого воздуха выходит из камеры во время прохождения поршня через верхнюю мертвую точку, предотвращая его расширение в течение третьего такта.

Моторный тормоз Джакобса – JakeBrake. Принцип работы заключается в сбросе давления в цилиндре после такта сжатия путем кратковременного открытия нормального выпускного клапана. Для сброса давления в конце хода сжатия между толкателем и стержнем клапана устанавливается промежуточное звено – плунжер, изменяющий длину под действием управляющей гидравлической системы. Основная работа торможения совершается на такте сжатия, после открытия выпускного клапана и сброса давления, поэтому такой тормоз называют декомпрессионным. Небольшая работа торможения совершается также и на такте впуска, когда в цилиндре создается разрежение. В моторном тормозе Джакобса отсутствует заслонка и возможность попадания в цилиндры двигателя твердых частиц из выхлопного тракта, которые могут снизить ресурс ДВС. В дополнение к громкому звуку, вызванному сбросом давления.

Моторный тормоз MAN был сконструирован на основе тормоза Джакобса. Он имеет несколько иной принцип действия: с использованием заслонки в выпускном коллекторе и модернизированного газораспределительного механизма. Последний удерживает выпускной клапан в приоткрытом положении в течение всех тактов, кроме впуска. Выпускной клапан открыт – а значит, двигатель работает как обычный компрессор, засасывая воздух и нагнетая его в закрытую заслонкой выпускную систему. В итоге моторный тормоз MAN на 60 % эффективнее, чем обычный горный тормоз с заслонкой в выпускном коллекторе.

Моторный тормоз MAN – турбонагнетатель EVBec, которые аналогичны моторным тормозам MAN с турбонаддувом для повышения давления во впускном коллекторе. Другими словами, этот тип двигателя увеличивает насосные потери за счет снижения потерь на сопротивление. Этот тип двигателя развивает мощность 630 кВт при средней угловой частоте вращения коленчатого вала 2400 об/мин. Турбокомпрессор подает воздух во впускной коллектор, используя кинетическую энергию газов в выпускном коллекторе, как показано на рис. 4.

Мощность насосных потерь различна у каждого типа указанных выше двигателей или тормозов, однако не все эти способы обеспечивают максимальную величину насосных потерь, кроме того, отсутствует механизм регули-

рования мощности насосных потерь при переменной скорости коленчатого вала, не говоря уже о некоторых дефектах, которые представляют угрозу для срока службы двигателя внут-

реннего сгорания. Также все эти методы не учитывают моменты открытия и закрытия впускного клапана при разных частотах вращения коленчатого вала.

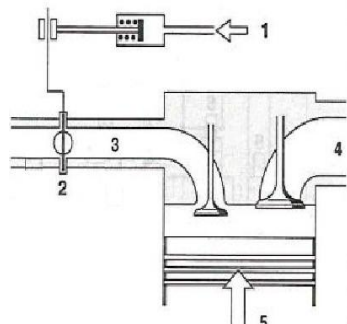


Рис. 1. Выхлопной тормоз:

1 – подача сжатого воздуха; 2 – выпускная заслонка; 3 – выпуск; 4 – выпуск; 5 – поршень

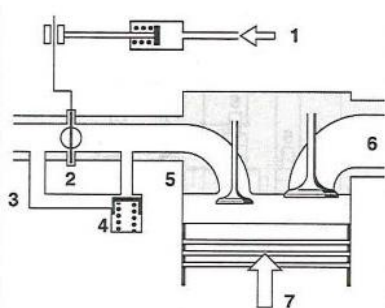


Рис. 2. Моторный тормоз с байпасом и установленным в нем перепускным клапаном, ограничивающим давление выпуска:

1 – подача сжатого воздуха для закрытия заслонки; 2 – герметичная заслонка; 3 – байпас; 4 – клапан ограничения давления выпускном коллекторе; 5 – выпускном коллекторе; 6 – впускной коллектор; 7 – поршень

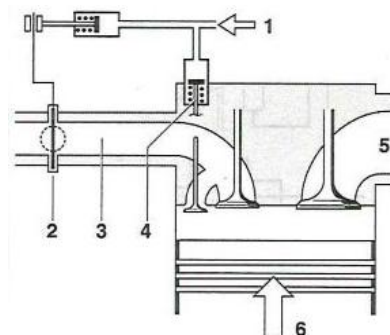


Рис. 3. Моторный тормоз Konstantdrossel (постоянный дроссель):

1 – подача сжатого воздуха; 2 – выпускная заслонка; 3 – выпуск; 4 – привод дополнительного клапана; 5 – выпуск; 6 – поршень

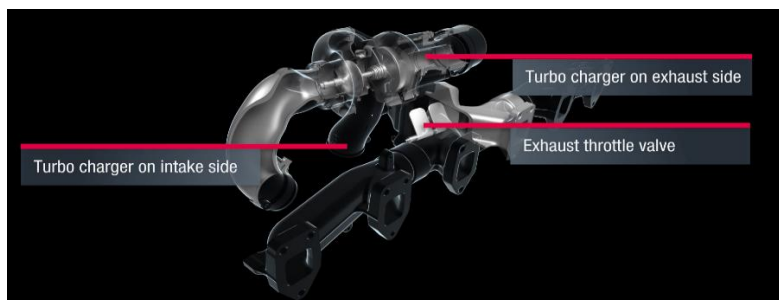


Рис. 4. MAN – TurboChargerEVBeс

Предлагается способ повышения насосных потерь в двигателе, основанный на синхронизации открытия выпускного и впускного клапанов в конце такта выпуска и начале такта впуска.

Механизм газораспределения в двигателе внутреннего сгорания открывает выпускной клапан перед нижней мертвой точкой в конце третьего такта (такт расширения) и повторно

закрывает после верхней мертвой точкой в начале первого такта (такт впуска). Что касается впускного клапана, то он открывается в конце четвертого такта (такт выпуска) и закрывается после нижней мертвой точки в начале второго такта (такт сжатия). Таким образом, газораспределительный механизм позволяет впускному клапану и выпускному клапану находиться в открытом положении в течение периода до

окончания четвертого такта (такт выпуска) и после начала первого такта (такт впуска). Одновременное открытие впускного и выпускного клапанов оказывает существенное влияние на величину насосных потерь, поскольку позволяет некоторому количеству сжатого газа возвращаться из выпускного коллектора в цилиндр, а затем во впускной коллектор, а это приводит к повышению давления в цилиндре и впускном коллекторе в начале такта впуска, что означает, что потери на впуске уменьшаются при увеличении потерь на выпуске. Уменьшение потерь на сопротивление удвоит работу, необходимую для сжатия газа во втором такте, но этого увеличения нельзя наблюдать из-за расширения сжатого газа в третьем такте (такт расширения). Количество утечек газа зависит от периода времени синхронизации открытия выпускного клапана и впускного клапана, так как чем больше время, тем больше количество утечек газа, а это значит, что общие насосные потери будут уменьшаться с уменьшением средней частоты вращения коленчатого вала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Рябов, И. М.* Анализ мощности механических потерь ДВС и определение уровня их повышения для обеспечения эффективного служебного торможения автомобиля двигателем / И. М. Рябов, Ф. Р. Аль-Сумайдаи // Грузовик. – 2020.
2. *Рябов, И. М.* Повышение эффективности служебных торможений автомобиля ДВС за счет улучшения характеристик мощности механических потерь / И. М. Рябов, Ф. Р. Аль-Сумайдаи, И. М. Титов // Пром-инжиниринг: труды VI Всероссийской научно-технич. конф. – Челябинск. – 2020.
3. *Рябов, И. М.* Оценка ресурсосбережения при использовании ДВС автомобиля в качестве тормоза-замедлителя при служебных торможениях / И. М. Рябов, Ф. Р. Аль-Сумайдаи; ВолгГТУ // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – Волгоград, 2019. – № 4 (291). – С. 33–37.
4. *Рябов, И. М.* Особенности механических потерь в ДВС и их влияние на процесс торможения автомобиля двигателем / И. М. Рябов, Ф. Р. Аль-Сумайдаи; ВолгГТУ // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – Волгоград, 2019. – № 4 (29). – С. 37–43.
5. *Рябов, И. М.* Обоснование целесообразности постоянного использования двигателя для служебных торможений автомобиля / И. М. Рябов, Ф. Р. Аль-Сумайдаи, И. М. Титов, С. В. Данилов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). – 2020. – № 3 (62). – С. 10–19.
6. *Рябов, И. М.* Углубленный анализ результатов экспериментального исследования тормозных свойств двигателя КАМАЗ-740 с моторным тормозом при электронном управлении / И. М. Рябов, Ф. Р. Аль-Сумайдаи, В. М. Зотов, А. Ю. Соколов, А. Х. Аль-Джумаили // Грузовик. – 2021. – № 6. – С. 8–15.
7. <https://www.youtube.com/watch?v=IYVnmmyErgE>

Ответственный за выпуск редактор РИО
В. В. Свитачева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

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

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

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

Темплан 2022 г. (научные издания). Поз. № 18ж. Дата выхода в свет 10.06.2022 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,51. Уч.-изд. л. 5,54.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 251.

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

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

К СВЕДЕНИЮ АВТОРОВ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

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

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

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