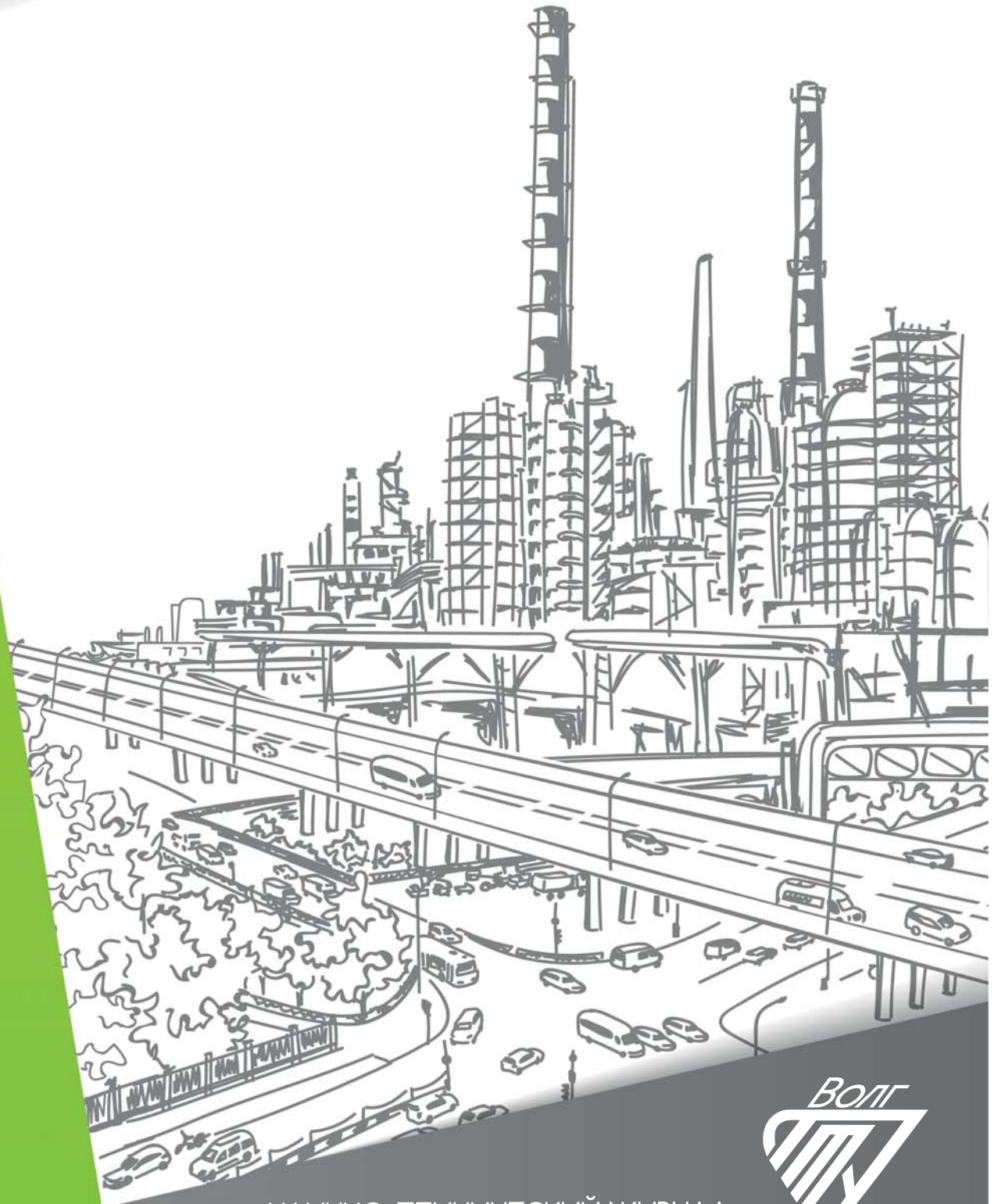
ISSN 2500-0586

ЭНЕРГО- И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ:

промышленность и транспорт

№ 3 (56)
2026



16+

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ВолГ

Издается
с января 2004 г.

Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт

научно-технический журнал

ISSN 2500-0586

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

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

Редакционная коллегия:

Е. В. Балакина – д.т.н., проф. ВолгГТУ
А. В. Баранов – д.ф.-м.н., проф. РГУ нефти и газа, г. Москва
А. Б. Голованчиков – д.т.н., проф. ВолгГТУ
А. Е. Городецкий – д.т.н., проф. ИПМаш РАН, г. Санкт-Петербург
А. В. Дмитриев – д.т.н., проф. КГЭУ, г. Казань
А. Ю. Дунин – д.т.н., проф. МГТУ (МАДИ), г. Москва
А. С. Дьяков – д.т.н., проф. МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва
В. Ф. Желтобрюхов– д.т.н., проф. ВолгГТУ, г. Волгоград
А. В. Келлер – д.т.н., проф. Московского политехнического университета, г. Москва
И. А. Коняхин – д.т.н., проф. ИТМО, г. Санкт-Петербург
В. В. Коротаев – д.т.н., проф. ИТМО, г. Санкт-Петербург
А. А. Львов – д.т.н., проф. СГТУ им. Гагарина Ю. А., г. Саратов
В. А. Марков – д.т.н., проф. МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва
Е. Р. Мошев – д.т.н., проф. ПНИПУ, г. Пермь
А. Е. Новиков – чл.-корр. РАН, д.т.н., проф. ВолгГТУ
Е. А. Федянов – д.т.н., проф. ВолгГТУ
Н. М. Филькин – д.т.н., проф. ИжГТУ им. М. Т. Калашникова, г. Ижевск
А. Н. Шилин – д.т.н., проф. ВолгГТУ

Ответственный секретарь
П. С. Васильев – к.т.н., доц. ВолгГТУ
Тел. +7 (8442) 24-84-31

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

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

№ 3 (56)
Сентябрь
2026

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

Адрес редакции:
РФ, 400005, Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28
Гл. редактор: телефон: +7 (8442) 24-80-03
e-mail: lysak2@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

© Волгоградский государственный технический университет, «Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт», 2026

Published since
January 2004 г.

Energo- i resursosberezhenie:

promyshlennost' i transport

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

ISSN 2500-0586

Journal is registered in the Federal Service for supervision of communications, information technology and mass media (Roscomnadzor) registration certificate:
ПИ N° (ФС77-64543, registration date: 22 January 2016

Editor-in-chief

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

Editorial Board:
E. V. Balakina – D. Sc. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd
A. V. Baranov – D. Sc. (Phisical and Math.), Prof., Gubkin University, Moscow.
A. B. Golovanchikov – D. Sc. (Engineering), Prof., VSTU, Volgograd
A. E. Gorodetskij– D. Sc. (Engineering), Prof., IPME, St. Petersburg
A. V. Dmitriev – D. Sc. (Engineering), Prof. KSPEU, Kazan
A. Yu. Dunin – D. Sc. (Engineering), Prof. MADI, Moscow
A. S. Dyakov – D. Sc. (Engineering), Prof. BMSTU, Moscow
V. F. Zheltobryukhov – D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU, Volgograd
A. V. Keller – D. Sc. (Engineering), Prof. Prof. Moscow Poly, Moscow
I. A. Konyakhin – D. Sc. (Engineering), Prof. ITMO University, St. Petersburg
V. V. Korotaev – D. Sc. (Engineering), Prof. ITMO University, St. Petersburg
A. A. L'vov – D. Sc. (Engineering), Prof. SSTU, Saratov
V. A. Markov – D. Sc. (Engineering), Prof. BMSTU, Moscow
E. R. Moshev – D. Sc. (Engineering), Prof. PNRPU, Perm
A. E. Novikov – Corresponding Member of RAS, D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU, Volgograd
E. A. Fedyanov – D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU, Volgograd
N. M. Filkin – D. Sc. (Engineering), Prof. ISTU, Izhevsk
A. N. Shilin – D. Sc. (Engineering), Prof. VSTU, Volgograd

Executive Secretary
P. S. Vasilyev – PhD, Associate Prof.
Тел. +7 (8442) 24-84-31

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

VSTU Publisher tel.:
+7 (8442) 24-84-08
+7 (8442) 24-84-05
e-mail: zavrio@vstu.ru

© Volgograd State Technical University,
«Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport», 2026

№ 3 (56)
September
2026

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) 24-80-03
e-mail: lysak2@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 accordance 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

Баев Д. П. *6*
Васильев П. С. *12*
Голованов И. Ю. *19*
Голованчиков А. Б. *6*
Диков В. А. *19*
Дьяков А. С. *45*
Иванов М. А. *38*
Кетов Д. Ю. *24*
Кобзаренко В. Б. *45*
Коноваленко А. А. *31*
Лагуткин М. Г. *19*
Лапенков Р. А. *38*
Малиновский М. П. *38*
Меренцов Н. А. *6*
Нефедьев А. И. *24, 31*
Рублёва А. А. *12*
Сорокин М. А. *12*
Тишина А. Ю. *19*
Шагарова А. А. *12*
Шурак А. А. *6*
Щербин А. М. *38*

AUTHOR INDEX

Baev D. P. *6*
Dikov V. A. *19*
Dyakov A. S. *45*
Golovanchikov A. B. *6*
Golovanov I. Yu. *19*
Ivanov M. A. *38*
Ketov D. Yu. *24*
Kobzarenko V. B. *45*
Konovalenko A. A. *31*
Lagutkin M. G. *19*
Lapenkov R. A. *38*
Malinovsky M. P. *38*
Merentsov N. A. *6*
Nefed’ev A. I. *24, 31*
Rublyova A. A. *12*
Shagarova A. A. *12*
Shcherbin A. M. *38*
Shurak A. A. *6*
Sorokin M. A. *12*
Tishina A. Yu. *19*
Vasilyev P. S. *12*

СОДЕРЖАНИЕ

Часть 1. ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

Голованчиков А. Б., Баев Д. П., Шурак А. А., Меренцов Н. А.
Влияние параметров уравнения Аррениуса
на константу скорости пиролиза метана..... 6

Васильев П. С., Шагарова А. А., Рублёва А. А., Сорокин М. А.
Влияние капиллярных явлений на эффективность работы
колонных аппаратов с пропластовыми контактными устройствами..... 12

Голованов И. Ю., Тишина А. Ю., Лагуткин М. Г., Диков В. А.
Влияние расположения патрубков межтрубного пространства
на интенсивность и эффективность процесса теплопередачи
в двухтрубном теплообменном аппарате..... 19

Кетов Д. Ю., Нефедьев А. И.
Роботизированная система для оценки и восстановления
двигательных функций кисти..... 24

Нефедьев А. И., Коноваленко А. А.
Датчик пламени котельной установки
с дублирующим каналом контроля..... 31

Часть 2. ТРАНСПОРТ

Иванов М. А., Щербин А. М., Малиновский М. П., Лапенков Р. А.
Способы измерения усилия
в электромеханическом тормозном приводе автомобиля..... 38

Кобзаренко В. Б., Дьяков А. С.
Классификация подводных транспортно-технологических средств
с контактным типом движителя..... 45

CONTENTS

Part 1. INDUSTRY

Golovanchikov A. B., Baev D. P., Shurak A. A., Merentsov N. A.
Influence of the parameters of the Arrhenius equation on the rate constant of methane pyrolysis..... 6

Vasilyev P. S., Shagarova A. A., Rublyova A. A., Sorokin M. A.
The influence of capillary phenomena on the efficiency of column apparatuses with porous plastic contact devices..... 12

Golovanov I. Yu., Tishina A. Yu., Lagutkin M. G., Dikov V. A.
The effect of the location of the interstitial space pipes on the intensity and efficiency of the heat transfer process in a two-tube heat exchanger..... 19

Ketov D. Yu., Nefed'ev A. I.
Robotic system for assessment and restoration of hand motor functions..... 24

Nefed'ev A. I., Konovalenko A. A.
Boiler flame sensor with a duplicate control channel..... 31

Part 2. TRANSPORT

Ivanov M. A., Shcherbin A. M., Malinovsky M. P., Lapenkov R. A.
Methods for measuring force in an electromechanical brake actuator of a car..... 38

Kobzarenko V. B., Dyakov A. S.
Classification of underwater transport and technological vehicles with a contact type of propulsion..... 45

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

УДК 661.961.6
DOI:10.35211/2500-0586-2026-3-56-6-12

Научная статья
Original article

А. Б. Голованчиков, Д. П. Баев, А. А. Шурак, Н. А. Меренцов

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ УРАВНЕНИЯ АРРЕНИУСА НА КОНСТАНТУ СКОРОСТИ ПИРОЛИЗА МЕТАНА

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия
✉ Денис Петрович Баев, denispetrovichbaev@mail.ru

Аннотация. Приведен расчет констант скорости реакции пиролиза метана по заданным экспериментальным значениям параметров уравнения Аррениуса: предэкспоненциального множителя K_0 и энергии активации E. Показано преобладающее влияние величины энергии активации по сравнению с величиной предэкспоненциального множителя. На основании гипотезы о равенстве предэкспоненциальных коэффициентов в каталитических и безкаталитическом процессах выведено условие эквидистантности температур при равных значениях констант скорости реакции K. Приведены примеры расчетов и представлена их графическая интерпретация при сравнении безкаталитического и каталитических процессов пиролиза метана в барботажных реакторах с барботированием газа через расплавы металлов, их сплавов и расплавов солей.

Ключевые слова: метан, пиролиз, уравнение Аррениуса, предэкспоненциальный коэффициент, энергия активации, катализатор, расплав металла и сплава, расплав солей, эквидистантность температур, барботаж

Для цитирования: Голованчиков А. Б., Баев Д. П., Шурак А. А., Меренцов Н. А. Влияние параметров уравнения Аррениуса на константу скорости пиролиза метана. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 3(56): 6–12. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-6-12.

Информация об авторах:
Александр Борисович Голованчиков – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ВолгГТУ
Scopus ID: 6602843533
e-mail: 9275170082@mail.ru
Денис Петрович Баев – преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ВолгГТУ
https://orcid.org/0009-0003-0794-4928
e-mail: denispetrovichbaev@mail.ru
Антон Анатольевич Шурак – старший преподаватель кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ВолгГТУ
e-mail: a-shurak2@mail.ru
Николай Анатольевич Меренцов – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ВолгГТУ
https://orcid.org/0000-0001-5946-0667
e-mail: steeple@mail.ru

Вклад авторов:
А. Б. Голованчиков – проведение исследования, оформление графических материалов, написание текста статьи.
Д. П. Баев – определение цели исследования, анализ данных исследования, редактирование текста статьи.
А. А. Шурак – методология исследования, редактирование текста статьи.
Н. А. Меренцов – методология исследования, редактирование текста статьи.

© Голованчиков А. Б., Баев Д. П., Шурак А. А., Меренцов Н. А., 2026

A. B. Golovanchikov, D. P. Baev, A. A. Shurak, N. A. Merentsov

INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE ARRHENIUS EQUATION ON THE RATE CONSTANT OF METHANE PYROLYSIS

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia
✉ Denis P. Baev, denispetrovichbaev@mail.ru

Abstract. Calculations of the rate constants for the methane pyrolysis reaction are presented based on the specified experimental values of the Arrhenius equation parameters: the pre-exponential factor K_0 and the activation energy E. The dominant influence of the activation energy over the pre-exponential factor is demonstrated. Based on the hypothesis that the pre-exponential factors are equal in catalytic and non-catalytic processes, a condition for the equidistance of temperatures at equal values of the reaction rate constants K is derived. Calculation examples are provided, and their graphical interpretation is presented in a comparison of non-catalytic and catalytic methane pyrolysis processes in bubble column reactors with gas bubbling through molten metals, their alloys, and molten salts.

Keywords: methane, pyrolysis, Arrhenius equation, pre-exponential coefficient, activation energy, catalyst, metal and alloy melt, salt melt, temperature equidistance, bubbling

For citation: Golovanchikov A. B., Baev D. P., Shurak A. A., Merentsov N. A. Influence of the parameters of the Arrhenius equation on the rate constant of methane pyrolysis. Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2026; 3(56): 6–12. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-6-12.

Information about the authors:
Alexander B. Golovanchikov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department "Processes and Apparatus of Chemical and Food Production" VSTU
Scopus ID: 6602843533
e-mail: 9275170082@mail.ru
Denis P. Baev – Lecturer of the Department "Processes and Apparatus of Chemical and Food Production" VSTU
https://orcid.org/0009-0003-0794-4928
e-mail: denispetrovichbaev@mail.ru
Anton A. Shurak – Senior Lecturer of the Department "Processes and Apparatus of Chemical and Food Production" VSTU
e-mail: a-shurak2@mail.ru
Nikolai A. Merentsov – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department "Processes and Apparatus of Chemical and Food Production" VSTU
https://orcid.org/0000-0001-5946-0667
e-mail: steeple@mail.ru

Contribution of the authors:
Alexander B. Golovanchikov – research, graphic design, and article writing.
Denis P. Baev – research objective definition, data analysis, and article editing.
Anton A. Shurak – research methodology and article editing.
Nikolai A. Merentsov – research methodology and article editing.

Термический пиролиз метана или природного газа, содержащего 91–99 % метана и включающего его гомологи, а также азот, кислород, диоксид углерода и следы других газов, проводится в каталитических и безкаталитических промышленных реакторах при высоких температурах 700–1600 °С без доступа воздуха или кислорода [1; 2]. Реакция эндотермическая и протекает в адиабатическом или политропном режимах по стехиометрическому уравнению:

$$CH_4 \rightarrow C\downarrow + 2H_2 + Q_t. \qquad (1)$$

Целью реакции пиролиза метана до последнего времени являлось получение технического углерода, идущего в основном для вулканизации резины в автомобильной и сельскохозяйственной промышленности (до 90 % при производстве шин), а также в лакокрасочной, электротехнической, спортивной, медицинской, металлургической, стекольной и других отраслях [1; 2].

Однако в конце прошлого века с перманентными энергетическими кризисами, связанными с переходом ведущих экономик мира на безуглеродные энергоносители и прежде всего на возобновляемые источники энергии, а также на квоты выбросов диоксида углерода, реакция пиролиза метана (1) стала рассматриваться как источник получения водорода в качестве экономически чистого энергоносителя [3–6].

Важно отметить при этом, что из одной тонны метана при пиролизе теоретически получается, согласно стехиометрическому уравнению (1), 750 кг углерода и 250 кг водорода. Поэтому реакция важна с точки зрения получения и технического углерода, и водорода. Кроме того, последний является важным продуктом не только как энергоноситель, но и как элемент, используемый в промышленном производстве аммиака и других химических технологиях [7].

Ахиллесовой пятой процесса термического пиролиза метана является высокая энергоемкость из-за того, что реакция эндотермическая, а температура превышает 1000 °С.

Целью работы является снижение температуры реакции пиролиза метана за счет перехода от безкаталитического процесса к каталитическому при барботаже пузырьков реакционных газов через слой расплава низкотемпературных сплавов металлов.

Еще в 1931 г. в США был опубликован патент пиролиза метана при барботаже пузырьков реакционных газов через слой расплава металла или соли, а также жидких сплавов металлов или жидких сплавов солей [8]. Преимущества этого способа пиролиза связаны с совмещением: 1) всплывания пузырьков реакционных газов с большой скоростью через слой расплава; 2) использования в качестве расплава сплавов, являющихся катализаторами, что создает возможность снижения температуры пиролиза; 3) передачи тепла от расплава непосредственно к поверхности пузырьков, минуя поверхность теплопередачи, что обеспечивает отсутствие образования на ней термических отложений и устраняет необходимость их периодического удаления; 4) самопроизвольного выделения образующихся частиц технического углерода на поверхности пузырьков реакционных газов, а после их всплывания – выделения слоя этих частиц на поверхности жидкого сплава (в виде шлака как в доменных печах при производстве чугуна или в печах производства стали или других металлов и сплавов).

Описанный выше способ пиролиза метана при барботаже пузырьков реакционных газов через расплав металла или сплава, а также расплавы солей, вызывает повышенный интерес в силу перечисленных преимуществ по сравнению с типовыми промышленными способами (безкаталитическим или каталитическим с неподвижными или псевдоожиженным слоем твердых частиц катализатора) как в экспериментальных, так и в теоретических исследованиях [9–11].

Для сравнительных расчетов, подтверждающих разные преимущества каталитических процессов пиролиза метана через расплавы металлов или их сплавов и солей неорганических веществ, необходимо знать параметры уравнения Аррениуса: предэкспоненциальный множитель K_0 и энергию активации E, 1/с:

$$K = K_0 \cdot \exp\left[-E/(R \cdot T)\right], \qquad (2)$$

где R = 8,314 кДж/(кмол·К) – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура, К.

Для безкаталитического процесса пиролиза метана эти параметры приведены в [11] и [12] соответственно:

$$\begin{cases} K_{01} = 4{,}5 \cdot 10^{13}\ 1/\text{с}; \quad E_1 = 3{,}81 \cdot 10^5\ \text{кДж/кмол} \\ K_{01} = 3{,}0 \cdot 10^{15}\ 1/\text{с}; \quad E_2 = 3{,}65 \cdot 10^5\ \text{кДж/кмол} \end{cases}. \qquad (3)$$

В табл. 1 размещены результаты расчетов констант скорости реакции пиролиза метана в безкаталитическом режиме по уравнению Аррениуса для обоих вариантов численных значений его параметров (3) и погрешность этих расчетов как отношение K_2/K_1.

Таблица 1

Сравнение констант скорости реакции безкаталитического пиролиза метана

t, °С	T, К	K_1, 1/с	K_2, 1/с	K_1/K_2
1027	1300	$2{,}21 \cdot 10^{-2}$	6,47	293,0
1077	1350	$8{,}15 \cdot 10^{-2}$	22,6	277,3
1127	1400	$2{,}74 \cdot 10^{-1}$	72,2	263,6
1177	1450	$8{,}46 \cdot 10^{-1}$	213	251,4
1222	1500	2,43	518	240,5
1277	1550	6,5	1500	230,7

Из табл. 1 видно, что константы скорости безкаталитической реакции пиролиза метана (1) в диапазоне температур работы промышленных реакторов отличаются друг от друга в 230–290 раз. При этом из (3) вытекает, что K_{02}/K_{01} = 66,7 и E_2/E_1 = 0,958, что в значительной степени предопределяет важность точности расчетов энергии активации по сравнению с точностью расчетов предэкспоненциального множителя. В [13] подчеркивается, что величину предэкспоненциального множителя в каталитических процессах по сравнению с неката-

литическими можно не менять, а меру активности катализатора можно оценивать соотношением констант скорости каталитической реакции $K_{кат}$ и некаталитической K:

$$A_{кат} = \frac{K_{кат}}{K} = \exp\left[\Delta E/\left(R \cdot T\right)\right],$$

где $\Delta E = E - E_{кат}$ характеризует уменьшение энергии активации в каталитической реакции по сравнению с некаталитической.

Таблица 2

Оценка точности аппроксимации константы скорости безкаталитической реакции пиролиза метана

t, °C	T, K	K_2, 1/с	K_3, 1/с	δ_K, %
1027	1300	6,47	9,08	+40,5
1052	1325	12,2	15,8	+28,9
1077	1350	22,6	26,8	+18,7
1102	1375	40,8	44,7	+9,66
1127	1400	72,2	73,3	+1,57
1152	1425	125	118	-5,67
1177	1450	213	187	-12,2
1202	1475	355	291	-18,0
1225	1500	584	448	-23,3
1252	1525	943	678	-28,1

В табл. 2 приведены результаты численной проверки гипотезы о возможности замены предэкспоненциального множителя K_{02} во втором уравнении системы (3) на предэкспоненциальный множитель K_{01} с определением теоретической энергии активации E_3, рассчитанной с помощью метода наименьших квадратов (МНК) при условии $K_{03} = K_{01} = 4{,}5 \cdot 10^{13}$ 1/с.

Из табл. 2 следует, что средняя относительная ошибка аппроксимации составляет $\delta_{Kcp} = 18{,}7$ % при значении энергии активации $E_3 = 3{,}16 \cdot 10^5$ кДж/кмол. Удовлетворительная погрешность, не превышающая 10 %, приходится на рабочие температуры в диапазоне 1110–1150 °С.

В табл. 3 приведены численные значения параметров уравнений Аррениуса для процессов пиролиза метана при барботаже пузырьков реакционных газов через расплавы металлов и их сплавов, когда используется гипотеза о равенстве предэкспоненциальных множителей $K_{03} = K_{01}$, и по известному численному значению энергии активации безкаталитического процесса E_1 с помощью МНК определяется энергии активации E_3 каталитического процесса. Численные значения параметров K_{02}, E_2 приведены для разных катализаторов в [10] и [11].

Таблица 3

Оценка точности аппроксимации констант скорости каталитических реакций пиролиза метана

Расплав	Диапазон температур, °С	K_{02}, 1/с	E_2, кДж/кмол	E_3, кДж/кмол	δ_{Ecp}, %
Никель	1500–1650	$2{,}1 \cdot 10^4$	$1{,}94 \cdot 10^4$	$2{,}07 \cdot 10^5$	+36,3
Сплав никеля (27 %) с теллуром (73 %)	625–700	$1{,}8 \cdot 10^7$	$1{,}93 \cdot 10^5$	$3{,}08 \cdot 10^5$	+41,4
Сплав никеля (50 %) с теллуром (50 %)	725–825	$4{,}7 \cdot 10^7$	$2{,}23 \cdot 10^5$	$3{,}43 \cdot 10^5$	+48,8
Сплав меди (45 %) с висмутом (55 %)	625–700	$3{,}7 \cdot 10^8$	$2{,}22 \cdot 10^5$	$3{,}16 \cdot 10^5$	+32,3
Сплав олова (95 %) с медью (5 %)	625–700	$6{,}4 \cdot 10^7$	$2{,}07 \cdot 10^5$	$3{,}12 \cdot 10^5$	+37,5
Сплав олова (70 %) с медью (30 %)	625–700	$299 \cdot 10^7$	$2{,}5 \cdot 10^5$	$3{,}25 \cdot 10^5$	+26,2
Сплав олова (95 %) с никелем (5 %)	625–700	$92 \cdot 10^7$	$2{,}35 \cdot 10^5$	$3{,}19 \cdot 10^5$	+29,6

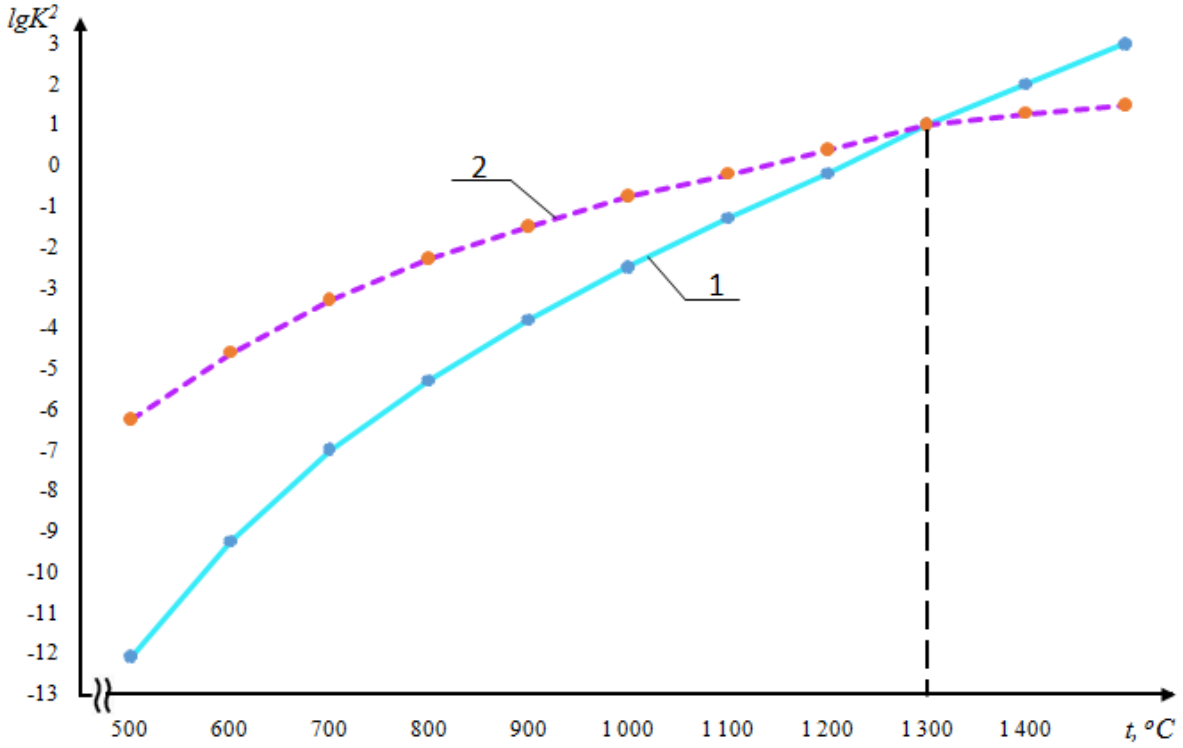
Из табл. 3 видно, что гипотеза о равенстве предэкспоненциальных коэффициентов K_0 в каталитических и безкаталитическом процессах плохо соответствует реакции пиролиза метана при барботаже пузырьков реакционных газов через расплав никеля и других жидких сплавов, так как средние относительные ошибки аппроксимации энергии активации E_3 составляют около 30 %, даже в небольшом диапазоне рабочих температур расплавов.

На рисунке представлены графики зависимостей констант скорости пиролиза метана от температуры для безкаталитической (типовой) реакции в промышленном реакторе ($K_{01} = 4{,}5 \cdot 10^{13}$ 1/с; $E_1 = 3{,}81 \cdot 10^5$ кДж/кмол) и при барботаже пузырьков реакционных газов через расплав катализатора олова с 5 % меди ($K_{02} = 6{,}4 \cdot 10^7$ 1/с; $E_1 = 2{,}07 \cdot 10^5$ кДж/кмол).

Из рисунка видно, что расплав олова с 5 % меди увеличивает скорость реакции в области температур от 500 до 1200 °С по сравнению с типовым безкаталитическим процессом, но сами константы скорости реакции в температурном интервале от 500 до 1000 °С на два

и больше порядков ниже, чем при средней температуре в промышленных безкаталитических реакторах, равной 1300 °С.

При температурах t > 1300 °С скорость реакции в безкаталитическом процессе становится выше, чем в каталитическом с данным катализатором. Например, при 800 °С константа скорости реакции каталитического процесса пиролиза метана с указанным катализатором составляет $K = 5{,}36 \cdot 10^{-3}$ 1/с, а без катализатора в типовом промышленном реакторе такая же константа скорости имеет место при t = 970 °С, при этом ее необходимая величина K = 10 1/с обеспечивается только при t = 1800 °С.



Графики зависимости константы скорости реакции пиролиза метана от температуры:
1 – для безкаталитической реакции в промышленных реакторах; *2* – для барботажа пузырьков реакционных газов через расплав каталитического сплава олова с 5 % меди

Условие равенства предэкспоненциального коэффициента в каталитических и безкаталитическом реакциях пиролиза метана как оценочное целесообразно применять, когда известны энергии активации безкаталитического E_1 и каталитического процессов E_2, а также известна величина предэкспоненциального множителя безкаталитической реакции K_{01}.

Так, в [10] приведены рабочие температуры для расплавов солей и величина значения энергий активации, а величины предэкспоненциальных множителей отсутствуют. В табл. 4 приведены результаты расчетов температур пиролиза метана с использованием расплава поваренной соли NaCl с учетом гипотезы равенства предэкспоненциальных коэффициентов $K_{01} = K_{03}$ при $E_1 = 3{,}81 \cdot 10^5$ кДж/кмол для безкаталитической реакции и $E_2 = 2{,}31 \cdot 10^5$ кДж/кмол для каталитической реакции с барботажем пузырьков реакционных газов.

Таблица 4

Сравнение температуры NaCl при пиролизе метана через ее расплав как катализатор и температуры безкаталитического процесса при одинаковой константе скорости реакции *K*

t_1, °С	T_1, К	t_2, °С	T_2, К	K, 1/с
1502	1775	803,2	1076,2	276
1527	1800	818,3	1091,3	395
1552	1825	833,5	1106,5	560
1577	1850	848,7	1121,7	786
1602	1875	863,8	1136,8	1090
1627	1900	879,0	1152,0	1510
1652	1925	894,1	1167,1	2060

Анализ табл. 4 показывает, что одинаковые константы скорости каталитического и безкаталитического процессов при выполнении гипотезы о равенстве предэкспоненциальных ко-

эффициентов в уравнении Аррениуса обеспечивается при выполнении условия:

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{E_2}{E_1}. \quad (4)$$

Условие (4) несложно доказывается:

$$\begin{cases} K_1 = K_{01} \cdot \exp\left[-E_1/(R \cdot T_1)\right] \\ K_2 = K_{02} \cdot \exp\left[-E_2/(R \cdot T_2)\right] \end{cases}.$$

Если $K_1 = K_2$ и $K_{01} = K_{02}$, то после алгебраических преобразований получается пропорция (4): при равенстве констант скорости реакций в каталитическом и безкаталитическом процессах и выполнении гипотезы о равенстве предэкспоненциальных коэффициентов в этих реакциях отношение температур равно отношению энергий активации.

Пропорция (4) обуславливает понятие эквидистантности температур в уравнении Аррениуса аналогично эквидистантности давлений насыщенных паров над кипящими раствором и растворителем согласно правилу Бабо [14].

Выводы

1. Способ пиролиза метана при барботаже пузырьков реакционных газов через расплав металлов или их сплавов позволяет снизить рабочую температуру с 1300–1500 °С до 600–800 °С за счет каталитической активности расплава или сплава.

2. Гипотеза о равенстве предэкспоненциальных коэффициентов в уравнении Аррениуса для каталитических и безкаталитического процессов пиролиза метана в расплавах металлов или их сплавов не подтверждается даже в узком диапазоне интервала температур, в котором средняя погрешность составляет от 30 до 50 %, а наибольшая доходит до 100 % и более (табл. 3).

3. Для пиролиза метана при барботаже пузырьков реакционных газов через расплавы солей при известных энергиях активации в безкаталитической и каталитической реакциях на определенном численном значении предэкспоненциального множителя уравнения Аррениуса можно в оценочном режиме рассчитывать отношение рабочих температур каталитического и безкаталитического процессов по формуле (4).

4. Эффективность металлических сплавов как катализаторов при проведении пиролиза метана при барботаже пузырьков реакционных газов через расплав с точки зрения снижения рабочих температур необходимо подтверждать теоретическими расчетами, так как выигрыш скорости реакции в каталитическом процессе по сравнению с безкаталитическим остается на порядок и более ниже, чем при высоких рабочих температурах промышленных реакторов, работающих в настоящее время без катализатора. Поэтому степени конверсии метана, рассчитываемые для разных каталитических сплавов, приводятся для рабочих температур, сравнимых с высокими температурами пиролиза метана в промышленных безкаталитических реакторах [9; 10], и составляют 1100–1200 °С.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Пат. 2326147 РФ, МПК C09C 1/52. Способ получения газовой сажи / С. В. Сластунов, Г. Г, Каркашадзе, М. В. Шмидт, К. С. Коликов; заявитель и патентообладатель Моск. гос. горный ун-т. – № 2006134679/15; заявл. 02.10.06; опубл. 10.06.08. Бюл. № 16. – 7 с.

2. *Тимонин, А. С.* Машины и аппараты химических производств / А. С. Тимонин [и др.] / под общей редакцией А. С. Тимонина. – Калуга: Издательство Н. Ф. Бочкаревой, 2008. – 812 с.

3. *Якубсон, К. И.* Перспективы производства и использования водорода как одно из направлений развития низкоуглеродной экономики в Российской Федерации / К. И. Якубсон // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, вып. 12. – С. 1675–1696. – URL: https://doi.org/10.31857/S0044461820120014.

4. *Steinberg, M.* The Carnol process for CO_2 mitigation from power plants and the transportation sector / M. Steinberg // Energy Conversion and Management. – 1996. – Vol. 37, № 6–8. – P. 843–848. – URL: https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)00266-9.

5. *Steinberg, M.* Fossil fuel decarbonization technology for mitigating global warming / M. Steinberg // International Journal of Hydrogen Energy. – 1999. – Vol. 24, № 8. – P. 771–777. – URL: https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00128-1.

6. Hydrogen Production by Direct Contact Pyrolysis of Natural Gas / M. Serban [at al.] // Energy and Fuels. – 2003. – Vol. 17, № 3. – P. 705–713.

7. Перспективы использования водорода, образующегося при пиролизе метана, для производства аммиака / А. Б. Голованчиков, В. А. Козловцев, Н. А. Прохоренко, Н. А. Меренцов / Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 4 (46). – С. 13–16.

8. *Tyrer, D.* Production of hydrogen. Patent US1803221A, 1931.

9. Пиролиз метана водородного направления: особенности применения металлических расплавов (обзор) / В. Е. Парфенов [и др.] // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, вып. 5. – С. 611–619. – URL: https://doi.org/10.31857/S0044461820050011.

10. Пиролиз метана в расплавленных средах для получения водорода / И. В. Кудинов [и др.] // Нефтехимия. – 2023. – Т. 63, № 5. – С. 627–639. – URL: https://doi.org/10.31857/S0028242123050015.

11. *Кудинов, И. В.* Моделирование термического разложения метана и образования твердых углеродных частиц / И. В. Кудинов, А. А. Пименов, Г. В. Михеева // Нефтехимия. – 2020. – Т. 60, № 6. – С. 781–785. – URL: https://doi.org/10.31857/S002824212006012X.

12. *Молодых, Э. И.* Кинетика выделения сажи при пиролизе метана / Э. И. Молодых, В. И. Булгаков, Н. Н. Васильев // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. – 2001. – № 1. – С. 43–47.

13. *Мухленов, И. П.* Расчеты химико-технологических процессов / Под ред. И. П. Мухленова. – Л. : Химия, 1976. – 304 с.

14. *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. – Изд. 11-е, стер. – М. : РусМедиаКонсалт, 2004. – 575 с.

REFERENCES

1. Pat. 2326147 RU, IPC C09C 1/52. Method for producing carbon black / S. V. Slastunov, G. G. Karkashadze, M. V Shmidt, K. S. Kolikov; applicant and patentee: Moscow State Mining University. – № 2006134679/15; appl. 02.10.06; publ. 10.06.08. Bull. № 16. – 7 p.

2. *Timonin, A. S.* Machinery and apparatus of chemical productions / A. S. Timonin [et al.] / ed. by A. S. Timonin. – Kaluga: N. F. Bochkareva Publishing House, 2008. – 812 p.

3. *Yakubson, K. I.* Prospects for hydrogen production and use as a direction for low-carbon economy development in the Russian Federation / K. I. Yakubson // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2020. – Vol. 93, Iss. 12. – P. 1675-1696. – URL: https://doi.org/10.31857/S0044461820120014.

4. *Steinberg, M.* The Carnol process for CO_2 mitigation from power plants and the transportation sector / M. Steinberg // Energy Conversion and Management. – 1996. – Vol. 37, № 6-8. – P. 843-848. – URL: https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)00266-9.

5. *Steinberg, M.* Fossil fuel decarbonization technology for mitigating global warming / M. Steinberg // International Journal of Hydrogen Energy. – 1999. – Vol. 24, № 8. – P. 771-777. – URL: https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00128-1.

6. Hydrogen Production by Direct Contact Pyrolysis of Natural Gas / M. Serban [at al.] // Energy and Fuels. – 2003. – Vol. 17, № 3. – P. 705-713.

7. Prospects for using hydrogen from methane pyrolysis for ammonia production / A. B. Golovanchikov, V. A. Kozlovtsev, N. A. Prokhorenko, N. A. Merentsov // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. – 2022. – № 4 (46) – P. 13-16.

8. *Tyrer, D.* Production of hydrogen. Patent US1803221A, 1931.

9. Methane pyrolysis for hydrogen production: features of metallic melts application (review) / V. P. 9. Parfenov [at al.] // Russian Journal of Applied Chemistry. – 2020. – Vol. 93, Iss. 5. – P. 611-619. – URL: https://doi.org/10.31857/S0044461820050011.

10. Methane pyrolysis in molten media for hydrogen production / I. V. Kudinov [at al.] // Petroleum Chemistry. – 2023. – Vol. 63, № 5. – P. 627-639. – URL: https://doi.org/10.31857/S0028242123050015.

11. *Kudinov, I. V.* Modeling of thermal methane decomposition and solid carbon particle formation / I. V. Kudinov, A. A. Pimenov, G. V. Mikheeva // Petroleum Chemistry. – 2020. – Vol. 60, № 6. – P. 781-785. – URL: https://doi.org/10.31857/S002824212006012X.

12. *Molodykh, E. I.* Kinetics of carbon black formation during methane pyrolysis / E. I. Molodykh, V. I. Bulgakov, N. N. Vasiliev // Scientific and Educational Problems of Civil Protection. – 2001. – №. 1. – P. 43–47.

13. *Mukhlenov, I. P.* Calculations of chemical engineering processes / ed. by I. P. Mukhlenov. – Leningrad: Khimiya, 1976. – 304 p.

14. *Pavlov, K. F.* Examples and problems in the course of processes and apparatus of chemical technology: textbook for universities / K. F. Pavlov, P. G. Romankov, A. A. Noskov. – 11th ed., ster. – Moscow: RusMediaConsult, 2004. – 575 p.

Статья поступила в редакцию 03.07.2026, доработана 10.07.2026, подписана в печать 15.08.2026
The article was submitted 03.07.2026, revised 10.07.2026, accepted for publication 15.08.2026

УДК 66.069.83:532.546 Научная статья
DOI:10.35211/2500-0586-2026-3-56-12-18 Original article

П. С. Васильев, А. А. Шагарова, А. А. Рублева, М. А. Сорокин

ВЛИЯНИЕ КАПИЛЛЯРНЫХ ЯВЛЕНИЙ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ С ПОРОПЛАСТОВЫМИ КОНТАКТНЫМИ УСТРОЙСТВАМИ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия
✉ Петр Сергеевич Васильев, nestorvv@mail.ru

Аннотация. Работа посвящена вопросу обеспечения эффективной работы тепло- и массообменных колонных аппаратов с пропластовыми контактными устройствами с учетом влияния капиллярных явлений (капиллярного давления и капиллярного поднятия жидкой фазы), степень которого увеличивается с уменьшением размера пор. Получены расчетные зависимости для определения минимальной и максимальной высоты пропластовой насадки, минимальной и максимальной толщины пропластовой тарелки провального типа, а также минимальной высоты переливной перегородки и максимальной толщины пропластовой тарелки с переливными устройствами, учитывающими реальную степень влияния капиллярных явления в порах. Предложены условия выбора наиболее рационального типа пропластового контактного устройства, обеспечивающего наиболее эффективную работу колонного аппарата. Рассчитаны основные геометрические характеристики наиболее распространенных пропластовых насадок и тарелок, изготовленных главным образом из пористой резины с преимущественно открытыми порами. Выполнен расчет ректификационного колонного аппарата для фракционирования осветительного керосина марки КО-25 с пропластовыми тарелками с переливными устройствами, результаты которого детально проанализированы с точки зрения степени влияния капиллярных явлений. Полученные результаты существенно дополняют существующие инженерные методики расчета тепло- и массообменных аппаратов с пропластовыми контактными устройствами.

Ключевые слова: пропласт, насадка, тарелка, капиллярное давление, капиллярное поднятие, эффективность, методика расчета

© Васильев П. С., Шагарова А. А., Рублева А. А., Сорокин М. А., 2026

Для цитирования: Васильев П. С., Шагарова А. А., Рублева А. А., Сорокин М. А. Влияние капиллярных явлений на эффективность работы колонных аппаратов с поропластовыми контактными устройствами. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 3(56): 12–18. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-12-18.

Информация об авторах:

Петр Сергеевич Васильев – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ВолгГТУ

https://orcid.org/0000-0003-0262-686x

e-mail: nestorvv@mail.ru

Анжелика Анатольевна Шагарова – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ВолгГТУ

https://orcid.org/0009-0009-0057-9263

e-mail: shagarang@mail.ru

Анна Алексеевна Рублева – магистрант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ВолгГТУ

e-mail: annaro167325@gmail.com

Максим Алексеевич Сорокин – магистрант кафедры «Процессы и аппараты химических и пищевых производств» ВолгГТУ

e-mail: sorokin0202@gmail.com

Вклад авторов:

П. С. Васильев – разработка идеи, редактирование статьи.

А. А. Шагарова – постановка задачи, написание статьи.

А. А. Рублева – выполнение расчетов, оформление рисунков.

М. А. Сорокин – выполнение расчетов, оформление таблиц.

P. S. Vasilyev, A. A. Shagarova, A. A. Rublyova, M. A. Sorokin

THE INFLUENCE OF CAPILLARY PHENOMENA ON THE EFFICIENCY OF COLUMN APPARATUSES WITH POROUS PLASTIC CONTACT DEVICES

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

✉ Pyotr S. Vasilyev, nestorvv@mail.ru

Abstract. This work addresses the issue of ensuring the efficient operation of heat and mass transfer column apparatuses equipped with porous plastic contact devices, taking into account the influence of capillary phenomena (capillary pressure and capillary rise of the liquid phase), the extent of which increases as pore size decreases. Calculated relationships have been derived to determine the minimum and maximum heights of the porous plastic packing, the minimum and maximum thicknesses of the porous plastic plate of the drop-type design, as well as the minimum height of the overflow partition and the maximum thickness of the porous plastic plate with overflow devices, taking into account the actual degree of influence of capillary phenomena within the pores. Criteria are proposed for selecting the most suitable type of porous plastic contact device to ensure the most efficient operation of the column. The main geometric characteristics of the most common porous plastic packings and plates, manufactured primarily from porous rubber with predominantly open pores, have been calculated. A calculation was performed for a distillation column designed to fractionate KL-25 lighting kerosene using porous plastic plates with overflow devices; the results were analyzed in detail in terms of the extent of the influence of capillary phenomena. The results obtained significantly supplement existing engineering methods for calculating heat and mass transfer equipment with porous plastic contact devices.

Keywords: porous plastic, packing, plate, capillary pressure, capillary rise, efficiency, calculation method

For citation: Vasilyev P. S., Shagarova A. A., Rublyova A. A., Sorokin M. A. The influence of capillary phenomena on the efficiency of column apparatuses with porous plastic contact devices. Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2026; 3(56): 12–18. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-12-18.

Information about the authors:

Pyotr S. Vasilyev – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Processes and Apparatus of Chemical and Food Production” VSTU

https://orcid.org/0000-0003-0262-686x

e-mail: nestorvv@mail.ru

Anzhelika A. Shagarova – Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department “Processes and Apparatus of Chemical and Food Production” VSTU

https://orcid.org/0009-0009-0057-9263

e-mail: shagarang@mail.ru

Anna A. Rublyova – Master Student of the Department “Processes and Apparatus of Chemical and Food Production” VSTU

e-mail: annaro167325@gmail.com

Maxim A. Sorokin – Master Student of the Department "Processes and Apparatus of Chemical and Food Production" VSTU
e-mail: sorokin0202@gmail.com

Contribution of the authors:
Pyotr S. Vasilyev – concept development, manuscript edition.
Anzhelika A. Shagarova – problem statement, manuscript writing.
Anna A. Rublyova – performing calculations, preparation of figures.
Maxim A. Sorokin – performing calculations, preparation of tables.

Тепло- и массообменные колонные аппараты с поропластовыми контактными устройствами с развитой поровой структурой отличаются высокой эффективностью работы [1; 2]. Колонные аппараты с поропластовыми насадками обладают наименьшими высотой и гидравлическим сопротивлением по сравнению с аппаратами с другими типами насадок, а с поропластовыми тарелками – сопоставимой высотой и наименьшим гидравлическим сопротивлением [3]. При этом наибольшая эффективность их работы достигается при контакте жидкой и газовой (паровой) фаз как снаружи, так и внутри открытых (сообщающихся друг с другом) пор, что определяется степенью влияния капиллярных явлений (капиллярного давления и капиллярного поднятия жидкой фазы), которая во многом зависит от конструктивных параметров: высоты секции поропластовой насадки, высоты переливной перегородки и толщины поропластовой тарелки.

Получение расчетных зависимостей для определения этих конструктивных параметров, при которых достигается максимальная эффективность работы тепло- и массообменных колонных аппаратов с поропластовыми контактными устройствами, и является целью настоящей работы.

Максимальную высоту секции поропластовой насадки (толщину поропластовой тарелки) можно определить, исходя из условия сжатия пор под действием гидростатического давления жидкости в колонном аппарате не более чем на 15 %, что соответствует допустимому изменению значений порозности и удельной поверхности поропластового материала не более чем на 5 % [3], м:

$$H_{c/m,\,\max} = \frac{P_{15}}{g \cdot \rho_x}, \qquad (1)$$

где P_{15} – давление, при котором поры сжимаются на 15 %, Па; ρ_x – плотность жидкой фазы, кг/м^3.

Например, для поропластового материала с открытыми порами на основе каучука СКЭПТ P_{15} = 21 кПа [1], а на основе смеси каучуков СКМС-30РП и БС-45К – P_{15} = 0,75–1,25 кПа [4]. При использовании в качестве жидкой фазы разбавленных водных растворов ($\rho_x \approx 1000$ кг/м^3) в первом случае максимальная высота секции насадки составит $H_{c,\,\max} \approx 2{,}15$ м, а во втором случае максимальная толщина тарелки – $H_{m,\,\max} \approx 76$–127 мм.

Необходимо отметить, что для исключения пристеночного эффекта максимальная высота секции насадки в колонных аппаратах лежит в диапазоне $3 \cdot D < H_c < 5 \cdot D$, где D – внутренний диаметр аппарата [5]. С учетом этого обстоятельства, если $H_{c,\,\max} > 3 \cdot D$, то на практике наиболее целесообразно использовать насадочный аппарат, в ином случае – тарельчатый аппарат.

Минимальную высоту секции поропластовой насадки (толщину поропластовой тарелки провального типа, то есть без переливных устройств) можно определить, исходя из условия равенства гидростатического давления в секции насадки (на тарелке) колонного аппарата капиллярному давлению в ее наименьших порах, то есть совместного решения уравнения Бернулли [5] и формулы Жюрена [6], м:

$$H_{c/m,\,\min} = \frac{4 \cdot \sigma_{xy} \cdot \cos\theta}{0{,}85 \cdot g \cdot \rho_{xy} \cdot d_{n,\,\min}} + \frac{w_y^2}{2 \cdot g}, \qquad (2)$$

где σ_{xy} – поверхностное натяжение на границе жидкой и газовой (паровой) фаз, Н/м; θ – краевой угол смачивания поропластового материала жидкой фазой, град.; ρ_{xy} – плотность газожидкостной (парожидкостной) фазы, кг/м^3; $d_{n,\,\min}$ – минимальный диаметр пор, м; w_y – средняя скорость газовой (паровой) фазы в колонном аппарате, м/с.

Если основой поропластового материала является каучук (смесь каучуков), а жидкой фазой – разбавленный водный раствор, то $\theta \approx 90$ ° [6]. С учетом того, что средняя скорость газовой фазы в абсорбционных колонных аппаратах и паровой фазы в ректификационных колонных аппаратах лежит в районе $w_y \approx 1$ м/с [7], минимальная высота секции насадки (толщина тарелки провального типа) в этом случае составит $H_{c/m,\,\min} \approx 51$ мм.

Плотность газожидкостной (парожидкостной) фазы в уравнении (2) рассчитывается по формуле:

$$\rho_{xy} = \rho_x \cdot \delta + \rho_y \cdot (1-\delta) \approx \rho_x \cdot \delta, \qquad (3)$$

где ρ_y – плотность газовой (паровой) фазы (в большинстве практических случаев $\rho_y << \rho_x$), кг/м^3; δ – количество удерживаемой жидкости, м^3/м^3.

Например, количество удерживаемой жидкости насадкой из засыпанных внавал поропластовый колец Рашига размером 10×10×2 мм можно определить с помощью эмпирического уравнения [8]:

$$\delta = 5{,}067 \cdot 10^{-2} \cdot \mathrm{Re}_x^{0,420} \cdot \mathrm{Re}_y^{0,005}, \qquad (4)$$

где $\mathrm{Re}_x = 4 \cdot w_x \cdot \rho_x / (a \cdot \mu_x)$ – число Рейнольдса для жидкой фазы; $\mathrm{Re}_y = 4 \cdot w_y \cdot \rho_y / (a \cdot \mu_y)$ – число Рейнольдса для газовой (паровой) фазы; w_x – средняя скорость жидкой фазы в колонном аппарате, м/с; a – удельная поверхность насадки, м^2/м^3; μ_x – динамическая вязкость жидкой фазы, Па·с; μ_y – динамическая вязкость газовой (паровой) фазы, Па·с.

Высота секции поропластовой насадки H_c и толщина поропластовой тарелки провального типа H_m абсорбционных и ректификационных колонных аппаратов, рассчитанные например по методике [3], должны удовлетворять следующим совместным условиям соответственно:

$$\begin{cases} H_{c,\min} \le H_c \le H_{c,\max} \\ H_{c,\max} > 3 \cdot D \end{cases}, \qquad (5)$$

$$\begin{cases} H_{m,\min} \le H_m \le H_{m,\max} \\ H_{c,\max} \le 3 \cdot D \end{cases}. \qquad (6)$$

При расчете тарельчатых аппаратов по методике [3] для обеспечения гарантированного проникновения внутрь наименьших пор жидкой фазы необходимо увеличить ее допустимый межтарельчатый унос (брызгоунос) в два раза от рекомендуемого значения 0,1 кг/кг [7], то есть принять его равным 0,2 кг/кг.

Если основой поропластового материала является каучук (смесь каучуков), а жидкой фазой – нефтепродукт, то $\theta \approx 0$ ° [6], и минимальная толщина поропластовой тарелки провального типа зачастую оказывается больше рассчитанной по методике [3], то есть $H_{m,\min} > H_m$.

В этом случае, для обеспечения наибольшей эффективности работы колонных аппаратов, на практике наиболее целесообразно использовать поропластовые тарелки с переливными устройствами, минимальную высоту переливной перегородки которых можно определить по уравнению, м:

$$h_{пер,\min} = \left(\frac{4 \cdot \sigma_{xy} \cdot \cos\theta}{g \cdot \rho_x \cdot d_{n,\min}} + \frac{w_y^2}{2 \cdot g} \right) \Big/ (1 - \varphi_0), \qquad (7)$$

где $\varphi_0 = 0{,}58 \cdot \mathrm{Fr}_0^{0,1}$ – газосодержание (паросодержание) барботажного слоя на тарелке [9], м^3/м^3; $\mathrm{Fr}_0 = w_y^2 / (g \cdot \varepsilon^2 \cdot h_{пер})$ – число Фруда для газожидкостной (парожидкостной) фазы; ε – порозность тарелки, м^3/м^3; $h_{пер}$ – исполнительная высота переливной перегородки, м.

Толщина поропластовых тарелок с переливными устройствами и высота их переливной перегородки должны удовлетворять следующему совместному условию:

$$\begin{cases} H_m \le H_{m,\max} \\ H_{c,\max} \le 3 \cdot D \cdot \\ h_{пер} \ge h_{пер,\min} \end{cases} \qquad (8)$$

Необходимо отметить, что порозность ε и удельная поверхность a поропластовых контактных устройств рассчитываются по методике [10] на основе гистограммы порозностного состава поропластового материала (рис. 1), статистический анализ которой позволяет с заданной вероятностью определить преимущественное наличие или отсутствие открытых (сообщающихся друг с другом) пор.

При несоблюдении условий (5), (6), (8) степень влияние капиллярных явлений увеличивается, и жидкая фаза не будет проникать в наименьшие поры материала, то есть $d_{n,\min} > 0{,}2$ мм согласно рис. 1.

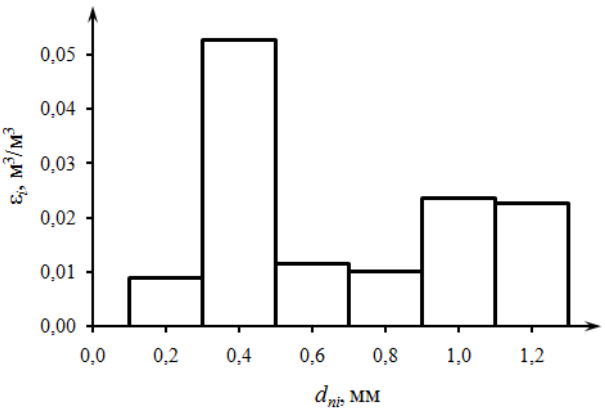


Рис. 1. Пример гистограммы порозностного состава пористой резины с преимущественно открытыми порами с вероятностью 95 %

В табл. 1 приведены рассчитанные по методике [10] для диапазона значений $d_{n,\ \min}$ = 0,2–1,0 мм основные геометрические характеристики различных контактных устройств, порозностный состав поропластового материала которых соответствует рис. 1.

С использованием данных табл. 1, по методике [3] выполнен расчет ректификационного колонного аппарата с поропластовыми тарелками с переливными устройствами для получения легкой и тяжелой фракций осветительного керосина марки КО-25.

Исходными для выполнения расчета являлись следующие данные. Производительность по исходной смеси 10000 кг/ч. Мольные доли легколетучего компонента: в исходной смеси 0,53; в дистилляте 0,96; в кубовом остатке 0,06. Температуры: исходной смеси 20 °С; дистиллята 115 °С; кубового остатка 180 °С. Давление в колонном аппарате 0,05 МПа. Доля рабочего сечения тарелки 0,9. Краевой угол смачивания поропластового материала жидкой фазой θ = 0 °.

Основные результаты расчета при условии $h_{пер} = h_{пер,\ \min}$ приведены в табл. 2.

Таблица 1

Основные геометрические характеристики контактных устройств

Минимальный диаметр пор	Порозность	Удельная поверхность	Эквивалентный диаметр
$d_{n,\ \min}$	ε	a	$d_э$
мм	$м^3/м^3$	$м^2/м^3$	мм
Поропластовые кольца Рашига размером 10×10×2 мм			
0,2	0,718	713	4,0
0,4	0,715	656	4,4
0,6	0,698	485	5,8
0,8	0,694	460	6,0
1,0	0,691	444	6,2
Самоструктурирующаяся кубооктаэдрическая поропластовая насадка размером 10 мм [11]			
0,2	0,640	648	4,0
0,4	0,636	576	4,4
0,6	0,614	357	6,9
0,8	0,609	326	7,5
1,0	0,605	305	7,9
Армированные поропластовые кольца Рашига размером 35×35×4 мм по патенту [12] (внутренний диаметр армирующего кольца 33 мм)			
0,2	0,869	314	11,1
0,4	0,868	283	12,3
0,6	0,861	189	18,2
0,8	0,860	176	19,5
1,0	0,858	167	20,6
Поропластовые тарелки провального типа и с переливными устройствами			
0,2	0,871	999	3,5
0,4	0,880	823	4,3
0,6	0,932	295	12,6
0,8	0,944	220	17,2
1,0	0,954	170	22,4

Анализ данных табл. 2 показывает, что при увеличении степени влияния капиллярных явлений (капиллярного давления и капиллярного поднятия жидкой фазы) в наименьших порах, то есть при переходе от $d_{n,\ \min}$ = 0,2 мм к $d_{n,\ \min}$ = 0,4 мм согласно рис. 1, толщина поропластовых тарелок увеличивается на 36 %, а общая высота аппарата – на 7 %.

При этом гидравлическое сопротивление аппарата уменьшается на 20 %, а его объем – на 21 %. Также необходимо отметить, что для $d_{n,\ \min} > 0{,}4$ мм расстояние между тарелками превышает свое максимально допустимое стандартное значение $h_m = 1{,}2$ м [7].

Таблица 2

Основные результаты расчета ректификационного колонного аппарата

Параметр	Величина	
	$d_{n,\ \min} = 0{,}2$ мм	$d_{n,\ \min} = 0{,}4$ мм
Минимальная высота переливной перегородки, рассчитанная по формуле (7), $h_{пер,\ \min}$, м	0,152	0,130
Средняя скорость паровой фазы в аппарате w_y, м/с	0,555	0,755
Стандартный внутренний диаметр аппарата D, м	1,4	1,2
Толщина пропластовых тарелок H_m, м:		
– в укрепляющей части колонны	0,244	0,332
– в исчерпывающей части колонны	0,193	0,263
Число пропластовых тарелок N:		
– в укрепляющей части колонны	2	2
– в исчерпывающей части колонны	3	3
Стандартное расстояние между тарелками h_m, м:		
– в укрепляющей части колонны	0,9	1,0
– в исчерпывающей части колонны	1,0	1,0
Общая высота аппарата H, м	6,968	7,451
Гидравлическое сопротивление аппарата ΔP, Па	2961	2363

На рис. 2 представлены графики зависимости минимальной высоты переливной перегородки от краевого угла смачивания пропластового материала нефтепродуктами, построенные для $d_{n,\ \min} = 0{,}2$ мм и $d_{n,\ \min} = 0{,}4$ мм.

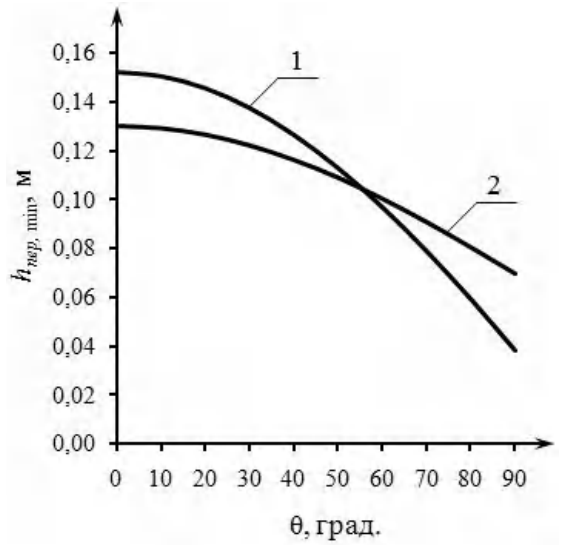


Рис. 2. Графики зависимости $h_{пер,\ \min} = f(\theta)$:
1 – $d_{n,\ \min} = 0{,}2$ мм; *2* – $d_{n,\ \min} = 0{,}4$ мм

Анализ рис. 2 показывает, что если вместо пористой резины на основе каучука (смеси каучуков), для которой $\theta \approx 0$ °, пропластовые тарелки изготовить из пористой резины на основе силикона (смеси силиконов), для которой $\theta \approx 90$ °, возможно значительно уменьшить степень влияния капиллярных явлений в наименьших порах. Для $d_{n,\ \min} = 0{,}2$ мм при такой замене материала минимальная высота переливной перегородки и пропорциональное ей гидравлическое сопротивление аппарата уменьшаются в 3,9 раза, а для $d_{n,\ \min} = 0{,}4$ мм – в 1,9 раза. При этом общая высота аппарата для $d_{n,\ \min} = 0{,}2$ мм уменьшается на 11 %, а для $d_{n,\ \min} = 0{,}4$ мм – на 4 %.

Таким образом, формулы (1)–(8) позволяют определять оптимальные диапазоны высоты секции пропластовой насадки, толщины пропластовой тарелки и высоты ее переливной перегородки, которые обеспечивают максимальную эффективность работы тепло- и массообменных колонных аппаратов с пропластовыми контактными устройствами с учетом степени влияния капиллярных эффектов. Формулы (1)–(8) существенно дополняют существующие методики расчета, например [3], что позволяет решать разноплановые задачи инженерного проектирования технологического оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Porous Plastic Packing for Heat and Mass Transfer Processes / A. B. Golovanchikov, A. A. Shagarova, P. S. Vasil'ev, K. V. Cherikova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Vol. 53. – P. 759–764. – URL: https://doi.org/10.1007/s10556-018-0417-z.

2. *Vasiliev, P. S.* Modeling of Mass Transfer Kinetics in Vapor-Liquid Systems on Porous Plastic Contact Devices / P. S. Vasiliev, A. A. Shagarova, K. V. Cherikova // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3183. – 050007. – URL: https://doi.org/10.1063/5.0224764.

3. Методика расчета тепломассообменных аппаратов с пропластовыми контактными устройствами / П. С. Васильев, К. В. Черикова, А. А. Шагарова, Л. С. Рева // Вестник МГТУ. – 2022. – Т. 25, № 3. – С. 259–269. – URL: https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-3-259-269.

4. *Рыжков, В. Л.* Производство пористых резинотехнических изделий / В. Л. Рыжков, В. И. Клочков, А. М. Воскресенский. – М. : ЦНИИТЭнефтехим, 1979. – 68 с.

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

6. *Малышева, Ж. Н.* Теоретическое и практическое руководство по дисциплине «Поверхностные явления и дисперсные системы»: учебное пособие. – 4-е изд., доп. и перераб. / Ж. Н. Малышева, И. А. Новаков. – Волгоград: ВолгГТУ, 2017. – 392 с.

7. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию / Под. ред. Ю. И. Дытнерского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1991. – 496 с.

8. *Васильев, П. С.* Экспериментальное определение удерживающей способности пропластовых насадок / П. С. Васильев, К. В. Черикова, П. В. Тишина // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2021. – № 1 (34). – С. 10–14.

9. *Рамм, В М.* Абсорбция газов / В. М. Рамм. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1976. – 656 с.

10. *Васильев, П. С.* Метод расчета основных геометрических характеристик насадок из пропластовых материалов / П. С. Васильев, Л. С. Рева, А. А. Шагарова // Химическая технология. – 2019. – Т. 20, № 9. – С. 429–432. – URL: https://www.doi.org/10.31044/1684-5811-2019-20-9-429-432.

11. *Васильев, П. С.* Гидравлические испытания кубооктаэдрической пропластовой насадки / П. С. Васильев, К. В. Черикова // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 3 (40). – С. 15–18.

12. П. м. 131311 РФ, МПК B 01 J 19/00. Насадка для массообменного аппарата / А. Б. Голованчиков, П. С. Васильев, Н. А. Дулькина, Т. Б. Агеева, В. В. Разуваев, В. Я. Закурский; ВолгГТУ. – 2013.

REFERENCES

1. Porous Plastic Packing for Heat and Mass Transfer Processes / A. B. Golovanchikov, A. A. Shagarova, P. S. Vasil'ev, K. V. Cherikova // Chemical and Petroleum Engineering. – 2018. – Vol. 53. – P. 759-764. – URL: https://doi.org/10.1007/s10556-018-0417-z.

2. *Vasiliev, P. S.* Modeling of Mass Transfer Kinetics in Vapor-Liquid Systems on Porous Plastic Contact Devices / P. S. Vasiliev, A. A. Shagarova, K. V. Cherikova // AIP Conference Proceedings. – 2024. – Vol. 3183. – 050007. – URL: https://doi.org/10.1063/5.0224764.

3. Calculation method for heat and mass transfer apparatuses with porous plastic contact devices / P. S. Vasilyev, K. V. Cherikova, A. A. Shagarova, L. S. Reva // Vestnik of MSTU. – 2022. – Vol. 25, № 3. – P. 259-269. – URL: https://doi.org/10.21443/1560-9278-2022-25-3-259-269.

4. *Ryzhkov, V. L.* Production of porous rubber products / V. L. Ryzhkov, V. I. Klochkov, A. M. Voskresensky. – Moscow: TsNIITEneftekhim, 1979. – 68 p.

5. *Kasatkin, A. G.* Basic processes and apparatuses of chemical technology: textbook for universities / A. G. Kasatkin. – 14th edition, reprinted. – Moscow: Alliance, 2008. – 750 p.

6. *Malysheva, Zh. N.* Theoretical and practical guide to the discipline "Surface phenomena and dispersed systems": textbook. – 4th edition, supplemented and revised / Zh. N. Malysheva, I. A. Novakov. – Volgograd: VSTU, 2017. – 392 p.

7. Basic processes and apparatuses of chemical engineering: design manual / edited by Yu. I. Dytnersky. – 2nd edition, revised and supplemented. – Moscow: Chemistry, 1991. – 496 p.

8. *Vasilyev, P. S.* Experimental determination of the retention capacity of porous plastic packing / P. S. Vasilyev, X. V. Tchyorickowa, P. V. Tishina // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. – 2021. – № 1 (34). – P. 10-14.

9. *Ramm, V. M.* Absorption of gases / V. M. Ramm. – 2nd edition, revised and supplemented. – Moscow: Chemistry, 1976. – 656 p.

10. *Vasil'ev, P. S.* Calculation method of porous plastic packing basic geometrical characteristics / P. S. Vasil'ev, L. S. Reva, A. A. Shagarova // Chemical Technology. – 2019. – Vol. 20, № 9. – P. 429-432. – URL: https://www.doi.org/10.31044/1684-5811-2019-20-9-429-432.

11. Vasilyev, P. S. Hydraulic testing of cuboctahedral porous plastic packing / P. S. Vasilyev, X. V. Tchyorickowa // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. – 2022. – № 3 (40). – P. 15-18.

12. U. m. 131311 RU, IPC B 01 J 19/00. Packing for mass-transfer apparatus / A. B. Golovanchikov, P. S. Vasiliev, N. A. Dulkina, T. B. Ageeva, V. V. Razuvaev, V. I. Zakursky; VSTU. – 2013.

Статья поступила в редакцию 29.06.2026, доработана 07.07.2026, подписана в печать 15.08.2026
The article was submitted 29.06.2026, revised 07.07.2026, accepted for publication 15.08.2026

УДК 66.045.123
DOI:10.35211/2500-0586-2026-3-56-19-24

Научная статья
Original article

И. Ю. Голованов[1], А. Ю. Тишина[2], М. Г. Лагуткин[1], В. А. Диков[3]

ВЛИЯНИЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ПАТРУБКОВ МЕЖТРУБНОГО ПРОСТРАНСТВА НА ИНТЕНСИВНОСТЬ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ В ДВУХТРУБНОМ ТЕПЛООБМЕННОМ АППАРАТЕ

[1] МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, Россия
[2] Московский Политехнический университет, Москва, Россия
[3] Дзержинский политехнический институт, филиал Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева, Дзержинск, Россия

✉ Иван Юрьевич Голованов, igol95@yandex.ru

Аннотация. В статье представлены данные, полученные с использованием компьютерного моделирования, об интенсивности и эффективности процесса теплопередачи в двухтрубном теплообменном аппарате при радиальном и тангенциальном расположении патрубков межтрубного пространства. На основании полученных результатов показано значительное увеличение интенсивности и эффективности процесса теплопередачи за счет тангенциального расположения патрубков межтрубного пространства.

Ключевые слова: двухтрубный теплообменный аппарат, компьютерное моделирование, тангенциальное расположение патрубков, интенсивность теплопередачи, эффективность теплопередачи

Для цитирования: Голованов И. Ю., Тишина А. Ю., Лагуткин М. Г., Диков В. А. Влияние расположения патрубков межтрубного пространства на интенсивность и эффективность процесса теплопередачи в двухтрубном теплообменном аппарате. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 3(56): 19–24. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-19-24.

Информация об авторах:

Иван Юрьевич Голованов – канд. техн. наук, доцент кафедры «Процессы и аппараты химических технологий» имени Н. И. Гельперина МИРЭА – Российского технологического университета
https://orcid.org/0009-0007-9073-1235
e-mail: igol95@yandex.ru

Алиса Юрьевна Тишина – студент кафедры «Аппаратурное оформление и автоматизация технологических производств имени профессора М. Б. Генералова» Московского политехнического университета
https://orcid.org/0009-0002-9280-0234
e-mail: k5alisa@yandex.ru

Михаил Георгиевич Лагуткин – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Процессы и аппараты химических технологий» имени Н. И. Гельперина МИРЭА – Российского технологического университета
https://orcid.org/0000-0001-9615-0051
e-mail: lag53@yandex.ru

Вадим Александрович Диков – канд. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Технологическое оборудование и транспортные системы» Дзержинского политехнического института, филиала Нижегородского государственного технического университета имени Р. Е. Алексеева
https://orcid.org/0009-0007-0317-614x
e-mail: dikov@dpingtu.ru

Вклад авторов:

И. Ю. Голованов – определение цели исследования, анализ данных исследования, редактирование текста статьи.

А. Ю. Тишина – проведение исследования, оформление графических материалов и таблиц, написание текста статьи.

М. Г. Лагуткин – методология исследования, редактирование текста статьи.

В. А. Диков – анализ данных исследования, редактирование текста статьи.

I. Yu. Golovanov[1], A. Yu. Tishina[2], M. G. Lagutkin[1], V. A. Dikov[3]

THE EFFECT OF THE LOCATION OF THE INTERSTITIAL SPACE PIPES ON THE INTENSITY AND EFFICIENCY OF THE HEAT TRANSFER PROCESS IN A TWO-TUBE HEAT EXCHANGER

[1] MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia
[2] Moscow Polytechnic University, Moscow, Russia
[3] Dzerzhinsk Polytechnic Institute, branch of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev, Dzerzhinsk, Russia

✉ Ivan Yu. Golovanov, igol95@yandex.ru

© Голованов И. Ю., Тишина А. Ю., Лагуткин М. Г., Диков В. А., 2026

Abstract. The article presents data obtained using computer modeling on the intensity and efficiency of the heat transfer process in a two-tube heat exchanger with radial and tangential arrangement of the pipes of the inter-tube space. Based on the results obtained, a significant increase in the intensity and efficiency of the heat transfer process is shown due to the tangential arrangement of the pipes of the inter-tube space.

Keywords: two-tube heat exchanger, computer simulation, tangential arrangement of pipes, heat transfer intensity, heat transfer efficiency

For citation: Golovanov I. Yu., Tishina A. Yu., Lagutkin M. G., Dikov V. A. The effect of the location of the interstitial space pipes on the intensity and efficiency of the heat transfer process in a two-tube heat exchanger. Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2026; 3(56): 19–24. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-19-24.

Information about the authors:

Ivan Yu. Golovanov – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Chemical Engineering named after N. I. Gelperin of MIREA – Russian Technological University
https://orcid.org/0009-0007-9073-1235
e-mail: igol95@yandex.ru

Alisa Yu. Tishina – Student of the Department «AO&ATP named after Prof. M. B. Generalov» of Moscow Polytechnic University
https://orcid.org/0009-0002-9280-0234
e-mail: k5alisa@yandex.ru

Mikhail G. Lagutkin – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Chemical Engineering named after N. I. Gelperin of MIREA – Russian Technological University
https://orcid.org/0000-0001-9615-0051
e-mail: lag53@yandex.ru

Vadim A. Dikov – Cand. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department of Technological Equipment and Transport Systems of Dzerzhinsk Polytechnic Institute, branch of the Nizhny Novgorod State Technical University named after R. E. Alekseev
https://orcid.org/0009-0007-0317-614x
e-mail: dikov@dpingtu.ru

Contribution of the authors:

Ivan Yu. Golovanov – defining the purpose of the study, analyzing the research data, editing the text of the article.
Alisa Yu. Tishina – conducting research, design of graphic materials and tables, writing the text of the article.
Mikhail G. Lagutkin – research methodology, editing of the article text.
Vadim A. Dikov – analyzing the research data, editing of the article text.

Создание закрученных потоков (в том числе тангенциальный ввод) рабочей среды широко применяется как для интенсификации проводимого процесса, так и для повышения эффективности промышленного оборудования [1–4].

В работе [5] показано, что тангенциальный ввод теплоносителя межтрубного пространства существенно повышает количество передаваемого тепла в двухтрубном теплообменном аппарате.

В рекуперативных теплообменных аппаратах интенсивность процесса теплопередачи определяет коэффициент теплопередачи K [5]:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2} + R_{заг}}, \quad (1)$$

где α_1 – коэффициент теплоотдачи трубного пространства, Вт/(м^2·°С); α_2 – коэффициент теплоотдачи межтрубного пространства, Вт/(м^2·°С); $\delta_{ст}$ – толщина теплопередающей стенки, м; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала теплопередающей стенки, Вт/(м·°С); $R_{заг}$ – термическое сопротивление загрязнений на теплопередающей стенке, (м^2·°С)/Вт.

Одним из показателей эффективности процесса теплопередачи являются удельные потери мощности [5]:

$$\Delta E = \frac{Q}{E}, \quad (2)$$

где ΔE – удельные потери мощности при эксплуатации теплообменного аппарата, Вт/Вт; Q – количество передаваемого тепла в теплообменном аппарате, Вт; E – потери мощности на перекачивание теплоносителей при эксплуатации теплообменного аппарата, Вт.

В двухтрубном теплообменном аппарате потери мощности E определяются как:

$$E = V_1 \cdot \Delta P_1 + V_2 \cdot \Delta P_2, \quad (3)$$

где V_1 – объемный расход теплоносителя трубного пространства, м^3/с; ΔP_1 – гидравлическое сопротивление трубного пространства, Па; V_2 – объемный расход теплоносителя межтрубного пространства, м^3/с; ΔP_2 – гидравлическое сопротивление межтрубного пространства, Па.

С использованием компьютерного моделирования в программном комплексе «SolidWorks» проанализируем, как тангенциальное расположение патрубков межтрубного пространства отразится на интенсивности и эффективности процесса теплопередачи в двухтрубном теплообменном аппарате.

В качестве материала теплообменного аппарата выберем сталь марки 08Х18Н10Т с теп-

лоемкостью 504 Дж/(кг·°С) и коэффициентом теплопроводности 17 Вт/(м·°С) [5].

Примем кожуховую трубу диаметром 57×4 мм и длиной 1400 мм. Теплообменную трубу примем диаметром 25×3 мм и длиной 1500 мм. Длина поверхности теплопередачи в этом случае составит 1400 мм [5].

Патрубки межтрубного пространства примем диаметром 32×4 мм и длиной 155 мм, согласно справочнику [6]. Такая геометрия будет обеспечивать равенство гидравлического диаметра патрубков и гидравлического диаметра межтрубного пространства.

Примем следующие исходные технологические параметры: теплоносители трубного и межтрубного пространств – вода; температура воды на входе в трубное пространство равна +60 °С; температура воды на входе в межтрубное пространство равна +20 °С; объемный расход воды в трубном пространстве составляет $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ м^3/с; объемный расход воды в межтрубном пространстве будем варьировать (шаг $1{,}0 \cdot 10^{-4}$ м^3/с) от $6{,}0 \cdot 10^{-4}$ м^3/с до $1{,}4 \cdot 10^{-3}$ м^3/с, для соответствия величине критерия Рейнольдса 10000–24000 – турбулентному режиму течения в межтрубном пространстве.

По итогам компьютерного моделирования получена графическая зависимость коэффициента теплопередачи K (1) от величины критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве (рис. 1).

По представленной на рис. 1 зависимости можно отметить, что тангенциальное расположение патрубков существенно повышает интенсивность процесса теплопередачи.

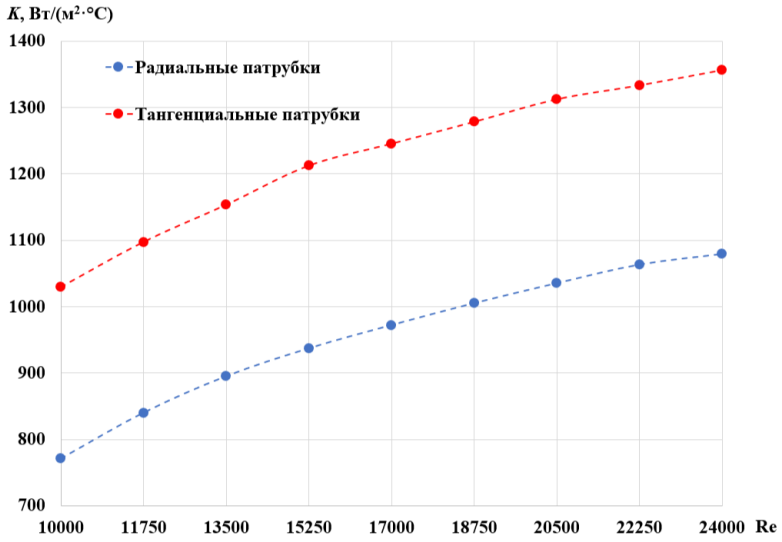


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплопередачи от критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве исследуемых двухтрубных теплообменных аппаратов

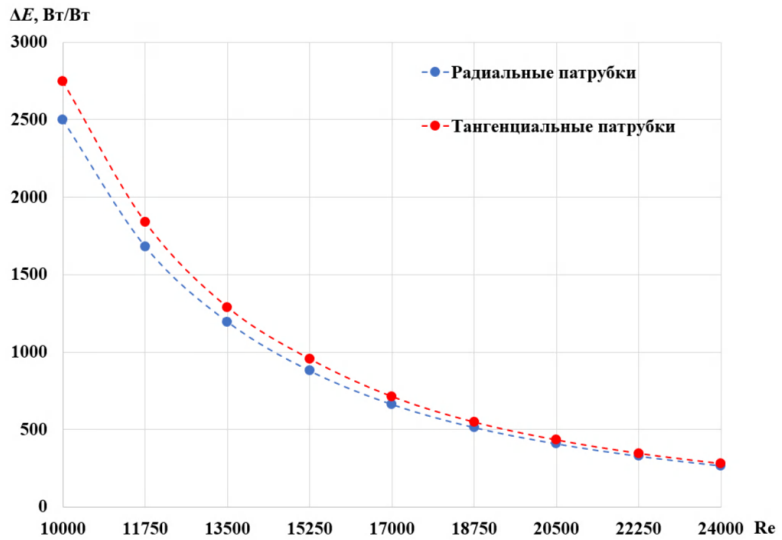


Рис. 2. Зависимость эффективности процесса теплопередачи от критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве исследуемых двухтрубных теплообменных аппаратов

На рис. 2 представлена графическая зависимость эффективности процесса теплопередачи, определяемой по удельным потерям мощности при эксплуатации двухтрубных теплообменных аппаратов ΔE (2), от величины критерия Рейнольдса в межтрубном пространстве.

По зависимости на рис. 2 можно отметить, что тангенциальное расположение патрубков также положительно влияет и на эффективность процесса теплопередачи.

На рис. 3 представлено распределение скорости потока воды в межтрубных пространствах двухтрубных теплообменных аппаратов при Re = 24000 (сечение по центру длины теплообменных аппаратов).

Из рис. 3 можно сделать вывод о неравномерном распределении скорости потока воды в межтрубном пространстве теплообменного аппарата с радиальными патрубками.

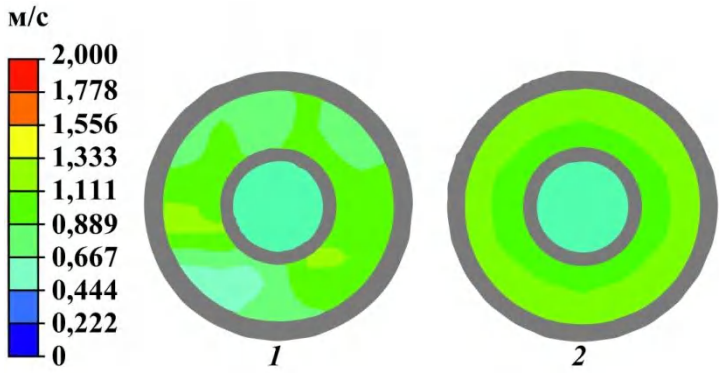


Рис. 3. Распределение скорости потока воды в межтрубном пространстве исследуемых двухтрубных теплообменных аппаратов:
1 – радиальные патрубки; *2* – тангенциальные патрубки

На рис. 4 представлено распределение температуры потока воды в межтрубных пространствах двухтрубных теплообменных аппаратов при Re = 24000 (сечение по центру длины теплообменных аппаратов).

На рис. 4 заметно неравномерное распределение температуры воды в поперечном сечении межтрубного пространства теплообменного аппарата с радиальными патрубками, что объясняется неравномерным распределением ее скорости, представленным на рис. 3.

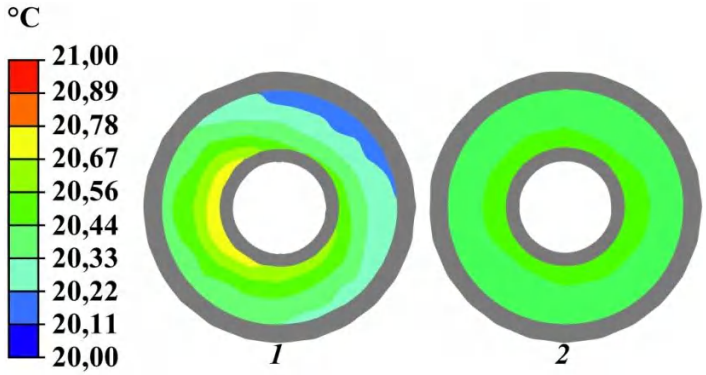


Рис. 4. Распределение температуры потока воды в межтрубном пространстве исследуемых двухтрубных теплообменных аппаратов:
1 – радиальные патрубки; *2* – тангенциальные патрубки

Неравномерность распределения скорости потока воды наблюдается также в продольном сечении патрубков на входе в межтрубное пространство (рис. 5) и на выходе из него (рис. 6) в теплообменном аппарате с радиальными патрубками.

Неравномерное распределение скорости потока воды на выходе из межтрубного пространства приводит к неравномерному распределению температуры воды на выходе из теплообменного аппарата с радиальными патрубками (рис. 7).

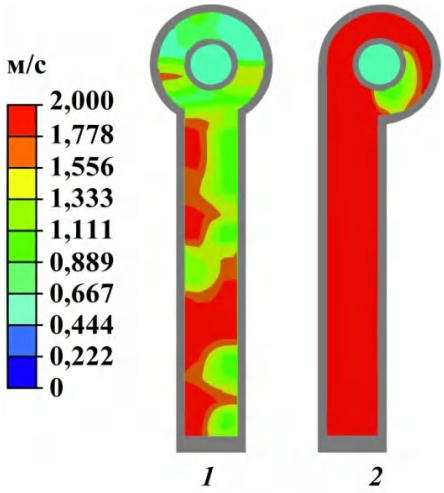


Рис. 5. Распределение скорости потока воды на входе в межтрубное пространство исследуемых двухтрубных теплообменных аппаратов:
1 – радиальные патрубки; *2* – тангенциальные патрубки

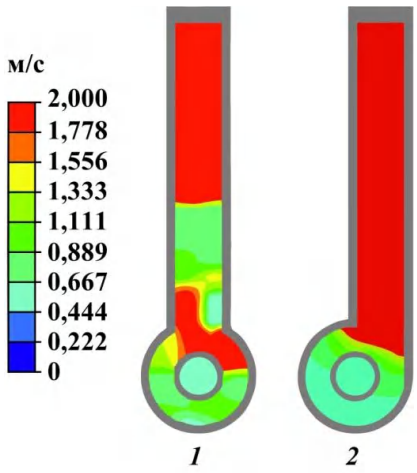


Рис. 6. Распределение скорости потока воды на выходе из межтрубного пространства исследуемых двухтрубных теплообменных аппаратов:
1 – радиальные патрубки; *2* – тангенциальные патрубки

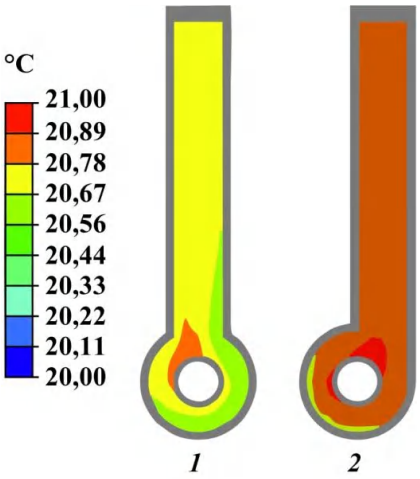


Рис. 7. Распределение температуры потока воды на выходе из межтрубного пространства исследуемых двухтрубных теплообменных аппаратов:
1 – радиальные патрубки; *2* – тангенциальные патрубки

Из анализа рис. 3–7 можно сделать вывод о неравномерном распределении скорости и температуры воды в межтрубном пространстве конструкции теплообменного аппарата с радиальным расположением патрубков межтрубного пространства. Данный фактор может оказывать негативное влияние на интенсивность и эффективность процесса теплопередачи. Тангенциальное расположение патрубков межтрубного пространства решает эту проблему.

Выводы

1. С использованием компьютерного моделирования показано, что тангенциальное расположение патрубков межтрубного пространства существенно влияет на интенсивность и эффективность процесса теплопередачи в двухтрубном теплообменном аппарате.

2. На основании результатов компьютерного моделирования показано, что в диапазоне величины критерия Рейнольдса межтрубного пространства 10000–24000 конструкция двухтрубного теплообменного аппарата с тангенциальным расположением патрубков межтрубного пространства обеспечивает большую интенсивность и эффективность процесса теплопередачи, в сравнении с конструкцией с радиальным расположением патрубков.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Baranova, E. Yu.* Application Areas, Design, and Calculation of Vortex Apparatuses / E. Yu. Baranova, I. Yu. Golovanov, A. S. Sokolov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 59, №. 2. – P. 455–462. – URL: https:// www.doi.org/10.1134/S004057952570071X.

2. Анализ конструкций аппаратов с фильтрующим элементом и перспективы их совершенствования для нефтедобычи / А. В. Козлов, Ю. А. Таран, М. Г. Лагуткин, И. Ю. Голованов // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. – № 2 (51). – С. 58–65. – URL: https://www.doi.org/10.35211/2500-0586-2025-2-51-58-65.

3. A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers / S. A. Marzouk, M. M. Abou Al-Sood, E. M. S. El-Said [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2023. – Vol. 148, № 15. – P. 7539–7578. – URL: https://www.doi.org/ 10.1007/ s10973-023-12265-3.

4. *Sapozhnikov, V. B.* Evaluating the Performance of Low-Temperature Liquid Separation Devices with Two-Stage Refrigeration and Pre-Cooling / V. B. Sapozhnikov, M. A. Ugolnikova, V. V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – Vol. 59, No. 1–2. – P. 134–138. – URL: https://www.doi.org/10.1007/s10556-023-01218-0.

5. Анализ эффективности процесса теплопередачи в двухтрубном теплообменном аппарате с тангенциальным вводом теплоносителя / И. Ю. Голованов, К. О. Занина, М. Г. Лагуткин, А. М. Юрицына // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. – № 1 (50). – С. 6–12. – URL: https://www.doi.org/ 10.35211/2500-0586-2025-1-50-6-12.

6. *Лащинский, А. А.* Конструирование сварных химических аппаратов: справочник / А. А. Лащинский; под ред. А. Р. Толчинского. – Изд. 2-е, стер. – М. : Альянс, 2008. – 384 с.

REFERENCES

1. *Baranova, E. Yu.* Application Areas, Design, and Calculation of Vortex Apparatuses / E. Yu. Baranova, I. Yu. Golovanov, A. S. Sokolov // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2025. – Vol. 59, №. 2. – P. 455-462. – URL: https://www.doi.org/10.1134/S004057952570071X.

2. *Kozlov, A. V.* Analysis of the designs of devices with a filter element and the prospects for their improvement for oil production / A. V. Koz-lov, Yu. A. Taran, M. G. Lagutkin, I. Yu. Golova-nov // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. – 2025. – № 2 (51). – P. 58-65. – URL: https://www.doi.org/10.35211/2500-0586-2025-2-51-58-65.

3. *Marzouk, S. A.* A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers / S. A. Marzouk, M. M. Abou Al-Sood, E. M. S. El-Said [et al.] // Journal of Thermal Analysis and Calorimetry. – 2023. – Vol. 148, № 15. – P. 7539-7578. – URL: https://www. doi.org/10.1007/s10973-023-12265-3.

4. *Sapozhnikov, V. B.* Evaluating the Performance of Low-Temperature Liquid Separation Devices with Two-Stage Refrigeration and Pre-Cooling / V. B. Sapozhnikov, M. A. Ugolnikova, V. V. Chernyavskaya // Chemical and Petroleum Engineering. – 2023. – Vol. 59, No. 1-2. – P. 134-138. – URL: https://www.doi.org/10.1007/s10556-023-01218-0.

5. *Golovanov, I. Yu.* Analysis of the efficiency of the heat transfer process in a two-tube heat exchanger with tangential coolant inlet / I. Yu. Golo-vanov, K. O. Zanina, M. G. Lagutkin, A. M. Yurit-syna // Energy and Resource Saving: Industry and Transport. – 2025. – № 1 (50). – P. 6-12. – URL: https://www.doi.org/10.35211/2500-0586-2025-1-50- 6-12.

6. *Lashchinsky, A. A.* Construction of welded chemical apparatuses: a reference book / A. A. La-shchinsky; edited by A. R. Tolchinsky. – 2nd edition, stereotypical. – Moscow: Alliance, 2008. – 384 p.

Статья поступила в редакцию 15.05.2026, доработана 16.06.2026, подписана в печать 15.08.2026
The article was submitted 15.05.2026, revised 16.06.2026, accepted for publication 15.08.2026

УДК 621.3.089.62
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-24-31

Научная статья
Original article

Д. Ю. Кетов[1], А. И. Нефедьев[2]

РОБОТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОЦЕНКИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДВИГАТЕЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ КИСТИ

[1] Волгоградский государственный медицинский университет, Волгоград, Россия
[2] Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия
✉ Дмитрий Юрьевич Кетов, ya_st@bk.ru

Аннотация. Восстановление двигательных функций кисти после инсультов, травм периферических нервов и при нейродегенеративных заболеваниях является одной из наиболее сложных задач современной реабилитации. Кисть обладает высокой степенью свободы и сложной биомеханикой, что требует высокоточных инструментов для диагностики и терапии. Роботизированные системы, такие как экзоскелеты и эндоэффекторные устройства, позволяют автоматизировать процесс реабилитации, обеспечивая высокую повторяемость упражнений и объективную оценку прогресса пациента.

Ключевые слова: кисть, двигательная функция, роботизированная система, измерительный комплекс, реабилитация, сервопривод, цифровой акселерометр

Для цитирования: Кетов Д. Ю., Нефедьев А. И. Роботизированная система для оценки и восстановления двигательных функций кисти. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 3(56): 24–31. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-24-31.

Информация об авторах:
Дмитрий Юрьевич Кетов – канд. техн. наук, доцент кафедры клинической инженерии и технологий искусственного интеллекта ВолгГМУ
e-mail: ya_st@bk.ru
Алексей Иванович Нефедьев – доцент, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника» ВолгГТУ
https://orcid.org/0000-0002-1470-3618
e-mail: nefediev@rambler.ru

Вклад авторов:
Д. Ю. Кетов – разработка электрической схемы, настройка и исследование устройства, оформление материалов, написание статьи
А. И. Нефедьев – разработка общей концепции построения устройства и структурной схемы, написание статьи.

© Кетов Д. Ю., Нефедьев А. И., 2026

D. Yu. Ketov[1], A. I. Nefed'ev[2]

ROBOTIC SYSTEM FOR ASSESSMENT AND RESTORATION OF HAND MOTOR FUNCTIONS

[1] Volgograd State Medical University, Volgograd, Russia
[2] Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia
✉ Dmitry Yu. Ketov, ya_st@bk.ru

Abstract. Restoring hand motor function after strokes, peripheral nerve injuries, and neurodegenerative diseases is one of the most challenging areas of modern rehabilitation. The hand has a high degree of freedom of movement and complex biomechanics, requiring highly precise diagnostic and therapeutic instruments. Robotic systems such as exoskeletons and endoscopic manipulators allow for the automation of the rehabilitation process, ensuring highly repeatable exercises and objective assessment of patient progress.

Keywords: hand, motor function, robotic system, measuring complex, rehabilitation, servo drive, digital accelerometer

For citation: Ketov D. Yu., Nefed'ev A. I. I Robotic system for assessment and restoration of hand motor functions. Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2026; 3(56): 24–31. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-24-31.

Information about the authors:
Dmitry Yu. Ketov – Cand. tech. Sciences, Associate Professor of the Department of Clinical Engineering and Artificial Intelligence Technologies, Volgograd State Medical University
e-mail: ya_st@bk.ru
Alexey I. Nefed'ev – Doc. tech. Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering VSTU
https://orcid.org/0000-0002-1470-3618
e-mail: nefediev@rambler.ru

Contribution of the authors:
Dmitry Yu. Ketov – development of an electrical circuit, setup and research of the device, preparation of materials, article writing.
Alexey I. Nefed'ev – developing a general concept for the device and its electrical circuit, article writing.

Повреждения верхних конечностей условно можно разделить на травмы опорно-двигательного аппарата и сосудисто-нервного пучка. Из общего числа 30 % приходится на повреждения кисти, после которых у большей части больных развиваются контрактуры, происходит снижение силы, расстройства координации, требующие восстановительного лечения. В результате пациенты значительно ограничены в своей повседневной социальной и бытовой активности.

Согласно многочисленным исследованиям, полноценное восстановление происходит лишь в 20 % случаев. Причиной этого может служить отсутствие у пациента мотивации к тренировкам, ограниченные человеческие ресурсы, которые могут быть задействованы в процессе лечения, отсутствие контроля, а также возникновение вторичных осложнений. В повседневной жизни пациенты используют только здоровую руку, не нагружая поврежденную, тем самым создавая условия для развития контрактур. На ранней стадии возникновение подобных проблем приводит к снижению интенсивности реабилитации и зачастую является причиной ее недостаточной эффективности.

Важнейшей составляющей реабилитации, а также абилитации (в случае формирования новых навыков и способностей) является двигательная терапия, в том числе тренажерная гимнастика. Лечебные методики должны включать как качественные (по направленности воздействия) так и количественные (по величине нагрузки и амплитуды) наборы упражнений, которые выполняются с помощью специальных технических средств. Занятия на аппаратах с пневмоприводами, с обратной связью, в роботизированных комплексах включены в стандарты оказания медицинской помощи больным с последствиями травм и заболеваниями опорно-двигательной системы.

Также к недостаткам таких тренажеров можно отнести малодоступность, необходимость обучения персонала, определенные трудности в эксплуатации и обслуживании. Поэтому на сегодняшний день актуальны вопросы о разработке новых автоматизированных технических средств реабилитации, обладающих полифункциональным набором воздействий, позволяющих дозировать нагрузку, а также имеющих возможность проведения контроля результатов двигательной терапии.

Таким образом, устройства для двигательной терапии должны обеспечивать возможность:

– локальной тренировки поврежденного сегмента;

– выполнения движений с учетом кинематических особенностей суставов вокруг всех возможных осей;

– осуществления всех видов движений (активных с дозируемой нагрузкой, пассивных с дозируемым усилием);

– тренировки силы, амплитуды, координации движений;

– использования различных режимов мышечной деятельности;

– оценки состояния двигательных функций кисти, контроля, управления и обратной связи.

Описанные выше проблемы реабилитации пациентов с двигательными нарушениями явились основанием для разработки роботизированной системы оценки и восстановления двигательных функций кисти, представленной на рис. 1.

Роботизированное устройство снабжено двигателями для обеспечения необходимого характера перемещения или помощи при реабилитации. За счет обеспечения запрограммированного движения и использования МЭМС-сенсоров (акселерометр, гироскоп) реализуется принцип биологической обратной связи. Система оценки и восстановления двигательных функций кисти обладает антропоморфностью, то есть способностью изменять характер своей работы в зависимости от условий окружающей среды, основываясь на показателях встроенных датчиков.



Рис. 1. Общая схема роботизированной системы оценки и восстановления двигательных функций кисти

Имеется возможность подключения к персональному компьютеру по средствам usb интерфейса, для проведения оценки состояния двигательных функций кисти с использование разработанного программного обеспечения.

Структурная схема устройства представлена на рис. 2.

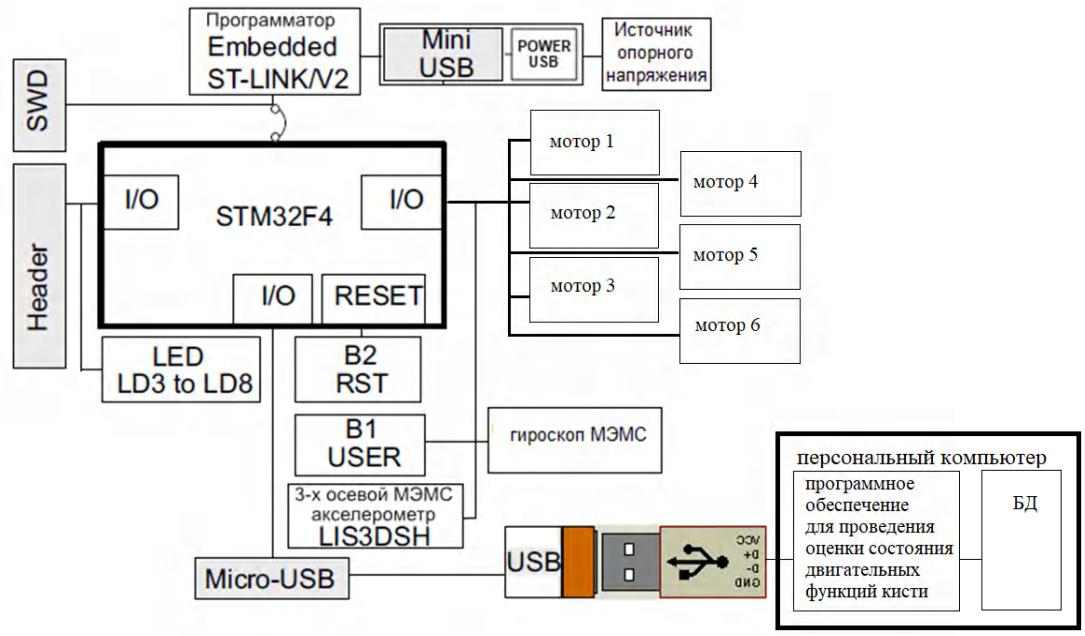


Рис. 2. Структурная схема роботизированной системы

В состав входит портативный измерительный комплекс и программное обеспечение для оценки и отображения результатов измерения. Используются шесть линейных приводов, управляемых по протоколу usart с энкодером, скомпонованных по форме на рис. 3.

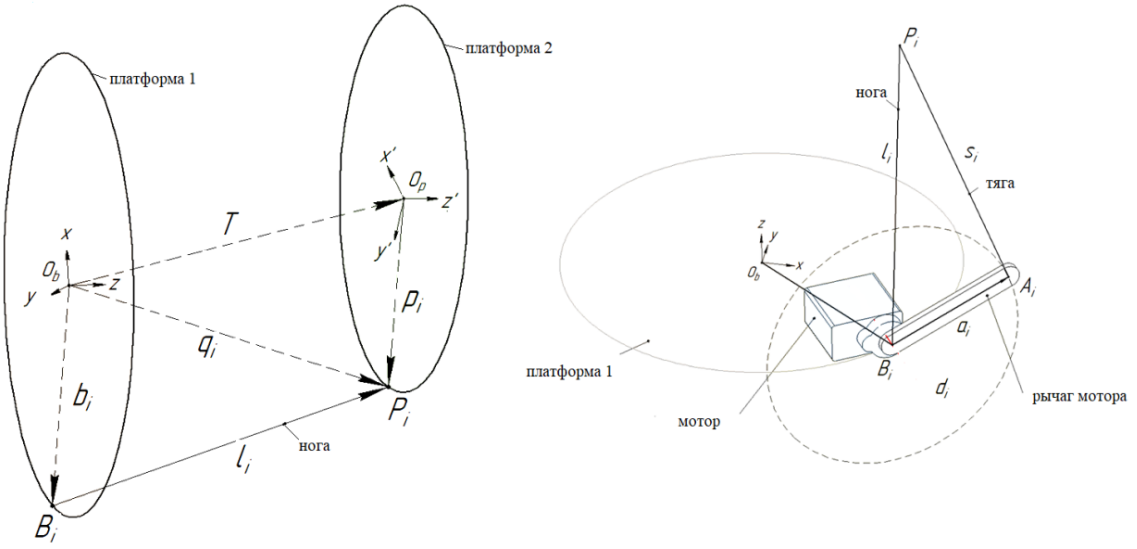


Рис. 3. Структурная схема роботизированной системы

Устройство состоит из двух платформ. Первая платформа жестко зафиксирована на запястье. Вторая платформа жестко зафиксирована на ладони (платформа *2*) при помощи перчатки, она подвижная и управляемая относительно первой. Платформы соединены шестью ногами в виде линейных приводов. Шесть ног попарно прикреплены через шарниры к трем точкам на платформе *1* и к трем точкам на платформе *2*. Линейные приводы могут изменять длину ног и тем самым изменять ориентацию платформы *2*. В результате платформа *2* имеет шесть степеней свободы и может не только двигаться по трем осям, но и вращаться вокруг этих осей. Для управления используется решение задачи обратной кинематики для платформы Стюарта, построенной на поворотных приводах, когда по заданному положению и ориентации платформы требуется найти длины ног.

Точки крепления ног для каждой платформы расположены на одинаковых расстояниях, и мы условно представим платформы в виде двух окружностей. Ориентацию платформы *2* по отношению к платформе *1* можно определить тремя углами Эйлера. Угол ψ определяет поворот вокруг оси **z**, угол θ — поворот вокруг оси ***y***, а угол φ – поворот вокруг оси ***x***.

Воспользуемся матрицами поворота для расчета вращения платформы *2* относительно платформы *1*.

$$
\begin{aligned}
R &= R_z(\psi) * R_y(\theta) * R_x(\varphi) \\
&= \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi & -\sin\varphi \\ 0 & \sin\varphi & \cos\varphi \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & -\sin\psi\cos\varphi + \cos\psi\sin\theta\sin\varphi & \sin\psi\sin\varphi + \cos\psi\sin\theta\cos\varphi \\ \sin\psi\cos\theta & \cos\psi\cos\varphi + \sin\psi\sin\theta\sin\varphi & -\cos\psi\sin\varphi + \sin\psi\sin\theta\cos\varphi \\ -\sin\theta & \cos\theta\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{1}
$$

У платформы Стюарта шесть ног. Рассмотрим произвольную ногу.

Зная линейные перемещения платформы *2* относительно платформы *1* и матрицу вращения платформы — *R*, определим координаты вектора q_i:

$$q_i = T + R * p_i$$

Координаты вектора $\boldsymbol{l_i}$ в системе координат базы $\boldsymbol{O_b}$, зная координаты точек его начала и конца. Координаты находятся вычитанием координат начала вектора из координат конца.

$$l_i = q_i - b_i$$

$$l_i = T + R * p_i - b_i \tag{2}$$

Рассмотрим схему с сервоприводом для произвольной ноги.

Найдем правильный угол поворота рычага сервопривода, зная необходимую длину ноги *l*.

Для расчета нам понадобится угол, который будет описывать положение плоскости вращения рычага сервопривода.

Назовем этот угол между осью ***x*** базы и плоскостью вращения рычага углом ***β*** (рис. 4).

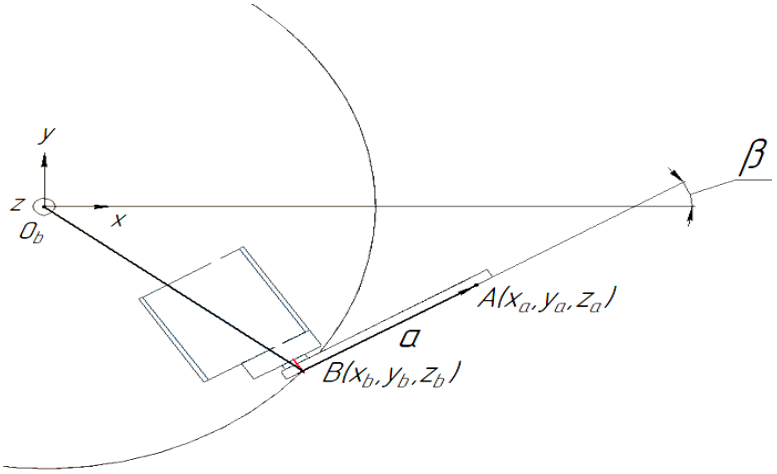


Рис. 4. Угол между осью x платформы *1* и плоскостью вращения рычага

Выразим необходимый нам угол ***α***:

$$R_A = R_z(\beta) * R_x(\alpha)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{L}{\sqrt{M^2+N^2}}\right) - \arctan\left(\frac{N}{M}\right)$$

$$L = l^2 - (s^2 - a^2)$$

$$M = 2a(z_p - z_b)$$

$$N = 2a[\cos\beta(x_p - x_b) + \sin\beta(y_p - y_b)]$$

Полученные выражения можно использовать для управления платформой *2*, построенной на поворотных приводах в процессе реабилитации.

Для проведения диагностики двигательных функций используются МЭМС-сенсоры LIS3DSH (сверхмаломощный высокопроизводительный трехосевой линейный акселерометр, который имеет динамически выбираемые полные шкалы 2g/±4g/6g/8g/16g, и способен измерять ускорения со скоростями передачи выходных данных от 3,125 Гц до 1,6 кГц). Разработанная система рассчитана на работу по длительным программам. Запись данных с трехосевого акселерометрического датчика MEMS LIS3DSH используется для фиксации положения, направления движения, времени перемещения верхней конечности.

Под поставленные задачи был выбран высокоэффективный микроэлектромеханический цифровой акселерометр с ультранизким энергопотреблением, схема которого представлена на рис. 5.

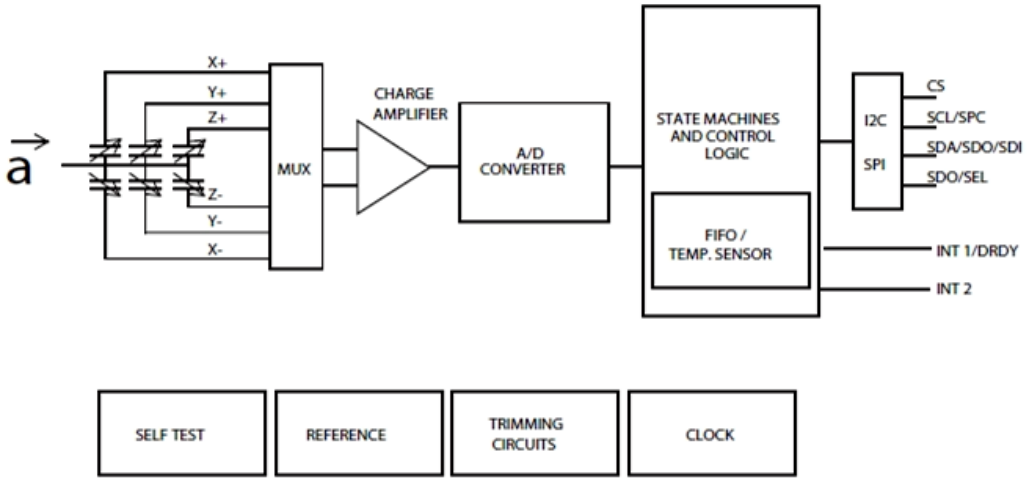


Рис. 5. Блок-схема трехосевого MEMS-акселерометра

Акселерометр может быть запрограммирован для выполнения специфического алгоритма: детектирование движений определенной сигнатуры, когда сенсор за счет своего функционала способен зарегистрировать требуемый профиль ускорений и выполнить какое-либо действие (генерация прерывания для хост-контроллера) в соответствии с этим профилем (реакция устройства на действия, которые оно совершает при взаимодействии с тем или иным электронным устройством или объектом). Эта особенность позволяет снизить вычислительную нагрузку на хост-контроллер, уменьшить суммарное энергопотребление и расширить функционал системы в целом. Основные характеристики MEMS LIS3DSH:

Диапазон питающего напряжения…….. 1,71–3,6 В;
Режим ультранизкого энергопотребления, не более……. 11 мкА;
Динамический изменяющийся предел измерений……. ±2g/±4g/±6g/±8g/±16 g;
Диапазон рабочих температур……. от -40 °C to +85 °C;
Стойкость к ударам, до ……10000 g
Чувствительность ……..….0,06 mg/digit
Частота среза …..……....1600 Гц

Также особенностями акселерометра являются 16-разрядный формат выходных данных, генерирование сигналов прерывания по определенному шаблону движения, встроенный температурный сенсор и встроенный режим самотестирования.

В результате работы автоматизированной системы были получены диагностические результаты движения кисти.

На графиках рис. 6 и 7 зафиксированы движения кисти, по которым можно оценить длительность выполнения операции, направление движения, характерное ускорение в процессе выполнения операции (по высоте и наклону вертикальной части кривой), наличие вибраций и равномерность движения, в целом зафиксировать возможные отклонения от штатных.

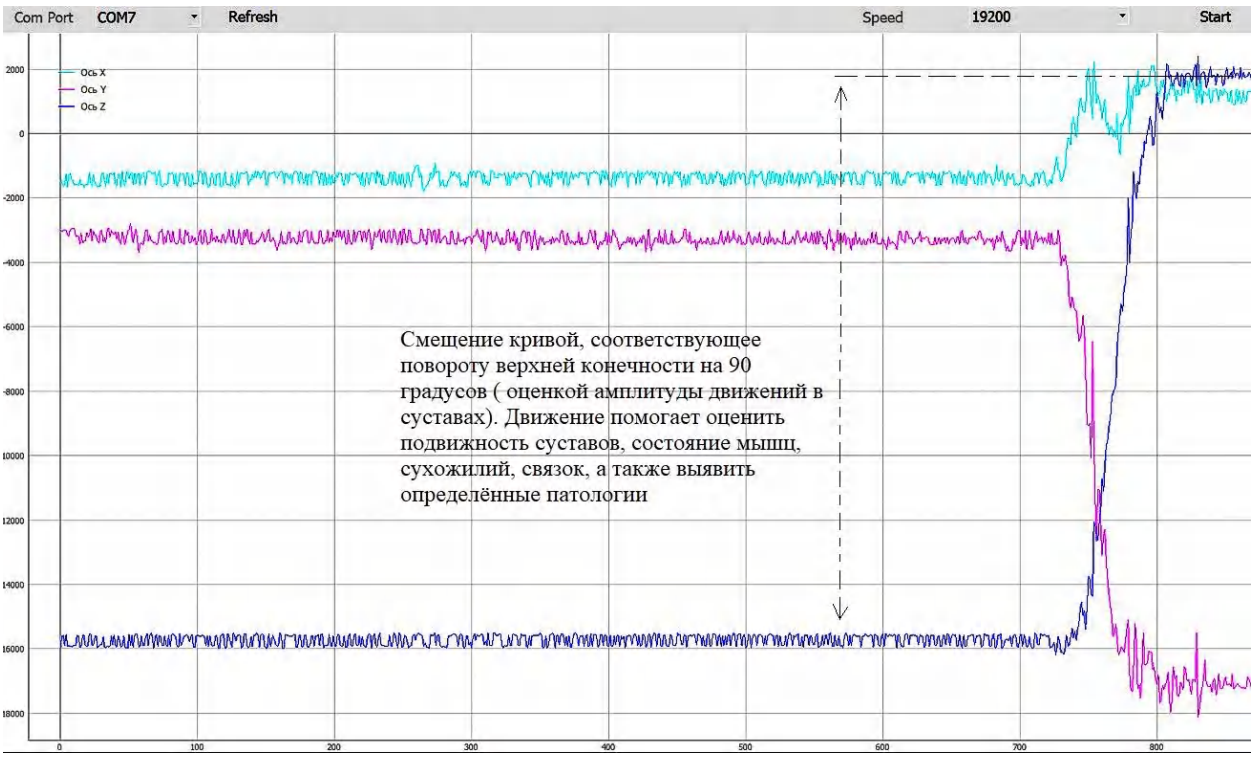


Рис. 6. Графики движения кисти

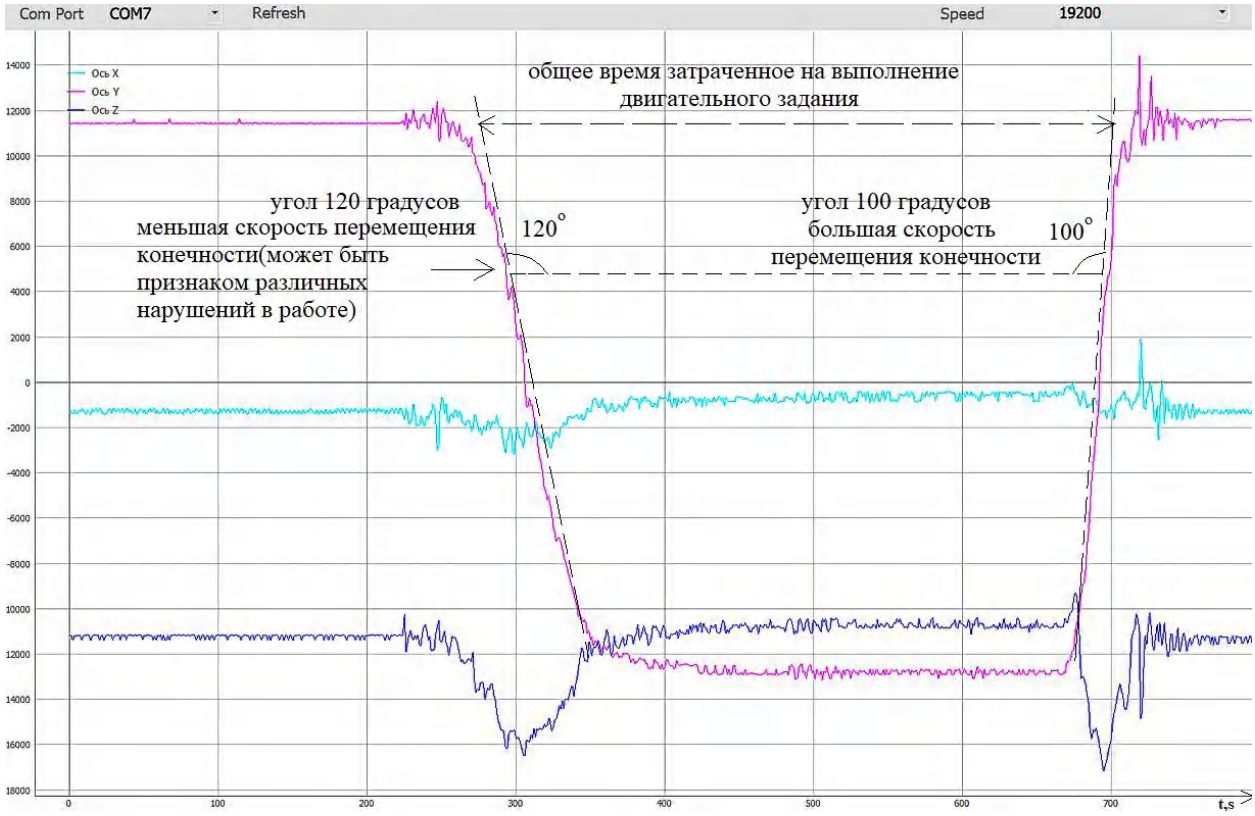


Рис. 7. Графики движения кисти

В результате использования данной системы осуществляется как визуальное наблюдение, так и программный контроль за правильностью работы алгоритмов при диагностике верхних конечностей по различным программам, записанным в памяти для получения первичной информации о характере протекания лечения, и последующее составление алгоритма дальнейшего лечения.

Разработанная роботизированная система позволяет проводить максимально эффективную кинезитерапию практически всех изолированных и комплексных движений руки, в том числе целенаправленных. Данные технологии делают их более компактными и экономически доступными для индивидуальных пациентов. У пациентов появляется возможность продолжить курс активной комплексной реабилитации на дому, после выписки из стационара, что может значительно ускорить восстановление двигательной функции руки.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Кетов, Д. Ю.* Информационно-измерительная система автоматизированного контроля технического состояния электроэнцефалографа : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук /Д. Ю. Кетов, 2023. – 179 с.

2. *D. Ketov.* Hardware and Software Equipment for Monitoring the Technical Condition of the Electroencephalograph / D. Ketov, A. Nefed'ev, S. Bezborodov // Series on Biomechanics. – Vol. 36. – No. 2 (2022). – P. 55–62.

3. *Кетов, Д. Ю.* Применение DDS-генератора для мониторинга технического состояния электроэнцефалографа / Д. Ю. Кетов, А. И. Нефедьев // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2022. – № 1(38). – С. 45–49.

4. *Кетов, Д. Ю.* Автоматизированный сетевой стенд для оперативных испытаний энцефалографа / Д. Ю. Кетов, Ю. П. Муха // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 11 (176) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2015. – (Серия «Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь» ; вып. 12). – С. 84–88.

5. Автоматизированный сетевой программный комплекс, предназначенный для проведения инструментального контроля технического состояния электроэнцефалографа / Д. Ю. Кетов, Ю. П. Муха, М. Л. Черножуков, С. С. Либенко // Телекоммуникации. – 2019. – № 4. – С. 42–48.

REFERENCES

1. *Ketov, D. Yu.* Information and measuring system for automated monitoring of the technical condition of an electroencephalograph: dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences / Ketov Dmitry Yuryevich, 2023. - 179 p.

2. *Ketov, D.*A. Nefed'ev, S. Bezborodov. Hardware and Software Equipment for Monitoring the Technical Condition of the Electroencephalograph // Series on Biomechanics. - Vol. 36. - No. 2 (2022). - P. 55-62.

3. *Ketov, D. Yu.* Application of a DDS generator for monitoring the technical condition of an electroencephalograph /

D. Yu. Ketov, A. I. Nefed'ev // Energy and resource saving: industry and transport. - 2022. - No. 1 (38). - P. 45-49.

4. *Ketov, D. Yu*. Automated network test bench for operational testing of an encephalograph / D. Yu. Ketov, Yu. P. Mukha // Bulletin of VolGTU. Series: Electronics, measurement equipment, radio engineering and communications. Issue 12. - Volgograd, 2015. - No. 11 (176). - P. 84-88.

5. Automated network software package designed for instrumental testing of the technical condition of an electroencephalograph / D. Yu. Ketov, Yu. P. Mukha, M. L. Chernozhukov, S. S. Libenko // Telecommunications. - 2019. - No. 4. - P. 42-48.

Статья поступила в редакцию 30.06.2026, доработана 07.08.2026, подписана в печать 15.08.2026
The article was submitted 30.06.2026, revised 07.08.2026, accepted for publication 15.08.2026

УДК 621.3.084.2 Научная статья
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-31-37 Original article

А. И. Нефедьев, А. А. Коноваленко

ДАТЧИК ПЛАМЕНИ КОТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ С ДУБЛИРУЮЩИМ КАНАЛОМ КОНТРОЛЯ

Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия
✉ Алексей Иванович Нефедьев, nefediev@rambler.ru

Аннотация. В работе рассматривается конструкция и методика расчета датчика пламени с дублирующим каналом контроля для промышленных горелочных устройств. В конструкции датчика объединены два физических принципа детектирования: ионизационный (основанный на эффекте проводимости пламени) и звуковой (основанный на пьезоэффекте). Рассматриваются принципы работы устройства, особенности его конструктивного исполнения и факторы, влияющие на точность и надежность сигнализации о наличии пламени. Особое внимание уделяется обоснованию выбора элементов датчика и оценке его применения в составе современной автоматизированной котельной системы. Приведен расчет аналоговых трактов сигнала датчика ионизации и звукового датчика, включающие в себя усилитель ионного тока, полосовой фильтр звукового канала, детектор и схему совпадения.

Ключевые слова: пламя, горелка, ионизационный датчик, звуковой датчик, схема совпадения, пьезодатчик

Для цитирования: Нефедьев А. И., Коноваленко А. А. Датчик пламени котельной установки с дублирующим каналом контроля. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 3(56): 31–37. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-31-37.

Информация об авторах:
Алексей Иванович Нефедьев – доцент, д-р техн. наук, профессор кафедры «Электротехника» ВолгГТУ
https://orcid.org/0000-0002-1470-3618
e-mail: nefediev@rambler.ru
Артем Александрович Коноваленко – ассистент кафедры «Энергоснабжение, теплотехника, теплогазоснабжение и вентиляция» Института архитектуры и строительства ВолгГТУ
e-mail: artyom.konovalenko34@yandex.ru

Вклад авторов:
А. И. Нефедьев – разработка общей концепции построения датчика пламени, написание статьи.
А. А. Коноваленко – сборка, настройка и исследование датчика пламени, оформление материалов, написание статьи.

A. I. Nefed'ev, A. A. Konovalenko

BOILER FLAME SENSOR WITH A DUPLICATE CONTROL CHANNEL

Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia
✉ Alexey I. Nefed'ev, nefediev@rambler.ru

Abstract. This paper examines the design and calculation methodology of a combined flame detection sensor for industrial burner systems. The sensor's design combines two physical detection principles: ionization (based on flame conduction) and sound (based on the piezoelectric effect). The operating principles of the device, its design features, and the factors affecting the accuracy and reliability of flame signaling are discussed. Particular attention is given to the rationale for the selection of sensor components and the evaluation of its application in a modern automated boiler system. The calculation of the analog signal paths for the ionization sensor and sound sensor is presented, including an ion current amplifier, a bandpass filter for the sound channel, a detector, and a coincidence circuit.

Keywords: flame, burner, ionization sensor, sound sensor, coincidence circuit, piezoelectric sensor

© Нефедьев А. И., Коноваленко А. А., 2026

For citation: Nefed'ev A. I., Konovalenko A.A. Boiler Flame Sensor with a duplicate control channel. Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2026; 3(56): 31–37. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-31-37.

Information about the authors:
Alexey I. Nefed'ev – Doc. tech. Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering VSTU
https://orcid.org/0000-0002-1470-3618
e-mail: nefediev@rambler.ru
Artyom A. Konovalenko – Assistant Professor at the Department of Energy Supply, Heat Engineering, Heat and Gas Supply and Ventilation at the Institute of Architecture and Construction of VSTU.
e-mail: artyom.konovalenko34@yandex.ru

Contribution of the authors:
Alexey I. Nefed'ev – development of the overall flame sensor design concept, article writing
Artyom A. Konovalenko – assembly, configuration, and device research, materials preparation, article writing.

Введение

Разработка и анализ конструкции ионизационно-звукового датчика пламени для системы управления горелками водогрейного котла обусловлены необходимостью повышения надежности контроля горения и снижения вероятности аварийных режимов. В современных котельных установках устойчивость работы горелочного устройства напрямую связана с качеством обнаружения факта наличия пламени, поскольку ложное срабатывание или запоздалое отключение подачи топлива может привести к нарушению теплового режима, перерасходу топлива и аварийным ситуациям. Традиционные методы контроля пламени, основанные только на ионизационном или оптическом принципе, не всегда обеспечивают достаточную помехоустойчивость в условиях высокой температуры, запыленности, вибрации и электромагнитных наводок [1; 2].

В связи с этим, актуальной является задача создания ионизационно-звукового датчика, способного использовать одновременно электрические признаки и акустические характеристики горения. Такой подход позволяет повысить достоверность распознавания пламени за счет взаимной компенсации недостатков отдельных каналов измерения. Ионизационный канал обеспечивает чувствительность к наличию горящего факела, а звуковой канал позволяет учитывать спектральные особенности процесса горения, отличающие нормальное пламя от срыва, затухания или нестабильного розжига [3; 4].

Принцип работы и структурная схема ионизационно-звукового датчика пламени

Ионизационно-звуковой датчик пламени предназначен для надежного подтверждения наличия устойчивого факела в топке водогрейного котла и формирования сигнала подтверждения для системы управления горелкой. Его принцип работы основан на одновременном использовании двух физических признаков горения – ионной проводимости пламени и акустических характеристик процесса сгорания. Такое сочетание физических принципов повышает достоверность контроля и снижает вероятность ложного срабатывания при наличии помех, запыленности, кратковременных отблесков или нестабильного розжига.

Ионная проводимость пламени возникает за счет того, что в зоне пламени под действием высокой температуры и химических реакций образуются заряженные частицы, и пламя становится электропроводным. В электродной цепи датчика, где один электрод размещен в зоне факела, а вторым электродом является металлический корпус горелки, протекает ток ионизации. При наличии пламени ток ионизации превышает порог чувствительности входного узла, а при его исчезновении быстро уменьшается до нуля [4].

Звуковой канал является дублирующим каналом контроля наличия пламени, и фиксирует спектр шумов, возникающих при горении и движении газов в камере сгорания. При этом ионизационный электрод является одновременно и проводником звука горения. Приемником звуковых колебаний является пьезоэлектрический преобразователь, который воспринимает характерные низкочастотные колебания ионизационного электрода, после чего сигнал усиливается и фильтруется для выделения постоянной составляющей напряжения, пропорциональной интенсивности звуков, возникающих при горении топлива.

Применение ионизационно-звукового датчика в системе управления горелками водогрейного котла позволяет повысить надежность контроля факела и снизить вероятность аварийных режимов, связанных с пропаданием пламени, нестабильным горением или ложным срабатыванием. Датчик включается в контур автоматизации как основной элемент подтвер-

ждения наличия устойчивого горения в горелке либо в группе горелок, работающих в едином топочном объеме. Сигнал с датчика поступает в контроллер системы управления, после чего формируется решение о допустимости дальнейшей подачи топлива и воздуха. При отсутствии достоверного сигнала от датчика система управления переводит горелку в безопасное состояние с отключением подачи газа или жидкого топлива и последующей продувкой топки.

Структурная схема комбинированного датчика пламени представлена на рис. 1.

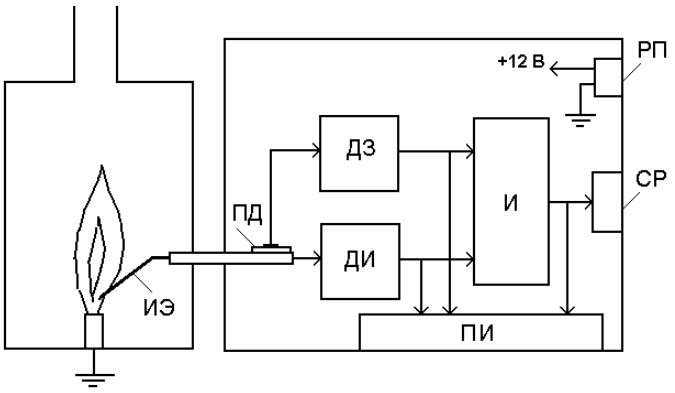


Рис. 1. Структурная схема комбинированного датчика пламени

На структурной схеме обозначены: ИЭ – ионизационный электрод, ПД – пьезодатчик, ДЗ – датчик звука, ДИ – датчик ионизации, «И» – схема совпадения, ПИ – панель индикации, РП – разъем питания, СР – сигнальный разъем. На панели индикации расположены светодиоды, индицирующие режимы короткого замыкания ионизационного электрода и горелки, наличия тока ионизации, наличие звука горения пламени и наличие сигнала «Пламя».

Устойчивый выходной сигнал наличия пламени формируется только при одновременном наличии ионизационного тока и характерного звукового сигнала горения топлива. Если один из признаков наличия пламени отсутствует, система управления переводит выход в состояние «Пламя отсутствует» и передает команду на отключение подачи топлива или блокировку запуска. Такой принцип построения датчика повышает устойчивость к внешним электромагнитным и акустическим помехам и делает датчик пригодным для применения в системах автоматического управления горелками водогрейных котлов [5; 6].

Особенность применения ионизационно-звукового принципа заключается в возможности совместного анализа двух независимых признаков пламени. Ионизационный канал обеспечивает регистрацию проводимости пламени, а звуковой канал – контроль характерного спектра горения и турбулентных колебаний в зоне факела. Это особенно важно для водогрейных котлов, работающих в переменных тепловых режимах, когда форма и яркость пламени могут изменяться при регулировании нагрузки. Совмещение двух методов определения наличия пламени позволяет уменьшить влияние внешних помех, загрязнения оптических поверхностей и локальных изменений состава топлива [7–9]. В результате повышается устойчивость распознавания наличия пламени при пуске, переходных процессах и работе на малых нагрузках.

Расчет ионизационного датчика пламени

В состав ионизационного датчика пламени входят ионизационный электрод, усилитель ионного тока (трансимпедансный усилитель), детектор короткого замыкания ионизационного электрода, светодиодные индикаторы режимов короткого замыкания и наличия пламени [10]. Упрощенная принципиальная схема ионизационного датчика пламени представлена на рис. 2.

Значение ионизационного тока, протекающего между ионизационным электродом и корпусом горелки, находится в диапазоне от десятков до сотен наноампер при напряжении +12 В на ионизационном электроде. Для расчетов примем значение тока ионизации $I_{\text{ион}} = 100$ нА.

Требуемое выходное напряжение на выходе усилителя ионного тока $U_{\text{УИТ}} = 9$ В.

Падение напряжения на резисторе $R1$, включенного последовательно с электродом ионизации

$$U_{R1} = I_{\text{ион}} \times R1 = 10^{-7} \times 10^{5} = 10 \text{ мВ}.$$

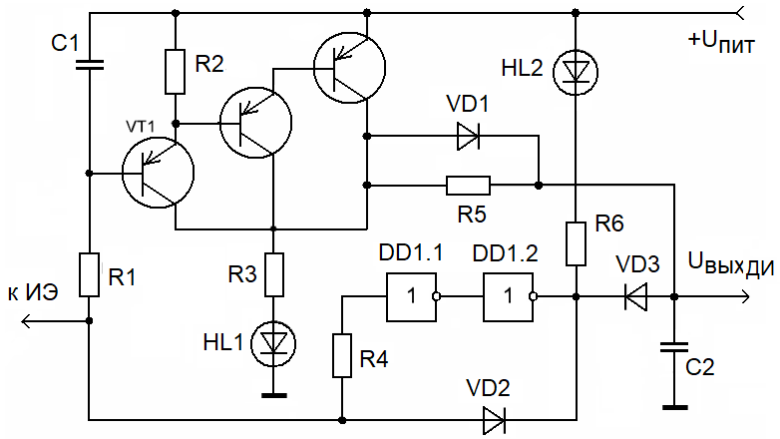


Рис. 2. Принципиальная схема ионизационного датчика пламени

При этом напряжение на ионизационном электроде

$U_{ИЭ} = U_{пит} - U_{БЭ.VT1} - U_{БЭ.VT2} - U_{БЭ.VT3} - U_{R1} =$
$= 9{,}99$ В

Для получения напряжения $U_К = 9$ В на последовательно соединенных резисторе $R3$ и светодиоде $HL1$ необходимо обеспечить напряжение на резисторе $R3$:

$$U_{R3} = U_К - U_{HL1} = 9 - 2{,}2 = 6{,}8 \text{ В}.$$

Чтобы получить ток через светодиод $HL1$ более 3 мА, примем сопротивление резистора $R3 = 2$ кОм, при этом ток через резистор $R3$:

$$I_{R3} = U_{R3} / R3 = 3{,}4 \text{ мА}.$$

Ток коллектора составного транзистора $VT1$-$VT3$:

$$I_к = I_{R1} \cdot h_{21э}^{VT1} + \left(I_{R1}(h_{21э}^{VT1} + 1) - \frac{U_{бэ}^{VT2} + U_{бэ}^{VT3}}{R2} \right) \cdot (h_{21э}^{VT2} + h_{21э}^{VT2} \cdot h_{21э}^{VT3} + h_{21э}^{VT3}).$$

Для получения выходного тока составного транзистора $VT1$ – $VT3$ более 3,4 мА, при этом минимальный статический коэффициент передачи тока $h_{21э}$ транзисторов должен быть не менее 50. Этому условию удовлетворяют транзисторы КТ361Г(Е), КТ3107А, КТ3129Б9.

Защиту от кратковременных помех путем введения задержки срабатывания датчика обеспечивают элементы $R1$ и $C1$. Постоянная времени $t = R1 \times C1 = 47 \times 10^3 \times 220 \times 10^{-12} \approx 10$ мкс.

При наличии тока ионизации через диод $HL1$ протекает ток коллектора составного транзистора $VT1$ – $VT3$, и светодиод $HL1$ индицирует наличие пламени, при этом выходное напряжение датчика ионизации $U_{вых} \geq 9$ В.

Узел индикации короткого замыкания ионизационного электрода на корпус горелки построен на двух инверторах микросхемы $DD1$ типа К561ЛН2 ($CD4049$). При коротком замыкании ионизационного электрода напряжение на входе инвертора $DD1.1$ будет ниже его порога переключения, при этом на выходе инвертора $DD1.2$ установится напряжение логического «0». При этом через диод $HL2$ начинает протекать ток, выходное напряжение датчика ионизации становится равным падению напряжения на диоде $VD3$, то есть соответствует уровню логического «0»:

$$U_{вых} \approx 0{,}7 \text{ В}.$$

Расчет звукового датчика пламени

В состав звукового датчика пламени входят пьезоэлектрический преобразователь, закрепленный на керамическом изоляторе ионизационного электрода, усилитель напряжения и светодиодный индикатор наличия пламени.

Полосовой фильтр должен иметь полосу пропускания 50–300 Гц. Реализация полосового фильтра Саллен-Ки для этой полосы частот не представляется возможным, поэтому полосовой фильтр был построен с помощью каскадного соединение НЧ- и ВЧ-фильтров. Частота среза фильтра низких частот (ФНЧ) второго порядка была выбрана равной 300 Гц, а частота среза фильтра высоких частот (ФВЧ) второго порядка – 50 Гц. Схемы НЧ- и ВЧ-фильтров второго порядка были реализованы по схеме Баттервотта на широко распространенном операционном усилителе типа LM358. Принципиальная схема полосового фильтра звукового датчика пламени представлена на рис. 3.

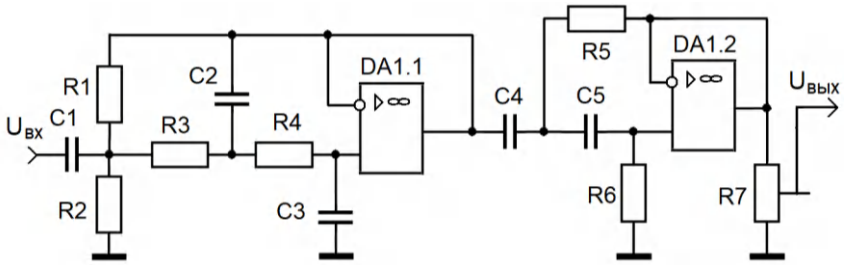


Рис. 3. Принципиальная схема полосового фильтра

Для расчета ФНЧ примем сопротивления резисторов $R3 = R4 = 10$ кОм.

Для частоты среза $f_{ср} = 300$ Гц емкость конденсатора $C2$ составит:

$$C2 = K_{C2} / (2\pi \times f_{ср} \times R3) = 75{,}05 \text{ нФ},$$

где K_{C2} – коэффициент, зависящий от типа и порядка фильтра.

Для фильтра Баттервотта второго порядка $K_{C2} = 1{,}114$.

Емкость конденсатора

$$C3 = K_{C3} / (2\pi \times f_{ср} \times R3) = 37{,}53 \text{ нФ},$$

где K_{C3} – коэффициент, зависящий от типа и порядка фильтра.

Для фильтра Баттервотта второго порядка $K_{C3} = 0{,}707$.

Для расчета ФВЧ примем емкость конденсаторов $C4 = C5 = 220$ нФ.

Для частоты среза $f_{ср} = 50$ Гц сопротивление резистора $R5$:

$$R5 = K_{R5} / (2\pi \times f_{ср} \times C4) = 10 \text{ кОм},$$

$$R6 = K_{R6} / (2\pi \times f_{ср} \times C4) = 20 \text{ кОм},$$

где $K_{R5} = 0{,}707$ и $K_{R6} = 1{,}414$ – коэффициенты для фильтра Баттервотта второго порядка.

В такой конфигурации полосового фильтра получается стабильная полоса пропускания с коэффициентом передачи $K_{пер} = 1$ в диапазоне 50–300 Гц без фазовых искажений между частотами среза. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) полосового фильтра представлена на рис. 4.

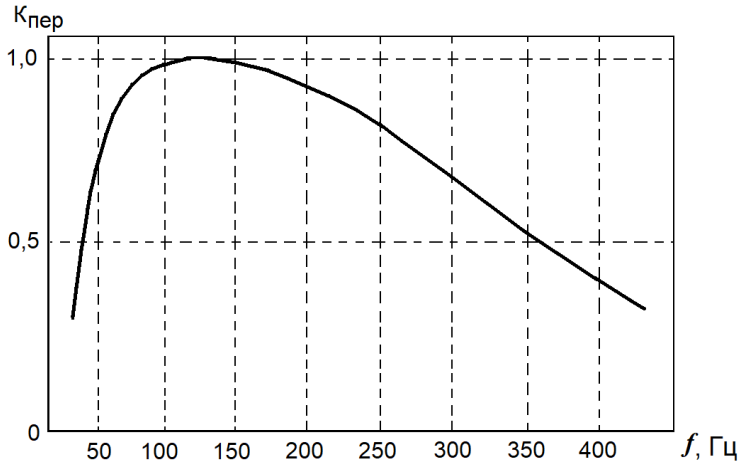


Рис. 4. Амплитудно-частотная характеристика фильтра

Резистор $R7$ предназначен для настройки на уровень звукового сигнала, излучаемого конкретным водогрейным котлом.

Расчет усилителя и схемы совпадения

Для получения постоянной составляющей выходного напряжения, пропорциональной амплитуде вибрации ионизационного электрода, применен операционный усилитель типа *LM*358, включенный по схеме неинвертирующего усилителя, на выходе которого установлен диодный выпрямитель с фильтром.

Принципиальная схема усилителя и выпрямителя приведена на рис. 5.

Необходимый коэффициент усиления задается резисторами $R3$ и $R2$:

$$K_U = 1 + (R3 / R2).$$

При выходном напряжении пьезоэлектрического преобразователя $U_{ПЭвых} = 10$ мВ, коэффициент усиления должен быть равен $K_U = 1000$.

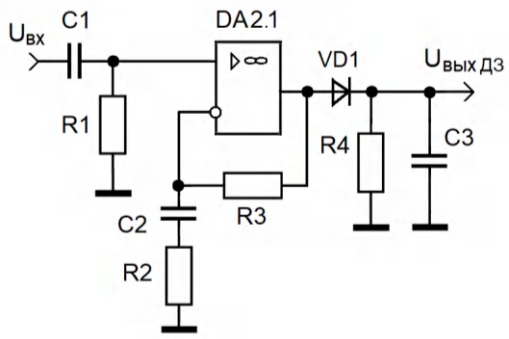


Рис. 5. Принципиальная схема усилителя и выпрямителя

На вход схемы совпадения И (рис. 1) подается напряжение $U_{\text{выхДИ}}$ с выхода усилителя ионного тока, и напряжение $U_{\text{выхДЗ}}$ с выхода выпрямителя звукового канала. Сигнал, подтверждающий наличие пламени, формируется на выходе схемы совпадения только при наличии сигналов с выходов усилителя ионного тока и с выхода выпрямителя звукового канала. Схема совпадения с индикацией сигнала «Пламя» представлена на рис. 6.

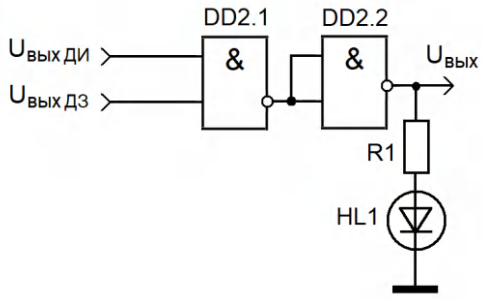


Рис. 6. Схема совпадения с индикацией сигнала «Пламя»

В схеме совпадения использованы два логических элемента 2И-НЕ микросхемы К561ТЛ1 (*CD*4093*BE*). При наличии пламени на выходе схемы совпадения устанавливается логический уровень «1», при этом светодиод HL1 индицирует наличие пламени.



Рис. 7. Внешний вид ионизационно-звукового датчика пламени

Внешний вид ионизационно-звукового датчика пламени представлен на рис. 7.

Выводы

Разработка датчика контроля пламени обусловлена необходимостью повышения безопасности работы водогрейных котлов с целью снижения рисков возникновения аварийных ситуаций. Необходимость разработки низковольтного ионизационного датчика пламени с дублирующим звуковым каналом контроля также заключается в необходимости повышения достоверности определения наличия пламени и его параметров для повышения безопасности эксплуатации водогрейных установок, и, соответственно, снижения рисков для обслуживающего персонала, а также в повышении безопасности работы обслуживающего персонала котельной благодаря низкому рабочему напряжению ионизационного датчика.

Разработанный датчик обладает высокой надежностью определения наличия пламени за счет перекрестного контроля сигналов, полученных от двух различных датчиков, работающих на принципиально независимых друг от друга принципах, позволит обеспечить повышенную надежность определения наличия пламени в котельной установке и повысить безопасность эксплуатации котельного оборудования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Контроль за работой печей и факельного хозяйства / А. И. Луговской, С. А. Логинов, Г. Д. Паршин, Е. А. Черняк // Химия и технология топлив и масел. – 2000. – № 5. – С. 50–52.

2. *Царик, Д. А.* Методы контроля пламени / Д. А. Царик // Научно-исследовательский центр «Вектор развития». – 2022. – № 10. – С. 261–266.

3. Способы контроля пламени в котельных установках и путевых подогревателях / С. П. Крючков, Р. Д. Каримов, И. И. Ямалов, А. С. Горбунов // Вестник современных исследований. – 2018. – № 10.1(25). – С. 318–320.

4. Особенности применения ионизационных датчиков для контроля пламени в нагревательных установках / С. П. Крючков, Р. Д. Каримов, А. С. Горбунов, И. И. Ямалов // Вестник современных исследований. – 2018. – № 10.5(25). – С. 219–220.

5. Повышение эффективности и безопасности эксплуатации факельных установок / А. М. Хазраткулова, Э. М. Баширова, В. В. Ибрагимов, А. Ф. Казакбаев // Экономика: вчера, сегодня, завтра. – 2020. – Т. 10, № 4–1. – С. 65–71.

6. *Nefed'ev, A. I.* Flame Ionization Detector for Boiler Control System / A. I. Nefed'ev, A. A. Konovalenko // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Sochi, Russia, 18–22 May, 2020) : conf. proceedings. – [Publisher: IEEE].

7. Патент № 220403 U1 Российская Федерация, МПК F23N 5/00. Датчик контроля наличия пламени / А. И. Нефедьев, Л. А. Нефедьева, А. А. Коноваленко. Опубл. 12.09.2023. Бюл. № 26.

8. Патент № 220780 U1 Российская Федерация, МПК F23N 5/00. Датчик контроля наличия пламени / А. И. Нефедьев, Л. А. Нефедьева, А. А. Коноваленко. Опубл. 03.10.2023. Бюл. № 28.

9. Патент № 220747 U1 Российская Федерация, МПК F23N 5/12. Датчик контроля наличия пламени / А. И. Нефедьев, Л. А. Нефедьева, А. А. Коноваленко. Опубл. 02.10.2023. Бюл. № 28.

10. Нефедьев, А. И. Датчик наличия пламени для котельной установки / А. И. Нефедьев, А. А. Коноваленко // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2018. – № 4 (25). – С. 24–27.

REFERENCES

1. Monitoring the Operation of Furnaces and Flare Systems / A. I. Lugovskoy, S. A. Loginov, G. D. Parshin, E. A. Chernyak // Chemistry and Technology of Fuels and Oils. - 2000. - No. 5. - P. 50-52.

2. *Tsarik, D. A.* Flame Monitoring Methods / D. A. Tsarik // Research Center "Vector of Development". - 2022. - No. 10. - P. 261-266.

3. Flame Monitoring Methods in Boiler Plants and Line Heaters / S. P. Kryuchkov, R. D. Karimov, I. I. Yamalov, A. S. Gorbunov // Bulletin of Modern Research. - 2018. - No. 10.1 (25). – P. 318-320.

4. Features of the application of ionization sensors for flame monitoring in heating installations / S. P. Kryuchkov, R. D. Karimov, A. S. Gorbunov, I. I. Yamalov // Bulletin of modern studies. – 2018. – No. 10.5(25). – P. 219-220.

5. Improving the efficiency and safety of flare installations / A. M. Khazratkulova, E. M. Bashirova, V. V. Ibragimov, A. F. Kazakbaev // Economy: yesterday, today, tomorrow. – 2020. – Vol. 10, No. 4-1. – P. 65-71.

6. *Nefed'ev, A. I.* Flame Ionization Detector for Boiler Control System / A. I. Nefed'ev, A. A. Konovalenko // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM) (Sochi, Russia, May 18-22, 2020) : conf. proceedings. – [Publisher: IEEE].

7. Patent No. 220403 U1 Russian Federation, IPC F23N 5/00. Flame presence monitoring sensor / A. I. Nefedyev, L. A. Nefedeva, A. A. Konovalenko. Published 12.09.2023. Bulletin No. 26.

8. Patent No. 220780 U1 Russian Federation, IPC F23N 5/00. Flame presence monitoring sensor / A. I. Nefedyev, L. A. Nefedeva, A. A. Konovalenko. Published 03.10.2023. Bulletin No. 28.

9. Patent No. 220747 U1 Russian Federation, IPC F23N 5/12. Flame presence monitoring sensor / A. I. Nefedyev, L. A. Nefedeva, A. A. Konovalenko. Published 02.10.2023. Bulletin No. 28.

10. *Nefed'ev, A. I.* Flame presence sensor for a boiler plant / A. I. Nefed'ev, A. A. Konovalenko // Energy and resource saving: industry and transport. - 2018. - No. 4 (25). – P. 24-27.

Статья поступила в редакцию 06.07.2026, доработана 03.08.2026, подписана в печать 15.08.2026
The article was submitted 06.07.2026, revised 03.08.2026, accepted for publication 15.08.2026

ТРАНСПОРТ

УДК 629.3.017.5-597.5
DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-38-45

Научная статья
Original article

М. А. Иванов[1], А. М. Щербин[1], М. П. Малиновский[1,2], Р. А. Лапенков[1]

СПОСОБЫ ИЗМЕРЕНИЯ УСИЛИЯ В ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОМ ТОРМОЗНОМ ПРИВОДЕ АВТОМОБИЛЯ

[1] ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», Москва, Россия
[2] Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия
✉ Максим Александрович Иванов, m.ivanov@nami.ru

Аннотация. Стремительное развитие электрического транспорта предъявляет повышенные требования к его безопасности, в том числе и к тормозной системе. Переход к электромеханическим тормозным приводам требует с высокой точностью и в реальном времени измерять развиваемое приводом усилие непосредственно в зоне контакта выходного штока с колодкой для реализации алгоритмов управления и выполнения функций систем активной безопасности. Исследованы основные способы измерения усилия в электромеханическом тормозном приводе, выявлены их преимущества и недостатки, проведено сравнение с целью определения оптимального варианта, удовлетворяющего требованиям точности и быстродействия. Исследование показало, что способ измерения усилия при помощи пьезоэлектрического преобразователя позволяет измерять быстроменяющиеся нагрузки, обладает высокой чувствительностью, а его недостаток в виде постепенного разряда пьезоэлемента решается применением схемы усилителя заряда. Результаты исследования позволяют сделать вывод о том, что способ измерения усилия при помощи пьезоэлектрического преобразователя лучше всего подходит для применения в электромеханическом тормозном приводе перспективного электрического транспорта.

Ключевые слова: электромеханическая тормозная система, электромеханический привод, измерение усилия, пьезоэлектрический преобразователь, усилитель заряда, тензорезистивный преобразователь

Для цитирования: Иванов М. А., Щербин А. М., Малиновский М. П., Лапенков Р. А. Способы измерения усилия в электромеханическом тормозном приводе автомобиля. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 3(56): 38–45. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-38-45.

Информация об авторах:
Максим Александрович Иванов – аспирант ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»; инженер-конструктор отдела моделирования и общей интеграции специальных транспортных средств ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»
SPIN-код: 2964-2254
e-mail: m.ivanov@nami.ru
Алексей Михайлович Щербин – канд. техн. наук, начальник отдела мехатроники и систем управления специальных транспортных средств ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»
SPIN-код: 1793-0829
e-mail: alexey.scherbin@nami.ru
Михаил Павлович Малиновский – канд. техн. наук, доцент кафедры тягачей и амфибийных машин МАДИ, главный специалист отдела моделирования и общей интеграции специальных транспортных средств ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»
SPIN-код: 4513-8855
https://orcid.org/0000-0001-7812-5653
Scopus ID: 57193743128
e-mail: ntbmadi@gmail.com
Роман Алексеевич Лапенков – канд. техн. наук, начальник управления специальных колесных транспортных средств ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ»
SPIN-код: 9679-1476
e-mail: roman.lapenkov@nami.ru

© Иванов М. А., Щербин А. М., Малиновский М. П., Лапенков Р. А., 2026.

Вклад авторов:
М. А. Иванов – сбор и анализ данных, написание статьи, оформление материалов.
А. М. Щербин – разработка идеи и общей концепции исследования.
М. П. Малиновский – редактирование финальной версии статьи.
Р. А. Лапенков – организация теоретического исследования.

M. A. Ivanov[1], A. M. Shcherbin[1], M. P. Malinovsky[1,2], R. A. Lapenkov[1]

METHODS FOR MEASURING FORCE IN AN ELECTROMECHANICAL BRAKE ACTUATOR OF A CAR

[1] Federal State Unitary Enterprise "Central Scientific Research Automobile and Automotive Engines Institute" (FSUE «NAMI»), Moscow, Russia
[2] Moscow automobile and road construction state technical university (MADI), Moscow, Russia

✉ Maksim A. Ivanov, m.ivanov@nami.ru

Abstract. The rapid development of electric vehicles places increased demands on their safety, including braking systems. The transition to electromechanical brake actuators requires highly accurate and real-time measurement of the force generated by the actuator directly at the contact zone between the output rod and the brake shoe, enabling the implementation of control algorithms and active safety system functions. The main methods for measuring force in electromechanical brake actuators were investigated, their advantages and disadvantages were identified, and a comparison was conducted to determine the optimal option that meets the requirements for accuracy and response time. The research demonstrated that force measurement using a piezoelectric transducer allows for the measurement of a rapidly changing loads, exhibits high sensitivity, and its disadvantage, the gradual discharge of the piezoelectric element, is addressed by using a charge amplifier circuit. The results of the research suggest that force measurement using a piezoelectric transducer is best suited for use in electromechanical brake actuators for future electric vehicles.

Keywords: electromechanical braking system, electromechanical actuator, force measurement, piezoelectric transducer, charge amplifier, strain gauge transducer

For citation: Ivanov M. A., Shcherbin A. M., Malinovsky M. P., Lapenkov R. A. Methods for measuring force in an electromechanical brake actuator of a car. Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2026; 3(56): 38–45. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-38-45.

Information about the authors:
Maksim A. Ivanov – Postgraduate Student at the State Research Center of the Russian Federation FSUE «NAMI», Design Engineer of the Department of Modeling and General Integration of Specialized Vehicles at the State Research Center of the Russian Federation FSUE «NAMI»
SPIN-code: 2964-2254
e-mail: m.ivanov@nami.ru
Aleksey M. Shcherbin – PhD in Technical Sciences, Head of the Mechatronics and Control Systems Department of Specialized Vehicles at the State Research Center of the Russian Federation FSUE «NAMI»
SPIN-code: 1793-0829
e-mail: alexey.scherbin@nami.ru
Mikhail P. Malinovsky – PhD in Technical Sciences, associate professor of the Department of Tractors and Amphibious Vehicles at MADI, Chief Specialist of the Department of Modeling and General Integration of Specialized Vehicles at the State Research Center of the Russian Federation FSUE «NAMI»
SPIN-code: 4513-8855
https://orcid.org/0000-0001-7812-5653
Scopus ID: 57193743128
e-mail: ntbmadi@gmail.com
Roman A. Lapenkov – PhD in Technical Sciences, Head of the Department of Special Wheeled Vehicles at the State Research Center of the Russian Federation FSUE «NAMI»
SPIN-code: 9679-1476
e-mail: roman.lapenkov@nami.ru

Contribution of the authors:
Maksim A. Ivanov – data collection and analysis, article writing, material preparation.
Aleksey M. Shcherbin – idea development and methodology design.
Mikhail P. Malinovsky – final approval of the version for publication.
Roman A. Lapenkov – organization of theoretical research.

Стремительное развитие электрического транспорта (рис. 1) заставляет предъявлять повышенные требования к его безопасности, в том числе и к тормозной системе. Традиционные вакуумные усилители и механические связи уступают место электрогидравлическим и полностью электромеханическим тормозным системам, объединяемым общим термином «Brake-by-wire» [1; 2]. Для реализации алгоритмов управления электромеханическим тормозным приводом (ЭМТП) и выполнения функций систем активной безопасности (антиблокировочная система, система курсовой устойчивости, автоматическое экстренное торможение) необходимо с высокой точностью и в реальном времени измерять усилие, создаваемое ЭМТП непосредственно в зоне контакта выходного штока с колодкой. Отсутствие достоверной информации о текущем усилии приводит к невозможности точного управления моментом ЭМТП и снижает эффективность работы систем активной безопасности [3]. Кроме того, в автомобиле с электромеханической тормозной системой отсутствует возможность определить усилие прижатия колодок, измерив давление гидравлической жидкости. Соответственно, информация о силе прижатия должна быть получена из другого источника и при помощи способа, пригодного для применения в электротранспорте.

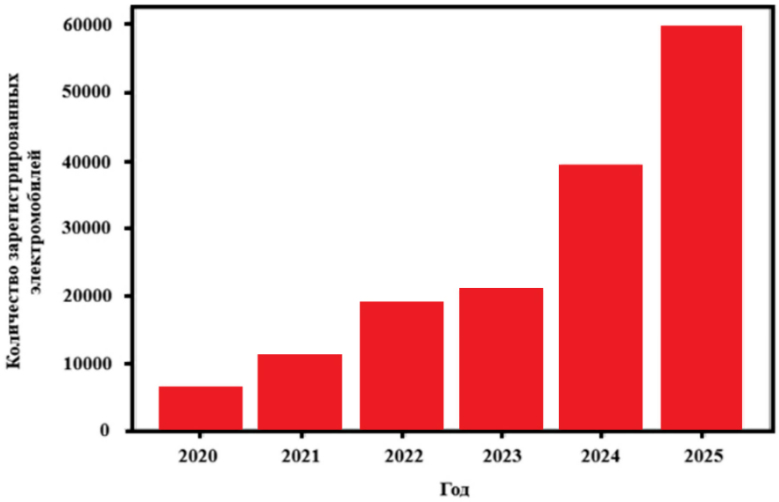


Рис. 1. Количество зарегистрированных электромобилей в Российской Федерации (по данным «АВТОСТАТ»)

В связи с этим возникает задача выбора и обоснования способа измерения усилия, создаваемого ЭМТП, который удовлетворял бы требованиям точности и быстродействия [4].

В первую очередь стоит упомянуть косвенный способ измерения. В электромеханических тормозных системах усилие прижатия тормозных колодок создается электродвигателем через понижающий редуктор и винтовую передачу [5]. При установившемся режиме работы момент, развиваемый электродвигателем, пропорционален потребляемому току. Зная передаточное отношение редуктора и коэффициент полезного действия (КПД) механической передачи, можно теоретически вычислить усилие, действующее на тормозные колодки, по измеренному значению тока электродвигателя.

Преимуществом косвенного способа является то, что для его применения не требуется встраивание дополнительных измерительных преобразователей в конструкцию ЭМТП [6]. Но недостатков у данного способа много, и они имеют принципиальный характер. Точность косвенных способов невысокая, погрешность может достигать ±0,5–6,0 % и существенно зависит от внешних факторов и корректности используемой математической модели [7]. Кроме того, активное сопротивление медных обмоток электродвигателя изменяется с температурой. При интенсивных торможениях температура электродвигателя ЭМТП может повышаться на десятки градусов Цельсия, что вносит значительную погрешность в оценку усилия. Также усилие, развиваемое на колодках, связано с моментом двигателя через КПД редуктора и винтовой пары. В процессе эксплуатации КПД изменяется вследствие износа деталей.

Тензорезистивные преобразователи занимают лидирующие позиции среди способов прямого измерения механических напряжений

и деформаций в машиностроении [8]. Их широкое распространение обусловлено высокой точностью статических измерений и технологической зрелостью. Одним из типов тензорезистивных преобразователей являются фольговые тензорезисторы. Применение тензорезисторов данного типа представляется рациональным, исходя из их небольших габаритов, а соответственно, удобства встраивания в конструкцию тормозного привода (рис. 2).

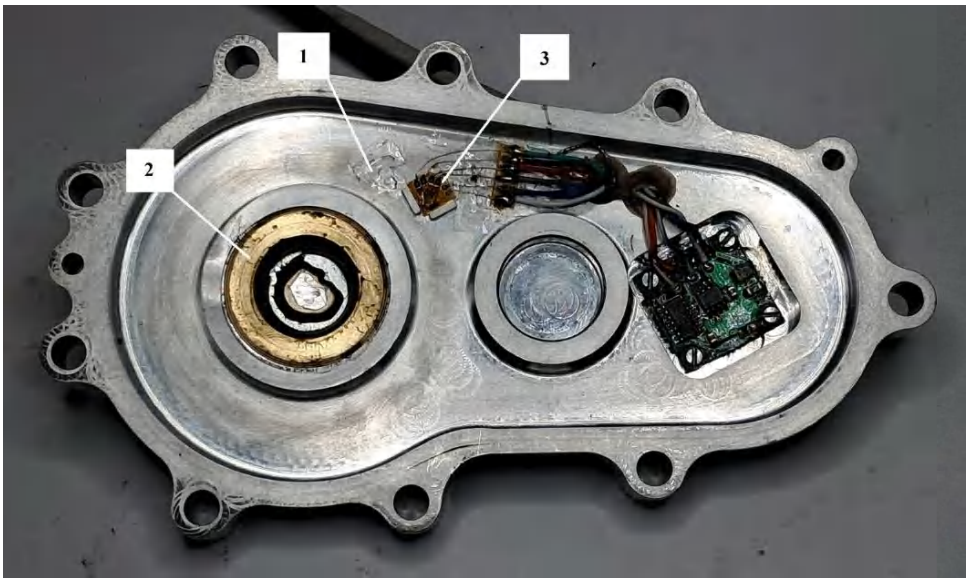


Рис. 2. Фольговый тензорезистор, встроенный в конструкцию опытного образца ЭМТП для легковых транспортных средств:
1 – крышка корпуса, *2* – подшипник скольжения, *3* – тензорезистор

На рис. 2 можно видеть, что в опытном образце ЭМТП для легковых транспортных средств тензорезистор закреплен на крышке корпуса. В процессе создания приводом усилия упорный подшипник упирается в подшипник скольжения, закрепленный на крышке. Под нагрузкой происходит обратимая деформация крышки, величина которой определяется тензорезистивным преобразователем. Усилие, создаваемое приводом, представляется возможным определить, исходя из величины этой деформации.

К преимуществам тензорезистивных преобразователей можно отнести возможность полноценных статических измерений и линейность [9]. Кроме того, они широко используются для измерения значительных сил в механических конструкциях. Отработанные схемотехнические решения упрощают внедрение тензорезистивных преобразователей в конечные изделия [10]. В то же время, несмотря на кажущуюся универсальность, их применение для прямого измерения усилия в ЭМТП сопряжено с рядом трудностей. Преобразователи данного типа чувствительны к температурным воздействиям. При колебаниях температуры значение сопротивления может смещаться, создавая ошибки измерения, не связанные с фактической деформацией. В условиях работы тормозных механизмов, где температура может изменяться от отрицательных значений до нескольких сотен градусов Цельсия [11], данная проблема приобретает критический характер. Также тензорезистивные преобразователи обладают ограниченной пригодностью для измерения быстроменяющихся нагрузок из-за ограниченного частотного диапазона, что непосредственно влияет на быстродействие системы измерения фактического усилия ЭМТП.

Пьезоэлектрические преобразователи, благодаря своим физическим свойствам, довольно часто используют для измерения динамических нагрузок [12; 13]. Чувствительными элементами в них могут быть как натуральные материалы (например, кварц), так и искусственная пьезокерамика [14]. Керамика на основе цирконата-титаната свинца (ЦТС) имеет высокие значения пьезомодуля, и позволяет преобразователю работать при температурах до 150 °С [15]. По конструкции такие преобразователи делают разных форм и размеров и с разными схемами нагружения (сжатие, растяжение, изгиб и т. д.) [16]. В тормозных системах чаще всего встречается схема сжатия, при которой пьезоэлемент размещают между силовыми элементами конструкции ЭМТП (рис. 3).

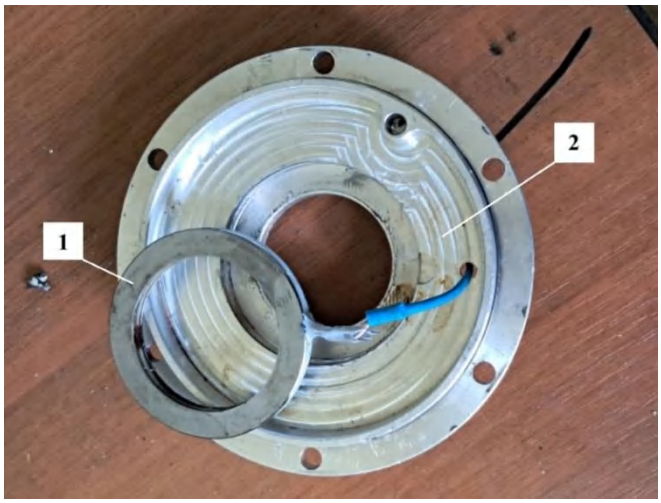


Рис. 3. Пьезоэлектрический преобразователь на основе пьезокерамики ЦТС-19, встроенный в конструкцию опытного образца ЭМТП для грузовых транспортных средств:
1 – пьезоэлектрический преобразователь, *2* – крышка корпуса

В опытном образце ЭМТП для грузовых транспортных средств (рис. 3) пьезоэлектрический преобразователь устанавливается на крышке корпуса. В процессе создания приводом усилия упорный подшипник, расположенный на уступе ротора электродвигателя, начинает упираться на поверхность преобразователя, сжимая его. Пьезоэлемент, в свою очередь, генерирует электрический заряд, прямо пропорциональный приложенному усилию.

Из-за того, что пьезоэлемент жесткий и деформируется минимально, резонансная частота пьезоэлектрических преобразователей получается выше, чем у обычных механических процессов в тормозной системе [17]. Кроме того, у пьезокерамики высокое значение пьезомодуля, а это значит, что преобразователи способны регистрировать даже небольшие изменения в силе прижатия колодок [18; 19], что является важным качеством для точного управления моментом ЭМТП. В то же время пьезоэлектрические преобразователи обладают недостатком, который заключается в постепенном стекании заряда с пьезоэлемента (рис. 4). Это становится особенно заметным при измерении статических нагрузок. При статическом нагружении пьезоэлемент со временем разряжается через собственное сопротивление.

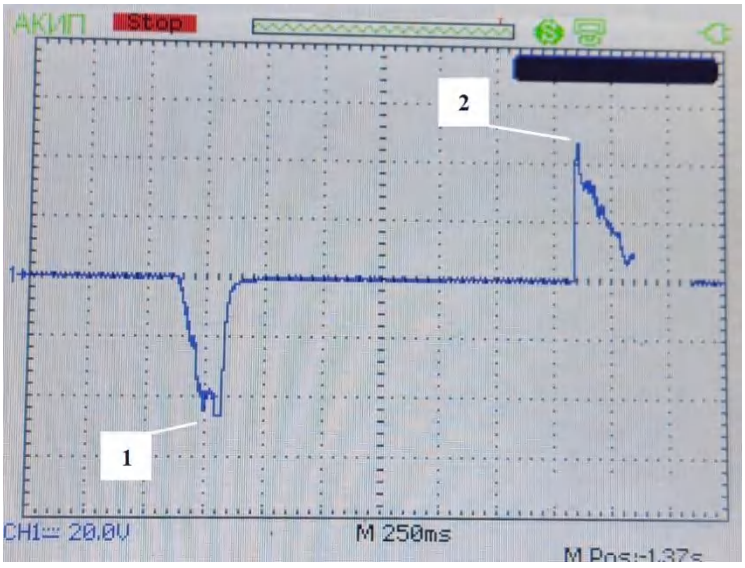


Рис. 4. Осциллограмма напряжения на пьезоэлектрическом преобразователе, показывающая процесс стекания заряда:
1 – создание нагрузки на преобразователь, *2* – снятие нагрузки с преобразователя

В измерительной технике явление стекания заряда с пьезоэлемента хорошо известно. Для борьбы с этой особенностью применяют усилители заряда [20]. Данное электронное устройство включается непосредственно на выходе пьезоэлектрического преобразователя. Принцип действия усилителя заряда основан на преобразовании малого электрического заряда, генерируемого пьезоэлементом, в пропорциональный сигнал напряжения с помощью операционного усилителя, охваченного емкостной обратной связью (рис. 5). Входной каскад такого усилителя представляет собой дифференциальный электронный интегратор, который накапливает поступающий заряд на конденсаторе обратной связи, формируя на выходе напряжение, прямо пропорциональное величине заряда. Благодаря крайне высокому входному сопротивлению усилителя процесс разряда пьезоэлемента через измерительную цепь значительно замедляется, тем самым обеспечивается возможность квазистатических измерений.

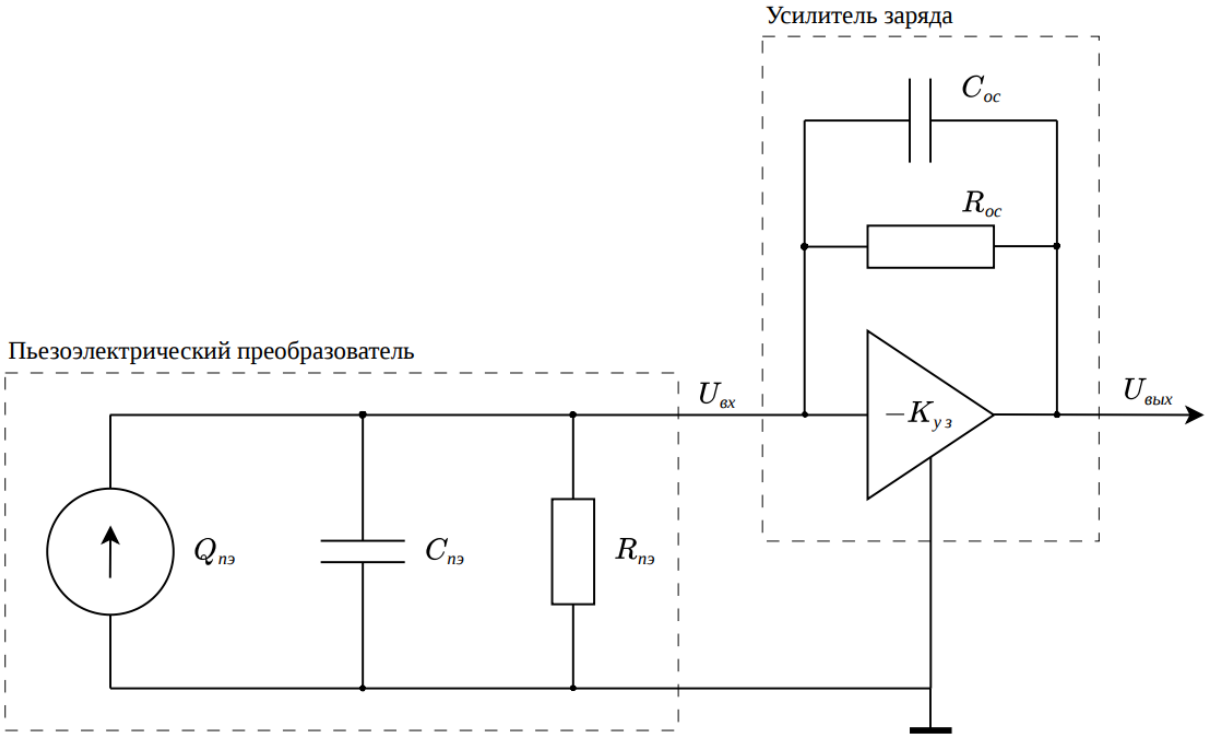


Рис. 5. Схема подключения пьезоэлектрического преобразователя к усилителю заряда

Косвенный способ, основанный на измерении тока, потребляемого электродвигателем привода, легок в реализации, но обладает низкой точностью, сильной зависимостью от температуры обмоток электродвигателя и износа механической передачи. Тензорезистивные преобразователи обладают линейностью и точностью при измерениях статической нагрузки, но они чувствительны к температурным воздействиям. В тормозных механизмах температура может достигать нескольких сотен градусов Цельсия, что будет приводить к смещению сопротивления и возникновению ошибки в измерениях. Кроме того, тензорезистивные преобразователи обладают ограниченным частотным диапазоном, а это оказывает негативное влияние на быстродействие ЭМТП и систем активной безопасности. Пьезоэлектрические преобразователи обладают широким частотным диапазоном, температурной стабильностью и высокой чувствительностью. Проблема стекания заряда при статических измерениях решается применением усилителя заряда.

Таким образом, учитывая преимущества пьезоэлектрических преобразователей, можно сделать вывод, что они лучше всего подходят для быстрых и точных измерений усилия в ЭМТП перспективного электротранспорта.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Думнов, С. Н.* Экспертное исследование устройства тормозных систем электрических транспортных средств категории М1 (на примере NISSAN LEAF) / С. Н. Думнов, И. С. Щербаков, М. Е. Молодых // Право и управление. – 2023. – № 1. – С. 373–380. – EDN KPJRYU.

2. Опыт разработки электромеханического привода для тормозного механизма электромобилей / А. В. Анисимов, А. А. Галимов, М. В. Григорьев, Р. А. Лапенков, А. М. Щербин // Труды НАМИ. – 2025. – № 4(303). – С. 86–95. – EDN JZLNKK.

3. *Жалнин, Э. В.* Концептуальные принципы интеллектуальных сельскохозяйственных машин на примере зерноуборочного комбайна / Э. В. Жалнин, З. А. Годжаев, С. Н. Флоренцев // Сельскохозяйственные машины и технологии. – 2017. – № 6. – С. 9–16. – EDN YLSVLC.

4. *Щербин, А. М.* Повышение энергоэффективности и безопасности движения электромобилей путем использования мехатронных приводов в системах рулевого и тормозного управления / А. М. Щербин // Труды НАМИ. – 2026. – № 1(304). – С. 138–148. – EDN RPRMVP.

5. Краткий анализ конструкций электромеханического тормоза для колесных машин / Б. Н. Белоусов, Р. А. Лапенков, А. М. Щербин, М. П. Малиновский // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2025. – № 3(52). – С. 44–55. – EDN XLBQVT.

6. *Бочкарев, И. В.* Разработка и исследование устройства контроля состояния фрикционных электромеханических устройств с постоянными магнитами / И. В. Бочкарев, Ж. Т. Галбаев // Проблемы автоматики и управления. – 2015. – № 1(28). – С. 237–242. – EDN WMROPJ.

7. Сравнение погрешности измерения крутящего момента асинхронного электрического двигателя прямыми и косвенными методами / А. В. Егоров, Е. А. Веселов, Ю. Ф. Кайзер, В. Г. Шрам // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2022. – № 8. – С. 374–382. – EDN GVWWJJ.

8. *Баурова, Н. И.* Применение методов неразрушающего контроля при диагностировании металлоконструкций / Н. И. Баурова // Путь и путевое хозяйство. – 2014. – № 10. – С. 12–15. – EDN SXKIQJ.

9. Особенности обработки сигналов, получаемых от пьезоэлектрических датчиков динамометра для измерения сил резания / А. М. Марков, С. Л. Леонов, П. О. Черданцев, А. О. Черданцев, С. В. Гайст, Е. Ю. Лапенков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – № 4. – С. 89–93. – EDN YJTMVT.

10. *Баурова, Н. И.* Методы неразрушающего контроля при диагностировании металлоконструкций / Н. И. Баурова // Механизация строительства. – 2009. – № 12. – С. 21–23. – EDN MXAVMV.

11. *Жуков, И. С.* Оценка тепловой нагруженности пар трения автоматизированной тормозной системы автомобиля / И. С. Жуков, В. Г. Дыгало // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – 2018. – № 3(122). – С. 147–152. – EDN VJCJUW.

12. Диагностирование газораспределительного механизма виброакустическим методом / А. В. Гриценко, В. Д. Шепелев, З. В. Альметова, Е. В. Шепелева // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Машиностроение. – 2017. – № 3. – С. 48-57. – EDN ZIFZRT.

13. *Виленчиц, Б. Б.* Натурные исследования аэродинамики автопоездов / Б. Б. Виленчиц, В. К. Попов, Г. В. Шаронов // Актуальные вопросы машиноведения. – 2014. – Т. 3. – С. 137–138. – EDN ZCHPLJ.

14. Эффективность пьезоэлектрических элементов в дорожном транспорте / И. Качахидзе, А. Камладзе, Г. Пурцхванидзе, В. Гветадзе // Международная научно-практическая конференция «Мировая наука». – 2018. – № 5(33). – С. 64–67. – EDN UOZKWY.

15. Пути оптимизации свойств пьезокерамического материала ЦТС-19 / А. Ю. Малыхин, А. В. Скрылев, А. Е. Панич, С. Н. Свирская, Е. И. Кретова, Е. С. Медведева // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 4(153). – С. 213–219. – EDN SDJKNL.

16. *Ващук, Н. А.* Диагностика двигателей подвижного состава с помощью пьезодатчика / Н. А. Ващук // Труды Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2014. – № 4. – С. 13–16. – EDN TUICJB.

17. *Бржозовский, Б. М.* Гармонический анализ в исследовании процессов формообразования и измерения прецизионных деталей / Б. М. Бржозовский, М. Б. Бровкова, О. В. Захаров // Вестник Саратовского государственного технического университета. – 2004. – № 1(2). – С. 46–53. – EDN PIEUIT.

18. *Марков, В. А.* Качество процесса топливоподачи и показатели транспортного дизеля / В. А. Марков, С. Н. Девянин // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 3 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2004. – (Серия «Наземные транспортные системы») – С. 17–23. – EDN HTKBED.

19. *Сметана, С. А.* Технологическая реализация диагностирования подвески автомобиля методом ударных импульсов / С. А. Сметана, А. В. Сидорченко // Вестник Луганского государственного университета имени Владимира Даля. – 2024. – № 7(85). – С. 67–73. – EDN ZLKWEL.

20. *Колясев, В. А.* Помехоустойчивый зарядовый усилитель для пьезоакселерометров / В. А. Колясев, С. В. Леньков, С. М. Молин // Приборы и техника эксперимента. – 2001. – № 1. – С. 61–64. – EDN MPJXTV.

REFERENCES

1. *Dumnov S. N.* Expert study of the design of braking systems of electric vehicles of category M1 (on the example of NISSAN LEAF) / S. N. Dumnov, I. S. Shcherbakov, M. E. Molodich // Law and Management. – 2023. – No 1. – Pp. 373-380. – EDN KPJRYU.

2. Experience in developing an electromechanical actuator for electric vehicle brakes / A. V. Anisimov, A. A. Galimov, M. V. Grigor'ev, R. A. Lapenkov, A. M. Shcherbin // Trudy NAMI. – 2025. – No 4(303). – Pp. 86-95. – EDN JZLNKK.

3. *Zhalnin E. V.* Conceptual principles of intelligent agricultural machines in the case of combine harvester / E. V. Zhalnin, Z. A. Godzhaev, S. N. Florentsev // Agricultural machinery and technologies. – 2017. – No 6. – Pp. 9-16. – EDN YLSVLC.

4. *Shcherbin A. M.* Improving energy efficiency and safety of driving of electric vehicles by using mechatronic drives in steering and brake systems / A. M. Shcherbin // Trudy NAMI. – 2026. – No 1(304). – Pp. 138-148. – EDN RPRMVP.

5. Brief analysis of electromechanical brake design for wheeled vehicles / B. N. Belousov, R. A. Lapenkov, A. M. Shcherbin, M. P. Malinovsky // Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. – 2025. – No 3(52). – Pp. 44-55. – EDN XLBQVT.

6. *Bochkarev I. V.* Development and research unit control status friction electromechanical devices permanent magnet / I. V. Bochkarev, Zh. T. Galbaev // Problems of automation and control. – 2015. – No 1(28). – Pp. 237-242. – EDN WMROPJ.

7. Comparison of measuring the torque of an asynchronous electric motor by direct and indirect methods /

A. V. Egorov, E. A. Veselov, Yu. F. Kaiser, V. G. Shram // Izvestiya Tul′skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki. – 2022. – No 8. – Pp. 374-382. – EDN GVWWJJ.

8. *Baurova N. I.* Application of not destroying control used for an estimation of a condition of metal designs / N. I. Baurova // Track and track facilities. – 2014. – No 10. – Pp. 12-15. – EDN SXKIQJ.

9. The features of a processing of signals received from piezoelectric sensors of a dynamometer for measuring cutting forces / A. M. Markov, S. L. Leonov, P. O. Cherdancev, A. O. Cherdancev, S. V. Gayst, E. Y. Lapenkov //Actual problems in machine building. – 2017. – No 4. – Pp. 89-93. – EDN YJTMVT.

10. *Baurova N. I.* The review of methods of not destroying control used for an estimation of a condition of metal designs / N. I. Baurova // Mechanization of construction. – 2009. – No 12. – Pp. 21-23. – EDN MXAVMV.

11. *Zhukov I. S.* Evaluation of thermal loading of friction pairs of an automated braking system of a vehicle / I. S. Zhukov, V. G. Dygalo // Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva. – 2018. – No 3(122). – Pp. 147-152. – EDN VJCJUW.

12. Diagnosis of the gas distribution mechanism by the vibroacoustic / A. V. Gritsenko, V. D. Shepelev, Z. V. Almetova, E. V. Shepeleva // Bulletin of the South-Ural state university. Series: Mechanical engineering industry. – 2017. – No 3. – Pp. 48-57. – EDN ZIFZRT.

13. *Vilenchits B. B.* The fullscale investigations of aerodynamics of the road trains / B. B. Vilenchits, V. K. Popov, G. V. Sharonov // Current issues in mechanical engineering. – 2014. – V. 3. – Pp. 137-138. – EDN ZCHPLJ.

14. Efficiency of piezoelectric elements in road transport / I. Kachakhidze, A. Kamladze, G. Purtskhvanidze, V. Gvetadze // International scientific and practical conference «World science». – 2018. – No 5(33). – Pp. 64-67. – EDN UOZKWY.

15. The ways of optimization piezoelectric material PZT-19 / A. Yu. Malykhin, A. V. Skrylev, A. E. Panich, S. N. Swirskaya, E. I. Kretova, E. S. Medvedeva // Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki. – 2014. – No 4(153). – Pp. 213-219. – EDN SDJKNL.

16. *Vashchuk N. A.* Diagnostics of engines rolling stock using the piezosensor / N. A. Vashchuk // Proceedings of the Rostov state university of railway transport. – 2014. – No 4. – Pp. 13-16. – EDN TUICJB.

17. *Brzhozovskiy B. M.* Hramonic analysis in research of processes of formshaping and measarments of precision parts / B. M. Brzhozovskiy, M. B. Brovkova, O. V. Zakharov // Bulletin of the Saratov state technical university. – 2004. – No 1(2). – Pp. 46-53. – EDN PIEUIT.

18. *Markov V. A.* Fuel delivery process quality and performance of transport diesel engines / V. A. Markov, S. N. Devianin // Bulletin of the Volgograd state technical university. Series: Ground transportation systems. – 2004. – No 3. – Pp. 17-23. – EDN HTKBED.

19. *Smetana S. A.* Technological implementation of vehicle suspension diagnosis by shock pulse method / S. A. Smetana, A. V. Sidorchenko // Bulletin of Volodymyr Dahl Luhansk state university. – 2024. – No 7(85). – Pp. 67-73. – EDN ZLKWEL.

20. *Kolyasev V. A.* Noise immune charge amplifier for piezoelectric accelerometers / V. A. Kolyasev, S. V. Len'kov, S. M. Molin // Pribory i tekhnika eksperimenta. – 2001. – No 1. – Pp. 61-64. – EDN MPJXTV.

Статья поступила в редакцию 30.07.2026, доработана 03.08.2026, подписана в печать 15.08.2026
The article was submitted 30.07.2026, revised 03.08.2026, accepted for publication 15.08.2026

УДК 629.3
DOI:10.35211/2500-0586-2026-3-56-45-51

Научная статья
Original article

В. Б. Кобзаренко, А. С. Дьяков

КЛАССИФИКАЦИЯ ПОДВОДНЫХ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СРЕДСТВ С КОНТАКТНЫМ ТИПОМ ДВИЖИТЕЛЯ

Московский государственный технический университет имени Н. Э. Баумана, Москва, Россия

✉ Алексей Сергеевич Дьяков, Diakov_as@bmstu.ru

Аннотация. В статье приведен анализ типов движителей, применяемых в подводных транспортно-технологических аппаратах различного назначения. На основании результатов анализа конструкций указанных аппаратов и принципов управления ими, было выявлено семь основных классификационных признаков. Предложена классификация подводных транспортно-технологических аппаратов, позволяющая в том числе выбирать в зависимости от назначения аппарата наиболее экономичный, с точки зрения затрат энергии на перемещение аппарата, тип движителя.

***Ключевые слова*:** контактные движители, подводные транспортно-технологические средства, классификация подводных аппаратов

Для цитирования: Кобзаренко В. Б., Дьяков А. С. Классификация подводных транспортно-технологических средств с контактным типом движителя. Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. 2026; 3(56): 45–51. DOI: 10.35211/2500-0586-2026-3-56-45-51.

© Кобзаренко В. Б., Дьяков А. С., 2026.

Информация об авторах:
Василий Борисович Кобзаренко – студент МГТУ им. Н. Э. Баумана
https://orcid.org/0009-0009-8514-9608
e-mail: kobzarenko.02@mail.ru
Алексей Сергеевич Дьяков – д-р техн. наук, профессор кафедры СМ10 «Колесные машины» МГТУ им. Н. Э. Баумана
https://orcid.org/0009-0005-7787-2354
e-mail: Diakov_as@bmstu.ru

Вклад авторов:
В. Б. Кобзаренко – анализ данных исследования, редактирование текста статьи.
А. С. Дьяков – определение цели и задач работы, методология исследования, редактирование текста статьи.

V. B. Kobzarenko, A. S. Dyakov

CLASSIFICATION OF UNDERWATER TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL VEHICLES WITH A CONTACT TYPE OF PROPULSION

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
✉ Aleksey S. Dyakov, Diakov_as@bmstu.ru

Abstract. This article analyzes the types of propulsion systems used in underwater transport and technological vehicles for various purposes. Based on the analysis of these vehicles' designs and control principles, seven key classification criteria were identified. A classification system for underwater transport and technological vehicles is proposed, allowing, among other things, for selecting the most energy-efficient propulsion system based on the vehicle's intended purpose.

***Keywords*:** contact propellers, underwater transport and technological means, classification of underwater vehicles

For citation: Kobzarenko V. B., Dyakov A. S. Classification of underwater transport and technological vehicles with a contact type of propulsion. Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2026; 3(56): 45–51. DOI:10.35211/2500-0586-2026-3-56-45-51.

Information about the authors:
Vasiliy B. Kobzarenko – student BMSTU
https://orcid.org/0009-0009-8514-9608
e-mail: kobzarenko.02@mail.ru
Aleksey S. Dyakov – Dr. Sci. (Engineering), Professor SM10 Department «Wheeled vehicles» BMSTU
https://orcid.org/0009-0005-7787-2354
e-mail: Diakov_as@bmstu.ru

Contribution of the authors:
Vasiliy B. Kobzarenko – scientific supervision, final approval of the version for publication.
Aleksey S. Dyakov – idea development and methodology design, final approval of the version for publication.

Подводные аппараты являются незаменимыми инструментами в современной промышленности. Дно океанов и рек содержит множество полезных ископаемых, запасы которых на суше стремительно уменьшаются. Данные аппараты позволяют проводить технологические операции на глубинах свыше 40 метров, представляющих опасность для организма человека.

Важность использования подводных транспортно-технологических средств (ТТС) в сфере подводного животноводства растет параллельно развитию аквакультуры, позволяя эффективно контролировать состояние водных организмов, обеспечивать оптимальное кормление и защиту рыб и моллюсков от заболеваний.

Кроме того, исследовательская деятельность существенно зависит от возможностей современных подводных ТТС, поскольку именно они позволяют изучать океанические экосистемы, геологические структуры и климатические изменения в морских средах обитания в силу практически полной невозможности изучения водоемов с глубинами более 100–200 м визуально (со спутников или кораблей). Подводные аппараты позволяют составить математические модели процессов, происходящих вдали от поверхности воды, что крайне актуально для океанологии.

Несмотря на успехи последних десятилетий, остается ряд нерешенных проблем, связанных с классификацией типов подводных аппаратов, исходя из специфики выполняемых ими задач, их размеров, типов управления.

Для эффективного развития индустрии морской робототехники необходима четкая систематизация существующих моделей и понимание перспектив дальнейшего совершенст-

вования конструкций, программного обеспечения и методов управления.

Существующие конструкции подводных аппаратов с контактными движителями

Гусеничные системы характеризуются высокой снаряженной массой и значительным тяговым усилием, необходимым для преодоления сопротивления грунта. Например, «Solwara 1» (рис. 1), разработанный компанией Naurilus Minerals, имеет массу 31000 кг и предназначен для добычи полезных ископаемых на глубине до 1600 м. Он является телеуправляемым необитаемым подводным аппаратом (ТНПА), использующим электрический двигатель для питания фрезерных установок и подъемного оборудования [1].



Рис. 1. Подводный аппарат «Solwara 1»

Схожая по принципу движения, но разработанная для меньших глубин (до 50 м), модель Komatsu D155W представляет собой подводный бульдозер массой 43000 кг, который также является телеуправляемым и оснащен полностью электрической силовой установкой [2].



Рис. 2. Подводный аппарат FET XT1500

Важными примерами развития автономности являются траншеекопатели Forum Energy Technologies (FET) (рис. 2). Этот аппарат массой 32000 кг и двигателем мощностью 1500 л. с. способен работать на глубинах до 1000 м. Его ключевой особенностью является автономное управление. Эти машины можно назвать лучшими в своем классе, так как именно с их помощью было закопано большинство кабелей и трубопроводов во всем мире [3].

Концепция совместного использования преимуществ контактных и водоходных движителей отражена в конструкции аппарата «Crawfish» (рис. 3), разработанного Обществом Фраунгофера. Данное ТТС является противоположностью габаритным и энерговооруженным ТТС, приведенным ранее. Имея массу всего 22 кг, этот аппарат использует комбинированный движитель (колесный и гребные винты), позволяющий ему переходить от гидродинамического движения в толще воды к контактному перемещению по поверхностям [4].



Рис. 3. Подводный робот «Crawfish»

В Российской Федерации также существуют наработки конструкций подводных аппаратов с контактным типом движителей. МАК-1 (рис. 4) имеет относительно небольшую массу, равную 150 кг и максимальную глубину погружения 20 м. Его шагающий движитель обеспечивает точное позиционирование на сложной поверхности, что делает его универсальным для мелководных инспекционных задач [5].



Рис. 4. Шагающий робот «МАК-1» [3]

Шагающий робот «Ортоног» [6] (рис. 5) является платформой для отработки методов удаленного управления аппаратами подобного типа.

Поскольку шагающие машины при движении в сложных условиях способны сохранять подвижность дольше, чем традиционные колесные и гусеничные конструкции.

Российский ТНПА, разработанный в МГТУ им. Н. Э. Баумана (рис. 6), является платформой, использующей колесный движитель для выполнения различных технологических задач. Он предназначается для обследования днищ судов, проверки толщин стенок нефте- и газопроводов, состояния металла подводных сооружений [7].



Рис. 5. Шагающий робот «Ортоног»



Рис. 6. Подводный аппарат МГТУ им. Н. Э. Баумана

Примером подводного ТТС, выполняющего исследовательские задачи, является аппарат «Helix», разработанного компанией «Copperstone Technologies» (рис. 7), способный погружаться на глубины до 200 метров. Отличительной особенностью данной конструкции является использование роторно-винтовых движителей.

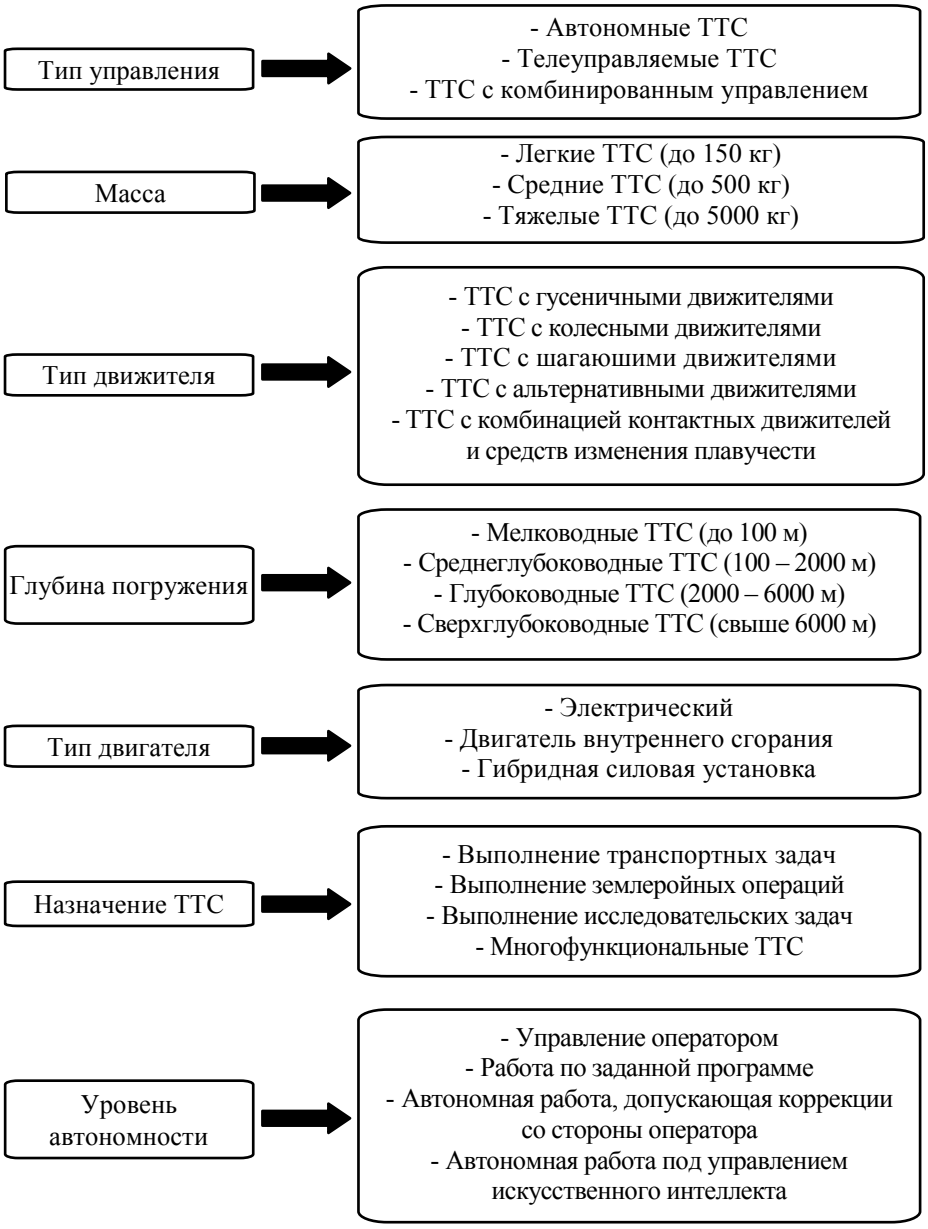
Устройство при помощи шнеков двигается вперед вместе с буем, в который установлен датчик, передающий сигнал оператору.

Данное ТТС предназначено для экологического мониторинга и изучения водоемов в экстремальных условиях [8].



Рис. 7. Подводный аппарат «Helix Neptune»

В результате анализа конструкций подводных аппаратов была разработана классификация, выделяющая основные признаки классов:



Создание классификации позволило четко разделить существующие аппараты. Принцип движения унифицирует аппараты, работающие на различных физических основах, позволяя четко отделить системы с низким энергопотреблением от систем с контактными движителями. Уровень автономности, в свою очередь, отражает сложность бортовых навигационных архитектур, отделяя простые запрограммированные маршруты от систем для высокоточной навигации и систем, использующих искусственный интеллект для картографирования и принятия решений в реальном времени.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Solwara project – Mining technology. – URL: https://www.mining-technology.com/projects/solwara-project/. – Текст: электронный.

2. Установка для глубоководных исследований / И. П. Тимофеев, Н. К. Улашик,Е. М. Ульянов, А. Г. Андреев. // Записки Горного института, 1986. – Т. 108. – С. 100–104.

3. Подводные траншеекопатели серии Perry XT. – URL: https://fet-rus.ru/produkcziya-dlya-podvodnyix-rabot podvodnyie-transheekopateli-perry-xt/. – Текст: электронный.

4. Robot climbs offshore wind turbines and paints while underwater. – URL: https://newatlas. com/robotics/crawfish-robot-offshore-turbine-maintenance. – Текст: электронный.

5. *Арыканцев, В. В*. Подводные исследования тягово-сцепных свойств и проходимости шагающего аппарата МАК-1/ В. В. Арыканцев, В. В. Чернышев// Известия Южного федерального университета. М; 2015. С. 169–178.

6. Отработка методов удаленного управления движением шагающего робота «Ортоног» / Е. М. Брискин, В. В. Чернышев, А. В. Малолетов (и др.) // Известия ВолгГТУ : межвуз. сб. науч. ст. № 9 / ВолгГТУ. – Волгоград, 2014. – С. 153–160.

7. Необитаемый подводный аппарат, созданный в МГТУ им. Баумана. – URL: https://sudostroenie.info/novosti/22306.html?utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera. – Текст: электронный.

8. Autonomous Industrial Service Robots for trailing management. – URL: https://copperstonetech.com/home-pipedrive-form/. – Текст: электронный.

REFERENCES

1. Solwara project – Mining technology [Electronic resource]. URL: https://www.mining-technology.com/projects/solwara-project/.

2. *Timofeev I.P*., Ulashik N.K., Ulyanov E.M., Andreev A.G. Deep Sea Research Unit // Journal of Mining Institute. 1986. Vol. 108. P. 100-104.

3. Perry XT series underwater trenchers [Electronic resource]. URL: https://fet-rus.ru/produkcziya-dlya-podvodnyix-rabot/podvodnyie-transheekopateli-perry-xt/.

4. Robot climbs offshore wind turbines and paints while underwater [Electronic resource]. URL: https://newatlas. com/robotics/crawfish-robot-offshore-turbine-maintenance/.

5. *Arykantsev, V. V*. Subsea investigations of traction properties and passability of walking unit MAK-1/5. Arykantsev V. V., Chernyshev V. V.// Izvestiya of the Southern Federal University. M; 2015. p. 169 – 178.

6. *Briskin, E. S*. Field tests of the walking robot "ortonog"/ E. S. Briskin, V. V. Chernyshev, A. V. Maloletov (and others) // Izvestia of Volgograd State Technical University; 2014. № 9. P. 153-160.

7. An unmanned underwater vehicle developed at Bauman Moscow State Technical University [Electronic resource]. URL: https://sudostroenie.info/novosti/ 22306.html?-utm_medium=organic&utm_source=yandexsmartcamera.

8. Autonomous Industrial Service Robots for trailing management [Electronic resource]. URL: https://copperstonetech.com/home-pipedrive-form/.

Статья поступила в редакцию 08.08.2026, доработана 12.08.2026, подписана в печать 15.08.2026
The article was submitted 08.08.2026, revised 12.08.2026, accepted for publication 15.08.2026

Ответственный за выпуск: редактор РИО
А. Н. Сергеева

Компьютерная верстка:
Е. В. Макарова

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

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

Адрес редакции и издателя: 400005, г. Волгоград, просп. В. И. Ленина, 28.
Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ)
Гл. редактор, тел.: +7 (8442) 24-80-03
E-mail: lysak2@vstu.ru

Темплан 2026 г. (научные издания). Поз. № 19ж. Дата выхода в свет 29.09.2026 г. Формат 60 × 84 1/8.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл. печ. л. 6,04. Уч.-изд. л. 5,71.
Тираж 100 экз. Свободная цена. Заказ № 418..

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

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