

DREAM

<http://dream-journal.org>

ISSN 2410-9908

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4

Diagnostics, Resource and Mechanics
of materials and structures

<http://dream-journal.org>

4
2023

July-August

Editor-in-Chief: **Sergey V. Smirnov**
Deputy Editors-in-Chief: **Sergey V. Gladkovsky**
Deputy Editors-in-Chief: **Evgenii Yu. Prosviryakov**

Editorial Council

Anatoly A. Burenin (Russia)
Irina G. Goryacheva (Russia)
Janez Grum (Slovenia)
Mikhail P. Lebedev (Russia)
Leopold I. Leontiev (Russia)
Evgeny V. Lomakin (Russia)
Valery P. Matveenko (Russia)
Nikolay A. Makhutov (Russia)
Nikita F. Morozov (Russia)
Vladimir V. Moskvichev (Russia)
Sergey V. Panin (Russia)
Vasily M. Fomin (Russia)
Shao Wen-zhu (China)

Editorial Board

Boris V. Artemyev (Moscow)
Vladimir A. Bataev (Novosibirsk)
Ivan A. Bataev (Novosibirsk)
Aleksandr K. Belyaev (St.-Peterburg)
Sergey V. Burov (Ekaterinburg)
Vladimir O. Vaskovsky (Ekaterinburg)
Dmitry I. Vichuzhanin (Ekaterinburg)
Vladimir G. Degtyar (Miass)
Igor G. Emelyanov (Ekaterinburg)
Sergey M. Zadvorkin (Ekaterinburg)
Alexander G. Zalazinsky (Ekaterinburg)
Anatoly V. Konovalov (Ekaterinburg)
Vladimir N. Kostin (Ekaterinburg)
Tatyana P. Lyubimova (Perm)
Aleksey V. Makarov (Ekaterinburg)
Vladimir A. Mironov (Ekaterinburg)
Radik R. Mulyukov (Ufa)
Vitaly V. Muravyov (Izhevsk)
Aleksandr P. Nichipuruk (Ekaterinburg)
Oleg A. Plekhov (Perm)
Anna M. Povlotskaya (Ekaterinburg)
Artemiy A. Popov (Ekaterinburg)
Nataliya B. Pugacheva (Ekaterinburg)
Igor Yu. Pyshmintsev (Chelyabinsk)
Evgeniy Yu. Raskatov (Ekaterinburg)
Anatoly B. Rinkevich (Ekaterinburg)
Roman A. Savray (Ekaterinburg)
Alexander S. Smirnov (Ekaterinburg)
Alexander I. Ulyanov (Izhevsk)
Yuliya V. Khudorozhkova (Ekaterinburg)

Elena E. Verstakova, editor of the English translation
Olga A. Verstakova, editor of Russian texts
Anna V. Garieva, maker-up
Galina V. Torlopova, associate editor
Raul N. Shakirov, site admin

Postal address: Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 34 Komsomolskaya st., 620049, Ekaterinburg, Russian Federation
phone: +7 (343) 375-35-83,
fax: +7 (343) 374-53-30
e-mail: dream-journal@mail.ru
<http://dream-journal.org>

Главный редактор: Смирнов Сергей Витальевич, д.т.н.

Заместитель главного редактора: **Сергей Викторович Гладковский, д.т.н.**

Заместитель главного редактора: **Евгений Юрьевич Просвиряков, д.ф.-м.н.**

Редакционный совет:

Буренин Анатолий Александрович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. (Россия)
Горячева Ирина Георгиевна, академик РАН, д.ф.-м.н. (Россия)
Грум Янез, Ph.D, (Республика Словения)
Лебедев Михаил Петрович, член-корр. РАН, д.т.н. (Россия)
Леонтьев Леопольд Игоревич, академик РАН, д.т.н. (Россия)
Ломакин Евгений Викторович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. (Россия)
Матвеев Валерий Павлович, академик РАН, д.т.н. (Россия)
Махутов Николай Андреевич, член-корр. РАН, д.т.н. (Россия)
Морозов Никита Федорович, академик РАН, д.ф.-м.н. (Россия)
Москвичев Владимир Викторович, д.т.н. (Россия)
Панин Сергей Викторович, д.т.н. (Россия)
Фомин Василий Михайлович, академик РАН, д.ф.-м.н. (Россия)
Шао Вэнь-чжу, профессор (Китай)

Редакционная коллегия:

Артемьев Борис Викторович, д.т.н., (Москва)
Батаев Владимир Андреевич, д.т.н. (Новосибирск)
Батаев Иван Анатольевич, д.т.н. (Новосибирск)
Беляев Александр Константинович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н., (Санкт-Петербург)
Буров Сергей Владимирович, к.т.н. (Екатеринбург)
Васьковский Владимир Олегович, д.ф.-м.н. (Екатеринбург)
Вичужанин Дмитрий Иванович, к.т.н. (Екатеринбург)
Дегтярь Владимир Григорьевич, академик РАН, д.т.н. (Миасс)
Емельянов Игорь Георгиевич, д.т.н. (Екатеринбург)
Задворкин Сергей Михайлович, к.ф.-м.н. (Екатеринбург)
Залазинский Александр Георгиевич, д.т.н. (Екатеринбург)
Коновалов Анатолий Владимирович, д.т.н. (Екатеринбург)
Костин Владимир Николаевич, д.т.н. (Екатеринбург)
Любимова Татьяна Петровна, д.ф.-м.н. (Пермь)
Макаров Алексей Викторович, член-корр. РАН, д.т.н. (Екатеринбург)
Мионов Владимир Александрович, д.м.н. (Екатеринбург)
Мулюков Радик Рафикович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. (Уфа)
Муравьев Виталий Васильевич, д.т.н. (Ижевск)
Ничипурук Александр Петрович, д.т.н. (Екатеринбург)
Плехов Олег Анатольевич, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. (Пермь)
Поволоцкая Анна Моисеевна, к.т.н. (Екатеринбург)
Попов Артемий Александрович, д.т.н. (Екатеринбург)
Пугачева Наталия Борисовна, д.т.н. (Екатеринбург)
Пышминцев Игорь Юрьевич, д.т.н. (Челябинск)
Раскатов Евгений Юрьевич, д.т.н. (Екатеринбург)
Ринкевич Анатолий Брониславович, член-корр. РАН, д.ф.-м.н. (Екатеринбург)
Саврай Роман Анатольевич, к.т.н. (Екатеринбург)
Смирнов Александр Сергеевич, к.т.н. (Екатеринбург)
Ульянов Александр Иванович, д.т.н. (Ижевск)
Худорожкова Юлия Викторовна, к.т.н. (Екатеринбург)

Верстакова Елена Евгеньевна – редактор перевода текста на английский язык

Верстакова Ольга Андреевна – редактор текста

Гариева Анна Валерьевна – верстальщик текста

Торлопова Галина Викторовна – помощник редактора

Шакиров Рауль Нурович, к.т.н. – администратор сайта журнала

Адрес редакции:

Россия, 620049, г. Екатеринбург, ул. Комсомольская, д. 34., ИМАШ УрО РАН

телефон: +7 (343) 375 35 83, факс +7 (343) 374-53-30

e-mail: dream-journal@mail.ru

<http://dream-journal.org>

CONTENTS

Baimetova E. S. Hydrodynamic load on a multi-section heat exchanger	6
Filimonov M. Yu. and Vaganova N. A. Some problems of heat and mass transfer during the operation of engineering systems in multiphase environments	15
Vandyshev A. B. Estimating the effect of the main design parameters on the effectiveness of high-purity hydrogen production from raw hydrocarbons in membrane catalytic devices	29
Kogan L. Kh. and Stashkov A. N. Capabilities of eddy current NDT of soldered current-carrying joints in submersible electrical equipment for oil and gas industry	47
Perov D. V. Estimating complex dielectric permittivity of materials by the frequency dependences of reflection and transmission coefficient magnitudes in the microwave range	60

СОДЕРЖАНИЕ

Байметова Е. С. Гидродинамическая нагрузка многосекционного теплообменного аппарата	6
Филимонов М. Ю., Ваганова Н. А. Некоторые задачи тепломассопереноса при эксплуатации технических систем в многофазных средах	15
Вандышев А. Б. Оценка влияния основных конструктивных параметров на эффективность получения высокочистого водорода в мембранно-каталитических устройствах из углеводородного сырья	29
Коган Л. Х., Сташков А. Н. Возможности вихретокового контроля качества пайки токоведущих соединений погружного электрооборудования для нефтегазовых систем	47
Перов Д. В. Оценка комплексной диэлектрической проницаемости материалов по частотным зависимостям модулей коэффициентов отражения и прохождения в микроволновом диапазоне	60

Received: 31.05.2023

Revised: 20.07.2023



Accepted: 25.08.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.006-014

HYDRODYNAMIC LOAD ON A MULTI-SECTION HEAT EXCHANGER

E. S. Baimetova

M. T. Kalashnikov Izhevsk State Technical University, 7 Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russia

 <https://orcid.org/0000-0002-4534-0936>  baimetova.e.s@gmail.com

E-mail: baimetova.e.s@gmail.com

Address for correspondence: 7 Studencheskaya St., Izhevsk, 426069, Russia

Tel.: +7 (912) 447-8295

The article considers the issues of numerical modeling of a multi-section heat exchanger using the tools of the OpenFOAM open source package. The multi-section heat exchanger is operated at velocities ranging between 0.1 and 2 m/s. Numerical simulation is carried out for a complete assembly of 8 sections. Each section contains six transverse microchannels with internal fins to increase heat transfer. Hydraulic oil with a kinematic viscosity of $0.000032 \text{ m}^2/\text{s}$ is used as the working fluid. As a result of numerical simulation, the hydrodynamic characteristics at the entrance to the microchannels were evaluated depending on the number of sections, as well as hydraulic resistances were evaluated depending on the pressure drop and the flow velocity of the working fluid.

Keywords: numerical simulation, hydrodynamic load, multi-section heat exchanger, distributing collector

References

1. Filippov, G.F., Melamed, L.E., and Tropkina, A.I. Models hierarchy of header devices analysis and macroscale analysis. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Problemy Energetiki*, 2010, 5–6, 3–17. (In Russian).
2. Delnov, V.N. Hydrodynamics of typical distribution header systems of nuclear power plants: modern views and research perspectives. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki, Seriya Yadernno-Reaktornye Konstanty*, 2020, 4, 116–128. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-4-116-128. (In Russian).
3. Gabrianovich, B.N. and Delnov, V.N. Hydrodynamics of headersystems of nuclear power plants. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Yadernaya Energetika*, 2007, 1, 113–121. (In Russian).
4. Gabrianovich, B.N., Delnov, V.N., and Yuryev, Yu.S. Features of coolant flow in distributing collector systems of nuclear power reactors with liquid metal cooling. In: *Trudy 3 Konf. TZhMT–2008 “Tyazhelye Zhidkometallicheskie Teplonositeli v Yadernykh Tekhnologiyakh”* [The Third Conference on Heavy Liquid Metal Coolants in Nuclear Technologies, Obninsk, 2008: Proceedings. Vol. 2]. GNTs RF-Fiziko-energeticheskiy in-t im. A.I. Leypunskogo Publ., Obninsk, 2010. (In Russian).
5. Dubonosov, A.Yu. and Gaponenko, A.M. *Gidrodinamika Vkhodnykh Tsilindricheskikh Kollektorov Teploobmennykh Apparatov Teploenergeticheskikh Ustanovok* [Hydrodynamics of Entrance Cylindrical Collectors of Heat-Exchange Devices of Heat Power Installations: Monograph]. Izd. Dom–Yug Publ., Krasnodar, 2013, 124 p. (In Russian).
6. Bystrov, P.I. and Mikhailov, V.S. *Gidrodinamika Kollektornykh Teploobmennykh Apparatov* [Hydrodynamics of Collector Heat-Exchange Apparatus]. Energoizdat Publ., Moscow, 1982, 223 p. (In Russian).

7. Koroleva, M.R., Terentyev, A.N., and Chernova, A.A. Fluid dynamics of a complicated collector. *Vestnik Rybinskoy Gosudarstvennoy Aviatsionnoy Tekhnologicheskoy Akademii im. P.A. Solovyeva*, 2021, 3 (58), 50–55. (In Russian).
8. Lunina, S.V. and Delnov, V.N. Test Calculations of Hydrodynamics of Distribution Header Systems in NPP Heat Exchangers and Reactors. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki, Seriya Yaderno-Reaktornye Konstanty*, 4, 129–137. DOI: 10.55176/2414-1038-2020-4-129-137. (In Russian).
9. Baimetova, E.S. and Koroleva, M.R. Research of conjugate heat transfer in a collector of a complex shape of an external fin. In: *XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022)*, Novosibirsk, August 08–14, 2022: Abstracts. FGBU SO RAN, 2022, 13–14. DOI: 10.53954/9785604788967_13.
10. Baymetova, E.S., Chernova, A.A., Koroleva, M.R., and Kelemen, M. Optimization of the developed outer surface of an industrial oil cooler. *MM Science Journal*, 2021, 2021, June, 4764–4768. DOI: 10.17973/MMSJ.2021_10_2021027.
11. Kudinov, V.A., Kartashov, E.M., Kovalenko, A.G., and Kudinov I.V. *Gidravlika: Uchebnik i Praktikum dlya Srednego Professionalnogo Obrazovaniya* [Hydraulics: Textbook and Practical Work for Secondary Vocational Education, ed. by V.A. Kudinov, 4th ed.]. Izdatelstvo Yurayt Publ., Moscow, 2023, 386 p. (In Russian).
12. Idelchik, I.E. *Spravochnik po Gidravlicheskim Soprotivleniyam* [Handbook of Hydraulic Resistances]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1992, 671 p. (In Russian).

Подана в журнал: 31.05.2023



УДК 532

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.006-014

ГИДРОДИНАМИЧЕСКАЯ НАГРУЗКА МНОГОСЕКЦИОННОГО ТЕПЛООБМЕННОГО АППАРАТА

Е. С. Байметова

*Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск, 426069, Россия*

 <https://orcid.org/0000-0002-4534-0936>  baimetova.e.s@gmail.com

Электронная почта: baimetova.e.s@gmail.com

Адрес для переписки: ул. Студенческая, 7, г. Ижевск, 426069, Россия

Тел.: +7 (912) 447-82-95

В работе рассматриваются вопросы численного моделирования гидродинамики многосекционного теплообменного аппарата с использованием инструментов пакета с открытым исходным кодом OpenFOAM. Многосекционный теплообменный аппарат эксплуатируется в скоростном диапазоне 0,1–2 м/с, численное моделирование проводится для полной сборки, составляющей 8 секций. Каждая секция содержит 6 поперечных микроканалов с внутренним оребрением для увеличения теплоотдачи. В качестве рабочей жидкости используется гидравлическое масло с кинематической вязкостью 0,000032 м²/с. В результате численного моделирования проведена оценка гидродинамических характеристик на входе в микроканалы в зависимости от количества секций, а также оценка гидравлических сопротивлений в зависимости от перепада давления и скорости подачи рабочей жидкости.

Ключевые слова: численное моделирование, гидродинамическая нагрузка, многосекционный теплообменный аппарат, раздающий коллектор

1. Введение

Теплообменные аппараты (ТА) сложной геометрии широко распространены в нефтехимической промышленности, в металлургии, энергетике, в системах отопления, на компрессорных станциях и тепловых электростанциях. Исследованию гидродинамики ТА посвящено большое количество научных публикаций, например [1–5]. Конструкция теплообменников во многом зависит от их назначения. Во многих случаях они выполняются в виде сложных коллекторных систем, гидродинамические особенности которых напрямую влияют на работу устройства. Гидравлическая неравномерность в таких ТА может нарушить температурный режим, значительно увеличить сопротивление и снизить тепловую эффективность [6]. Вопросы гидродинамики коллекторных систем рассматриваются в работах [2, 7–9]. В [2] рассмотрена гидродинамика типовых раздающих коллекторных систем. В работе [7] рассмотрена исследуемая коллекторная система в полном сборе без учета микроканалов, проводится оценка гидродинамических характеристик раздающего и собирающего коллекторов. В работах [8–10] рассмотрены методы численного и аналитического решения задач о стационарном течении вязкой несжимаемой жидкости.

Рассматриваемый в настоящей работе многосекционный теплообменный аппарат включает в себя раздающий коллектор, который является объектом исследования, и принимающий коллектор. Общая схема теплообменника приведена на рис. 1 а. Коллекторы соединены между собой набором из 8 параллельных идентичных секций, расположенных поперек каналов подвода и отвода рабочей жидкости. Каждая секция содержит 6 микроканалов,

внутреннее оребрение которых выполнено в виде симметричных трапеций с узкой верхней кромкой (рис. 1 *з*).

Несмотря на большое количество работ, посвященных гидродинамике внутренних процессов коллекторных систем, ввиду постоянной технической модернизации данного класса оборудования, работы, относящиеся к численному моделированию сложных многоканальных коллекторов нетиповых конструкций, требуют проведения новых исследований.

2. Постановка задачи

В работе исследуется составная часть ТА – раздающий 8-секционный коллектор, по которому прогоняется рабочая жидкость с диапазоном скоростей 0,1–2 м/с. Многосекционный раздающий коллектор в полной сборке представлен на рис. 1 *а*. Канал подвода рабочей жидкости выполнен в виде трубы круглого сечения с диаметром $d = 0,0274$ м, каналы отвода сгруппированы в 8 секций, каждая из которых содержит по шесть микроканалов с внутренним оребрением (рис. 1 *з*).

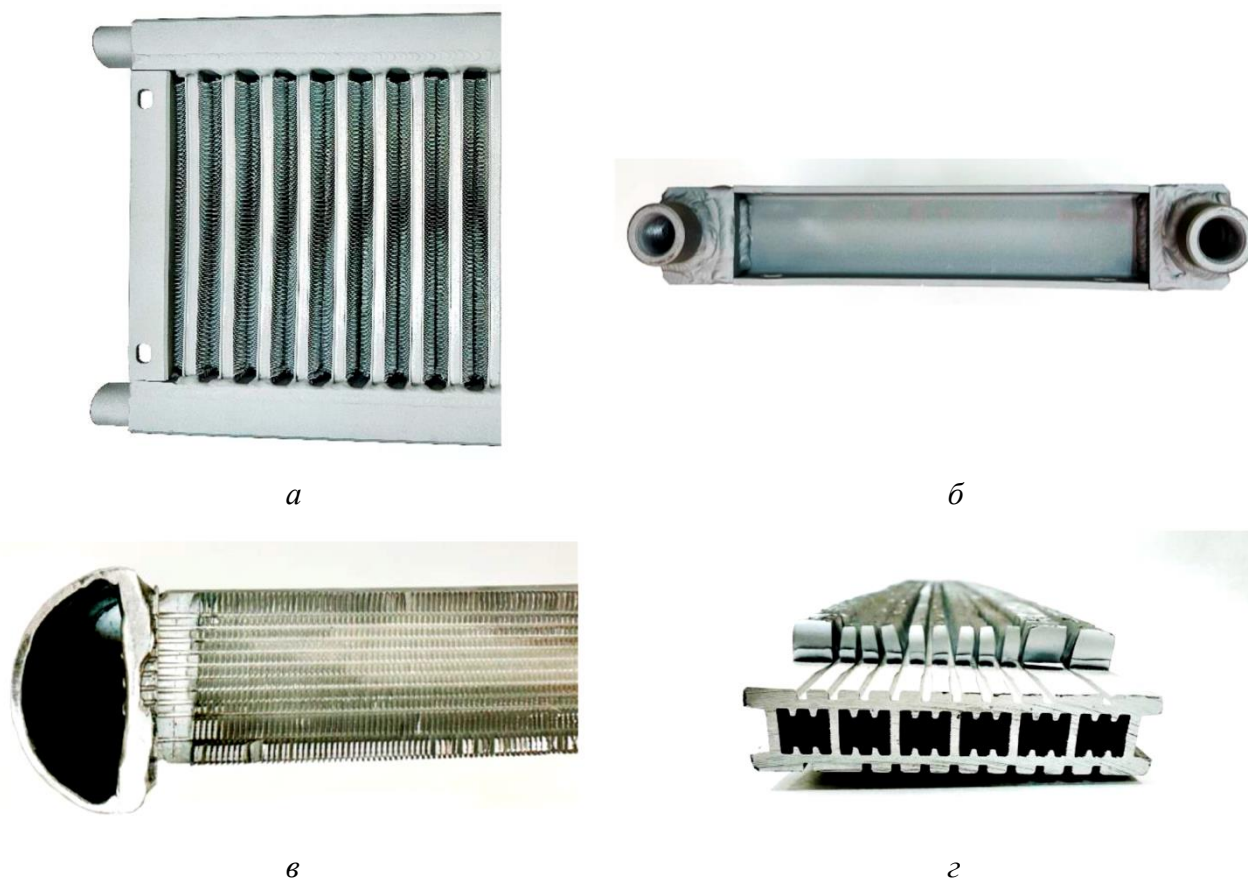


Рис. 1. Многосекционный коллектор: общая схема гидравлической модели (*а*); каналы подвода и отвода рабочей жидкости (полная сборка) (*б*); геометрия входа в раздающий коллектор (*в*); внутренняя геометрия выпускных микроканалов (*з*)

На рис. 2 изображена расчетная схема раздающего многосекционного коллектора. Расчетная сетка построена с использованием модуля для построения сеток Mesh в свободно распространяемом пакете Salome и импортирована в пакет openFOAM для дальнейшего численного моделирования. Сетка содержит 6 млн тетраэдральных элементов для 8-секционного раздающего коллектора. Визуализация данных проводилась в пакете ParaView.

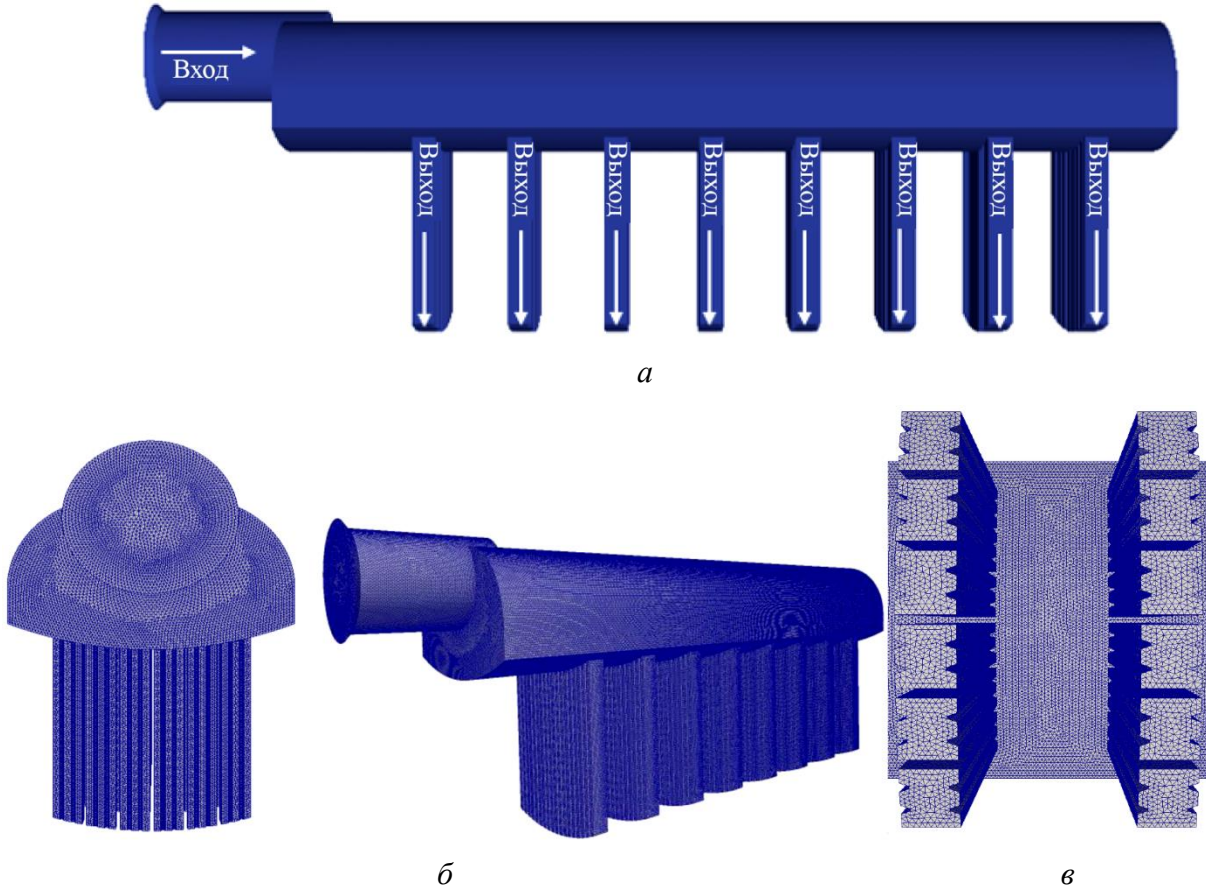


Рис. 2. Расчетная схема многосекционного теплообменного аппарата: схема подвода и отвода рабочей жидкости (а); расчетная сетка раздающего коллектора (б); геометрия микроканалов (в)

Граничные условия, используемые при численном моделировании в пакете openFOAM:

- на входе подача рабочей жидкости со скоростями 0,1–2 м/с с шагом 0,5 м/с;
- на выходе избыточное давление 0 Па;
- на стенках условие прилипания.

Математическая модель основана на системе уравнений Навье–Стокса. При построении математической модели использовались следующие допущения: течение ламинарное, стационарное, жидкость несжимаемая, вязкость рабочей жидкости постоянная, шероховатость материала не учитывается:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2)$$

где u_i – компоненты вектора скорости ϑ , p – избыточное давление, отнесенное к плотности жидкости, ν – кинематический коэффициент вязкости, i, j – индексы, принимающие значения 1, 2, 3.

3. Результаты численного моделирования

Расчет числа Рейнольдса в диапазоне скоростей 0,1–2 м/с представлен в табл. 1. Характеристики жидкости и скорость потока позволяют моделировать движение в ламинарной постановке. Расчет проводился по эквивалентному диаметру входа в коллектор $d = 0,0274$ м, динамической вязкости и плотности рабочей жидкости $\mu = 0,295$ Па·с, $\rho = 897$ кг/м³:

$$Re_{\theta} = \frac{\rho \cdot |\theta| \cdot d}{\mu},$$

$$Re_{0,1} = \frac{897 \cdot 0,1 \cdot 0,0274}{0,0295} = 83,$$

$$Re_{0,5} = \frac{897 \cdot 0,5 \cdot 0,0274}{0,0295} = 417,$$

$$Re_1 = \frac{897 \cdot 1 \cdot 0,0274}{0,0295} = 833,$$

$$Re_{1,5} = \frac{897 \cdot 1,5 \cdot 0,0274}{0,0295} = 1250,$$

$$Re_2 = \frac{897 \cdot 2 \cdot 0,0274}{0,0295} = 1666.$$

Таблица 1

Зависимость числа Рейнольдса от скорости подачи рабочей жидкости

V	0,1 м/с	0,5 м/с	1 м/с	1,5 м/с	2 м/с
Re	83	417	833	1250	1666

На рисунке 3 слева представлены изоповерхности модуля скорости в многосекционном раздающем коллекторе при различных значениях скорости на входе, а справа приведены профили скорости на входе в микроканалы. По геометрическому строению ядра течения рабочей жидкости, представленному в виде изоповерхностей скоростного поля, можно оценить неравномерность структуры течения. Параболический профиль скорости в коллекторе, характерный для ламинарного течения, наблюдается при скорости подачи жидкости 0,1 м/с. Начиная со скорости 0,5 м/с структура потока становится волнообразной, реагируя на многоканальную многосекционную конструкцию ТА. Явной гидравлической закупорки каналов не наблюдается, что видно по профилям скоростей на входе в микроканалы (рис. 3 справа).

Работа коллекторной системы оценивалась по равномерности входных профилей в микроканалы. При $V = 0,1$ м/с наблюдается более равномерное распределение потока по секциям, скорость подачи в секции не превышает 0,07 м/с, что обусловлено низким расходом на входе. Увеличение расхода рабочей жидкости при скорости $V = 0,5$ м/с на входе приводит к неравномерному распределению скоростей в микроструях. Максимальный расход наблюдается в 5-й секции и соответствует максимуму скорости 0,4 м/с. Волновая структура течения в коллекторе приводит к трансформации гидравлической нагрузки секций и микроканалов. Расход жидкости в первых трех секциях снижается. При входной скорости потока $V = 1$ м/с возрастает работа секций с 4-й по 8-ю, максимальный пик расхода также наблюдается в 5-й секции. Аналогичное распределение гидравлической нагрузки наблюдается для скоростей 1,5 м/с и 2 м/с. В последнем случае можно отметить локальный минимум скорости в 7-й секции.

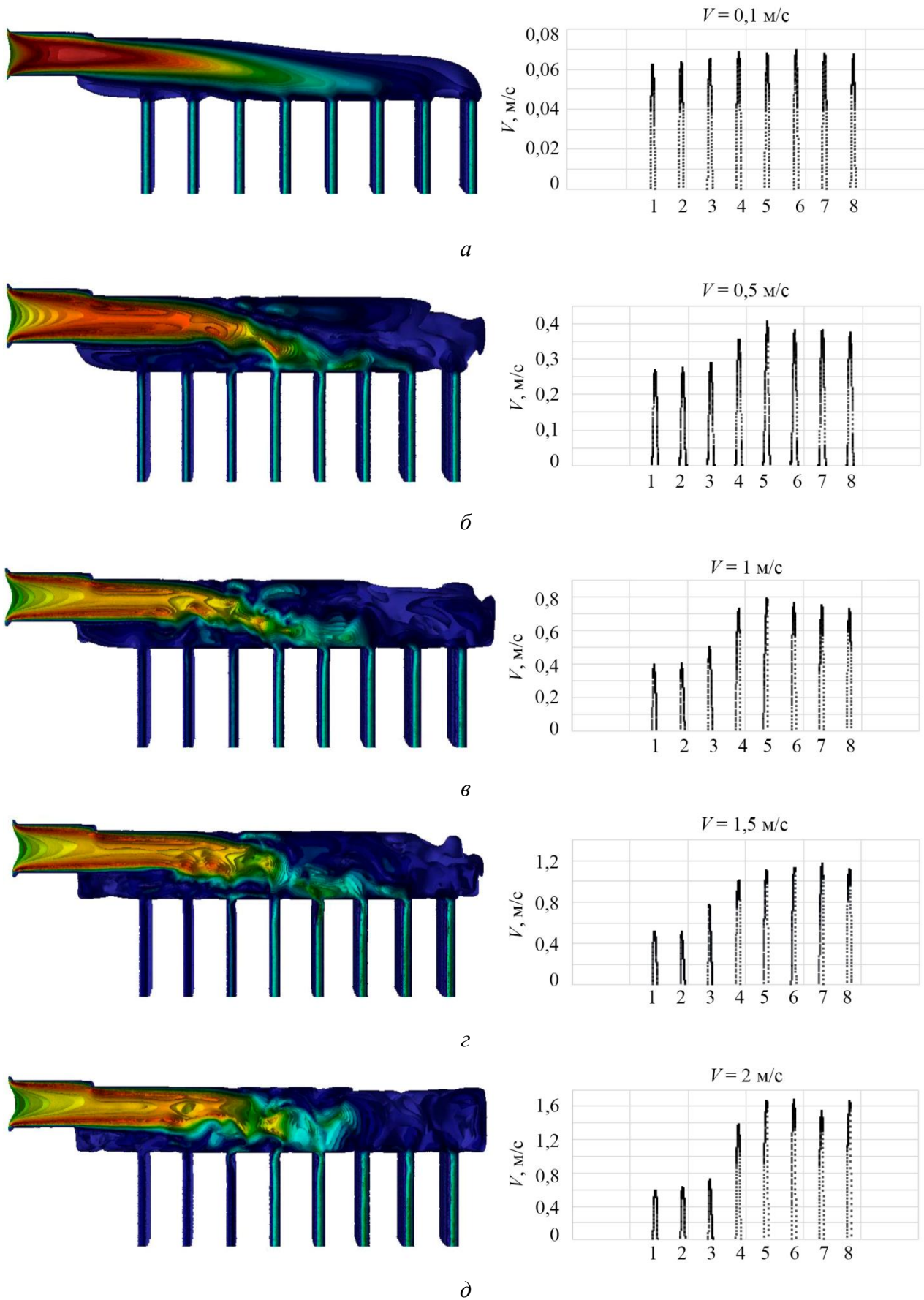


Рис. 3. Гидродинамическая нагрузка многосекционного ТА:
0,1 м/с (а); 0,5 м/с (б); 1 м/с (в); 1,5 м/с (г); 2 м/с (д)

Анализ местных гидравлических сопротивлений раздающего коллектора проводился по формуле Вейсбаха–Дарси [11], по данным численного моделирования, теоретические значения гидравлических сопротивлений получены согласно широко распространенному справочнику по гидравлическим сопротивлениям [12], данные занесены в таблицу 2.

Таблица 2

Гидравлические сопротивления раздающего коллектора

Параметр	Скорость, м/с				
	0,1 м/с	0,5 м/с	1 м/с	1,5 м/с	2 м/с
Δp , Па	95,789	201,026	450,873	747,175	1141,062
$\zeta_{\text{числ}}$	4,485	1,792	1,005	0,740	0,636
$\zeta_{\text{теор}}$ [12]	2,598	2,427	2,353	2,317	2,295
ε ,	72,6	26,2	57,3	68,1	72,3

В таблице 2 ε – оценка относительной погрешности расчета $\zeta_{\text{числ}}$ и $\zeta_{\text{теор}}$, которая проводилась по формуле

$$\varepsilon = \frac{|\zeta_{\text{теор}} - \zeta_{\text{числ}}|}{\zeta_{\text{теор}}} \cdot 100 \%$$

Полученные результаты $\zeta_{\text{числ}}$ и $\zeta_{\text{теор}}$ не согласуются, что связано с нетиповой конструкцией исследуемого раздающего коллектора, и указывают на необходимость разработки новых методик расчета гидравлических сопротивлений.

3. Заключение

В работе рассматривались вопросы численного моделирования гидродинамики многосекционного теплообменного аппарата с использованием инструментов пакета с открытым исходным кодом OpenFOAM. Анализ гидродинамической нагрузки многосекционного ТА позволил оценить влияние входной скорости на работу микроканалов. Выявлено, что при скорости жидкости более 0,5 м/с снижается нагрузка первых трех секций устройства, что необходимо учитывать при анализе тепловой эффективности ТА. Согласно полученным данным, потери давления возрастают с ростом скорости подачи рабочей жидкости. Гидравлические сопротивления, полученные численным и теоретическим методами, снижаются, однако плохо согласуются между собой. Это указывает на явную необходимость в доработке методик расчета гидравлических сопротивлений, ориентированных на конкретную конструкцию ТА.

Литература

1. Филиппов Г. Ф., Меламед Л. Э., Тропкина А. И. Иерархия моделей анализа коллекторных систем и макромасштабный анализ // Проблемы энергетики. – 2010. – № 5–6. – С. 3–17.
2. Дельнов В. Н. Гидродинамика типичных раздающих коллекторных систем // Вопросы атомной науки и техники. серия: ядерно-реакторные константы. – 2020. – № 4. – С. 116–128. – DOI: 10.55176/2414-1038-2020-4-116-128.
3. Габрианович Б. Н., Дельнов В. Н. Гидродинамика коллекторных систем ядерных энергетических установок // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 2007. – № 1. – С. 113–121.
4. Габрианович Б. Н., Дельнов В. Н., Юрьев Ю. С. Особенности течения теплоносителя в раздающих коллекторных системах реакторов ЯЭУ с жидкометаллическим охлаждением // Труды 3 межотрасл. конф. ТЖМТ–2008 «Тяжелые жидкометаллические теплоносители

- в ядерных технологиях», Обнинск, 15–19 сентября, 2008 : в 2-х т. – Обнинск : ГНЦ РФ-Физико-энергетический ин-т им. А. И. Лейпунского, 2010. – Т. 2.
5. Дубоносов А. Ю., Гапоненко А. М. Гидродинамика входных цилиндрических коллекторов теплообменных аппаратов теплоэнергетических установок. – Краснодар : Изд. Дом-Юг, 2013. – 124 с.
 6. Быстров П. И., Михайлов В. С. Гидродинамика коллекторных теплообменных аппаратов. – М. : Энергоиздат, 1982. – 223 с.
 7. Королева М. Р., Терентьев А. Н., Чернова А. А. Гидродинамика коллектора сложной формы // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. – 2021. – № 3 (58). – С. 50–55.
 8. Лунина С. В., Дельнов В. Н. Тестовые расчеты гидродинамики раздающих коллекторных систем теплообменников и реакторов // Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-реакторные константы». – 2020. – № 4. – С. 129–137. – DOI: 10.55176/2414-1038-2020-4-129-137.
 9. Baimetova E. S., Koroleva M. R. Research of conjugate heat transfer in a collector of a complex shape of an external fins // XXI International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR 2022), Novosibirsk, August 08–14, 2022 : abstracts. – С. 1–14. – DOI: 10.53954/9785604788967_13.
 10. Optimization of the developed outer surface of an industrial oil cooler / E. S. Baymetova, A. A. Chernova, M. R. Koroleva, M. Kelemen // MM Science Journal. – 2021. – Vol. 2021, No. June. – P. 4764–4768. – DOI: 10.17973/MMSJ.2021_10_2021027.
 11. Гидравлика: учебник и практикум для среднего профессионального образования / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, А. Г. Коваленко, И. В. Кудинов / под ред. В. А. Кудинова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Издательство Юрайт, 2023. – 386 с.
 12. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – Москва : Машиностроение, 1992. – 671 с.

Received: 07.04.2023

Revised: 20.06.2023

Accepted: 25.08.2023



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.015-028



SOME PROBLEMS OF HEAT AND MASS TRANSFER DURING THE OPERATION OF ENGINEERING SYSTEMS IN MULTIPHASE ENVIRONMENTS

M. Yu. Filimonov^{1, 2, a), *} and N. A. Vaganova^{1, 2, b)}

¹*N. N. Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics, Ural Branch of RAS,
 16 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russia*

²*Ural Federal University, 19 Mira St., Ekaterinburg, 620002, Russia*

a)  <https://orcid.org/0000-0002-9561-5416>  fmy@imm.uran.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0001-6966-9050>  vna@imm.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: fmy@imm.uran.ru

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 16, Ekaterinburg, 620108, Russia

Tel.: +7 (343) 375-3480

Three types of problems related to problems of heat and mass transfer in the soil are considered. The first class of problems deals with the diagnostics of damage of underground pipelines by thermal fields on the soil surface. The second type studies the dynamics of changes in the temperature of a geothermal reservoir depending on the temperature of the water entering this reservoir and the pressure gap between injection and production wells. The third-type problems consider the propagation of non-stationary thermal fields in the soil from operated engineering systems in the permafrost. The main attention is paid to long-term forecasting of the propagation of non-stationary thermal fields in the frozen soil between operating production wells of northern oil and gas fields. In problems of the first two classes, which served as a basis for the development of problems of the third type, water filtration in the soil is considered, and thermal fields propagate in single-phase media. The third-class problems take into account possible phase transitions in the soil when describing non-stationary thermal fields in permafrost soils, leading to Stefan-type problems. Accounting for water migration for the specific third-type problems on the determination of the radius of frozen soil thawing from production wells in northern oil and gas fields does not significantly affect this process since lateral water migration above the groundwater level is minimal. Therefore, only the latent heat of the initial water content is taken into consideration. This paper discusses a mathematical model containing the most significant physical and climatic data affecting the distribution of thermal fields in permafrost rocks and presents the results of numerical calculations.

Keywords: heat and mass transfer, wells, permafrost, computer modelling

Acknowledgment

The Uran supercomputer, IMM UB RAS, was used in the numerical calculations.

References

1. Obu, J., Westermann, S., Bartsch, A., Berdnikov, N., Christiansen, H.H., Dashtseren, A., Delaloye, R., Elberling, B., Etzelmüller, B., Kholodov, A., Khomutov, A., Käab, A., Leibman, M.O., Lewkowicz, A.G., Panda, S.K., Romanovsky, V., Way, R.G., Westergaard-Nielsen, A., Wu, T., Yamkhin, J., and Zou, D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale. *Earth-Science Reviews*, 2019, 193, 136–155. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
2. Obu, J. How much of the Earth's surface is underlain by permafrost? *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2021, 126, e2021JF006123. DOI: 10.1029/2021JF006123.

3. Romanovsky, V.E., Drozdov, D.S., Oberman, N.G., Malkova, G.V., Kholodov, A.L., Marchenko, S.S., Moskalenko, N.G., Sergeev, D.O., Ukraintseva, N.G., Abramov, A.A., Gilichinsky, D.A., and Vasiliev, A.A. Thermal state of permafrost in Russia. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2010, 21, 136–155. DOI: 10.1002/ppp.683.
4. Nitzbon, J., Westermann, S., Langer, M., Martin, Léo C.P., Strauss, J., Laboor, S., and Boike, J. Fast response of cold ice-rich permafrost in northeast Siberia to a warming climate. *Nature Communications*, 2020, 11, 2201. DOI: 10.1038/s41467-020-15725-8.
5. Vaganova, N. and Filimonov, M.Yu. Different shapes of constructions and their effects on permafrost. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1789, 020019. DOI: 10.1063/1.4968440.
6. Gladkikh, V.S., Ilin, V.P., Petukhov, A.V., and Krylov, A.M. Numerical modeling of non-stationary heat problems in a two-phase medium. *Journal of Physics: Conference Series*, 2021, 1715 (1), 012002. DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012002.
7. Wu, Q., Zhang, Z., Gao, S., and Ma, W. Thermal impacts of engineering activities on permafrost in different alpine ecosystems in Qinghai-Tibet Plateau, China. *The Cryosphere*, 2016, 10, 1695–1706. DOI: 10.5194/tc-10-1695-2016.
8. Schneider von Deimling, T., Lee, H., Ingeman-Nielsen, T., Westermann, S., Romanovsky, V., Lamoureux, S., Walker, D.A., Chadburn, S., Trochim, E., Cai, L., Nitzbon, J., Jacobi, S., and Langer, M. Consequences of permafrost degradation for Arctic infrastructure – bridging the model gap between regional and engineering scales. *The Cryosphere*, 2021, 15, 2451–2471. DOI: 10.5194/tc-15-2451-2021.
9. Nelson, F.E., Anisimov, O.A., and Shiklomanov, N.I. Subsidence risk from thawing permafrost. *Nature*, 2001, 410 (6831), 889–890. DOI: 10.1038/35073746.
10. Pepin, N., Bradley, R.S., Diaz, H.F., Baraer, M., Caceres, E.B., Forsythe, N., Fowler, H., Greenwood, G., Hashmi, M.Z., Liu, X.D., Miller, J.R., Ning, L., Ohmura, A., Palazz, E., Rangwala, I., Schöner, W., Severskiy, I., Shahgedanova, M., Wang, M.B., Williamson, S.N., and Yang, D.Q. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world. *Nature Climate Change*, 2015, 5, 424–430. DOI: 10.1038/nclimate2563.
11. Guo, D. and Wang, H. CMIP5 permafrost degradation projection: a comparison among different regions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121 (9), 4499–4517. DOI: 10.1002/2015JD024108.
12. Guo, D. and Wang, H. Permafrost degradation and associated ground settlement estimation under 2°C global warming. *Climate Dynamics*, 2017, 49, 2569–2583. DOI: 10.1007/s00382-016-3469-9.
13. Chadburn, S.E., Burke, E.J., Cox, P.M., Friedlingstein, P., Hugelius, G., and Westermann, S. An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming. *Nature Climate Change*, 2017, 7, 340–344. DOI: 10.1038/nclimate3262.
14. Wang, K., Zhang, T., Zhang, X., Clow, G.D., Jafarov, E.E., Overeem, I., Romanovsky, V., Peng, X., and Cao, B. Continuously amplified warming in the Alaskan Arctic: implications for estimating global warming hiatus. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44, 9029–9038. DOI: 10.1002/2017GL074232.
15. Vasiliev, A.A., Drozdov, D.S., Gravis, A.G., Malkova, G.V., Nyland, K.E., and Streletskiy, D.A. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. *Environmental Research Letters*, 2020, 15, 045001. DOI: 10.1088/1748-9326/ab6f12.
16. Alexandrov, G.A., Ginzburg, V.A., Insarov, G.E., and Romanovskaya, A.A. CMIP6 model projections leave no room for permafrost to persist in Western Siberia under the SSP5-8.5 scenario. *Climatic Change*, 2021, 169 (3), 1–11. DOI: 10.1007/s10584-021-03292-w.
17. Biskaborn, B.K., Smith, S.L., Noetzli, J., et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019, 10 (1), 264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
18. Moiseev, V., Komarova, T., and Petryaev, A. Year-round thermal stabilization of permafrost soils during road construction in the northern climatic zone of Russia. *E3S Web Conf.*, 2023, 383, 02010. DOI: 10.1051/e3sconf/202338302010.

19. Vaganova, N.A. and Filimonov, M.Yu. Simulation of cooling devices and effect for thermal stabilization of soil in a cryolithozone with anthropogenic impact. *Lecture Notes in Computer Science*, 2019, 11386, 580–587. DOI 10.1007/978-3-030-11539-5_68.
20. Vaganova, N.A. Mathematical model of testing of pipeline integrity by thermal fields. *AIP Conference Proceedings*, 2014, 1631, 37–41. DOI 10.1063/1.4902455.
21. Vaganova, N.A. Simulation of thermal fields from an underground pipeline at the ground surface. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1910, 020005. DOI 10.1063/1.5013942.
22. Vaganova, N.A. and Filimonov, M.Yu. Numerical analysis and diagnostics of pipelines by thermal fields. *AIP Conference Proceedings*, 2020, 2312, 050026. DOI: 10.1063/5.0035412.
23. Bashurov, V.V., Vaganova, N.A., and Filimonov, M.Yu. Numerical Simulation of Thermal Conductivity Processes with Fluid Filtration in Soil. *Vychislitelnye Tekhnologii*, 2011, 16 (4), 3–18. (In Russian).
24. Vaganova, N. and Filimonov, M.Yu. Refinement of model of an open geothermal system. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1789, 020020. DOI: 10.1063/1.4968441.
25. Filimonov, M.Yu., Akimova, E.N., Misilov, V.E., and Vaganova, N.A. Numerical simulation of temperature fields in an open geothermal system on multicore processors. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 2022, 8 (2), 76. DOI: 10.1007/s40948-022-00386-2.
26. Filimonov, M.Yu. and Vaganova, N.A. Optimal simulation of design and operation of geothermal systems. In: Y. Noorollahi, M.N. Naseer, M.M. Siddiqi, eds. *Utilization of Thermal Potential of Abandoned Wells: Fundamentals, Applications and Research*, Academic Press, 2022, 3, 35–57. DOI: 10.1016/B978-0-323-90616-6.00003-8.
27. Kamnev, Ya.K., Filimonov, M.Yu., Shein, A.N., and Vaganova, N.A. Automated monitoring the temperature under buildings with pile foundations in Salekhard (preliminary results). *Geography, Environment, Sustainability*, 2021, 14 (4), 75–82. DOI: 10.24057/2071-9388-2021-021.
28. Filimonov, M.Yu., Kamnev, Ya.K., Shein, A.N., and Vaganova, N.A. Modeling the temperature field in frozen soil under buildings in the city of Salekhard taking into account temperature monitoring. *Land*, 2022, 11 (7), 1102. DOI: 10.3390/land11071102.
29. Filimonov, M.Yu. and Vaganova N.A. Thawing of permafrost during the operation of wells of North-Mukerkamyl oil and gas field. *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics*, 2021, 14 (6), 795–804. DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-6-795-804.
30. Filimonov, M. and Vaganova, N. Permafrost thawing from different technical systems in Arctic regions. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017, 72, 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012006.
31. Samarskii, A.A. and Moiseyenko, B.D. An economic continuous calculation scheme for the Stefan multidimensional problem. *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 1965, 5 (5), 43–58. DOI: 10.1016/0041-5553(65)90004-2.
32. Samarsky, A.A. and Vabishchevich, P.N. *Computational Heat Transfer, Vol. 2: The Finite Difference Methodology*, Wiley, New York, Chichester, 1995, 432 p.
33. Lamontagne-Hallé, P., McKenzie, J.M., Kurylyk, B.L., Molson, J., and Lyon, L.N. Guidelines for cold-regions groundwater numerical modeling. *WIREs Water*, 2020, 7 (6). DOI: 10.1002/wat2.1467.
34. Yang, X., Hu, J., Ma, R., and Sun, Z. Integrated hydrologic modelling of groundwater-surface water interactions in cold regions. *Front. Earth Sci.*, 2021, 9, 721009. DOI: 10.3389/feart.2021.721009.
35. Hinkel, K.M., Outcalt, S.I., and Taylor, A.E. Seasonal patterns of coupled flow in the active layer at three sites in northwest north America. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 1997, 34 (5), 667–678. DOI: 10.1139/e17-053.
36. Kurylyk, B.L. and Watanabe, K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils. *Advances in Water Resources*. 2013, 60, 160–177. DOI: 10.1016/j.advwatres.2013.07.016.

37. Kurylyk, B.L., Hayashi, M., Quinton, W.L., McKenzie, J.M., and Voss, C.I. Influence of vertical and lateral heat transfer on permafrost thaw, peatland landscape transition, and groundwater flow. *Water Resources Research*, 2016, 52, 20, 1286–1305. DOI: 10.1002/2015WR018057.
38. Magnússon, R.Í., Hamm, A., Karsanaev, S.V., Limpens, J., Kleijn, D., Frampton, A., Maximov, T.C., and Heijmans, M.M.P.D. Extremely wet summer events enhance permafrost thaw for multiple years in Siberian tundra. *Nature Communications*, 2022, 13, 1556. DOI: 10.1038/s41467-022-29248-x.
39. Painter, S.L., Karra, S. Constitutive model for unfrozen water content in subfreezing unsaturated soils. *Vadose Zone Journal*, 2014, 13 (4), 1–8. DOI: 10.2136/vzj2013.04.0071.
40. Sjöberg, Y., Coon, E., Sannel, A.B.K.R., Pannetier, R., Harp, D., Frampton, A., Painter, S.L., and Lyon, S.W. Thermal effects of groundwater flow through subarctic fens: a case study based on field observations and numerical modeling. *Water Resources Research*, 2016, 52 (3), 1591–1606. DOI: 10.1002/2015WR017571.
41. Orgogozo L., Prokushkin A.S., Pokrovsky, O.S., Grenier, C., Quintard, M., Viers, J., Audry, S. Water and energy transfer modelling in a permafrost-dominated, forested catchment of Central Siberia: the key role of rooting depth. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2019, 30, 75–89. DOI: 10.1002/ppp.1995.
42. Sergeyev F., Kiselyov, F. Iterative refinement of the boundary condition in the numerical solution of the thermoelasticity problem. In: P. Akimov, N. Vatin, eds. *Proceedings of FORM 2021, Series Lecture Notes in Civil Engineering*, Springer, Cham, 2022, 170, 329–338. DOI: 10.1007/978-3-030-79983-0_31.



Подана в журнал: 07.04.2023
УДК 551.34, 536.5, 519.68
DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.015-028



НЕКОТОРЫЕ ЗАДАЧИ ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ В МНОГОФАЗНЫХ СРЕДАХ

М. Ю. Филимонов^{1, 2, а), *}, Н. А. Ваганова^{1, 2, б)}

¹Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Софьи Ковалевской, 16, г. Екатеринбург, 620108, Россия

²Уральский федеральный университет,
ул. Мира 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия

^{а)}  <https://orcid.org/0000-0002-9561-5416>  fmy@imm.uran.ru;

^{б)}  <https://orcid.org/0000-0001-6966-9050>  vna@imm.uran.ru

* Ответственный автор. Электронная почта: fmy@imm.uran.ru

Адрес для переписки: ул. Софьи Ковалевской, 16, г. Екатеринбург, 620108, Россия
Тел.: 8 (343) 375-34-80

Рассматриваются три типа задач, связанных с задачами тепломассопереноса в грунте. Первый класс задач связан с диагностикой повреждений подземных трубопроводов по тепловым полям на поверхности грунта. Второй тип задач посвящен исследованию динамики изменения температуры геотермального резервуара в зависимости от температуры воды, поступающей в этот резервуар, и перепада давлений между нагнетательными и добывающими скважинами. Третий класс задач посвящен изучению распространения нестационарных тепловых полей в грунте от эксплуатируемых технических систем в районе распространения вечной мерзлоты. Основное внимание уделено долгосрочному прогнозированию распространения нестационарных тепловых полей в мерзлом грунте между работающими добывающими скважинами северных нефтегазовых месторождений. В первых двух классах задач, которые послужили основой для разработки задач третьего типа, учитывается фильтрация жидкости в грунте, а тепловые поля распространяются в однофазных средах. В третьем классе задач учитываются возможные фазовые переходы в грунте при описании нестационарных тепловых полей в многолетнемерзлых грунтах, приводящих к задачам типа Стефана. Учет миграции жидкости для конкретных рассматриваемых задач третьего типа, связанных с определением радиуса оттаивания мерзлого грунта от добывающих скважин на северных нефтегазовых месторождениях, не оказывает существенного влияния на этот процесс, поскольку боковая миграция воды выше уровня грунтовых вод минимальна. Поэтому учитывается только скрытая теплота начального содержания воды. В предложенной работе рассматривается математическая модель, содержащая наиболее существенные физические и климатические данные, влияющие на распространение тепловых полей в многолетнемерзлых породах, приводятся результаты численных расчетов.

Ключевые слова: тепломассоперенос, скважины, вечная мерзлота, компьютерное моделирование

1. Введение

Вечная мерзлота занимает около четверти от общей площади Северного полушария [1, 2]. В России более 60 % территории занимает криолитозона [3], в которой добывается 93 % природного газа и 75 % нефти. Потенциальные запасы углеводородов здесь оцениваются в 90 миллиардов баррелей нефти и 47,3 триллиона кубических метров природного газа (13 и 30 % неоткрытых мировых запасов). Толщина многолетнемерзлых пород (ММП)

в криолитозоне изменяется от 10 до 800 метров. Таяние вечной мерзлоты из-за глобального потепления или различных воздействий, связанных с деятельностью человека, будет сопровождаться оседанием поверхности земли и развитием криогенных опасных геологических процессов, называемых термокарстом [4–17]. Производство и транспортировка нефти и газа также оказывают существенное влияние на вечную мерзлоту, поскольку теплая нефть нагревает трубы в скважинах и трубопроводах; к деградации вечной мерзлоты могут привести и другие производственные процессы. Поэтому проблема снижения интенсивности тепловых взаимодействий в системе «источник тепла – ММП» имеет особое значение для решения задач энергосбережения, охраны окружающей среды, безопасности, экономии средств и повышения эксплуатационной надежности различных инженерных сооружений. В работе рассматриваются различные модели тепломассопереноса, связанные с описанием распространения нестационарных тепловых полей в грунте от различных технических систем с учетом не только наиболее значимых климатических факторов (сезонные изменения температуры и интенсивности солнечного излучения из-за географического расположения объекта), но и технические особенности строительства эксплуатационных скважин, а также другие типы технических систем, таких как отсыпки, резервуары, трубопроводы, факельные системы, сезоннодействующие охлаждающие устройства [18, 19].

Учет солнечного излучения был использован авторами в задачах, связанных с диагностикой целостности подземных продуктопроводов по тепловым полям на дневной поверхности [20, 21]. При компьютерном моделировании трехмерных тепловых полей от подземного трубопровода в окружающем его грунте учитывались следующие физические факторы: термодиффузионные свойства грунта, неоднородность грунта, возможные повреждения поверхности трубопровода, а также солнечная радиация на дневной поверхности (рис. 1 а). Расчет теплового поля от подземного трубопровода с повреждением теплоизоляции трубопровода приведен на рис. 1 б. Линия АВ на дневной поверхности находится над местом повреждения трубопровода. Алгоритм определения повреждений подземного трубопровода описан в работе [22].

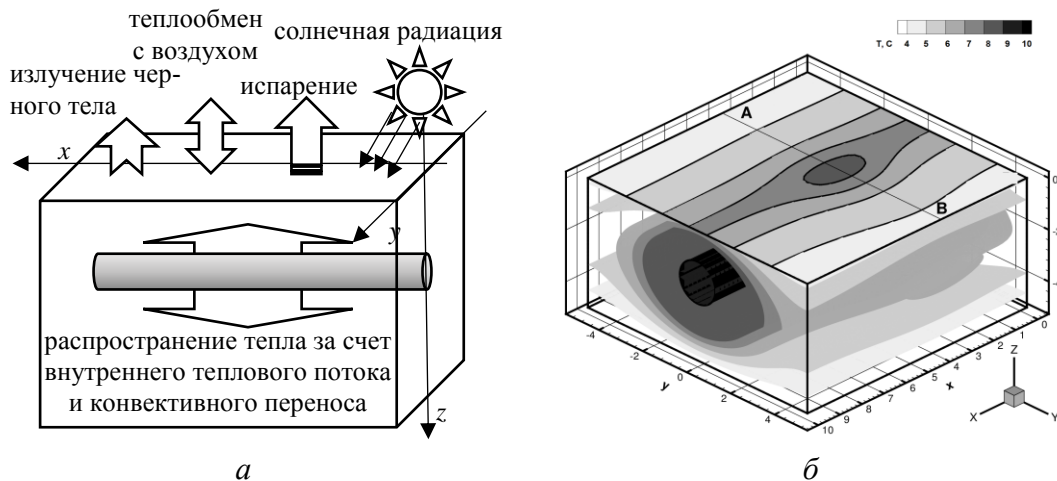


Рис. 1. Основные тепловые потоки в грунте (а); тепловые поля от подземного трубопровода с поврежденной теплоизоляцией (б)

В работе [23] учитывается также и фильтрация жидкости в грунте вдоль оси z .

При моделировании геотермальных задач [24, 25], связанных с добычей горячей воды из геотермального резервуара из добывающей скважины Ω_2 , учитывается фильтрация холодной воды, закачиваемой после использования горячей в скважину Ω_1 (рис. 2).

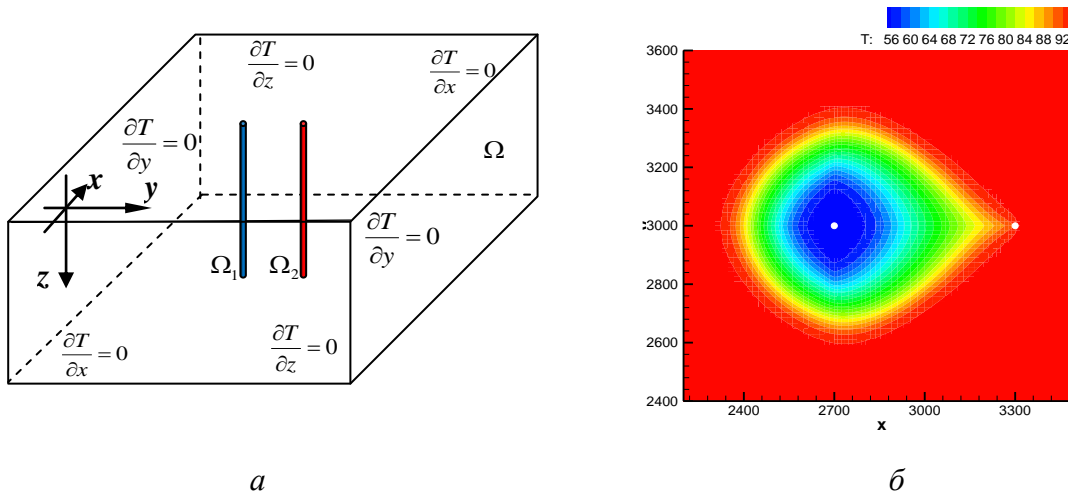


Рис. 2. Схема расчетной области и краевые условия для геотермальной системы (а); температурное поле в геотермальном резервуаре в горизонтальной плоскости xu после 15 лет эксплуатации геотермальной станции, состоящей из двух скважин (б)

Обзор различных геотермальных задач, исследуемых авторами, содержится в главе 3 монографии [26]. Описанные для геотермального резервуара задачи тепломассопереноса не учитывают возможность фазового перехода при замерзании и оттаивания грунта в криолитозоне.

Для моделирования тепловых полей при проведении строительства различных инженерных объектов в зоне ММП следует учитывать вместе с климатическими данными и возможные источники тепла от скважин, трубопроводов, фундаментов сооружений и т. п. Для верификации численных методик используются термометрические скважины, которые позволяют проверить и повысить точность получаемого решения за счет имеющихся параметров [27, 28]. В работе основное внимание уделено описанию моделей распространения нестационарных тепловых полей от эксплуатируемых северных нефтегазовых месторождений. Предложенные модели и численные алгоритмы были опробованы на 15 северных российских нефтяных и газовых месторождениях. Без проведения таких расчетов по долгосрочному прогнозированию распространения тепловых полей в окрестности скважин невозможно начинать эксплуатацию таких месторождений. Важной проблемой применения любых алгоритмов для решения поставленной задачи является адаптация алгоритмов к конкретному географическому месту на основании температурных данных из разведочных скважин. В отличие от ранее использованных подходов в [29, 30], в настоящей работе использован новый способ привязки разработанного алгоритма к конкретной кустовой площадке северного нефтегазового месторождения.

2. Постановка задачи и математическая модель

При обустройстве кустовых площадок для северных нефтегазовых месторождений большое значение имеет точное определение радиуса растепления (положение изотермы фазового перехода) от скважин, поскольку при проектировании кустовой площадки завышенное расстояние между скважинами приводит к существенному увеличению затрат на обустройство кустовых площадок. Существуют нормативные документы, регламентирующие расстояния между скважинами. Для кустовых площадок различных месторождений необходимо в каждом случае рассчитывать радиусы протаивания как для нетеплоизолированных, так и для теплоизолированных конструкций с учетом характеристик мерзлого разреза и температуры флюида. Согласно нормативным документам, расстояние между двумя скважинами не может быть меньше, чем 2 радиуса растепления от одиночной скважины за 25–30 лет

ее эксплуатации. Было показано, что расчет радиуса от одиночной скважины не может гарантировать требуемого расстояния между соседними скважинами, поскольку растепление ММП между двумя соседними эксплуатируемыми добывающими скважинами происходит быстрее, чем растепление от одиночной скважины. Поэтому и требуется рассчитывать радиусы растепления в пространстве между двумя соседними скважинами. Для моделирования тепловых полей в зоне ММП при эксплуатации различных технических систем следует учитывать различные климатические и физические факторы. К первой группе факторов относится учет солнечного излучения, сезонное изменение температуры воздуха, приводящее к периодическому протаиванию (промерзанию) грунта, снежный покров и т. п. Ко второй группе факторов относятся теплофизические параметры грунтов, меняющиеся от влажности, их неоднородность и температура. Для полного моделирования тепловых полей при проведении строительства различных инженерных объектов в зоне ММП дополнительно следует учитывать возможные источники тепла от них и теплофизические параметры применяемой теплоизоляции. Основные тепловые потоки, возникающие при эксплуатации кустовых площадок, приведены на рис. 3.

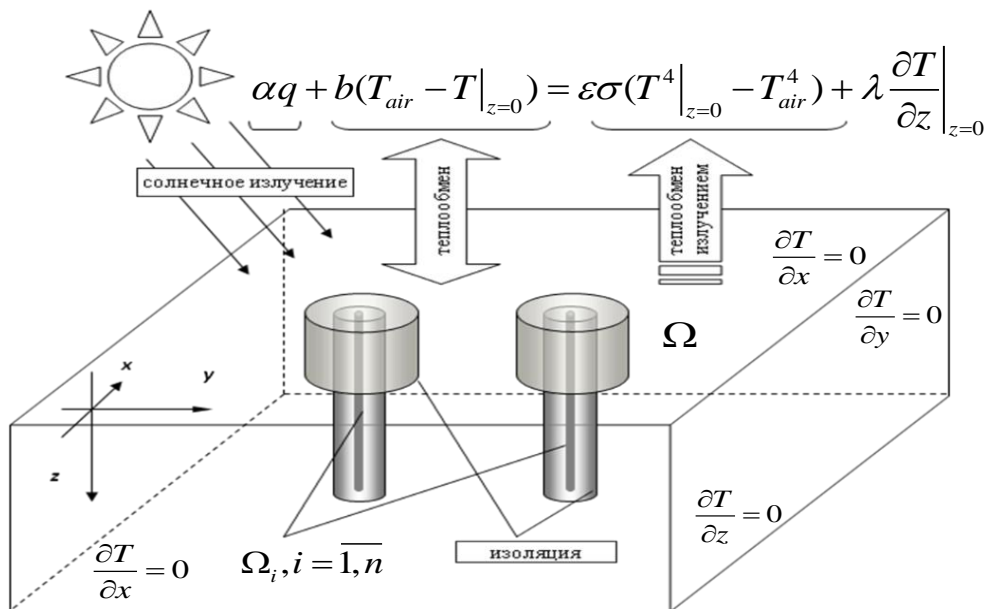


Рис. 3. Основные тепловые потоки и краевые условия двух скважин ($n = 2$)

В качестве основной математической модели для учета излучения от каждой скважины используется уравнение контактной (диффузионной) теплопроводности с неоднородными коэффициентами, включающее локализованную теплоемкость фазового перехода [31, 32]. Такой подход позволяет решать задачу типа Стефана без явного выделения границы фазового перехода. Теплота фазового превращения вводится с применением дельта-функции Дирака δ как сосредоточенная теплоемкость фазового перехода в коэффициент теплоемкости. Получаемая таким образом разрывная функция затем «распределяется» по температуре и не зависит от числа измерений и фаз. В предложенной модели не учитывается миграция жидкости [33–35], которая не будет оказывать существенного влияния на распространение тепловых полей в мерзлом грунте от добывающих скважин, поскольку боковая миграция воды выше уровня грунтовых вод минимальна. Существует множество подходов к решению таких проблем, которые учитывают взаимосвязь между водо- и теплообменом и влияние бокового стока подземных вод [36–41].

Пусть в начальный момент времени $t_0 = 0$ грунт занимает заданный параллелепипед Ω и имеет температуру $T_0(x, y, z)$. Расчетная область представляет собой трехмерный паралле-

лепипед, в котором оси x и y расположены параллельно поверхности грунта, а ось z направлена вниз. Будем считать, что размер области Ω определяется положительными числами L_x, L_y, L_z : $-L_x \leq x \leq L_x, -L_y \leq y \leq L_y, -L_z \leq z \leq 0$. Для моделирования распространения тепла в этом объеме была предложена следующая математическая модель. Пусть $T = T(t, x, y, z)$ – температура грунта в точке (x, y, z) в момент времени t . Основные тепловые потоки, связанные с климатическими факторами, на поверхности грунта $z = 0$ представлены на рис. 3. В качестве граничного условия на поверхности грунта – основной зоне формирования естественных тепловых полей – используется уравнение баланса потоков, приносящих и уносящих энергию, с учетом основных климатических факторов: среднемесячной температуры воздуха и мощности солнечного излучения (в основном в летние месяцы). Через $T_{air}(t)$ обозначена температура воздуха в приповерхностном слое, которая изменяется периодически в соответствии с годичным температурным циклом, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²К⁴) – постоянная Стефана–Больцмана, $b = b(t, x, y)$ – коэффициент теплообмена, $\varepsilon = \varepsilon(t, x, y)$ – коэффициент серости. Коэффициенты теплообмена и серости зависят от типа и состояния поверхности грунта. Суммарная солнечная радиация $q(t)$ состоит из суммы прямой солнечной радиации и рассеянной радиации. Грунтом поглощается только часть суммарной радиации, равной $\alpha q(t)$, где $\alpha = \alpha(t, x, y)$ – доля энергии, ушедшая на нагрев грунта, которая в общем случае зависит от состояния атмосферы, угла падения солнечных лучей, т. е. широты местности и времени суток. Заметим, что солнечное излучение исследователи все чаще начинают учитывать в своих моделях [42], связанных с задачами, возникающими при обустройстве северных нефтегазовых месторождений.

В общем случае моделирование процессов распространения тепла в грунте сводится к решению в области Ω уравнения

$$\rho(c_v(T) + k\delta(T - T^*)) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\lambda(T) \text{grad } T) \quad (1)$$

с учетом начального условия

$$T(0, x, y, z) = T_0(x, y, z). \quad (2)$$

Здесь $\rho = \rho(x, y, z)$ – плотность [кг/м³], $T^* = T^*(x, y, z)$ – температура фазового перехода, $c_v(T)$ – удельная теплоемкость [Дж/(кг·К)],

$$c_y(T) = \begin{cases} c_1(x, y, z) \text{ при } T < T^*, \\ c_2(x, y, z) \text{ при } T > T^*, \end{cases}$$

$\lambda(T)$ – коэффициент теплопроводности [Вт/(м·К)],

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1(x, y, z) \text{ при } T < T^*, \\ \lambda_2(x, y, z) \text{ при } T > T^*, \end{cases}$$

$k = k(x, y, z)$ – теплота фазового перехода, δ – дельта-функция Дирака. Коэффициенты, входящие в уравнение (1), могут меняться в различных точках расчетной области ввиду неоднородности грунта. Обоснование применимости этого уравнения для решения задач типа Стефана приведено в работе [18] и в монографии [19].

Баланс потоков на поверхности грунта $z = 0$ определяет соответствующее нелинейное граничное условие

$$\alpha q + b(T_{air} - T|_{z=0}) = \varepsilon\sigma(T^4 - T_{air}^4) + \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0}. \quad (3)$$

Учет поглощенной и отраженной солнечной энергии в условии (3) является сложной задачей, поскольку при выборе параметров α и ε присутствует много неопределенностей. В идеале для полного количественного описания солнечной радиации, поглощенной и отраженной поверхностью грунта в конкретной географической местности, нужно учитывать много факторов, которые, как правило, неизвестны. Для того чтобы воспользоваться численными методами, необходимо на границах расчетной области Ω задать, например, краевые условия

$$\left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=\pm L_x} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=\pm L_y} = 0, \quad \left. \frac{\partial T}{\partial z} \right|_{z=-L_z} = 0, \quad (4)$$

которые при больших размерах Ω не будут оказывать существенного влияния на получающееся решение. Здесь очень важной задачей является правильное определение размеров L_x и L_y , поскольку с увеличением этих размеров происходит и увеличение числа узлов расчетной сетки, что может привести к нехватке машинной памяти, а при малых числах L_x и L_y краевое условие (4) будет оказывать существенное влияние на результаты численного моделирования (особенно если расстояние между скважинами планируется выбрать минимальным).

Скважины являются источниками тепла, температура которых соответствует температурам находящихся в них флюидов $T_i(t)$. В связи с этим возникают дополнительные условия на поверхности этих объектов:

$$T|_{\Omega_i} = T_i(t), \quad i = 1, \dots, n. \quad (5)$$

Таким образом, для моделирования распространения нестационарных тепловых полей на кустовой площадке нефтегазового месторождения от скважин требуется решить задачу (1)–(5), в которой учтены не только климатические (сезонные изменения температуры и интенсивность солнечного излучения, обусловленные географическим расположением месторождения) и физические (различные теплофизические характеристики неоднородного грунта, меняющиеся со временем) факторы, но и инженерные особенности конструкций скважин, включая различные температуры нефти для добывающих скважин.

3. Численная реализация процесса растепления (промерзания) грунтов на кустовой площадке

В основу численной методики был заложен алгоритм, хорошо зарекомендовавший себя для нахождения тепловых полей от подземных трубопроводов [20, 22], но с учетом специфики, связанной с возможными фазовыми переходами в грунте. Новый механизм привязки алгоритма к конкретному северному месторождению основан на том, что, согласно термометрическим наблюдениям, на глубине 10 метров температура грунта практически не зависит от сезонных изменений температуры воздуха и известен промежуток ее изменения в течение года. В соответствии с этими данными подбираются начальные условия таким образом, чтобы на глубине 10 метров примерно выполнялось условие нахождения расчетной температуры в заданном промежутке изменения температуры на основе данных термометрической скважины. Обычно для этого достаточно 4–5 расчетов для различных начальных условий. Эти расчеты температур целесообразно проводить вблизи границы расчетной области в первые годы начала эксплуатации кустовой площадки, пока влияние от скважин не сказывается на распределении температуры на границе расчетной области.

Был разработан комплекс программ по моделированию распространения нестационарных тепловых полей и определению радиусов растепления в мерзлом грунте от добывающих скважин, расположенных на северных нефтегазовых месторождениях. Ниже приведены результаты численных расчетов для трех добывающих скважин. Выбиралась следующая расчетная область: 70 м (по оси x) \times 50 м (по оси y) \times 40 м (по оси z). Сетка состояла из

$251 \times 151 \times 101 = 3828001$ узлов. Месяцем начала эксплуатации скважин выбирался октябрь. Оси трех скважин расположены соответственно на отметках 20, 40 и 50 м. Рабочая площадка, на которой располагались скважины, имеет сверху отсыпку толщиной 2 метра (бетонные плиты и песок).

Температура флюида в скважинах считается равной $+25$ °С. Результаты численных расчетов представлены на рис. 4. Полученные тепловые поля иллюстрируют картину растепления ММП в процессе эксплуатации трех скважин в течение 5 и 15 лет соответственно.

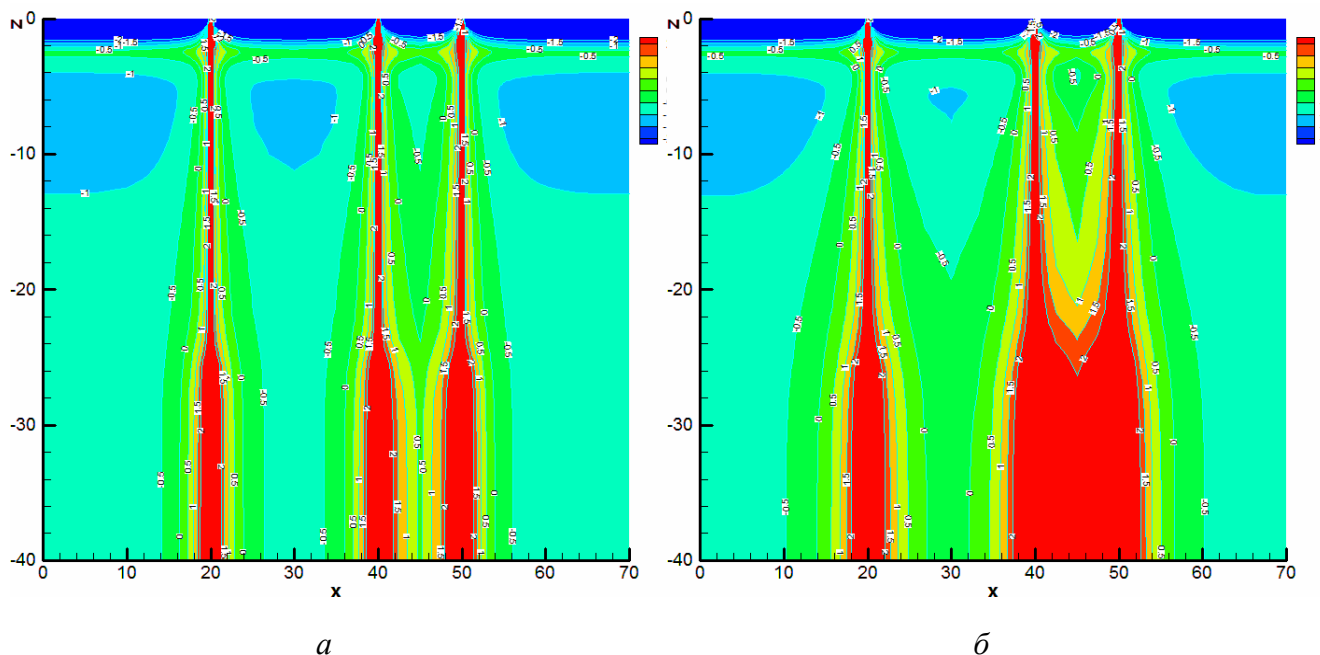


Рис. 4. Температурные поля от трех скважин через 5 (а) и 15 (б) лет после начала эксплуатации

Численные расчеты показали, что для конкретного северного нефтегазового месторождения расстояние между скважинами 10 метров является недостаточным для соблюдения строительных нормативов для вечномёрзлых грунтов. Точность численного алгоритма была проверена в 2012 году для российского нефтяного месторождения Русское, для которого полученные численные результаты отличались от экспериментальных менее чем на 5 % через 3 года после начала эксплуатации месторождения.

4. Заключение

Описаны три класса задач, связанных с распространением нестационарных трёхмерных тепловых полей в грунте. Первый класс задач связан с диагностикой повреждений подземных трубопроводов, второй класс задач связан с задачами моделирования геотермальных систем. Эти два класса задач были использованы для построения моделей и идей алгоритмов для третьего класса задач, связанных с обустройством и эксплуатацией северных нефтегазовых месторождений. Для третьего типа задач разработаны математическая модель, алгоритмы, адаптирующиеся к конкретному географическому месту, а также комплекс программ для численного моделирования нестационарных трехмерных тепловых полей в системе «скважины–многолетнемерзлые породы», позволяющий проводить вычислительные эксперименты и делать долговременные прогнозы по оценке радиуса растепления мерзлых пород от теплоизолированных скважин с учетом годичного цикла оттаивания/промерзания верхних слоев грунта под воздействием сезонных изменений температуры воздуха и интенсивности солнечного излучения. В ходе численных расчетов были выявлены некоторые закономерности

сти по увеличению скорости распространения радиусов растепления от двух соседних скважин навстречу друг другу в зависимости от различных параметров, что может послужить основанием для корректировки строительных стандартов.

Благодарность

При проведении численных расчетов был использован суперкомпьютер «Уран» ИММ УрО РАН.

Литература

1. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale / J. Obu, S. Westermann, A. Bartsch, N. Berdnikov, H. H. Christiansen, A. Dashtseren, R. Delaloye, B. Elberling, B. Etzelmüller, A. Kholodov, A. Khomutov, A. Kääb, M. O. Leibman, A. G. Lewkowicz, S. K. Panda, V. Romanovsky, R. G. Way, A. Westergaard-Nielsen, T. Wu, J. Yamkhin, D. Zou // *Earth Science Reviews*. – 2019. – Vol. 193. – P. 136–155. – DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.04.023.
2. Obu J. How much of the Earth's surface is underlain by permafrost? // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. – 2021. – Vol. 126. – P. e2021JF006123. – DOI: 10.1029/2021JF006123.
3. Thermal state of permafrost in Russia / V. E. Romanovsky, D. S. Drozdov, N. G. Oberman, G. V. Malkova, A. L. Kholodov, S. S. Marchenko, N. G. Moskalenko, D. O. Sergeev, N. G. Ukraintseva, A. A. Abramov, D. A. Gilichinsky, A. A. Vasiliev // *Permafrost and Periglacial Processes*. – 2010. – Vol. 21. – P. 136–155. – DOI: 10.1002/ppp.683.
4. Fast response of cold ice-rich permafrost in northeast Siberia to a warming climate / J. Nitzbon, S. Westermann, M. Langer, L. C. P. Martin, J. Strauss, S. Laboor, J. Boike // *Nature Communications*. – 2020. – Vol. 11. – P. 2201. – DOI: 10.1038/s41467-020-15725-8.
5. Vaganova N., Filimonov M. Yu. Different shapes of constructions and their effects on permafrost // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1789. – P. 020019. – DOI: 10.1063/1.4968440.
6. Numerical modeling of non-stationary heat problems in a two-phase medium / V. S. Gladkikh, V. P. Ilin, A. V. Petukhov, A. M. Krylov // *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. – Vol. 1715, No. 1. – P. 012002. – DOI: 10.1088/1742-6596/1715/1/012002.
7. Thermal impacts of engineering activities on permafrost in different alpine ecosystems in Qinghai-Tibet Plateau, China / Q. Wu, Z. Zhang, S. Gao, W. Ma // *The Cryosphere*. – 2016. – Vol. 10. – P. 1695–1706. – DOI: 10.5194/tc-10-1695-2016.
8. Consequences of permafrost degradation for Arctic infrastructure – bridging the model gap between regional and engineering scales / T. Schneider von Deimling, H. Lee, T. Ingeman-Nielsen, S. Westermann, V. Romanovsky, S. Lamoureux, D. A. Walker, S. Chadburn, E. Trochim, L. Cai, J. Nitzbon, S. Jacobi, M. Langer // *The Cryosphere*. – 2021. – Vol. 15. – P. 2451–2471. – DOI: 10.5194/tc-15-2451-2021.
9. Nelson F. E., Anisimov O. A., Shiklomanov N. I. Subsidence risk from thawing permafrost // *Nature*. – 2001. – Vol. 410, No. 6831. – P. 889–890. – DOI: 10.1038/35073746.
10. Elevation-dependent warming in mountain regions of the world / N. Pepin, R. S. Bradley, H. F. Diaz, M. Baraer, E. B. Caceres, N. Forsythe, H. Fowler, G. Greenwood, M. Z. Hashmi, X. D. Liu, J. R. Miller, L. Ning, A. Ohmura, E. Palazz, I. Rangwala, W. Schöner, I. Severskiy, M. Shahgedanova, M. B. Wang, S. N. Williamson, D. Q. Yang // *Nature Climate Change*. – 2015. – Vol. 5. – P. 424–430. – DOI: 10.1038/nclmate2563.
11. Guo D., Wang H. CMIP5 permafrost degradation projection: a comparison among different regions // *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. – 2016. – Vol. 121. – P. 4499–4517. – DOI: 10.1002/2015JD024108.
12. Guo D., Wang H. Permafrost degradation and associated ground settlement estimation under 2°C global warming // *Climate Dynamics*. – 2017. – Vol. 49. – P. 2569–2583. – DOI: 10.1007/s00382-016-3469-9.

13. An observation-based constraint on permafrost loss as a function of global warming / S. E. Chadburn, E. J. Burke, P. M. Cox, P. Friedlingstein, G. Hugelius, S. Westermann // *Nature Climate Change*. – 2017. – Vol. 7. – P. 340–344. – DOI: 10.1038/nclimate3262.
14. Continuously amplified warming in the Alaskan Arctic: implications for estimating global warming hiatus / K. Wang, T. Zhang, X. Zhang, G. D. Clow, E. E. Jafarov, I. Overeem, V. Romanovsky, X. Peng, B. Cao // *Geophysical Research Letters*. – 2017. – Vol. 44. – P. 9029–9038. – DOI: 10.1002/2017GL074232.
15. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic / A. A. Vasiliev, D. S. Drozdov, A. G. Gravis, G. V. Malkova, K. E. Nyland, D. A. Streletskiy // *Environmental Research Letters*. – 2020. – Vol. 15. – P. 045001. – DOI: 10.1088/1748-9326/ab6f12.
16. CMIP6 model projections leave no room for permafrost to persist in Western Siberia under the SSP5-8.5 scenario / G. A. Alexandrov, V. A. Ginzburg, G. E. Insarov, A. A. Romanovskaya // *Climatic Change*. – 2021. – Vol. 169, No. 3. – P. 1–11. – DOI: 10.1007/s10584-021-03292-w.
17. Permafrost is warming at a global scale / B. K. Biskaborn, S. L. Smith, J. Noetzli, et al. // *Nature Communications*. – 2019. – Vol. 10. – DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4.
18. Moiseev V., Komarova T., Petryaev A. Year-round thermal stabilization of permafrost soils during road construction in the northern climatic zone of Russia // *E3S Web Conf.* – 2023. – Vol. 383. – P. 02010. – DOI: 10.1051/e3sconf/202338302010.
19. Vaganova N. A., Filimonov M. Yu. Simulation of cooling devices and effect for thermal stabilization of soil in a cryolithozone with anthropogenic Impact // *Lecture Notes in Computer Science*. – 2019. – Vol. 11386. – P. 580–587. – DOI: 10.1007/978-3-030-11539-5_68.
20. Vaganova N. A. Mathematical model of testing of pipeline integrity by thermal fields // *AIP Conference Proceedings*. – 2014. – Vol. 1631. – P. 37–41. – DOI 10.1063/1.4902455.
21. Vaganova N. A. Simulation of thermal fields from an underground pipeline at the ground surface // *AIP Conference Proceedings*. – 2017. – Vol. 1910. – P. 020005. – DOI: 10.1063/1.5013942.
22. Vaganova N. A., Filimonov M. Yu. Numerical analysis and diagnostics of pipelines by thermal fields // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2312. – P. 050026. – DOI: 10.1063/5.0035412.
23. Башуров В. В., Ваганова Н. А., Филимонов М. Ю. Численное моделирование процессов теплообмена в грунте с учетом фильтрации жидкости // *Вычислительные технологии*. – 2011. – Т. 16, № 4. – С. 3–18.
24. Vaganova N., Filimonov M. Yu. Refinement of model of an open geothermal system // *AIP Conference Proceedings*. – 2016. – Vol. 1789. – P. 020020. – DOI: 10.1063/1.4968441.
25. Numerical simulation of temperature fields in an open geothermal system on multicore processors / M. Yu. Filimonov, E. N. Akimova, V. E. Misilov, N. A. Vaganova // *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. – 2022. – Vol. 8, iss. 2. – P. 76. – DOI: 10.1007/s40948-022-00386-2.
26. Filimonov M. Yu., Vaganova N. A. Optimal simulation of design and operation of geothermal systems. Utilization of Thermal Potential of Abandoned Wells: Fundamentals, Applications and Research / ed. by Y. Noorollahi, M. N. Naseer, M. M. Siddiqi. – Cambridge : Academic Press, 2022. – Ch. 3. – P. 35–57. – DOI: 10.1016/B978-0-323-90616-6.00003-8.
27. Automated monitoring the temperature under buildings with pile foundations in Salekhard (preliminary results) / Ya. K. Kamnev, M. Yu. Filimonov, A. N. Shein, N. A. Vaganova // *Geography, Environment, Sustainability*. – 2021. – Vol. 14, No. 4. – P. 75–82. – DOI: 10.24057/2071-9388-2021-021.
28. Modeling the temperature field in frozen soil under buildings in the city of Salekhard taking into account temperature monitoring / M. Yu. Filimonov, Ya. K. Kamnev, A. N. Shein, N. A. Vaganova // *Land*. – 2022. – Vol. 11, No. 7. – P. 1102. – DOI: 10.3390/land11071102.

29. Filimonov M. Yu., Vaganova N. A. Thawing of permafrost during the operation of wells of North-Mukerkamyl oil and gas field // *Journal of Siberian Federal University. Mathematics & Physics.* – 2021. – Vol. 14, No. 6. – P. 795–804. – DOI: 10.17516/1997-1397-2021-14-6-795-804.
30. Filimonov M., Vaganova N. Permafrost thawing from different technical systems in Arctic regions // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* – 2017. – Vol. 72. – P. 012006. – DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012006.
31. Samarskii A. A., Moiseyenko B. D. An economic continuous calculation scheme for the Stefan multidimensional problem // *USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics.* – 1965. – Vol. 5, No. 5. – P. 43–58. – DOI: 10.1016/0041-5553(65)90004-2.
32. Самарский А. А., Вабищевич П. Н. Вычислительная теплопередача. – М. : Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.
33. Guidelines for cold-regions groundwater numerical modeling / P. Lamontagne-Hallé, J. M. McKenzie, B. L. Kurylyk, J. Molson, L. N. Lyon // *WIREs Wate.* – 2020. – Vol. 6, No. 7. – DOI: 10.1002/wat2.1467.
34. Integrated hydrologic modelling of groundwater-surface water interactions in cold regions / X. Yang, J. Hu, R. Ma, Z. Sun // *Front. Earth Sci.* – 2021. – Vol. 9. – DOI: 10.3389/feart.2021.721009.
35. Hinkel K. M., Outcalt S. I., Taylor A. E. Seasonal patterns of coupled flow in the active layer at three sites in northwest north America // *Canadian Journal of Earth Sciences.* – 1997. – Vol. 34. – P. 667–678. – DOI: 10.1139/e17-053.
36. Kurylyk B. L., Watanabe K. The mathematical representation of freezing and thawing processes in variably-saturated, non-deformable soils // *Advances in Water Resources.* – 2013. – Vol. 60. – P. 160–177. – DOI: 10.1016/j.advwatres.2013.07.016.
37. Influence of vertical and lateral heat transfer on permafrost thaw, peatland landscape transition, and groundwater flow / B. L. Kurylyk, M. Hayashi, W. L. Quinton, J. M. McKenzie, C. I. Voss // *Water Resources Research.* – 2016. – Vol. 52. – P. 1286–1305. – DOI: 10.1002/2015WR018057.
38. Extremely wet summer events enhance permafrost thaw for multiple years in Siberian tundra / R. Í. Magnússon, A. Hamm, S. V. Karsanaev, J. Limpens, D. Kleijn, A. Frampton, T. C. Maximov, M. M. P. D. Heijmans // *Nature Communications.* – 2022. – Vol. 13. – P. 1556. – DOI: 10.1038/s41467-022-29248-x.
39. Painter S. L., Karra S. Constitutive model for unfrozen water content in subfreezing unsaturated soils // *Vadose Zone Journal.* – 2014. – Vol. 13, No. 4. – DOI: 10.2136/vzj2013.04.0071.
40. Thermal effects of groundwater flow through subarctic fens: a case study based on field observations and numerical modeling / Y. Sjöberg, E. Coon, A. B. K. R. Sannel, R. Pannetier, D. Harp, A. Frampton, S. L. Painter, S. W. Lyon // *Water Resources Research* – 2016. – Vol. 52. – P. 1591–1606. – DOI: 10.1002/2015WR017571.
41. Water and energy transfer modelling in a permafrost-dominated, forested catchment of Central Siberia: the key role of rooting depth / L. Orgogozo, A. S. Prokushkin, O. S. Pokrovsky, C. Grenier, M. Quintard, J. Viers, S. Audry // *Permafrost and Periglacial Processes.* – 2019. – Vol. 30. – P. 75–89. – DOI: 10.1002/ppp.1995.
42. Sergeev F., Kiselyov F. Iterative Refinement of the boundary condition in the numerical solution of the thermoelasticity problem // *Lecture Notes in Civil Engineering : proceedings of FORM 2021.* – Springer, Cham, 2022 / ed. by P. Akimov, N. Vatin. – 2022. – Vol. 17. – P. 329–338. – DOI: 10.1007/978-3-030-79983-0_31.

Received: 30.06.2023

Revised: 09.08.2023

Accepted: 25.08.2023

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.029-046

ESTIMATING THE EFFECT OF THE MAIN DESIGN PARAMETERS ON THE EFFECTIVENESS OF HIGH-PURITY HYDROGEN PRODUCTION FROM RAW HYDROCARBONS IN MEMBRANE CATALYTIC DEVICES

A. B. Vandyshev

*Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia*

✉ vandyshev@imach.uran.ru

E-mail: vandyshev@imach.uran.ru

Address for correspondence: ul Komsomolskaya, 34, Ekaterinburg, 620049, Russia

Tel.: +7 (343) 362-3025; fax: +7 (343) 374-5330

The paper presents the results of the application of a physically grounded mathematical model, verified through numerous practical examples, intended for estimating the effect of some design factors (membrane thickness and the system of high-purity hydrogen outlet from the under-membrane space of membrane elements) on the effectiveness and efficiency of the production of highly pure hydrogen from the products of steam conversion of hydrocarbons in advanced membrane catalytic devices.

Keywords: mathematical modeling, design factors, membrane catalytic devices, high-purity hydrogen, raw hydrocarbons

References

1. Murav'ev, L.L., Vandyshev, A.B., and Makarov, V.M. Modeling of membrane extraction of hydrogen from the products of steam conversion of hydrocarbons. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 1999, 33, 258–263.
2. Vandyshev, A.B. Analyzing the parameters of membrane catalytic systems for extraction of highly pure hydrogen from hydrocarbon feedstock with the application of mathematical modeling. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2016, 4, 6–46. DOI: 10.17804/2410-9908.2016.4.006-045. Available at: http://dream-journal.org/issues/2016-4/2016-4_87.html
3. Vandyshev, A.B. and Kulikov, V.A. Assessment of the effects of temperature and pressure on the efficiency of high-purity hydrogen production from hydrocarbon feedstocks in membrane-catalytic devices. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2021, 56, 799–808. DOI: 10.1007/s10556-021-00845-9.
4. Vandyshev, A.B. and Kulikov, V.A. Assessment of the effect of hydrocarbon and steam mixture flow rate on the main parameters of high-purity hydrogen production in a membrane-catalytic device with a fixed membrane area. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2021, 57, 639–646. DOI: 10.1007/s10556-021-00989-8.
5. Vandyshev, A.B. Estimating the effect of some individual technological factors on the effectiveness of producing high-purity hydrogen from hydrocarbons in catalytic membrane devices. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2022, 4, 6–36. DOI: 10.17804/2410-9908.2022.4.006-036. Available at: http://dream-journal.org/issues/2022-4/2022-4_359.html

6. Vandyshev, A.B. and Kulikov, V.A. Analysis of the efficiency of a Pd/Ag membrane with a thickness of 2.25 microns on a porous ceramic substrate in a laboratory membrane reactor. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2019, 55, 129–135. DOI: 10.1007/s10556-019-00592-y.
7. Vandyshev, A.B. and Kulikov, V.A. Analysis of parameters for producing high-purity hydrogen from natural gas in a tubular type membrane-catalytic module. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2021, 56, 715–720. DOI: 10.1007/s10556-021-00833-z.
8. Vandyshev, A.B. and Kulikov, V.A. Analysis of the results of testing an individual disk-type membrane-catalytic module for obtaining high-purity hydrogen from methane. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2020, 55, 725–732. DOI: 10.1007/s10556-020-00686-y.
9. Vandyshev, A.B. A systematic analysis of the parameters of disk-type membrane-catalytic devices for producing high-purity hydrogen from methane and diesel fuel. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2020, 4, 6–27. DOI: 10.17804/2410-9908.2020.4.06-27. Available at: http://dream-journal.org/issues/2020-4/2020-4_284.html
10. Goltsov, V.A. Hydrogen in metals. In: *Atomno-Vodorodnaya Energetika i Tekhnologiya* [Nuclear-Hydrogen Energy and Technology: Collection of Papers]. Atomizdat Publ., Moscow, 1978–1988, 1, 193–230.
11. Vandyshev, A.B. and Kulikov, V.A. Hydrogen permeability of palladium membranes made of alloy V-1 in laboratory investigations and membrane devices. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2015, 51, 396–401. DOI: 10.1007/s10556-015-0058-4.
12. Babak, V.N., Didenko, L.P., Kvurt, Yu.P., Sementsova, L.A., and Zakiev, S.E. Simulation of steam methane reforming in a membrane reactor with a nickel catalyst and a palladium alloy foil. *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2021, 55, 390–402. DOI: 10.1134/S0040579521030027.
13. Shirasaki, Y., Tsuneki, T., Ota, Y., Yasuda, I., Tachibana, S., Nakajima, H., and Kobayashi, K. Development of membrane reformer system for highly efficient hydrogen production from natural gas. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2009, 34 (10), 4482–4487. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.08.056.
14. Zhivulko, S.A., Avakov, V.B., Langraft, I.K., and Urusov, A.P. Experience in the practical implementation of the hydrocarbon fuel conversion technology with hydrogen extraction from the reaction zone. In: *Trudy V Vserossiyskoy konferentsii "Toplivnye Elementy i Energoustanovki na Ikh Osnove"* [The Fifth All-Russian Conference on Fuel Cells and Power Plants Based on Them, Suzdal, June 17–21, 2018: Proceedings]. Suzdal, 2018, 62–64.
15. Shirasaki, Y., Sato, T., Itoh, N., Tsuneki, T., Nishii, T., Kurokawa, H., Yasuda, I., Shimamori, Takagi, Y., Hikosaka, H., and Tanaka, H. Development of a membrane-on-catalyst hydrogen production module for steam reforming of city gas. *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, 2017, 43, 336–341. DOI: 10.1252/KAKORONBUNSHU.43.336.
16. Lukyanov, B.N. Obtaining ultra-pure hydrogen for fuel cells in the reactors with membrane separation. *Chemistry for Sustainable Development*, 2012, 20 (3), 251–263.
17. Baboshin, V.M., Buevich, Yu.A., Ivonin, A.K., Kirnos, I.V., and Kukui, B.G. Diffusion separation of hydrogen from gaseous mixtures. *Journal of Engineering Physics*, 1984, 47, 821–826. DOI: 10.1007/BF00832599.
18. Vandyshev, A.B., Kulikov, V.A., Kirnos, I.V., and Nikishin, S.N. High-temperature membrane apparatuses in systems for repeated utilization of hydrogen. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2006, 42, 640–644. DOI: 10.1007/s10556-006-0155-5.
19. Vandyshev, A.B., Kulikov, V.A., and Nikishin, S.N. Analysis of flow-rate characteristics of high-output membrane equipment for the production of ultra-pure hydrogen. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2010, 46, 72–78. DOI: 10.1007/s10556-010-9294-9.

Подана в журнал: 30.06.2023


УДК 66.071.6.001.57

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.029-046

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ОСНОВНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЧИСТОГО ВОДОРОДА В МЕМБРАННО-КАТАЛИТИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВАХ ИЗ УГЛЕВОДОРОДНОГО СЫРЬЯ

А. Б. Вандышев

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им. Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук,
ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия*

 vandyshv@imach.uran.ru

Электронная почта: vandyshv@imach.uran.ru

Адрес для переписки: ул. Комсомольская, 34, Екатеринбург, 620049, Россия

Тел.: +7 (343) 362-30-25; факс: +7 (343) 374-53-30

Приведены результаты использования физически обоснованной математической модели, проверенной на многочисленных практических примерах, для оценки влияния некоторых конструктивных факторов (толщины мембраны и системы отвода высококчистого водорода из подмембранного пространства мембранных элементов) на эффективность и экономичность получения высококчистого водорода из продуктов паровой конверсии углеводородов в перспективных мембранно-каталитических устройствах.

Ключевые слова: математическое моделирование, конструктивные факторы, мембранно-каталитические устройства, высококчистый водород, углеводородное сырье

1. Введение

Одним из актуальных направлений современной водородной энергетики является разработка перспективных мембранно-каталитических (МК) устройств эффективного и экономичного получения высококчистого водорода (>99,999 об.%) из углеводородного сырья, принцип действия которых основан на совмещении диффузионного извлечения водорода на тонких водородселективных мембранах из палладиевых сплавов с каталитическими процессами.

На эффективность получения высококчистого водорода в МК-устройствах существенное влияние оказывает достаточно большое количество технологических и конструктивных параметров. С помощью физически обоснованной математической модели [1, 2], адекватно и на хорошем количественном уровне описывающей результаты испытаний МК-устройств разных типов и производительности, удалось оценить влияние основных технологических факторов, а также определить их оптимальные диапазоны [3–5] для эффективного извлечения высококчистого водорода из углеводородного сырья.

Отсутствие необходимого количества имеющихся систематических экспериментальных данных не позволяет установить количественные закономерности влияния конструктивных параметров на эффективность получения высококчистого водорода в мембранно-каталитических устройствах.

Для решения этой задачи целесообразно также использовать метод математического моделирования, хорошо зарекомендовавший себя при оценке влияния технологических факторов.

2. Влияние толщины мембраны на параметры получения высокочистого водорода из углеводородного сырья в мембранно-каталитических устройствах

Из конструктивных параметров ранее наибольшее внимание уделялось влиянию на параметры МК-устройств толщины мембраны из палладия и его сплавов, обладающих высокой удельной водородопроницаемостью и селективностью по отношению к водороду. Анализ параметров МК-устройств с мембранами толщиной 2,25, 4,0, 12,0 и 20 мкм методом математического моделирования представлен в работе [6], а толщиной 7,3 и 50 мкм – в работах [7–9]. Из-за существенного различия конструктивных и технологических параметров исследованных МК-устройств установить количественные закономерности влияния толщины мембраны на параметры извлечения высокочистого водорода в МК-устройствах не представляется возможным. Удалось лишь только качественно показать, что с уменьшением толщины мембраны средняя плотность потока диффузии водорода через мембрану в МК-устройствах увеличивается [6].

Цель первого раздела – методом математического моделирования на расчетных примерах детально проанализировать влияние толщины мембраны на характеристики МК-устройств при одинаковых и оптимальных исходных технологических условиях (1-й пример), а также дополнительно при фиксированной площади мембраны (2-й пример).

Для проведения анализа использовали физически обоснованную и верифицированную математическую модель [1, 2]. Упрощенная структурная схема МК-устройства, лежащая в основе математической модели, представлена на рис. 1.

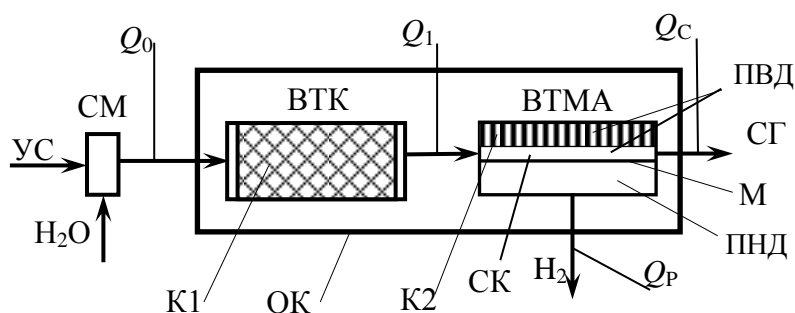


Рис. 1. Упрощенная структурная схема МК-устройства: УС – углеводородное сырье, СМ – смеситель, ВТК – высокотемпературный конвертер, ВТМА – высокотемпературный мембранный аппарат, ПВД – полость высокого давления, ПНД – полость низкого давления, СГ – сбросной газ, К1 – катализатор конверсии углеводорода, К2 – катализатор конверсии метана, М – мембрана из палладиевого сплава, СК – свободный канал, ОК – общий корпус, Q_0 , Q_1 , Q_p , Q_c – объемные потоки по ходу технологической схемы

Исходная смесь водяного пара с углеводородным сырьем (УС на рис. 1) из смесителя (СМ на рис. 1), поступает в высокотемпературный конвертер (ВТК на рис. 1). В случае использования метана в качестве углеводородного сырья в ВТК исходная смесь, согласно обратимым химическим реакциям (1) и (2), в присутствии катализатора конверсии (К1) превращается в смесь простых газов (H_2 , H_2O , CO_2 , CO , CH_4):



Далее продукты паровой конверсии метана подаются на извлечение водорода в свободный канал (СК на рис. 1) высокотемпературного мембранного аппарата (ВТМА) между

мембраной (М на рис. 1) и катализатором конверсии метана (К2 на рис. 1). Извлеченный высокочистый водород выводится из полости низкого давления (ПНД на рис. 1) мембранного аппарата и подается потребителю, а обедненная по водороду реакционная смесь в виде сбросного газа (СГ на рис. 1) выводится из полости высокого давления (ПВД на рис. 1) мембранного аппарата.

В случае 1-го расчетного примера заданы следующие стандартные технологические условия: рабочая температура $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, абсолютное давление в высокотемпературном конвертере (ВТК на рис. 1) и полости высокого давления (ПВД на рис. 1) высокотемпературного мембранного аппарата (ВТМА на рис. 1) $p_{\text{в}} = 2,6\text{ МПа}$, абсолютное давление в полости низкого давления (ПНД на рис. 1) мембранного аппарата $p_{\text{н}} = 0,15\text{ МПа}$. Отметим, что согласно [3, 5], сочетание указанных выше технологических параметров обеспечивает максимальную эффективность извлечения высокочистого водорода в МК-устройствах при выводе водорода-продукта из мембранного элемента самотеком под избыточным давлением. В качестве сырья выбрана смесь $\text{C}_n\text{H}_m\text{-3H}_2\text{O}$ с исходным объемным расходом $Q_0 = 100\text{ м}^3/\text{ч}$. Здесь и далее по тексту все объемные расходы приведены к нормальным условиям. В качестве материала мембраны выбран хорошо изученный сплав на основе палладия типа В-1 [10] с коэффициентом удельной водородопроницаемости при рабочей температуре МК-устройства $600\text{ }^{\circ}\text{C}$, равным $0,015\text{ см}^3\text{H}_2\cdot\text{мм}/(\text{см}^2\cdot\text{с}\cdot\text{атм.}^{0,5})$ [11]. Для анализа выбрали две основные толщины мембраны, изготовленные методом холодной прокатки [12]: $\delta = 20$ и $\delta = 50\text{ мкм}$. В качестве дополнительной толщины приняли мембрану с $\delta = 10\text{ мкм}$, которую, по данным работы [12], также можно получить методом холодной прокатки. Метод холодной прокатки позволяет получать вакуум-плотную мембрану с высокой водородной проницаемостью и селективностью. Отметим, что мембрана из палладиевого сплава толщиной 20 мкм испытана в течение 3010 часов с 61 теплосменой в МК-устройстве с максимальной производительностью $40\text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ [13]. На базе МК-модулей дискового типа с толщиной мембраны $\delta = 50\text{ мкм}$ из сплава $75\%\text{ Pd} - 25\%\text{ Ag}$ разработан мембранно-каталитический реактор получения высокочистого водорода производительностью порядка $8\text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ из углеводородного сырья [9, 14].

Первоначально в рамках 1-го примера рассчитали равновесный состав продуктов паровой конверсии метана при рабочих условиях на выходе из ВТК (рис. 1) и условия равенства атомного состава по водороду, кислороду и углероду на входе и выходе ВТК. Равновесный состав продуктов паровой конверсии получился следующий: $X_{\text{H}_2} = 0,2096$, $X_{\text{H}_2\text{O}} = 0,5674$, $X_{\text{CO}_2} = 0,0475$, $X_{\text{CO}} = 0,0066$ и $X_{\text{C}_n\text{H}_m} = 0,1689$ мольных долей. Расчетный объемный расход продуктов конверсии, поступающих на мембранное извлечение водорода, при исходном потоке смеси $\text{C}_n\text{H}_m\text{-3H}_2\text{O}$ $Q_0 = 100\text{ м}^3/\text{ч}$ составил $Q_1 = 112,12\text{ м}^3/\text{ч}$.

Отметим, что свободный (молекулярный) водород непосредственно участвует в процессе мембранного извлечения водорода, а связанный водород (метан) участвует в мембранном извлечении опосредованно, через смещение химического равновесия (1) вправо по мере отбора водорода через мембрану.

Результаты расчетов для 1-го примера при указанных выше стандартных и оптимальных технологических условиях в графическом виде представлены на рис. 2, а в численном виде – в табл. 1. Для всех исследованных толщин мембраны характер зависимостей производительности высокочистого водорода Q_p от площади мембраны F (кривые 1, 2, 3 на рис. 2) одинаковый. А именно: с увеличением расчетной площади мембраны производительность по высокочистому водороду увеличивается и достигает максимального и одинакового значения $Q_p = 92,9\text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ (табл. 1) при приближении концентрации водорода X_{H_2} над участком поверхности мембраны (кривые 4, 5, 6 на рис. 2) к концентрационному пределу $X_{\text{пред}} = p_{\text{н}}/p_{\text{в}} = 0,15/2,6 = 0,0577$ моль. долей, при котором дальнейшее мембранное извлечение водорода прекращается.

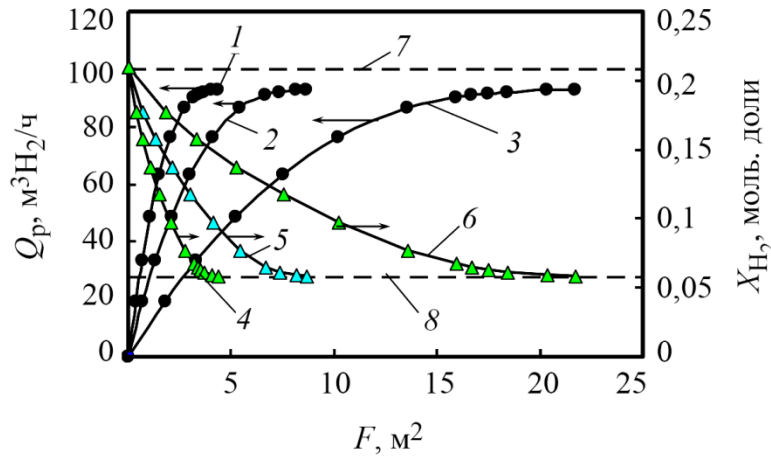


Рис. 2. Зависимости производительности МК-устройства Q_p (1, 2, 3) и концентрации водорода над поверхностью мембраны X_{H_2} (4, 5, 6) от площади мембраны F для исходной смеси $\text{CH}_4\text{-3H}_2\text{O}$: 1, 4 – $\delta = 10$ мкм; 2, 5 – $\delta = 20$ мкм; 3, 6 – $\delta = 50$ мкм; 7 – уровень потока исходного сырья ($\text{CH}_4\text{-3H}_2\text{O}$) $Q_0 = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$; 8 – уровень концентрационного предела $X_{\text{пред}} = 0,0577$ моль. долей

Большие значения расчетных удельных показателей объемного ($q_v = Q_p/Q_0$) и мольного ($q_M = Q_p/Q_{\text{CH}_4}$) выходов водорода (табл. 1) для всех исследованных толщин мембран свидетельствуют о высокой эффективности извлечения высокочистого водорода в МК-устройстве при условиях 1-го примера.

Расчетная площадь мембраны $F_{\text{расч}}$, необходимая для полного извлечения водорода с уменьшением толщины мембраны с 50 до 10 мкм, снижается с 21,7 до 4,34 м² (табл. 1) из-за увеличения средней плотности потока диффузии водорода через мембрану $J_{\text{H}_2} = Q_p/F_{\text{расч}}$ от 4,28 до 21,4 м³Н₂/м²ч (табл. 1).

Таким образом, в рамках 1-го расчетного примера влияние толщины мембраны отражается на величине площади мембраны, необходимой для полного извлечения водорода из одинакового объемного расхода исходного сырья $Q_0 = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$ при высоких удельных показателях извлечения водорода (q_v и q_M).

Для 2-го расчетного примера технологические условия (рабочая температура 600 °С, абсолютные давления $p_v = 2,6$ МПа и $p_n = 0,15$ МПа и сырьевая смесь $\text{CH}_4\text{-3H}_2\text{O}$) приняты такими же, как и для 1-го примера.

Таблица 1

Расчетные параметры МК-устройства при стандартных и оптимальных технологических условиях (1-й пример)

Расчетные параметры МК-устройства при рабочей температуре 600 °С, $p_v = 2,6$ МПа, $p_n = 0,15$ МПа, $Q_0 = 100 \text{ м}^3/\text{ч}$						
$\delta, \text{ мкм}$	$F_{\text{расч}}, \text{ м}^2$	$Q_p, \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$	$J_{\text{H}_2}, \text{ м}^3\text{H}_2/\text{м}^2\text{ч}$	$X_{\text{H}_2}, \text{ моль. доли}$	$q_v, \text{ м}^3\text{H}_2/\text{м}^3 \text{ сырья}$	$q_M, \text{ м}^3\text{H}_2/\text{моль CH}_4$
50	21,7	92,9	4,28	0,0586	0,929	3,72
20	8,67	92,9	10,7	0,0586	0,929	3,72
10	4,34	92,9	21,4	0,0586	0,929	3,72

К конструктивным параметрам 3 мембран из палладиевого сплава В-1 с толщиной $\delta = 50, \delta = 20$ и $\delta = 10$ мкм добавлена стандартная установленная площадь мембраны $F_{\text{уст}} = 10 \text{ м}^2$.

В целях обеспечения режима полного извлечения водорода в МК-устройстве в рамках 2-го расчетного примера выбрали исходные объемные расходы исходной парометановой смеси $Q_0 = 43,6 \text{ м}^3/\text{ч}$, $Q_0 = 113,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ и $Q_0 = 228 \text{ м}^3/\text{ч}$ для мембран толщиной 50, 20, и 10 мкм соответственно.

Результаты расчетов для условий 2-го примера в графическом виде представлены на рис. 3, а в численном виде – в табл. 2

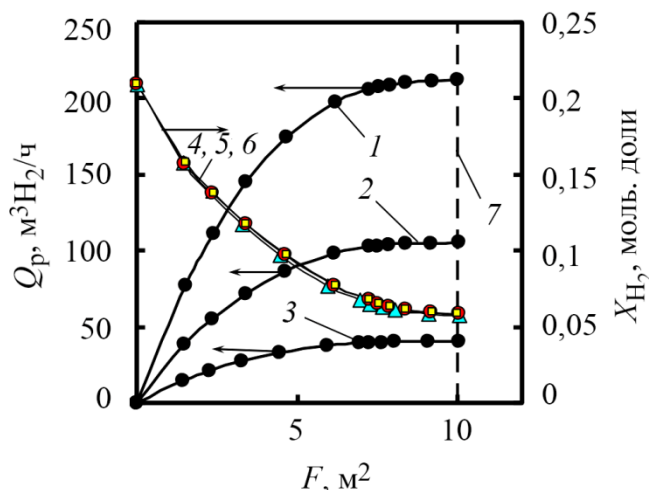


Рис. 3. Зависимости производительности МК-устройства Q_p (1, 2, 3) и концентрации водорода над поверхностью мембраны X_{H_2} (4, 5, 6) от площади мембраны F для исходной смеси CH_4-3H_2O : 1, 4 – $\delta = 10$ мкм, $Q_0 = 228 \text{ м}^3/\text{ч}$; 2, 5 – $\delta = 20$ мкм, $Q_0 = 113,5 \text{ м}^3/\text{ч}$; 3, 6 – $\delta = 50$ мкм, $Q_0 = 43,6 \text{ м}^3/\text{ч}$; 7 – уровень установленной площади мембраны $F_{уст} = 10 \text{ м}^2$

С увеличением расчетной площади мембраны производительность по высокочистому водороду Q_p (кривые 1, 2, 3 на рис. 3) увеличивается и достигает максимальных значений $Q_p = 40,5 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ для $\delta = 50$ мкм, $Q_p = 105,5 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ для $\delta = 20$ мкм и $Q_p = 212 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ для $\delta = 10$ мкм (табл. 2) при одинаковой величине площади мембраны $F_{расч} = F_{уст} = 10 \text{ м}^2$.

Концентрации водорода X_{H_2} над участком поверхности мембраны (кривые 4, 5, 6 на рис. 3) с увеличением площади мембраны уменьшаются и приближаются к концентрационному пределу $X_{пред} = p_H/p_V = 0,15/2,6 = 0,0577$ моль. долей при расчетной площади мембраны $F_{расч} = F_{уст} = 10 \text{ м}^2$, при котором дальнейшее мембранное извлечение водорода прекращается

Таблица 2

Расчетные параметры МК-устройства при стандартных технологических условиях и фиксированной площади мембраны $F = 10 \text{ м}^2$ (2-й пример)

δ , мкм	Расчетные параметры МК-устройства при рабочей температуре 600 °С, $p_V = 2,6 \text{ МПа}$, $p_H = 0,15 \text{ МПа}$						
	Q_0 , $\text{м}^3/\text{ч}$	$F_{расч}$, м^2	Q_p , $\text{м}^3\text{H}_2/\text{ч}$	J_{H_2} , $\text{м}^3\text{H}_2/\text{м}^2\text{ч}$	X_{H_2} , моль. доли	q_v , $\text{м}^3\text{H}_2/\text{м}^3\text{сырья}$	q_m , $\text{м}^3\text{H}_2/\text{моль } CH_4$
50	43,6	10,03	40,5	4,04	0,0581	0,929	3,72
20	113,5	10,03	105,5	10,5	0,0585	0,929	3,72
10	228	10,01	212	21,2	0,0585	0,93	3,72

В рамках 2-го расчетного примера высокие величины расчетных удельных показателей объемного ($q_v = Q_p/Q_0 = 0,929-0,93 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{м}^3\text{сырья}$) и мольного ($q_M = Q_p/Q\text{CH}_4 = 3,72 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{мольCH}_4$) выходов водорода (табл. 2) для всех исследованных толщин мембран свидетельствуют о высокой эффективности извлечения высокочистого водорода в МК-устройстве.

Таким образом, для условий 2-го расчетного примера влияние толщины мембраны при стандартных технологических условиях и фиксированной площади мембраны $F_{\text{уст}} = 10 \text{ м}^2$ отражается на величине производительности по высокочистому водороду Q_p , которая составляет $40,5 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ для мембраны толщиной 50 мкм, $105,5 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ для мембраны толщиной 20 мкм и $212 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ для мембраны толщиной 10 мкм (табл. 2). Интенсивности отвода водорода через мембрану, характеризующиеся средней плотностью диффузии водорода J_{H_2} , для каждой толщины мембраны практически одинаковы как для 1-го примера (табл. 1), так и для 2-го примера (табл. 2).

Используя расчетные данные из табл. 1 и табл. 2, построили график зависимости средней плотности потока диффузии водорода через мембрану J_{H_2} от обратной толщины мембраны $1/\delta$, представленный на рис. 4. Расчетные точки для 1-го и 2-го расчетных примеров хорошо укладываются на прямую линию, проходящую через начало координат (рис. 4). Линейная зависимость $J_{\text{H}_2} = Q_p/F$ от $1/\delta$ на рис. 4 согласуется с уравнением (3) из работ [1, 2] для локальной диффузионной характеристики на участке площади мембраны ΔF , вытекающим из закона Сивертса–Ричардсона.

$$\Delta Q_{p_j} = \frac{\gamma}{\delta} \sqrt{p_B} \cdot \Delta F \cdot \left(\sqrt{\frac{X_{\text{H}_2, \text{н}} + X_{\text{H}_2, \text{к}}}{2}} - \sqrt{\frac{p_{\text{H}}}{p_B}} \right), \quad (3)$$

где ΔQ_p – диффузионный поток водорода через участок площади мембраны ΔF , γ – коэффициент удельной водородопроницаемости мембраны, δ – толщина мембраны, p_B – абсолютное давление в ПВД, p_{H} – абсолютное давление в ПНД, ΔF_j – размер участка площади мембраны, $X_{\text{H}_2, \text{н}}$ – начальная объемная доля водорода на участке площади мембраны ΔF , $X_{\text{H}_2, \text{к}}$ – конечная объемная доля водорода на участке площади мембраны ΔF .

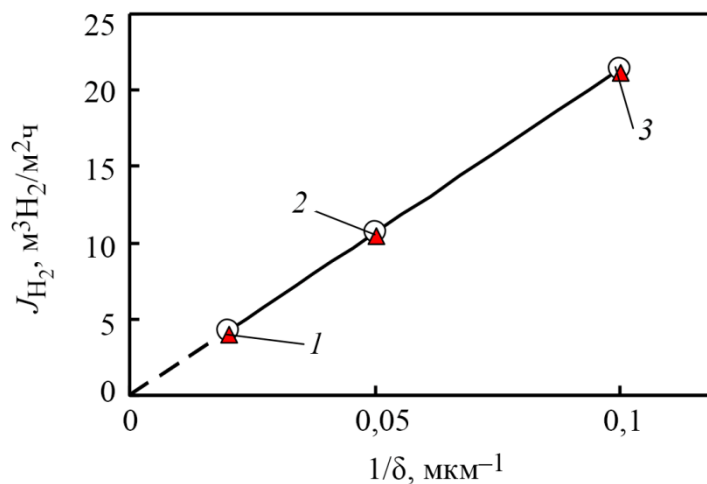


Рис. 4. Зависимости средней плотности потока диффузии водорода через мембрану J_{H_2} от обратной толщины мембраны $1/\delta$: 1 – $\delta = 50 \text{ мкм}$; 2 – $\delta = 20 \text{ мкм}$; 3 – $\delta = 10 \text{ мкм}$; круги – 1-й расчетный пример; треугольники – 2-й расчетный пример

Для сравнения аналогичный график построили по известным литературным данным [6–9] для МК-устройств с разной толщиной мембраны (рис. 5). Отметим существенный разброс экспериментальных данных из-за различия исходных технологических условий и кон-

структивных параметров МК-устройств, включая разные мембранные материалы. Прямая линия 7 на рис. 5, построенная по уравнению линейной регрессии, отражает только общую тенденцию зависимости средней плотности потока диффузии водорода через мембрану J_{H_2} от обратной толщины мембраны $1/\delta$.

Отметим, что в случае стандартных исходных технологических условий и конструктивных параметров линейная зависимость средней плотности потока диффузии водорода J_{H_2} от обратной толщины мембраны $1/\delta$ (рис. 4) более четко выражена и физически обоснована.

С точки зрения практической реализации МК-устройств важно учитывать влияние толщины мембраны. Так, при толщине мембраны $\delta = 20$ мкм в рамках 1-го расчетного примера достигается высокая производительность по высокочистому водороду $Q_p = 92,9$ м³Н₂/ч при высоких удельных показателях объемного ($q_v = Q_p/Q_0 = 0,929$ м³Н₂/м³сырья) и мольного ($q_M = Q_p/Q_{CH_4} = 3,72$ м³Н₂/мольСН₄) выходов водорода (табл. 1), свидетельствующих о высокой эффективности извлечения водорода. В этом случае, согласно расчетам, требуется приемлемая площадь мембраны $F_{расч} = 8,67$ м² (табл. 1), близкая к испытанной в МК-устройстве с такой же толщиной мембраны и производительностью $Q_p = 40$ м³Н₂/ч [13].

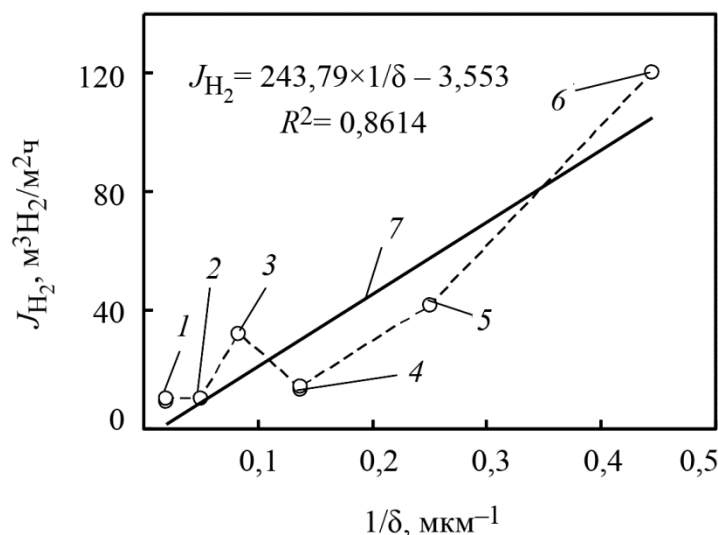


Рис. 5. Зависимости средней плотности потока диффузии водорода через мембрану J_{H_2} от обратной толщины мембраны $1/\delta$: точки 2, 3, 5 и 6 для мембран с $\delta = 20, 12, 4$ и $2,25$ мкм соответственно [6], точка 1 – $\delta = 50$ мкм [8, 9], точка 4 – $\delta = 7,3$ мкм [7]; 7 – зависимость J_{H_2} от $1/\delta$ по уравнению линейной регрессии $J_{H_2} = 243,79 \cdot 1/\delta - 3,553$

Согласно нашим расчетам, увеличение толщины мембраны с $\delta = 20$ мкм до $\delta = 50$ мкм приводит к увеличению необходимой для полного извлечения водорода площади мембраны с $F_{расч} = 8,67$ м² до $F_{расч} = 21,7$ м² (табл. 1), что может оказаться неприемлемым с точки зрения существенного увеличения габаритных размеров МК-устройства и более высоких капитальных затрат. В рамках 1-го расчетного примера показано, что уменьшение толщины мембраны с $\delta = 20$ мкм до $\delta = 10$ мкм приводит к уменьшению необходимой для полного извлечения водорода площади мембраны с $F_{расч} = 8,67$ м² до $F_{расч} = 4,34$ м² (табл. 1), что может сказаться на существенном снижении габаритных размеров МК-устройства и капитальных затрат. Однако отсутствие практических примеров использования мембран, полученных методом холодной прокатки, для МК-устройств большой производительности позволяет рассматривать мембрану толщиной $\delta = 10$ мкм как некоторый перспективный резерв для создания компактных МК-устройств получения высокочистого водорода из углеводородного сырья.

Таким образом, представленный в первом разделе анализ на приведенных расчетных примерах наглядно показал, что влияние толщины водородселективной мембраны в сочетании с ре-

комендациями по выбору оптимальных технологических параметров [3–5] необходимо учитывать при проектировании, изготовлении и эксплуатации перспективных мембранно-каталитических устройств получения высокочистого водорода из углеводородного сырья.

3. Влияние системы отвода высокочистого водорода из мембранных элементов на эксплуатационные показатели мембранно-каталитических устройств

В данном разделе рассмотрено влияние еще одного конструктивного фактора, связанного с системой отвода высокочистого водорода из подмембранного пространства мембранных элементов, на показатели извлечения водорода из углеводородного сырья в мембранно-каталитических устройствах. Отметим, что ранее влияние этого фактора для МК-устройств не рассматривалось.

В работе [3] на основании расчетных данных представлены графические диаграммы для оперативной оценки оптимальных исходных параметров – температуры и давлений по обе стороны от мембраны для двух типов МК-устройств, отличающихся способом отвода водорода-продукта: под разряжением с применением металлгидридного компрессора (1-й тип) и самотеком при повышенном давлении (2-й тип). Для 1-го типа МК-устройств абсолютное давление высокочистого водорода под мембраной $p_n < 0,1$ МПа, а для 2-го типа $p_n > 0,1$ МПа. В качестве критерия оценки эффективности получения высокочистого водорода в МК-устройствах использован удельный показатель объемного выхода водорода $q_v = Q_p/Q_0$, определяемый отношением объемного расхода высокочистого водорода Q_p к объемному расходу исходного сырья Q_0 (смеси углеводорода с парами воды).

Температурные зависимости объемных выходов водорода q_v для МК-устройства 1-го типа для ряда фиксированных абсолютных давлений p_n под мембраной по данным работы [3] представлены на рис. 6. Абсолютное давление газовой смеси в предварительном конвертере и продуктов паровой конверсии углеводородов в полости высокого давления над мембраной во всех случаях было стандартным, $p_b = 0,9$ МПа [3].

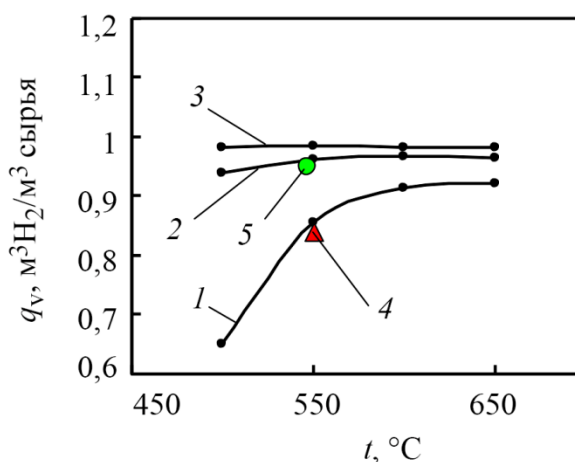


Рис. 6. Температурные зависимости объемного выхода высокочистого водорода q_v при абсолютных давлениях под мембраной $p_n = 0,08$ (1), $0,04$ (2) и $0,02$ МПа (3) для МК-устройства 1-го типа при фиксированном абсолютном давлении над мембраной $p_b = 0,9$ МПа; 4 – оценка по данным работы [2]; 5 – экспериментальные данные [15]

Точкой 5 на рис. 6 отмечен удельный показатель объемного выхода водорода $q_v = 0,0636/0,067 = 0,95$ м³ H₂/м³ сырья по экспериментальным данным для лабораторного МК-устройства трубчатого типа с мембраной из Pd–Ag сплава толщиной 7,3 мкм и площадью 93 см² при температуре 547 °C, $p_b = 0,9$ МПа и $p_n = 0,04$ МПа из работы [15]. Отметим, что все объемные расходы, как и в 1-м разделе, приведены к нормальным условиям. Эта точка 5

($q_v = 0,95 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{м}^3$) при температуре $547 \text{ }^\circ\text{C}$ расположена достаточно близко к изобаре $p_n = 0,04 \text{ МПа}$ (кривая 2 на рис. 6), что свидетельствует о практической реализации в эксперименте с МК-модулем трубчатого типа [15] абсолютного давления высокочистого водорода под мембраной, близкого к заявленному $p_n = 0,04 \text{ МПа}$. Отметим, что экспериментальные параметры получения высокочистого водорода в МК-устройстве трубчатого типа [15] количественно подтверждены расчетами с использованием математической модели [1, 2] в работе [7]. Точкой 4 на рис. 6 отмечен показатель объемного выхода водорода $q_v = Q_p/Q_0 = 0,84 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{м}^3$ сырья, оцененный в работе [2] по экспериментальным данным для МК-реактора производительностью $40 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ [13] с мембранными элементами плоского типа при температуре $550 \text{ }^\circ\text{C}$ и абсолютном давлении продуктов паровой конверсии природного газа над мембраной $p_b = 0,9 \text{ МПа}$. В отличие от МК-конвертера трубчатого типа, точка 4 на рис. 6 расположена вблизи изобары $p_n = 0,08 \text{ МПа}$ (кривая 1 на рис. 6), что существенно (почти в 2 раза) отличается от заявленного в работе [13] абсолютного давления высокочистого водорода под мембраной $p_n = 0,04 \text{ МПа}$. Отметим, что технологические условия для обоих типов МК-устройств практически одинаковы, включая состав природного газа из городской сети, представляющего собой смесь предельных углеводородов (88,5% CH_4 , 4,6% C_2H_6 , 5,4% C_3H_8 и 1,5% C_4H_{10} [13, 15]). Однако величины объемных выходов водорода q_v существенно отличаются.

Целью второго раздела являлась оценка наиболее вероятной причины такого существенного расхождения объемных выходов водорода в МК-устройствах с разным типом мембранных элементов при одинаковых технологических условиях.

В МК-модуле трубчатого типа [15] для получения высокочистого водорода из природного газа обращает на себя внимание наличие внутри пористой никелевой трубки, выполняющей функцию подложки для обеспечения механической прочности тонкой мембраны из палладиевого сплава, свободного цилиндрического канала диаметром порядка 8 мм. Этот канал образует полость низкого давления с минимальным гидравлическим сопротивлением при отводе высокочистого водорода из МК-устройства трубчатого типа. Очевидно, что это обстоятельство и определяет высокую эффективность извлечения высокочистого водорода, характеризуемую коэффициентом объемного выхода водорода $q_v = 0,95 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{м}^3$ [15] при $p_n = 0,04 \text{ МПа}$.

Мембранно-каталитический реактор производительностью $40 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ [13] состоял из 112 параллельно работающих индивидуальных мембранно-каталитических реакторов коробчатого типа с размерами $615 \times 86 \times 25 \text{ мм}$. В каждом индивидуальном МК-реакторе установлены один предварительный конвертер природного газа с катализатором $\text{Ni}/\text{Al}_2\text{O}_3$ и два параллельно работающих мембранных элемента плоского типа в виде прямоугольных призм с размерами $460 \times 40 \times 10 \text{ мм}$ [13], сопряженных с дополнительными катализаторами конверсии метана. Для удаления водорода-продукта под разрежением из подмембранного пространства единичных МК-реакторов, объединенных в один общий коллектор, использован металлгидридный побудитель расхода водорода с абсолютным давлением на входе $p = 0,04 \text{ МПа}$.

Из-за отсутствия подробных сведений о конструкции мембранных элементов плоского типа [13] можно предположить, что для придания механической прочности тонкой мембране толщиной 20 мкм из палладиевого сплава внутри каждого мембранного элемента традиционно использована пористая подложка. Вероятно, что эта пористая подложка использовалась также и для удаления высокочистого водорода из внутренней полости мембранных элементов вдоль их длины, равной 460 мм. Общая установленная площадь мембран толщиной 20 мкм на пористой подложке в МК-реакторе составляла $F_{\text{уст}} = 0,46 \times 0,1 \times 2 \times 112 = 10,3 \text{ м}^2$ [13, 16].

Наиболее вероятной причиной отмеченного выше существенного различия объемных выходов водорода (рис. 6) в МК-устройствах трубчатого и плоского типов при практически

одинаковых технологических условиях является повышенное гидравлическое сопротивление пористой подложки в подмембранном пространстве мембранного элемента плоского типа по сравнению со свободным цилиндрическим каналом в МК-устройстве трубчатого типа.

Ранее необходимость учета влияния гидравлического сопротивления в полости низкого давления плоских мембранных элементов типа «мешок» при извлечении особо чистого водорода из азотоводородных газовых смесей была детально изучена в работе, связанной с разработкой опытно-промышленного высокотемпературного мембранного аппарата ДБ-100 с проектной производительностью по особо чистому водороду $Q_p = 100 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ [17]. При испытаниях данного аппарата установлено, что его производительность по особо чистому водороду Q_p на уровне $60 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ оказалась существенно меньше проектной. При условии отсутствия противодействия (т. е. свободный выход водорода-продукта) максимальную производительность аппарата удалось увеличить до $Q_p = 78 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$, что также меньше проектной величины $Q_p = 100 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$.

Количественно согласовать экспериментальные и расчетные данные в работе [17] для ДБ-100 в диапазоне Q_0 от 60 до $103 \text{ м}^3/\text{ч}$ удалось при использовании математической модели, учитывающей диффузию водорода через мембрану и гидравлическое сопротивление в полости низкого давления мембранных элементов при величине безразмерного коэффициента гидравлического сопротивления в полости низкого давления мембранного аппарата $\beta = 0,18 \cdot 10^{-1}$. На основании анализа данной работы можно утверждать, что причиной расхождения проектных и экспериментальных данных являлось повышенное гидравлическое сопротивление в полости низкого давления мембранного аппарата ДБ-100 из-за несовершенства системы отвода особо чистого водорода из внутренних полостей плоских мембранных элементов типа «мешок».

В дальнейшем при создании мембранной установки УДВВ-500 с проектной производительностью $Q_p = 500 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ была усовершенствована конструкция плоского мембранного элемента типа «флажок», что позволило устранить повышенное гидравлическое сопротивление системы отвода особо чистого водорода из его внутренней полости. При проведении промышленных испытаний экспериментально подтверждена проектная производительность мембранной установки УДВВ-500 [18]. Далее модернизированные плоские мембранные элементы типа «флажок» были использованы при проектировании и изготовлении трех мембранных аппаратов АМПЭ-2,5-68 производительностью по $1000 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ [19].

Таким образом, можно предположить, что более низкая величина объемного выхода водорода в МК-устройстве с плоскими индивидуальными МК-модулями (точка 4 на рис. 6) связана с повышенным гидравлическим сопротивлением при удалении высокочистого водорода из подмембранного пространства вдоль пористой подложки.

С помощью физически обоснованной и адекватной математической модели [1, 2] провели анализ МК-конвертера [13] получения высокочистого водорода из природного газа с проектной производительностью $40 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$. Первоначально расчеты выполнены при следующих условиях (1-й режим): рабочая температура $550 \text{ }^\circ\text{C}$, абсолютное давление над мембраной $p_v = 0,9 \text{ МПа}$, абсолютное давление под мембраной $p_n = 0,08 \text{ МПа}$ (из графика на рис. 6 для точки 4). Исходное сырье: смесь природного газа (ПГ), состоящего из 88,5% CH_4 , 4,6% C_2H_6 , 5,4% C_3H_8 , 1,5% C_4H_{10} с парами воды при отношении $Q_{\text{H}_2\text{O}}/Q_{\text{ПГ}} = 3,2$, объемный расход сырьевой смеси $Q_0 = 11,6 \cdot (3,2 + 1) = 48,72 \text{ м}^3/\text{ч}$ [13]. Расчетный равновесный состав продуктов конверсии на выходе из предварительного конвертера МК-устройства [13] с учетом двух химических равновесий (4), (5) при условии неизменности атомного состава водорода, кислорода, углерода в исходной смеси ПГ- $3,2\text{H}_2\text{O}$ и продуктах конверсии представлены в табл. 3,





Таблица 3

Равновесные и атомные составы продуктов паровой конверсии исследуемых смесей углеводородного сырья

Мольные доли продуктов конверсии на выходе из ВТК					Атомные доли на входе и выходе ВТК		
X_{H_2}	$X_{\text{H}_2\text{O}}$	X_{CO_2}	X_{CO}	X_{CH_4}	Н	О	С
0,2210	0,5637	0,0594	0,0064	0,1495	0,7056	0,2243	0,0701

Таким образом, из исходной смеси природного газа сложного состава с парами воды из предварительного конвертера выходит 5-компонентная смесь простых газов H_2 , H_2O , CO_2 , CO , CH_4 , которая поступает на мембранное извлечение высокочистого водорода в свободный канал между мембраной и катализатором конверсии метана МК-модуля плоского типа. Согласно физическим представлениям, молекулярный водород из продуктов паровой конверсии непосредственно участвует в мембранном извлечении, а связанный водород CH_4 в присутствии катализатора паровой конверсии метана – опосредованно, через смещение химического равновесия (4) вправо по мере оттока водорода через мембрану.

Результаты анализа извлечения высокочистого водорода с помощью модели [1, 2] при указанных выше условиях для 1-го режима представлены графически на рис. 7, а в численном виде – в 1-й строке табл. 4. С увеличением расчетной площади мембраны F объемный расход высокочистого водорода Q_p (кривая 1 на рис. 7) растет и достигает максимального значения $Q_p = 39,58 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$.

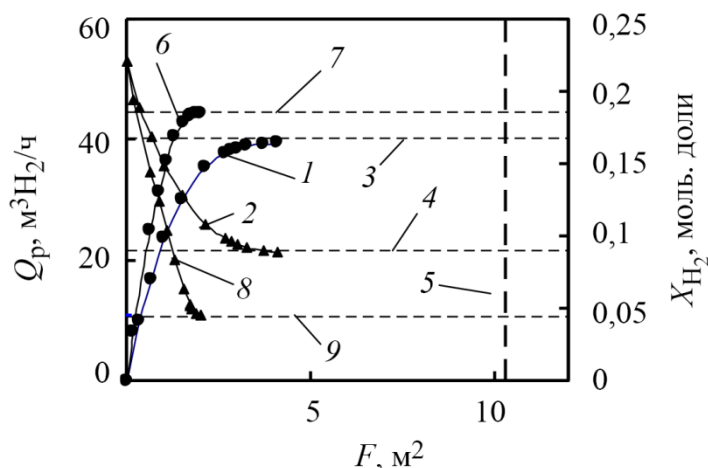


Рис. 7. Зависимости производительности МК-устройства Q_p (1, 6) и концентрации водорода над поверхностью мембраны X_{H_2} (2, 8) от площади мембраны F для 1-го режима (1–4) и 2-го режима (6–9): 3 – уровень проектной производительности $Q_p = 40 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$; 4 – уровень концентрационного предела $X_{\text{пред}} = 0,089$ моль. долей; 5 – уровень установленной площади мембраны $F_{\text{уст}} = 10,3 \text{ м}^2$; 7 – уровень максимальной производительности $Q_p = 44,4 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$; 9 – уровень концентрационного предела $X_{\text{пред}} = 0,044$ моль. долей

Концентрация водорода над участком площади мембраны с увеличением площади мембраны F (кривая 2 на рис. 7) уменьшается и приближается к концентрационному пределу $X_{\text{пред}} = p_{\text{H}}/p_{\text{В}} = 0,08/0,9 = 0,0888$ моль. долей, обозначенному на рис. 7 горизонтальной пунк-

тирной линией 4. Пунктирной горизонтальной линией 3 на рис. 2 отмечен уровень проектной производительности МК-реактора [13], равный $40 \text{ м}^3\text{Н}_2/\text{ч}$.

Для технологических условий 1-го режима максимальная расчетная производительность МК-реактора практически совпадает с проектной. Однако максимальная производительность Q_p достигается при расчетной площади мембраны $F_{\text{расч}} = 4,1 \text{ м}^2$ (табл. 4), существенно меньшей установленной площади мембраны $F_{\text{уст}} = 10,3 \text{ м}^2$ [16], обозначенной на рис. 7 вертикальной пунктирной линией 4.

В случае 1-го режима из-за низкого перепада давлений $\Delta p = p_v - p_n$ на мембране при $p_n = 0,08 \text{ МПа}$ процесс извлечения высококачественного водорода из продуктов паровой конверсии природного газа осуществляется менее эффективно и характеризуется расчетной средней плотностью потока водорода через мембрану $J_{\text{Н}_2} = Q_p/F_{\text{расч}} = 9,65 \text{ м}^3\text{Н}_2/\text{м}^2\text{ч}$ (табл. 4).

Расчетная величина удельного показателя объемного выхода водорода при этих условиях составила $q_v = 0,81 \text{ м}^3\text{Н}_2/\text{м}^3\text{сырья}$ (табл. 4), что также свидетельствует о низкой эффективности получения высококачественного водорода в МК-устройстве [13] с плоскими мембранными элементами.

Таблица 4

Параметры МК-реактора с плоскими мембранными элементами

Режим	Расчетные параметры МК-реактора [13] при температуре $550 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_v = 0,9 \text{ МПа}$						
	$Q_0, \text{ м}^3/\text{ч}$	$F_{\text{расч}}, \text{ м}^2$	$Q_p, \text{ м}^3\text{Н}_2/\text{ч}$	$J_{\text{Н}_2}, \text{ м}^3\text{Н}_2/\text{м}^2\text{ч}$	$X_{\text{Н}_2}, \text{ моль. доли}$	$q_v, \text{ м}^3\text{Н}_2/\text{м}^3\text{сырья}$	$q_M, \text{ м}^3\text{Н}_2/\text{моль у.в.}$
$p_n = 0,08 \text{ МПа}$							
1	48,72	4,1	39,58	9,65	0,0898	0,81	3,91
$p_n = 0,04 \text{ МПа}$							
2	48,72	2,0	44,4	22,2	0,0454	0,911	4,41
3	119,8	5,16	109,4	21,2	0,0449	0,913	4,42
4	239,5	9,96	218,7	21,9	0,0453	0,913	4,42

При снятии ограничений, связанных с отводом высококачественного водорода из подмембранного пространства плоских мембранных элементов [13] путем исключения влияния гидравлического сопротивления, можно снизить абсолютное давление p_n до входного давления металлгидридного компрессора, равного $0,04 \text{ МПа}$. В этом случае необходимо изменить конструкцию пористой подложки, например, путем создания в ней свободных продольных каналов (длиной 460 мм) без изменения габаритных размеров собственно мембранных элементов.

Дополнительно рассмотрен 2-й режим, который по исходным данным отличается от 1-го режима только величиной $p_n = 0,04 \text{ МПа}$. Результаты анализа параметров получения высококачественного водорода из продуктов паровой конверсии природного газа в МК-реакторе при $p_n = 0,04 \text{ МПа}$ для 2-го режима представлены в графическом виде на рис. 7, а в численном виде – в табл. 4 (2-я строка). Качественно зависимости Q_p-F (кривая 6 на рис. 7) и $X_{\text{Н}_2}-F$ (кривая 8 на рис. 7) аналогичны кривым 1 и 2 на рис. 7 для 1-го режима, но количественно заметно отличаются. Так, максимальная производительность для 2-го режима по высококачественному водороду Q_p выше, чем для 1-го режима, и составляет $Q_p = 44,4 \text{ м}^3\text{Н}_2/\text{ч}$. Уровень концентрационного предела для 2-го режима (горизонтальная пунктирная линия 9 на рис. 7) снизился до $X_{\text{конц.}} = p_n/p_v = 0,04/0,9 = 0,044$ моль. долей. Интенсивность отвода водорода через мембрану для 2-го режима, характеризуемая средней плотностью потока диффузии водорода через мембрану $J_{\text{Н}_2} = Q_p/F_{\text{расч}}$, увеличилась с $9,65 \text{ м}^3\text{Н}_2/\text{м}^2\text{ч}$ (1-й режим) до $22,2 \text{ м}^3\text{Н}_2/\text{м}^2\text{ч}$ (табл. 4). Расчетная площадь мембраны для 2-го режима, необходимой для полного извлечения водорода, снизилась с $4,1 \text{ м}^2$ (1-й режим) до $2,0 \text{ м}^2$ (табл. 4). Величина удельного показателя

теля объемного выхода водорода для 2-го режима по сравнению с 1-м увеличилась с 0,81 до $q_v = 0,911 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{м}^3\text{сырья}$ (табл. 4), что свидетельствует о более высокой эффективности получения высокочистого водорода в МК-устройстве [13] с плоскими мембранными элементами при $p_n = 0,04 \text{ МПа}$.

С целью повышения производительности МК-устройства [13] и более рационального использования установленной площади мембраны при условии снятия ограничений по отводу высокочистого водорода из подмембранного пространства мембранных элементов ($p_n = 0,04 \text{ МПа}$) рассмотрены еще два технологических режима с $Q_0 = 119,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ (3-й режим) и с $Q_0 = 239,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ (4-й режим). Остальные исходные технологические условия взяты такими же, как для 2-го режима.

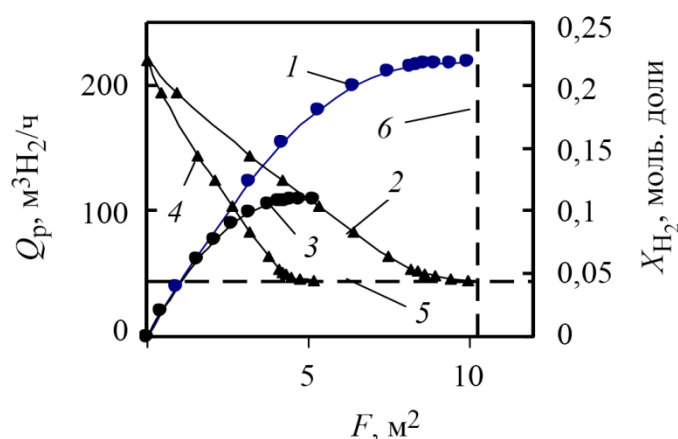


Рис. 8. Зависимости производительности МК-устройства Q_p (1, 3) и концентрации водорода над поверхностью мембраны X_{H_2} (2, 4) от площади мембраны F : 1, 2 – для 3-го режима, 3, 4 – для 4-го режима, 5 – уровень концентрационного предела $X_{пред} = 0,044$ моль. долей, 6 – уровень установленной площади мембраны $F_{уст} = 10,3 \text{ м}^2$

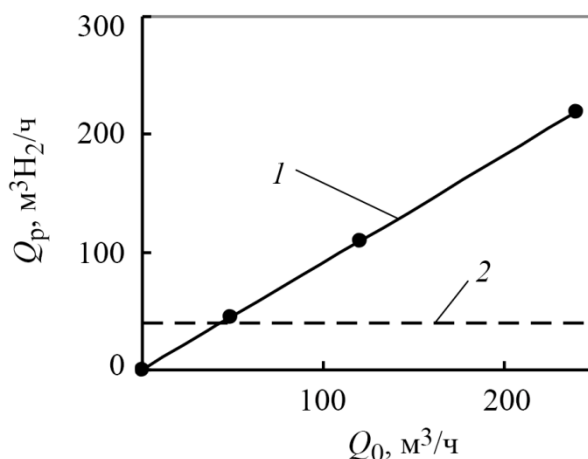


Рис. 9. Расчетная расходная характеристика (1) МК-устройства [13] с мембранными элементами плоского типа при $p_n = 0,04 \text{ МПа}$ и температуре $550 \text{ }^\circ\text{C}$:
2 – уровень проектной производительности $Q_p = 40 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$

Результаты анализа методом математического моделирования для 3-го и 4-го режимов в графическом виде представлены на рис. 8, а в численном виде – в табл. 4 (3-я и 4-я строки). Проведенный анализ показал, что при принятых исходных технологических условиях по сравнению со 2-м режимом максимальная производительность МК-устройства [13] по высокочистому водороду существенно увеличивается до $109,4 \text{ м}^3\text{H}_2/\text{ч}$ для 3-го режима

и до 218,7 м³Н₂/ч для 4-го режима (табл. 4). При этом наблюдается более рациональное использование установленной площади мембран (табл. 4). Так, для 3-го режима $F_{\text{расч}} = 5,16 \text{ м}^2$, а для 4-го режима $F_{\text{расч}} = 9,96 \text{ м}^2$ (табл. 4).

Средняя плотность потока диффузии водорода через мембрану и удельные показатели объемного и мольного выходов водорода для 3-го и 4-го режимов сохраняются на уровне 2-го режима.

По расчетным данным для 2-го, 3-го и 4-го режимов (табл. 4) построили график расходной характеристики МК-устройства [13], представленный на рис. 9, из которого видно, что при снятии ограничений по отводу высокочистого водорода из подмембранного пространства мембранных элементов плоского типа общую производительность МК-устройства можно значительно увеличить.

Представленный во втором разделе анализ на количественном уровне показал, что затруднения, связанные с отводом высокочистого водорода из подмембранного пространства мембранных элементов плоского типа, могут оказывать негативное влияние на эксплуатационные характеристики мембранно-каталитических устройств, что необходимо учитывать при их разработке.

4. Заключение

С помощью физически обоснованной математической модели, проверенной на многочисленных практических примерах, проведена оценка влияния наиболее важных конструктивных параметров перспективных мембранно-каталитических устройств – толщины мембраны и системы отвода высокочистого водорода из подмембранного пространства мембранных элементов – на эффективность и экономичность получения высокочистого водорода из продуктов паровой конверсии углеводородов.

На основании расчетных примеров количественно установлено, что для режима полного извлечения высокочистого водорода из продуктов конверсии углеводородного сырья уменьшение толщины мембраны с учетом выбора оптимальных исходных технологических параметров при фиксированной площади мембраны позволяет повысить производительность МК-устройства по высокочистому водороду при высоком удельном показателе объемного выхода водорода.

Уменьшение толщины мембраны позволяет минимизировать необходимую площадь мембраны при полном извлечении высокочистого водорода из одинакового объемного расхода исходного сырья, а также снизить габаритные размеры МК-устройства и капитальные затраты.

На основании сравнения МК-устройств с мембранными элементами трубчатого и плоского типов проанализировано влияние системы отвода высокочистого водорода из подмембранного пространства мембранных элементов.

Установлено, что в случае затруднений по отводу высокочистого водорода из подмембранного пространства мембранных элементов плоского типа, связанных с повышенным гидравлическим сопротивлением, снижается как производительность МК-устройства, так и эффективность мембранного извлечения водорода, характеризуемая удельным показателем объемного выхода водорода.

Предложен обоснованный способ устранения повышенного гидравлического сопротивления в мембранных элементах плоского типа путем создания внутри пористой подложки продольных каналов без изменения геометрических размеров собственно мембранных элементов, что позволяет существенно увеличить производительность МК-устройства при высоком удельном показателе объемного выхода водорода.

Представленные результаты исследований могут быть использованы в качестве рекомендаций для дальнейшего развития и совершенствования мембранно-каталитических систем получения высокочистого водорода из углеводородного сырья.

Литература

1. Muravyev L. L., Vandyshev A. B., Makarov V. M. Modeling of membrane extraction of hydrogen from the products of steam conversion of hydrocarbons // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 1999. – Vol. 33. – P. 258–263.
2. Vandyshev A. B. Analyzing the parameters of membrane catalytic systems for extraction of highly pure hydrogen from hydrocarbon feedstock with the application of mathematical modeling // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2016. – Iss. 4. – P. 6–46. – DOI: 10.17804/2410-9908.2016.4.006-045. – URL: http://dream-journal.org/issues/2016-4/2016-4_87.html
3. Vandyshev A. B., Kulikov V. A. Assessment of the effects of temperature and pressure on the efficiency of high-purity hydrogen production from hydrocarbon feedstocks in membrane-catalytic devices // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 56. – P. 799–808. – DOI: 10.1007/s10556-021-00845-9.
4. Vandyshev A. B., Kulikov V. A. Assessment of the effect of hydrocarbon and steam mixture flow rate on the main parameters of high-purity hydrogen production in a membrane-catalytic device with a fixed membrane area // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 57. – P. 639–646. – DOI: 10.1007/s10556-021-00989-8.
5. Vandyshev A. B. Estimating the effect of some individual technological factors on the effectiveness of producing high-purity hydrogen from hydrocarbons in catalytic membrane devices // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2022. – Iss. 4. – P. 6–36. – DOI: 10.17804/2410-9908.2022.4.006-036. – URL: http://dream-journal.org/issues/2022-4/2022-4_359.html
6. Vandyshev A. B., Kulikov V. A. Analysis of the efficiency of a Pd/Ag membrane with a thickness of 2.25 microns on a porous ceramic substrate in a laboratory membrane reactor // Chemical and Petroleum Engineering. – 2019. – Vol. 55. – P. 129–135. – DOI: 10.1007/s10556-019-00592-y.
7. Vandyshev A. B., Kulikov V. A. Analysis of parameters for producing high-purity hydrogen from natural gas in a tubular type membrane-catalytic module // Chemical and Petroleum Engineering. – 2021. – Vol. 56. – P. 715–720. – DOI: 10.1007/s10556-021-00833-z.
8. Vandyshev A. B., Kulikov V. A. Analysis of the results of testing an individual disk-type membrane-catalytic module for obtaining high-purity hydrogen from methane // Chemical and Petroleum Engineering. – 2020. – Vol. 55. – P. 725–732. – DOI: 10.1007/s10556-020-00686-y.
9. Vandyshev A. B. A systematic analysis of the parameters of disk-type membrane-catalytic devices for producing high-purity hydrogen from methane and diesel fuel // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2020. – Iss. 4. – P. 6–27. – DOI: 10.17804/2410-9908.2020.4.06-27. – URL: http://dream-journal.org/issues/2020-4/2020-4_284.html
10. Гольцов В. А. Водород в металлах // Атомно-водородная энергетика и технология : сборник статей. – М. : Атомиздат, 1978–1988. – Вып. 1. – С. 193–230.
11. Vandyshev A. B., Kulikov V. A. Hydrogen permeability of palladium membranes made of alloy V-1 in laboratory investigations and membrane devices // Chemical and Petroleum Engineering. – 2015. – Vol. 51. – P. 396–401. – DOI: 10.1007/s10556-015-0058-4.
12. Simulation of steam methane reforming in a membrane reactor with a nickel catalyst and a palladium alloy foil / V. N. Babak, L. P. Didenko, Yu. P. Kvurt, L. A. Sementsova, S. E. Zakiev // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2021. – Vol. 55. – P. 390–402. – DOI: 10.1134/S0040579521030027.
13. Development of membrane reformer system for highly efficient hydrogen production from natural gas / Y. Shirasaki, T. Tsuneki, Y. Ota, I. Yasuda, S. Tachibana, H. Nakajima, K. Kobayashi // International Journal of Hydrogen Energy. – 2009. – Vol. 34, iss. 10. – P. 4482–4487. – DOI: 10.1016/j.ijhydene.2008.08.056.

14. Опыт практической реализации технологии конверсии углеводородного топлива с отбором водорода из зоны реакции / С. А. Живулько, В. Б. Аваков, И. К. Ланграфт, А. Р. Урусов // Труды V Всероссийской конференции «Топливные элементы и энергоустановки на их основе», Суздаль, 17–21 июня 2018 г. – Суздаль, 2018. – С. 62–64.
15. Development of a membrane-on-catalyst hydrogen production module for steam reforming of city gas / Y. Shirasaki, T. Sato, N. Itoh, T. Tsuneki, T. Nishii, H. Kurokawa, I. Yasuda, T. Shimamori, Y. Takagi, H. Hikosaka, H. Tanaka // Kagaku Kogaku Ronbunshu. – 2017. – Vol. 43. – P. 336–341. – DOI: 10.1252/KAKORONBUNSHU.43.336.
16. Lukyanov B. N. Obtaining ultra-pure hydrogen for fuel cells in the reactors with membrane separation // Chemistry for Sustainable Development. – 2012. – Vol. 20, No. 3. – P. 251–263.
17. Diffusion separation of hydrogen from gaseous mixtures / V. M. Baboshin, Yu. A. Buevich, A. K. Ivonin, I. V. Kirnos, B. G. Kukui // Journal of Engineering Physics. – 1984. – Vol. 47. – P. 821–826. – DOI: 10.1007/BF00832599.
18. High-temperature membrane apparatuses in systems for repeated utilization of hydrogen / A. B. Vandyshev, V. A. Kulikov, I. V. Kirnos, S. N. Nikishin // Chemical and Petroleum Engineering. – 2006. – Vol. 42. – P. 640–644. – DOI: 10.1007/s10556-006-0155-5.
19. Vandyshev A. B., Kulikov V. A., Nikishin S. N. Analysis of flow-rate characteristics of high-output membrane equipment for the production of ultra-pure hydrogen // Chemical and Petroleum Engineering. – 2010. – Vol. 46. – P. 72–78. – DOI: 10.1007/s10556-010-9294-9.

Received: 30.06.2023

Revised: 15.08.2023



Accepted: 25.08.2023



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.047-059

CAPABILITIES OF EDDY CURRENT NDT OF SOLDERED CURRENT-CARRYING JOINTS IN SUBMERSIBLE ELECTRICAL EQUIPMENT FOR OIL AND GAS INDUSTRY

L. Kh. Kogan^{a)},* and A. N. Stashkov^{b)}

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia*

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0003-2725-3748>  lhkogan@e1.ru;

^{b)}  <https://orcid.org/0000-0003-2169-274X>  stashkov@imp.uran.ru

*Corresponding author. E-mail: lhkogan@e1.ru

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia
Tel.: 8 (912) 632-6522

The paper shows the possibility to test the quality of soldering of small current-carrying non-ferromagnetic joints in submersible electrical equipment for oil and gas systems by the amplitude eddy current method using a highly sensitive primary transducer with a U-shaped core. The sensitivity of soldering quality testing under different conditions of generating an exciting signal is compared. It has been found that the sensitivity of NDT in the case of current amplitude stabilized in the excitation coil (current generator) is significantly higher than that in case of voltage amplitude stabilized in it (voltage generator). Possible errors in determining the level of soldering of the joints due to the variation of their cross section within the limits of tolerance according to the technology of their manufacture have been detected. Circuit solutions and software have been developed to test the level of soldering of such joins. Approbation of soldering quality testing was carried out on products manufactured under production conditions.

Keywords: eddy current method, submersible electrical equipment for oil and gas industry, current-carrying joints, soldering quality testing, eddy current transducer with a U-shaped core

Acknowledgment

The reported study was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme Diagnostics, No. 122021000030-1).

References

1. Rozenfeld, E.V., Nichipuruk, A.P., Kogan, L.Kh., and Khudyakov, B.A. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. I. General principles. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, 46 (4), 281–291. DOI: 10.1134/S1061830910040066.
2. Khromchenko, G.E. *Soedinenie i Okontsevanie Mednykh i Aluminiyevykh Provodov i Kabeley* [Connection and Termination of Copper and Aluminum Wires and Cables]. Gosenergoizdat Publ., Moscow–Leningrad, 1962, 49 p. (In Russian).
3. Principe, R., Vallejo, L.M., Bailey, J., Berthet, R., Favier, L., Grand-Clement, L., and Savary, F. Phased array ultrasonic nondestructive tests of soldered current-carrying bus-bar splices of superconducting magnets. In: *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, June 1–8, 2018, IEEE, 2018, 28 (4), 9000708. DOI: 10.1109/TASC.2018.2800735.

4. Malyy, V.V., Kostyukhin, A.S., and Kinzhagulov, I.Y. Development of technology for non-destructive quality control of heat exchanger brazed joints and determination of the principles of its automation. *Tekhniko-Tekhnologicheskie Problemy Servisa*, 2022, 3 (61), 11–17. (In Russian).
5. Maierhofer, Ch., Röllig, M., Steinfurth, H., Ziegler, M., Kreutzbruck, M., Scheuerlein, Ch., and Heck, S. Non-destructive testing of Cu solder connections using active thermography. *NDT & E International*, 2012, 52, 103–111. DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.07.010.
6. Kogan, L.Kh., Nichipuruk, A.P., Rozenfeld, E.V., and Khudyakov, B.A. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. II. Experiment. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, 46 (4), 292–301. DOI: 10.1134/S1061830910040078.
7. Syasko, V.A., Roitgarts, M.B., Koroteev, M.Yu., and Solomenchuk, P.V. Quality testing of soldered joints of turbogenerator stator winding cores at the “Elektrosila” plant. *V Mire Nerazruchayushchego Kontrolya*, 2010, 2 (56), 40–43. (In Russian).
8. Koroteev, M.Yu. Calculation of eddy current probe parameters for quality control of turbine generators rods winding soldering. *Estestvennye i Tekhnicheskie Nauki*, 2014, 2, 195–204. (In Russian).
9. Potapov, A.I., Syasko, V.A., Koroteev, M.Yu., and Solomenchuk, P.V. A Finite-element modeling of a probe of eddy-current quality testing of soldered joints in turbogenerator windings. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2014, 50 (5), 264–273. DOI: 10.1134/S1061830914050064.
10. Fedosenko, Yu.K., Shkatov, P.N., and Efimov, A.G. *Vikhretokovyy Kontrol* [Eddy Current Testing: Educational Book]. Spektr Publ., Moscow, 2011, 224 p. (In Russian).
11. Dorofeev, A.L. *Elektro-Induktivnaya Defektoskopiya* [Electroinductive (Induction) Flaw Detection]. Mashinostroenie Publ., Moscow, 1967, 231 p. (In Russian).
12. Syasko, V.A. and Chertov, D.N. Lamination detection in carbon fiber reinforced plastics with the use of tangential eddy current transducers. *V Mire Nerazruchayushchego Kontrolya*, 2012, 2 (56), 19–21. (In Russian).
13. Ge, J., Yusa, N., and Fan, M. Frequency component mixing of pulsed or multi-frequency eddy current testing for nonferromagnetic plate thickness measurement using a multi-gene genetic programming algorithm. *NDT & E International*, 2021, 120, 102423. DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102423.
14. Sidi-Ahmed, K., Maouche, B., Gabi, Y., Alloui, L., Straß, B., Wolter, B., and Feliachi, M. Numerical simulations and experimental investigation of laser hardening depth investigation via 3MA-eddy current technique. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2022, 550, 169046. DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169046.
15. Reutov, Yu.Ya. On joint application of permanent and alternating fields in magnetic detection of defects in thick-walled steel products. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2022, 58 (12), 1129–1141. DOI: 10.1134/S1061830922700139.

Подана в журнал: 30.06.2023



УДК 620.179.14



DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.047-059

ВОЗМОЖНОСТИ ВИХРЕТОКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ПАЙКИ ТОКОВЕДУЩИХ СОЕДИНЕНИЙ ПОГРУЖНОГО ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ НЕФТЕГАЗОВЫХ СИСТЕМ

Л. Х. Коган^{a)}, *, А. Н. Сташков^{b)}

*Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН,
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия*

^{a)}  <https://orcid.org/0000-0003-2725-3748>  lhkogan@e1.ru;

^{b)}  <https://orcid.org/0000-0003-2169-274X>  stashkov@imp.uran.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: lhkogan@e1.ru

Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

Тел.: 8 (912) 632–65–22

Показана возможность контроля качества пайки токоведущих малогабаритных ферромагнитных соединений погружного электрооборудования для нефтегазовых систем амплитудным вихретоковым методом с использованием высокочувствительного первичного преобразователя с П-образным сердечником. Проведено сравнение чувствительности контроля качества пайки при различных условиях генерации возбуждающего сигнала. Установлено, что чувствительность контроля при условии стабилизации амплитуды тока в возбуждающей обмотке вихретокового преобразователя (генератор тока) существенно выше, чем при стабилизации амплитуды напряжения в ней (генератор напряжения). Установлены возможные погрешности определения уровня пропаянности контролируемых соединений за счет вариации их сечения в пределах допуска по технологии их изготовления. Разработаны схмотехнические решения и программное обеспечение для контроля уровня пропаянности таких соединений. Проведена апробация контроля качества пайки на изделиях, изготовленных в производственных условиях.

Ключевые слова: вихретоковый метод, погружное электрооборудование для нефтегазовых систем, токоведущие соединения, контроль качества пайки, вихретоковый преобразователь с П-образным сердечником

1. Введение

При изготовлении токоведущих соединений погружного электрооборудования для нефтегазовых систем, состоящих из латунных или медных наконечников и выводного медного многожильного кабеля, требуется проверять качество пайки такого соединения. В реальных условиях из-за неудачной подготовки поверхностей, возникновения воздушных пузырей, частичного вытекания припоя заполнение припоем зазоров внутри наконечника оказывается неполным. Качество спая принято считать удовлетворительным, если не менее 60 % объема пустот внутри наконечника заполнено припоем [1, 2].

В случае некачественной пайки ухудшается электрический контакт в соединении, что приводит к существенному увеличению его электросопротивления. Это ведет к локальному увеличению плотности тока и температуры контакта, что может вызвать преждевременный выход его из строя. Для предотвращения подобных ситуаций необходимо проводить неразрушающий контроль паяных соединений до момента ввода их в эксплуатацию. Так как требуется проводить 100 %-й контроль качества, то применение физических методов неразрушающего контроля является единственным, безальтернативным вариантом.

Для контроля качества пайки элементов энергетического оборудования применяются термографические, акустические и вихретоковые методы. Например, в работе [3] показана возможность выявления дефектов в виде отсутствия связующего при пайке соединений шин сверхпроводящих магнитов в ЦЕРН ультразвуковым методом с применением антенных фазированных решеток. В статье [4] приведены сведения о возможности контроля качества паяных соединений теплообменных аппаратов с помощью автоматизированного ультразвукового контроля. Результаты контроля медных паяных соединений с помощью импульсной термографии приведены в работе [5].

Наиболее перспективными и широко применяемыми методами неразрушающего контроля качества паяных соединений являются вихретоковые [1, 6–15]. В работах [1, 6] приведены теоретические и практические сведения о вихретоковом контроле качества пайки токоведущих соединений электрических машин с применением П-образного трансформаторного преобразователя. Преобразователь данного типа не имеет аналогов. Его отличительной особенностью является высокая однородность магнитного поля в межполюсном пространстве, что положительно сказывается на результатах контроля паяных соединений. Такой контроль применяется для контроля элементов машин для выработки электроэнергии.

Вихретоковый контроль деталей энергетического оборудования описан и в работах [7–9], но в качестве первичного преобразователя использовался преобразователь экранного типа [10].

Для контроля качества пайки токоведущих соединений электрических машин в ИФМ УрО РАН была разработана и внедрена в производство методика и универсальное вихретоковое устройство ДПС-6, а также более поздняя его модификация ДПС-8 [1, 6].

Однако до настоящего времени вихретоковые методы применялись для контроля качества пайки соединений с достаточно большим сечением – от 310 до 1200 мм². В случае если сечение контролируемых соединений мало, изменения уровня пропаянности, влекущие за собой изменение электропроводности соединения в целом, незначительны. Поэтому для контроля необходимо использовать высокочувствительную аппаратуру вихретокового контроля.

Целью данной работы является определение возможности контроля качества пайки малогабаритных токоведущих соединений погружного электрооборудования для нефтегазовых систем амплитудным вихретоковым методом с использованием высокочувствительного трансформаторного преобразователя с сердечником П-образного типа.

2. Образцы и методики измерений

Токоведущие соединения погружного электрооборудования для нефтегазовых систем состоят из наконечников разной конфигурации (изготовленных из латуни марки Л63 или ЛС59 и меди марки М1) и выводного кабеля, изготовленного из многожильного медного провода. Латунные наконечники могут иметь внешний диаметр от 5,5 до 9,0 мм, внутренний диаметр от 4,2 до 6,2 мм и длину внутреннего пространства наконечника, в которую впаивается с использованием свинцово-оловянного припоя с добавлением серебра выводной кабель, равную 10,5 мм. Медные наконечники имеют внешний диаметр 9,0 мм, внутренний диаметр 6,2 мм и такую же длину (10,5 мм).

Исследования проводились на соединениях, имеющих наконечники из латуни (марки Л63) с внешним диаметром 5,5 мм и меди марки М1 с внешним диаметром 9 мм.

На рис. 1 приведен внешний вид таких соединений и сплошных образцов, имитирующих их пропаянность величиной 100 %.

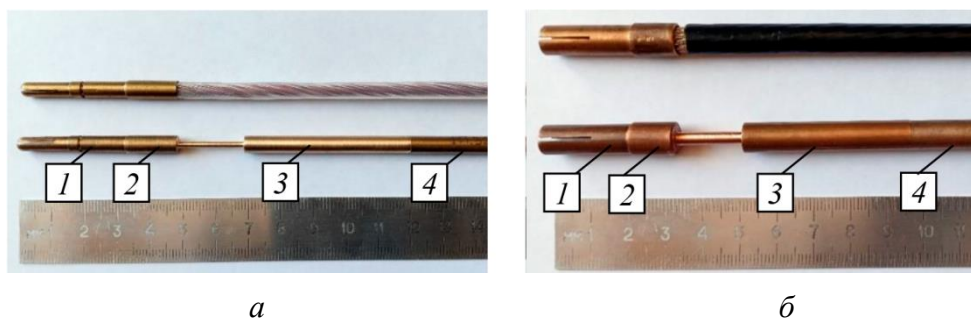


Рис. 1. Внешний вид токоведущих соединений наконечников из латуни (а) и меди (б) с выводным кабелем и сплошных образцов, имитирующих пропаянность 100 %

Исследования проводились:

- а) на образцах соединений с пропаянностью 0 %, у которых выводной кабель вклеивался в наконечник на полную длину его внутреннего пространства;
- б) на сплошных образцах, имитирующих наконечник со 100 %-й пропаянностью;
- в) на сплошных образцах, имитирующих наконечник, во внутреннее пространство которого (длиной 2 мм) впаивался выводной кабель;
- г) на пропаянных в условиях производства соединениях с неизвестным уровнем пропаянности.

Параметры образцов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Параметры соединений с латунными наконечниками

Образец №	Внешний диаметр наконечника, мм	Длина наконечника (часть 2 на рис. 1 а), мм	Пропаянность, %	Примечание
1	5,48	15,0	0	Выводной кабель вклеен в наконечник
2	5,47	15,0	Сплошной 100	–
3	5,47	15,0	Сплошной	Выводной кабель впаиван в наконечник на 2 мм
4	5,45	15,0	Неизвестна	Пайка в условиях предприятия-изготовителя
5	5,43	15,0	Неизвестна	Пайка в условиях предприятия-изготовителя

Для определения влияния внешнего диаметра латунного наконечника (часть 2 на рис. 1 а) на результаты контроля часть сплошного образца № 2 (часть 3 на рис. 1 а) длиной 50 мм была обточена до диаметра 5,33 мм, что на 0,12 мм меньше, чем диаметр части 4 (такой же длины) этого же образца (рис. 1 а), равный 5,45 мм.

Аналогично часть сплошного медного образца № 2 (часть 4 на рис. 1 б) длиной 50 мм была обточена до диаметра 7,95 мм, что составило 0,15 мм по отношению к части этого же образца 3 (рис. 1 б) диаметром 8,10 мм такой же длины.

Для создания однородного электромагнитного поля в зоне контроля использовали вихретоковый трансформаторный преобразователь с П-образным сердечником [6] размерами 10×20×36 мм. Так как исследуемые соединения имели малый диаметр и небольшую зону контроля, для увеличения чувствительности был изготовлен вихретоковый преобразователь (ВТП) с коэффициентом трансформации около 16.

Для исследования описанных выше образцов соединений с разным уровнем пропаянности использовалась компьютеризированная лабораторная установка для вихретокового контроля (ВТК), структурная схема которой приведена на рис. 2.

Таблица 2

Параметры соединений с медными наконечниками

Образец №	Внешний диаметр наконечника, мм	Длина наконечника (часть 2 на рис. 1 б), мм	Пропаянность, %	Примечание
1	8,95	11,0	0	Выводной кабель вклеен в наконечник
2	8,97	11,0	Сплошной 100	–
3	8,94	11,0	Сплошной	Выводной кабель впаян в наконечник на 2 мм
4	8,96	11,0	Неизвестна	Пайка в условиях предприятия-изготовителя
5	8,94	11,0	Неизвестна	Пайка в условиях предприятия-изготовителя

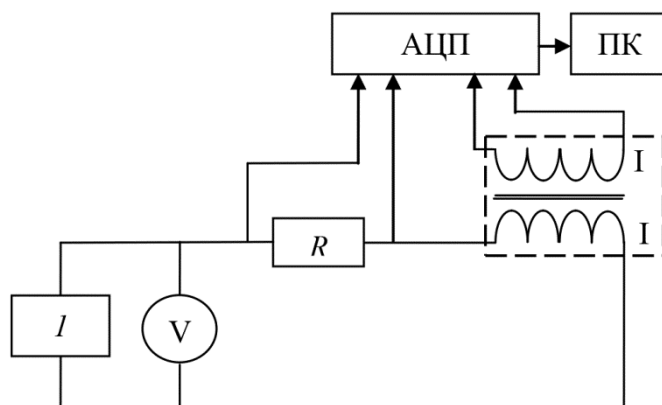


Рис. 2. Компьютеризированная лабораторная установка для вихретокового контроля: I – источник напряжения (тока), V – вольтметр, АЦП – аналого-цифровой преобразователь, ПК – персональный компьютер; пунктирной линией обозначен ВТП с возбуждающей (I) и измерительной (II) обмотками

В установке (рис. 2) роль фазометра и вольтметра выполнял АЦП NI USB-6361. С помощью написанного в среде графического программирования LabView программного обеспечения (ПО) измерялась разность фаз сигналов между возбуждающей и измерительной обмотками ВТП. С помощью ПО были записаны годографы вносимых напряжений для образцов соединений с разным уровнем пропаянности. После проведения калибровки на образцах

с пропаянностью 0 и 100 % может быть произведен расчет уровня пропаянности испытуемых соединений.

Недостаток компьютеризированной лабораторной установки (рис. 2) состоял в том, что она не позволяла проводить измерения при токах в обмотке возбуждения ВТП больше 7 мА (амплитуда электромагнитного поля в межполюсном пространстве H не более 1,43 А/см), что ограничивало ее чувствительность.

Основные исследования проводились с использованием лабораторной вихретоковой установки, позволявшей увеличить ток в обмотке ВТП до 30 мА, при этом амплитуда электромагнитного поля в межполюсном пространстве составляла около 4,70 А/см. Структурная схема такой лабораторной установки приведена на рис. 3. Усилитель 2 (рис. 3) включался как в режиме источника тока, так и в режиме источника напряжения.

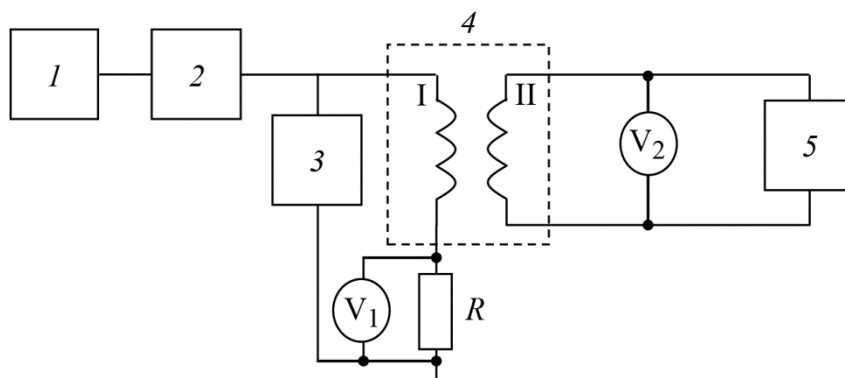


Рис. 3. Структурная схема лабораторной вихретоковой установки: 1 – генератор АКПП-3409/3; 2 – источник тока или напряжения; 3 – частотомер; 4 – трансформаторный ВТП с П-образным сердечником; 5 – осциллограф; V_1 – вольтметр В7-34А (предназначен для определения величин тока в обмотке возбуждения ВТП); V_2 – вольтметр DMM 4040; пунктирной линией обозначен ВТП с возбуждающей (I) и измерительной (II) обмотками

В качестве источника тока или напряжения 2 (рис. 3) применялись схемы, представленные на рис. 4.

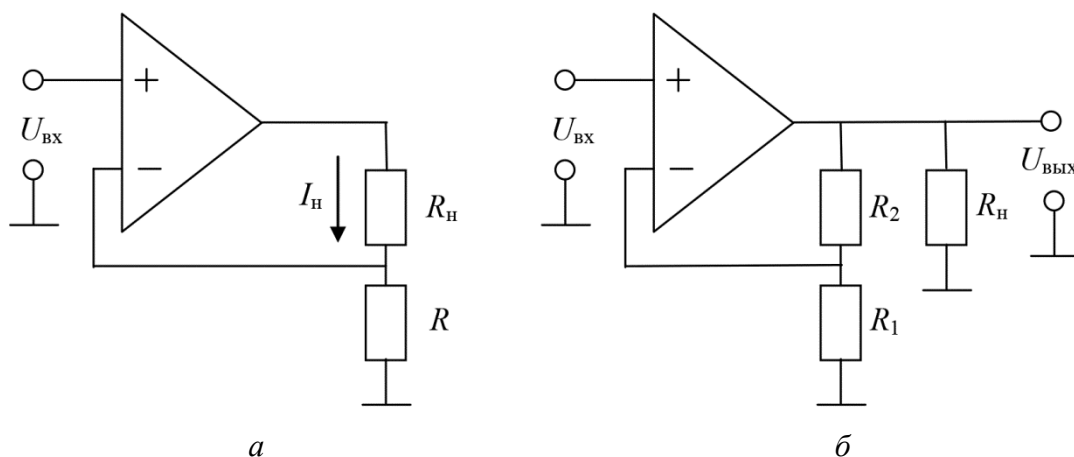


Рис. 4. Схемы источника тока (а) и источника напряжения (б), управляемых напряжением

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

3.1. Сравнение чувствительности контроля качества пайки при различных условиях генерации возбуждающего сигнала

С использованием компьютеризированной лабораторной установки (рис. 2) при варьировании частот от 1 до 6 кГц были записаны годографы вносимых напряжений для образцов соединений с латунными наконечниками диаметром 5,5 мм с уровнями пропаянности 0 и 100 %. При этом в одном случае (рис. 5 а) на возбуждающую обмотку ВТП подавалось напряжение постоянной величины равной 300 мВ (источник напряжения, управляемый напряжением), в другом (рис. 5 б) – напряжение при постоянной амплитуде тока, равной 7 мА (источник тока, управляемый напряжением).

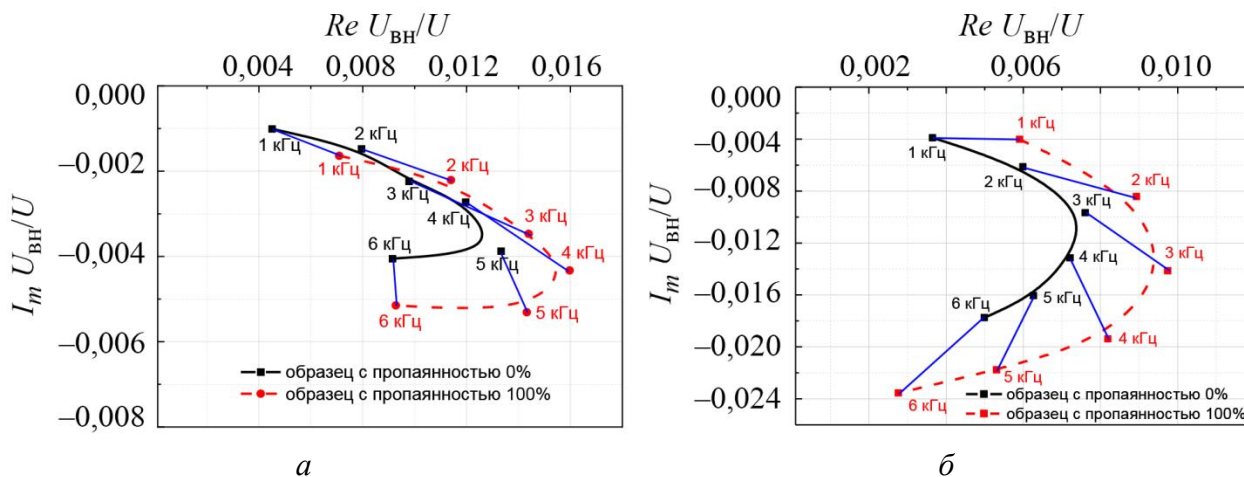


Рис. 5. Годографы вносимого напряжения, измеренные при постоянной амплитуде напряжения (а) и тока (б) в возбуждающей обмотке ВТП

Из результатов, представленных на рис. 5, следует, что максимальная чувствительность контроля (расстояние между точками на комплексной плоскости для образцов со степенями пропаянности 0 и 100 % на одинаковых частотах) получается на частотах от 3 до 4 кГц. Кроме того, предпочтительнее проведение контроля при стабилизации амплитуды возбуждающего тока.

Для более точного сравнения чувствительности контроля при использовании стабилизации напряжения (генератор напряжения) или тока (генератор тока), а также для определения оптимальной для контроля уровня пропаянности соединений частоты дальнейшие исследования проводились с использованием лабораторной вихретоковой установки, структурная схема которой приведена на рис. 3.

Оказалось, что оптимальная частота для контроля соединений с латунными наконечниками диаметром 5,5 мм составляет 2,9 кГц, а для соединений с медными наконечниками диаметром 9,0 мм – 930 Гц.

В таблице 3 приведены результаты измерений на соединениях с латунными наконечниками диаметром 5,5 мм с пропаянностью 0 % (образец 1, табл. 1) и 100 % (образец 2, табл. 1) на частоте 2,9 кГц при стабилизации напряжения (генератор напряжения) или тока (генератор тока). Напряжение и ток в обмотке возбуждения в обоих случаях составляли $U_{\text{возб}} = 2,103 \text{ В}$ и $I_{\text{возб}} = 30 \text{ мА}$ ($H = 4,70 \text{ А/см}$) соответственно.

Таблица 3

Результаты измерений сигнала ВТП на соединениях с латунными наконечниками и разными схемами возбуждения (режимы генератора напряжения и тока)

Образец №	Пропаянность %	Генератор напряжения		Генератор тока	
		$U_{\text{изм}}, \text{ В}$	$\Delta U_{\text{изм}}, \text{ В}$	$U_{\text{изм}}, \text{ В}$	$\Delta U_{\text{изм}}, \text{ В}$
1	0	33,596	0,024	33,396	0,209
2	100	33,572		33,187	

Приведенные данные показывают, что при постоянной амплитуде тока в возбуждающей обмотке ВТП (режим генератора тока) чувствительность контроля описанных выше соединений возрастает в 8,7 раза по сравнению с режимом генератора напряжения.

Аналогичные измерения были проведены на соединениях с медными наконечниками диаметром 9,0 мм с пропаянностью 0 (образец 1, табл. 2) и 100 % (образец 2, табл. 2) на частоте 930 Гц при стабилизации напряжения (генератор напряжения) или тока (генератор тока). Напряжение и ток в обмотке возбуждения в обоих случаях составляли $U_{\text{возб}} = 0,680$ В и $I_{\text{возб}} = 30$ мА ($H = 4,78$ А/см) соответственно. Результаты измерений приведены в таблице 4.

Таблица 4

Результаты измерений сигнала ВТП на соединениях с медными наконечниками и разными схемами возбуждения (режимы генератора напряжения и тока)

Образец №	Пропаянность %	Генератор напряжения		Генератор тока	
		$U_{\text{изм}}$, В	$\Delta U_{\text{изм}}$, В	$U_{\text{изм}}$, В	$\Delta U_{\text{изм}}$, В
1	0	10,636	0,116	10,651	0,628
2	100	10,520		10,023	

Данные таблицы 4 показывают, что в случае контроля соединений с медными наконечниками диаметром 9,0 мм чувствительность контроля при стабилизации тока генератора в 5,4 раза выше, чем при стабилизации его напряжения.

Это происходит вследствие того, что изменение амплитуды тока, вызванное действием вихревых токов, компенсируется путем уменьшения амплитуды напряжения. При этом, независимо от образцов, амплитуда тока в возбуждающей обмотке ВТП поддерживается постоянной.

3.2. Результаты исследований для наконечников из латуни

Исследованы токоведущие соединения наконечников из латуни диаметром 5,5 мм с выводным кабелем с использованием лабораторной вихретоковой установки, работающей в режиме источника тока (рис. 4 а).

При проведении измерений на оптимальной частоте $f = 2,9$ кГц при стабилизации тока в обмотке ВТП (при отсутствии образцов в его межполюсном пространстве) на уровне $I_{\text{возб}} = 30$ мА ($H = 4,70$ А/см) и $U_{\text{возб}} = 2,102$ В контролируемые соединения фиксировались в межполюсном пространстве ВТП определенным образом. Результаты измерений напряжений на измерительной обмотке ВТП ($U_{\text{изм}}$) приведены в таблице 5.

Ранее уже указывалось (см. стр. 4), что электромагнитное поле в межполюсном пространстве П-образного сердечника ВТП, имеющего длину 20 мм и расстояние между полюсами 10 мм, достаточно однородно [6]. Тем не менее, необходимо было определить, как изменяется величина $U_{\text{изм}}$ при перемещении контролируемого соединения в межполюсном пространстве ВТП. Оказалось, что изменение $U_{\text{изм}}$ при перемещении наконечника соединения № 3 (табл. 1) длиной 15 мм (часть 2, рис. 1 а), расположенного симметрично в межполюсном пространстве, от одного полюса к другому составляет 6 мВ (2,9 % по сравнению со значением $\Delta U_{\text{изм}}$, полученным при измерении на соединениях с пропаянностью 0 и 100 %), а при перемещении продольно относительно полюсов – 56 мВ (26,8 %). Поэтому при контроле необходима фиксация контролируемого соединения в межполюсном пространстве ВТП.

Важным вопросом является установление влияния возможных вариаций по техническим условиям внешних диаметров наконечников (в пределах 0,12 мм) на погрешность определения уровня пропаянности описанных выше соединений.

При этом необходимо было учесть два важных обстоятельства.

Во-первых, поскольку выводной кабель состоит из многожильного медного провода, диаметр жил которого составляет 1–2 мм, уровень вихревых токов, возникающих в них, пренебрежимо мал. Как показал эксперимент, напряжение измерительной обмотки не изменяется при помещении кабеля в ВТП и удалении из него.

Таблица 5

Результаты измерений напряжений на измерительной обмотке ВТП ($U_{изм}$)

Образец, №	Внешний диаметр наконечника, мм	Пропаянность, %	$U_{изм}$, В	$\Delta U_{изм}$, мВ	$\Delta U_{изм}$, %
1	5,48	0	33,396	209	100
2	5,47	100	33,187		
3	5,47	Кабель впаян в наконечник на 2 мм	33,189	207	99,0
4	5,45	Пропаянность неизвестна	33,241	155	72,4
5	5,43	Пропаянность неизвестна	33,264	132	63,2
2 (часть 3)	–	Сплошной $\varnothing = 5,33$ мм длина 50 мм	33,105	55	26,3
2 (часть 4)	–	Сплошной $\varnothing = 5,45$ мм длина 50 мм	33,050		

Во-вторых, электромагнитное поле, имеющее в центре межполюсного пространства величину $H = 4,70$ А/см, на его краю равно $H = 4,22$ А/см, а на расстоянии 7,5 мм от края полюса ВТП уменьшается в e раз и составляет величину 1,51 А/см. Учитывая, что ширина полюса ВТП составляет 20 мм, изменения диаметра контролируемого соединения будут значительно влиять на сигнал ВТП, если они происходят в пределах 35 мм зоны контроля (17,5 мм в обе стороны от центра ВТП).

Для определения влияния вариаций внешних диаметров наконечников на результаты контроля часть 3 сплошного образца № 2 (рис. 1 а) была обточена на длине 50 мм до диаметра 5,33 мм и величина $U_{изм}$, измеренная на этой части образца, сравнивалась с $U_{изм}$ на соседней части этого же образца 4, имеющего диаметр 5,45 мм и длину 50 мм (табл. 5).

Из данных табл. 5 следует, что при изменении диаметра на 0,12 мм эта разница составляет 26,2 % по сравнению с величиной $\Delta U_{изм}$, полученной при измерении на соединениях с пропаянностью 0 и 100 %. При этом средний объем частей 3 и 4 образца № 2 длиной 35 мм равен $V_{спл} = 1 \cdot (\pi D^2/4) = 35 \cdot [3,14 \cdot (5,39)^2/4] = 798,21$ мм³.

Объем наконечника, находящегося в зоне контроля, складывается из объема части 2 длиной 15 мм и объема части 1 длиной 10,0 мм (рис. 1 а): $V_{нак} = V_1 + V_2 = 15 \cdot [3,14 \cdot (5,47)^2/4] + 10,0 \cdot [3,14 \cdot (4,93)^2/4] = 544,62$ мм³.

Таким образом, если учесть соотношение этих объемов, равное $V_{нак}/V_{спл} = 544,62$ мм³ / $798,21$ мм³ = 0,68, то погрешность определения уровня пропаянности соединений с латунным наконечником диаметром 5,5 мм при вариации его внешнего диаметра 0,12 мм составит 26,2 % · 0,68 = 17,9 %. Изменение диаметра предоставленных предприятием-изготовителем соединений составило 0,05 мм, что соответствует погрешности определения уровня их пропаянности, равной 17,9 % · 0,05/0,12 = 7,5 %.

Можно ожидать, что погрешность определения уровня пропаянности соединений с латунными наконечниками диаметрами 6,5; 7,0; 8,0; и 9,0 мм при вариации внешнего диаметра на 0,12 мм будет меньше 17,9 %.

3.3. Результаты исследований для наконечников из меди

Исследованы токоведущие соединения наконечников из меди диаметром 9,0 мм с выводным кабелем с использованием лабораторной вихретоковой установки, работающей в режиме источника тока (рис. 4 а).

Измерения проводились на оптимальной частоте $f = 930$ Гц при стабилизации тока в обмотке ВТП (при отсутствии образцов в его межполюсном пространстве) на уровне $I_{\text{возб}} = 30$ мА ($H = 4,78$ А/см) и $U_{\text{возб}} = 0,680$ В. Результаты измерений напряжений на измерительной обмотке ВТП ($U_{\text{изм}}$) приведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты измерений напряжений на измерительной обмотке ВТП ($U_{\text{изм}}$)

Образец, №	Внешний диаметр наконечника, мм	Пропаянность, %	$U_{\text{изм}}$, В	$\Delta U_{\text{изм}}$, мВ	$\Delta U_{\text{изм}}$, %
1	8,95	0	10,651	628	100
2	8,97	100	10,023		
3	8,94	Кабель впаян в наконечник на 2 мм	10,054	597	95,0
4	8,96	Полностью пропаянный	10,180	471	75,0
5	8,94	Не полностью пропаянный	10,299	352	56,0
2 (часть 3)	–	Сплошной $\varnothing = 8,10$ мм длина 50 мм	9,806	48	7,6
2 (часть 4)	–	Сплошной $\varnothing = 7,95$ мм длина 50 мм	9,854		

Результаты измерений, аналогичные приведенным в п. 3.2, по перемещению медного наконечника соединения № 3 (табл. 6) в межполюсном пространстве ВТП показали, что при перемещении от полюса к полюсу $U_{\text{изм}}$ не изменяется, а при перемещении продольно относительно полюсов изменяется на $\Delta U_{\text{изм}} = 12$ мВ (1,8 % от шкалы). Поэтому фиксация контролируемых медных соединений в межполюсном пространстве ВТП также необходима.

Электромагнитное поле, измеренное на $f = 930$ Гц, имеющее в центре межполюсного пространства величину $H = 4,78$ А/см, на его краю равно $H = 4,46$ А/см, а затем на расстоянии 7,5 мм от края уменьшается в e раз и составляет величину 1,59 А/см. Аналогично результатам для латунных наконечников, с учетом того что ширина полюса ВТП составляет 20 мм, изменения диаметра контролируемого соединения будут значительно влиять на сигнал ВТП, если они происходят в пределах 35 мм его зоны контроля (17,5 мм в обе стороны от центра ВТП).

Для определения влияния вариаций внешних диаметров медных наконечников на результаты контроля часть 4 сплошного образца № 2 (рис. 1 б) была обточена на длине 50 мм до диаметра 7,95 мм и величина $U_{\text{изм}}$, полученная при измерении на этой части образца, сравнивалась с $U_{\text{изм}}$, полученной на части 3 этого же образца (диаметром 8,1 мм и длиной 50 мм), что показано в табл. 6.

Из данных табл. 6 следует, что при изменении внешнего диаметра на 0,15 мм эта разница составляет 7,6 % по сравнению с величиной $\Delta U_{\text{изм}}$, полученной при измерении на соединениях с пропаянностью 0 и 100 %. При этом средний объем частей 3 и 4 образца № 2, находящихся в пределах 35 мм зоны контроля ВТП, равен $V_{\text{спл}} = 1 \cdot (\pi D^2/4) = 35 \cdot [3,14 \cdot (8,02)^2/4] = 1767,2$ мм³.

Объем медного наконечника, находящегося в пределах 35 мм зоны контроля ВТП, складывается из собственно длины 2 (рис. 1 б) наконечника, равной 11 мм (V_1), части 1 (рис. 1 б), состоящей из сплошного цилиндра диаметром 8,0 мм и длиной 3,0 мм (V_2), а также полый части такого же диаметра длиной 7,5 мм и толщиной 1,4 мм с разрезом (V_3). Очевидно, что вихревые токи, возникающие в этой полый части, будут давать существенно меньший вклад в величину $U_{изм}$. Будем условно считать, что этот вклад будет в четыре раза меньше, чем если бы эта часть длиной 7,5 мм была сплошной. Тогда общий объем медного наконечника, находящегося в пределах 35 мм зоны контроля ВТП, будет равен $V_{нак} = V_1 + V_2 + V_3 = 11 \cdot (3,14 \cdot 8,95^2/4) + 3,0 \cdot (3,14 \cdot 8,0^2/4) + 7,5 \cdot (3,14 \cdot 8,0^2/4)/4 = 936,6 \text{ мм}^3$.

Таким образом, если учесть соотношение этих объемов, равное $V_{нак}/V_{спл} = 936,6 \text{ мм}^3 / 1767,2 \text{ мм}^3 = 0,53$, то погрешность определения уровня пропаянности соединений с медным наконечником диаметром 9,0 мм при вариации его внешнего диаметра 0,15 мм составит $7,6 \% \cdot 0,53 = 4,03 \%$. Соответственно, при изменении внешнего диаметра на 0,1 мм погрешность определения уровня пропаянности составит 2,69 %.

По техническим условиям внешний диаметр медного наконечника может быть меньше номинального (9,0 мм) на 0,2 мм, а внутренний диаметр на 0,2 мм больше номинального (6,2 мм). Если учесть, что изменение внутреннего диаметра будет несколько меньше влиять на $U_{изм}$, чем аналогичное изменение внешнего диаметра, то общая погрешность определения уровня пропаянности такого соединения за счет вариации его диаметров, допустимых по ТУ, не будет превышать 10,7 %.

4. Заключение

Показана возможность контроля качества пайки токоведущих малогабаритных соединений погружного электрооборудования для нефтегазовых систем с латунными или медными наконечниками амплитудным вихретоковым методом с использованием высокочувствительного первичного преобразователя с П-образным сердечником. Проведено сравнение чувствительности контроля качества пайки при различных условиях генерации возбуждающего сигнала. Установлено, что чувствительность контроля при использовании источника тока для возбуждающей обмотки ВТП (режим генератора тока) повышается в 5–9 раз (при частотах контроля от 930 Гц до 2,9 кГц) по сравнению с использованием источника напряжения. Погрешность определения уровня пропаянности контролируемых соединений погружного электрооборудования из-за вариации их сечения в пределах допуска по технологии изготовления для токоведущих соединений с латунными наконечниками диаметром 5,5 мм составила 17,9 %, а для соединений с медными наконечниками диаметром 9,0 мм – 10,7 %.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

Литература

1. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. I. General principles / E. V. Rozenfeld, A. P. Nichipuruk, L. Kh. Kogan, B. A. Khudyakov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46, iss. 4. – P. 281–291. – DOI: 10.1134/S1061830910040066.
2. Хромченко Г. Е. Соединение и оконцевание медных и алюминиевых проводов и кабелей. – 2-е изд. – Москва ; Ленинград : Госэнергоиздат, 1962. – 49 с.
3. Phased array ultrasonic nondestructive tests of soldered current-carrying bus-bar splices of superconducting magnets / R. Principe, L. M. Vallejo, J. Bailey, R. Berthet, L. Favier, L. Grand-



- Clement, F. Savary // IEEE Transactions on Applied Superconductivity, June 1–8, 2018. – IEEE, 2018. – Vol. 28, No. 4. – 9000708. – DOI: 10.1109/TASC.2018.2800735.
4. Малый В. В., Костюхин А. С., Кинжагулов И. Ю. Разработка технологии неразрушающего контроля качества паяных соединений теплообменных аппаратов и определение принципов ее автоматизации // Техничко-технологические проблемы сервиса. – 2022. – № 3 (61). – С. 11–17.
 5. Non-destructive testing of Cu solder connections using active thermography / Ch. Maierhofer, M. Röllig, H. Steinfurth, M. Ziegler, M. Kreutzbruck, Ch. Scheuerlein, S. Heck // NDT & E International. – 2012. – Vol. 52. – P. 103–111. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2012.07.010.
 6. Eddy-current quality control of soldering of current-carrying joints in electrical machines. II. Experiment / L. Kh. Kogan, A. P. Nichipuruk, E. V. Rozenfeld, B. A. Khudyakov // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2010. – Vol. 46, iss. 4. – 292–301. – DOI: 10.1134/S1061830910040078.
 7. Контроль качества паяных соединений стержней статорных обмоток турбогенераторов на заводе «Электросила» / В. А. Сясько, М. Б. Ройтгарц, М. Ю. Коротеев, П. В. Соломенчук // В мире неразрушающего контроля. – 2010. – № 2 (56). – С. 40–43.
 8. Коротеев М. Ю. Расчет параметров вихретоковых преобразователей для контроля качества пайки стержней статорной обмотки турбогенераторов // Естественные и технические науки. – 2014. – № 2. – С. 195–204.
 9. A Finite-element modeling of a probe of eddy-current quality testing of soldered joints in turbogenerator windings / A. I. Potapov, V. A. Syasko, M. Yu. Koroteev, P. V. Solomenchuk // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2014. – Vol. 50, iss. 5. – P. 264–273. – DOI: 10.1134/S1061830914050064.
 10. Федосенко Ю. К., Шкатов П. Н., Ефимов А. Г. Вихретоковый контроль : учебное пособие / под общ. ред. В. В. Ключева. – М. : Издательский дом «Спектр». – 2011. – 224 с.
 11. Дорофеев А. Л. Электро-индуктивная дефектоскопия. – М. : Машиностроение, 1967. – 231 с.
 12. Сясько В. А., Чертов Д. Н. Выявление расслоений углепластиковых материалов с использованием тангенциальных вихретоковых преобразователей // В мире неразрушающего контроля. – 2012. – № 2 (56). – С. 19–21.
 13. Ge J., Yusa N., Fan M. Frequency component mixing of pulsed or multi-frequency eddy current testing for nonferromagnetic plate thickness measurement using a multi-gene genetic programming algorithm // NDT & E International. – 2021. – Vol. 120. – P. 102423. – DOI: 10.1016/j.ndteint.2021.102423.
 14. Numerical simulations and experimental investigation of laser hardening depth investigation via 3MA-eddy current technique / K. Sidi-Ahmed, B. Maouche, Y. Gabi, L. Alloui, B. Straß, B. Wolter, M. Feliachi // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, – 2022. – Vol. 550. – P. 169046 – DOI: 10.1016/j.jmmm.2022.169046.
 15. Reutov Yu. Ya. On joint application of permanent and alternating fields in magnetic detection of defects in thick-walled steel products // Russian Journal of Nondestructive Testing. – 2022. – Vol. 58, iss. 12. – P. 1129–1141. – DOI: 10.1134/S1061830922700139.

Received: 30.06.2023**Revised:** 14.08.2023**Accepted:** 25.08.2023**DOI:** 10.17804/2410-9908.2023.4.060-072

ESTIMATING COMPLEX DIELECTRIC PERMITTIVITY OF MATERIALS BY THE FREQUENCY DEPENDENCES OF REFLECTION AND TRANSMISSION COEFFICIENT MAGNITUDES IN THE MICROWAVE RANGE

D. V. Perov

*M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620108, Russia*

 <https://orcid.org/0000-0002-3785-4881>  peroff@uran.ru

E-mail: peroff@uran.ru

Address for correspondence: ul. S. Kovalevskoy, 18, Ekaterinburg, 620108, Russia

Tel.: +7 (343) 378-3697

Electromagnetic waves of the microwave range are an effective tool for solving problems of non-destructive testing and diagnostics as applied to dielectric, semiconductor, and composite materials, ferrite products. An algorithm is suggested for estimating the complex permittivity of non-magnetic materials by the frequency dependences of reflection and transmission coefficient magnitudes during the interaction of electromagnetic waves in the microwave range with a sample in the form of a plate located in the cross section of a closed rectangular waveguide. Statistical analysis methods are applied to evaluating the errors arising during the application of this algorithm due to imperfect matching of the waveguide measurement path with the receivers and generator of the scalar circuit analyzer. It is shown that the proposed algorithm using the results of measuring reflection and transmission coefficients in a wide frequency range can significantly reduce the influence of frequency-dependent measurement errors on the accuracy of complex permittivity estimation. An additional advantage of the algorithm is that its implementation does not require vector network analyzers, which are very expensive.

Keywords: radiowave non-destructive testing methods, microwave measurements, super high frequencies, scalar circuit analyzer, reflection and transmission coefficients, complex dielectric permittivity

Acknowledgment

The results were obtained within the state assignment from the Ministry of Science and Higher Education of Russia, themes No. 122021000036-3 "Spin" and No. 122021000035-6 "Function".

References

1. Mazor, Yu.L., Machusskii, E.A., and Pravda, V.I., eds. *Radiotekhnika: Entsiklopediya* [Radio Engineering: Encyclopedia]. Dodeka–XXI Publ., Moscow, 2002. 994 p. (In Russian).
2. Klyuev, V.V. and Zusman, G., eds. *Nondestructive Testing and Diagnostics: Handbook*, RSNTTD Publ., Moscow; Metrix Instrument Co., Houston, 2004, 656 p.
3. Chen, L.F., Ong, C.K., Neo, C.P., Vardan, V.V., and Vardan, V.K. *Microwave Electronics: Measurements and Material Characterization*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester 2004, 537 p.
4. Nikolsky, V.V. and Nikolskaya, T.I. *Elektrodinamika i Rasprostranenie Radiovoln* [Electrodynamics and Propagation of Radio Waves]. Nauka Publ., Moscow, 1989, 544 p. (In Russian).

5. Semenov, N.A. *Tekhnicheskaya Elektrodinamika* [Technical Electrodynamics]. Svyaz Publ., Moscow, 1973, 480 p. (In Russian).
6. Brekhovskikh, L.M. *Waves in Layered Media*, Academic Press, New York, 1980, 503 p.
7. R2-65 panoramic VSWR meter: user manual, Vilnius, 1986, 116 p. (In Russian).
8. R2-67 panoramic VSWR meter: user manual, Vilnius, 1986, 124 p. (In Russian).
9. Rinkevich, A.B., Perov, D.V., Kuznetsov, E.A., Nemytova, O.V., Milyaev, M.A., and Ustinov, V.V. Enhancement of microwave giant magnetoresistance effect in reflected wave. *Applied Physics Letters*, 2022, 120 (23), 233502. DOI: 10.1063/5.0095405.
10. Rinkevich, A.B., Perov, D.V., Pakhomov, Ya.A., Samoylovich, M.I., and Kuznetsov, E.A. Millimeter waveband dielectric properties of nanocomposite materials based on opal matrices with particles of spinels. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2016, 37 (11), 1124–1138. DOI: 10.1007/s10762-016-0308-3.
11. Bykov, V.V. *Tsifrovoe Modelirovanie v Statisticheskoy Radiotekhnike* [Digital Modeling in Statistical Radio Engineering]. Sovetskoe Radio Publ., Moscow, 1971, 328 p. (In Russian).
12. Rabiner, L.R. and Gold, B. *Theory and Application of Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, NJ, Englewood Cliffs, 1975, 762 p.
13. Tikhonov, V.I. *Statisticheskaya Radiotekhnika* [Statistical Radio Engineering]. Radio i Svyaz Publ., Moscow, 1982, 624 p. (In Russian).
14. Kunze H.-J. *Physical Measurement Methods: An Introduction to the Principles of Classical and Modern Methods*, Vieweg+Teubner Verlag, Stuttgart, 1986, 226 p. (In German).
15. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. M. Abramowitz and I.A. Stegun, eds., Dover, New York, 1972, 1046 p.
16. Rinkevich, A.B., Nemytova, O.V., Perov, D.V., Samoylovich, M.I., and Kuznetsov, E.A. Artificial crystals with 3d metal and palladium particles subjected to high-temperature heat treatment. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2018, 451, 38–46. DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.10.112.

Подана в журнал: 30.06.2023



УДК 620.179.18:537.86:537.226.1:621.372.8

DOI: 10.17804/2410-9908.2023.4.060-072

ОЦЕНКА КОМПЛЕКСНОЙ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ МАТЕРИАЛОВ ПО ЧАСТОТНЫМ ЗАВИСИМОСТЯМ МОДУЛЕЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОТРАЖЕНИЯ И ПРОХОЖДЕНИЯ В МИКРОВОЛНОВОМ ДИАПАЗОНЕ

Д. В. Перов

*Институт физики металлов им. М. Н. Михеева Уральского отделения РАН,
ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия*

 <https://orcid.org/0000-0002-3785-4881>  peroff@uran.ru

Электронная почта: peroff@uran.ru

Адрес для переписки: ул. С. Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620108, Россия

Тел.: +7 (343) 378–36–97

Электромагнитные волны микроволнового диапазона являются эффективным инструментом для решения задач неразрушающего контроля и диагностики применительно к диэлектрическим, полупроводниковым и композитным материалам, изделиям из ферритов. Предложен алгоритм определения комплексной диэлектрической проницаемости немагнитных материалов по частотным зависимостям модулей коэффициентов отражения и прохождения при взаимодействии электромагнитных волн микроволнового диапазона с образцом в виде пластины, расположенной в поперечном сечении экранированного волновода прямоугольного сечения. С использованием статистических методов анализа выполнена оценка погрешностей, возникающих при применении данного алгоритма, которые обусловлены неидеальным согласованием волноводного измерительного тракта с приемниками и генератором скалярного анализатора цепей. Показано, что предлагаемый в данной работе алгоритм, использующий результаты измерений коэффициентов отражения и прохождения в широком диапазоне частот, позволяет существенно уменьшить влияние частотно-зависимых погрешностей их измерения на точность оценки комплексной диэлектрической проницаемости. Дополнительное преимущество рассматриваемого алгоритма заключается в том, что для его реализации не требуются векторные анализаторы цепей, которые являются весьма дорогостоящим оборудованием.

Ключевые слова: радиоволновые методы контроля, микроволновые измерения, сверхвысокие частоты, скалярный анализатор цепей, коэффициенты отражения и прохождения, комплексная диэлектрическая проницаемость

1. Введение

Электромагнитные волны микроволнового диапазона относятся к области спектра электромагнитного излучения с длинами волн от 1 м до 1 мм, соответствующими частотам от 300 МГц и до 300 ГГц. Внутри микроволнового диапазона можно выделить область сверхвысоких частот (СВЧ), от 3 до 30 ГГц, которой соответствует интервал значений длин волн от 10 до 1 см (сантиметровые волны) [1]. Электромагнитные волны СВЧ диапазона находят чрезвычайно широкое практическое применение в системах радиолокации и радиосвязи различного назначения, плазменных установках, нагревательных устройствах промышленного и бытового назначения и многих других радиотехнических приборах и системах [1], в частности в тех, которые применяются для выполнения неразрушающего контроля изделий, а также для оценки электрических и магнитных параметров различных материалов [2, 3].

Использование электромагнитных волн микроволнового диапазона для задач неразрушающего контроля и диагностики является особенно эффективным применительно к диэлектрическим, полупроводниковым и композитным материалам, изделиям из ферритов. Радиоволновые методы неразрушающего контроля могут применяться для проверки качества изделий при их промышленном производстве, а именно: для обнаружения локальных структурных дефектов, контроля адгезии металлических пленок к диэлектрическим подложкам, определения толщины диэлектрических пластин. Другой важной областью их применения является оценка электрических и магнитных параметров материалов: комплексных магнитной и диэлектрической проницаемостей, удельной электрической проводимости, что является актуальной задачей как при промышленном производстве изделий, так и при научных исследованиях свойств материалов [2, 3].

В данной работе будет рассмотрена методика оценки комплексной диэлектрической проницаемости немагнитных материалов по частотным зависимостям модулей коэффициентов отражения и прохождения при взаимодействии электромагнитных волн микроволнового диапазона с образцом в виде пластины, расположенной в поперечном сечении экранированного волновода прямоугольного сечения.

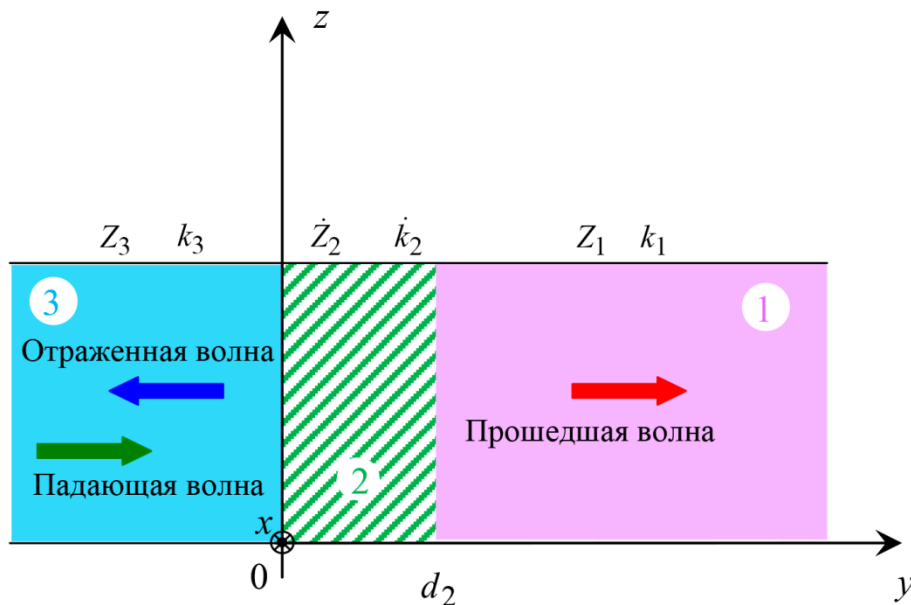


Рис. 1. Схема нумерации сред и направления распространения

2. Постановка задачи и методы решения

Рассмотрим систему, состоящую из двух полупространств: сред № 1 и 3, а также среды № 2 (слой толщиной d_2), которая схематично показана на рис. 1. Предположим, что данная система из трех сред располагается внутри экранированного волновода прямоугольного сечения, то есть имеет конечные размеры в направлениях осей x и z . Как известно [4, 5], в этом случае волновое число и импеданс для среды с номером n с комплексными диэлектрической $\dot{\epsilon}_n$ и магнитной $\dot{\mu}_n$ проницаемостями будут иметь вид

$$\dot{k}_n = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_0}\right)^2 \dot{\epsilon}_n \dot{\mu}_n - \left(\frac{\pi p}{a}\right)^2 - \left(\frac{\pi q}{b}\right)^2}, \quad (1)$$

$$\dot{Z}_n = \frac{\omega \mu_0 \dot{\mu}_n}{k_n}, \quad (2)$$

где $c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$ – скорость распространения электромагнитных волн в вакууме; ϵ_0 и μ_0 – это, соответственно, электрическая и магнитная постоянные; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота; f – частота; a и b – это, соответственно, ширина и высота волновода, то есть размеры его поперечного сечения по осям x и z . Формулы (1) и (2) относятся к модам типа Н (или ТЕ) [4, 5], которые имеют обозначение H_{pq} , где $p = (0), 1, 2, \dots$ и $q = (0), 1, 2, \dots$ (индексы p и q не могут быть одновременно равны нулю).

Мода H_{10} является фундаментальной модой волновода прямоугольного поперечного сечения [4, 5], которая наиболее часто используется на практике, поскольку она имеет наименьшую частоту отсечки и, следовательно, является единственной распространяющейся модой в определенном интервале частот. Выпишем отдельно вещественную и мнимую части волнового числа $\dot{k}_n = k'_n - ik''_n$, определяемого формулой (1), при $p = 1$ и $q = 0$:

$$k'_n = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\Re_n^4 + \Im_n^4} + \Re_n^2 \right)}, \quad (3)$$

$$k''_n = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\sqrt{\Re_n^4 + \Im_n^4} - \Re_n^2 \right)}, \quad (4)$$

где $\Re_n = \sqrt{\left(\frac{\omega}{c_0} \right)^2 (\epsilon'_n \mu'_n - \epsilon''_n \mu''_n) - \left(\frac{\pi}{a} \right)^2}$ и $\Im_n = \frac{\omega}{c_0} \sqrt{(\epsilon''_n \mu'_n + \epsilon'_n \mu''_n)}$.

В формулах (3) и (4) используются представления для комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей через их вещественные и мнимые части в виде $\dot{\epsilon}_n = \epsilon'_n - i\epsilon''_n$ и $\dot{\mu}_n = \mu'_n - i\mu''_n$.

Далее будем полагать, что среды № 1 и 3 одинаковы, причем $\dot{\epsilon}_1 = \dot{\epsilon}_3 = 1$ и $\dot{\mu}_1 = \dot{\mu}_3 = 1$. Таким образом, среды № 1 и 3 – это воздух. Среду № 2 будем также считать немагнитной, то есть $\dot{\mu}_2 = 1$. Для комплексной диэлектрической проницаемости среды № 2 будем использовать представление вида [3–5]

$$\dot{\epsilon}_2 = \epsilon'_2 - i\epsilon''_2 = \epsilon'_2 - i \frac{\sigma_2}{\omega \epsilon_0}, \quad (5)$$

где σ_2 – удельная микроволновая электрическая проводимость среды № 2. Тогда комплексные коэффициенты отражения и прохождения при взаимодействии волны с одиночным слоем будут иметь следующий вид [5, 6]:

$$\dot{R} = \frac{i(\dot{Z}_2^2 - Z_1^2) \sin(\dot{k}_2 d_2)}{2Z_1 \dot{Z}_2 \cos(\dot{k}_2 d_2) + i(\dot{Z}_2^2 + Z_1^2) \sin(\dot{k}_2 d_2)}, \quad (6)$$

$$\dot{T} = \frac{2Z_1 \dot{Z}_2}{2Z_1 \dot{Z}_2 \cos(\dot{k}_2 d_2) + i(\dot{Z}_2^2 + Z_1^2) \sin(\dot{k}_2 d_2)}. \quad (7)$$

Предположим, что значения параметров ε'_2 и σ_2 неизвестны, их необходимо найти. Соответственно, необходимо разработать алгоритм определения этих величин по известным частотным зависимостям коэффициентов отражения и прохождения, которые могут быть измерены экспериментально. Другой важной задачей является определение погрешностей при получении оценок параметров с использованием данного алгоритма.

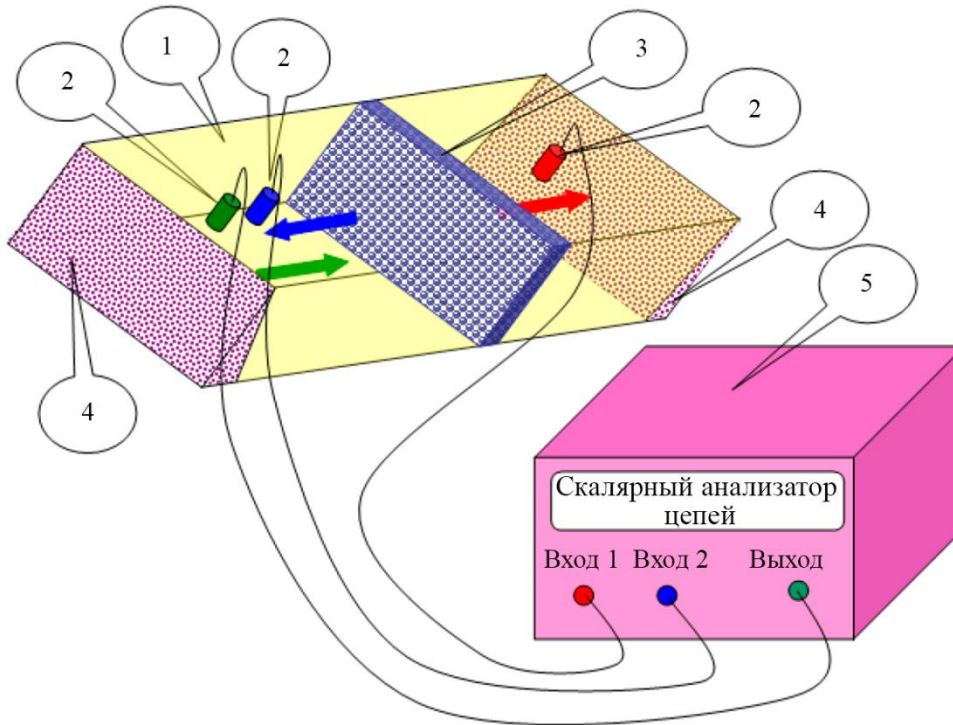


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – волновод; 2 – коаксиально-волноводные переходы; 3 – исследуемый образец; 4 – поглотители электромагнитных волн; 5 – скалярный анализатор цепей

Для выполнения экспериментальных исследований была использована установка на основе волноводного измерительного тракта, схема которой приведена на рис. 2. Исследуемый образец в виде прямоугольной пластины располагался в поперечном сечении волновода, полностью перекрывая его. В состав установки входит скалярный анализатор цепей [7–9], который позволяет получать экспериментальные частотные зависимости модулей комплексных коэффициентов отражения и прохождения $|\dot{R}_*(f)|$ и $|\dot{T}_*(f)|$. Если сопоставить эти зависимости с соответствующими теоретическими функциями $|\dot{R}(f, \varepsilon'_2, \sigma_2)|$ и $|\dot{T}(f, \varepsilon'_2, \sigma_2)|$, рассчитанными по формулам (6) и (7), то оценочные значения параметров ε'_2 и σ_2 могут быть получены из условия минимизации среднеквадратичных разностей следующего вида:

$$\Delta^R(\varepsilon'_2, \sigma_2) = \min_{\varepsilon'_2 = \varepsilon'_{2*}} \min_{\sigma_2 = \sigma_{2*}} \sum_{j=1}^J \left[\left| \dot{R}(f_j, \varepsilon'_2, \sigma_2) \right| - \left| \dot{R}_*(f_j) \right| \right]^2, \quad (8)$$

$$\Delta^T(\varepsilon'_2, \sigma_2) = \min_{\varepsilon'_2 = \varepsilon'_{2*}} \min_{\sigma_2 = \sigma_{2*}} \sum_{j=1}^J \left[\left| \dot{T}(f_j, \varepsilon'_2, \sigma_2) \right| - \left| \dot{T}_*(f_j) \right| \right]^2, \quad (9)$$

где Δ^R и Δ^T – остаточные разности для модулей коэффициентов отражения и прохождения.

3. Результаты и обсуждение

Рассмотрим пример получения оценок комплексных диэлектрических проницаемостей нанокompозитных сред, которые могут быть достигнуты при реализации условий, определяемых соотношениями (8) и (9), а также выполним оценку возникающих при этом погрешностей. Выполним анализ частотных зависимостей модулей коэффициентов отражения и прохождения для образца 3D-нанокompозита на основе искусственной опаловой матрицы с наночастицами шпинели CoCu_2O_4 [10]. Они показаны на рис. 3 *a* пунктирными линиями. Там же, в виде сплошных линий без осцилляций, построены соответствующие теоретические зависимости модулей соответствующих коэффициентов, для расчета которых использовались формулы (8) и (9). Толщина образца d_2 равна 1.9 мм, размеры поперечного сечения волновода: $a = 7,2$ мм, $b = 3,4$ мм. В результате были получены следующие оценки диэлектрических параметров для данного материала: $\varepsilon'_{2*} = 2,4069$, $\sigma_{2*} = 0,1862$ См/м, которые минимизируют среднеквадратичные разности (8) и (9), принимающие в данном случае следующие значения: $\Delta^R = 0,5053$ и $\Delta^T = 0,2376$.

Заметим, что поскольку формулы (6) и (7), входящие в выражения (8) и (9), содержат немонотонные трансцендентные функции, то остаточные разности могут, вообще говоря, иметь несколько локальных минимумов, соответствующих различным сочетаниям параметров ε' и σ_2 . Для того, чтобы убедиться в том, что полученные оценки ε'_{2*} и σ_{2*} действительно соответствуют глобальным минимумам остаточных разностей (8) и (9), необходимо выполнить построение поверхностей, соответствующих функциям $\Delta^R(\varepsilon'_2, \sigma_2)$ и $\Delta^T(\varepsilon'_2, \sigma_2)$ в некоторых интервалах физически обоснованных значений переменных ε' и σ_2 , включающих ε'_{2*} и σ_{2*} . Это может служить наглядным подтверждением попадания точек с координатами ε'_{2*} и σ_{2*} в области глобальных минимумов значений остаточных разностей.

Как видно на рис. 3 *a*, экспериментальные зависимости имеют искажения в виде характерных осцилляций, причиной которых является неидеальное согласование волноводного измерительного тракта с приемниками и генератором скалярного анализатора цепей в используемом диапазоне частот электромагнитных волн вследствие наличия в тракте локальных нерегулярных особенностей в местах соединения волноводных элементов, коаксиально-волноводных переходов и т. п. Они являются основной причиной погрешностей оценок комплексной диэлектрической проницаемости при использовании рассматриваемого в данной статье алгоритма. Поскольку истинные значения параметров каждой нерегулярности заранее не известны, то они не могут быть учтены заранее, а вид указанных осцилляций изменяется случайным образом в зависимости от настроек измерительной системы и различается для разных исследуемых образцов. Поэтому для получения оценок этих погрешностей будем использовать методы статистического моделирования [11].

Прежде всего предположим, что данные оценки являются точными значениями диэлектрических параметров $\varepsilon'_{2(0)}$ и $\sigma_{2(0)}$. Следовательно, соответствующие им теоретические зависимости модулей коэффициентов также полагаются точными. Тогда остаточные разности Δ^R и Δ^T , определяемые по формулам (8) и (9), будут иметь смысл среднеквадратичных отклонений экспериментально измеренных частотных зависимостей модулей коэффициентов отражения и прохождения от истинных.

Далее синтезируем частотные зависимости модулей коэффициентов отражения и прохождения, моделирующие полученные экспериментально, которые будут иметь те же самые значения остаточных разностей Δ^R и Δ^T . С этой целью для каждой из зависимостей модулей коэффициентов используем следующий вычислительный алгоритм. Сначала получаем выборку значений с использованием стандартного алгоритма генерации последовательности нормально распределенных псевдослучайных чисел с нулевым значением математического

ожидания и среднеквадратичным отклонением, равным единице [11]. Затем пропускаем ее через цифровой фильтр, чтобы воспроизвести осцилляции с теми периодами и амплитудами, которые имеются на соответствующих экспериментальных зависимостях. Для этой цели используем полосовой фильтр с конечной импульсной характеристикой, реализующий окно Хэмминга [12] с полосой пропускания, определяющей характерные периоды осцилляций в диапазоне от 1,3 до 3,5 ГГц. Порядок фильтра выбираем равным 500. Наконец нормируем амплитуды полученной случайной последовательности n_l , состоящей из L отсчетов, где $l = 1, 2, \dots, L$, таким образом, чтобы обеспечить требуемые значения Δ^R и Δ^T . Для этого умно-

жаем n_l на амплитудный коэффициент $\sqrt{\Delta \left(\sum_{l=1}^L n_l^2 \right)^{-1}}$, где Δ – одна из величин Δ^R или Δ^T ,

которая выбирается в зависимости от того, к какой из теоретических зависимостей модулей коэффициентов прибавляется данная случайная последовательность. Примеры синтезированных таким образом частотных зависимостей модулей коэффициентов отражения и прохождения приведены на рис. 3 а в виде сплошных осциллирующих кривых.

На рис. 3 б показана сводная картина для 500 пар независимых случайных последовательностей, моделирующих экспериментальные зависимости модулей коэффициентов. Более темные линии без осцилляций показывают теоретические зависимости, которые аппроксимируют эти синтезированные кривые в соответствии с условиями (8) и (9). Каждой из них будут соответствовать свои оценочные значения диэлектрических параметров, которые не равны $\varepsilon'_{2(0)}$ и $\sigma_{2(0)}$. Приведем результаты статистического анализа этих результатов.

Построим гистограммы относительных частот [13] для оценочных значений ε'_{2*} и σ_{2*} , которые показаны на рис. 3 в, г. Здесь по осям ординат отложены выборочные плот-

ности вероятностей $\frac{n_i^{(\varepsilon)}}{N\Delta^{(\varepsilon)}}$ и $\frac{n_j^{(\sigma)}}{N\Delta^{(\sigma)}}$, где i и j – номера интервалов (бинов) статистических рядов для ε'_{2*} и σ_{2*} ; $n_i^{(\varepsilon)}$ и $n_j^{(\sigma)}$ – выборочные частоты, то есть количество оценочных значений ε'_{2*} и σ_{2*} , попавших в соответствующие интервалы с номерами i и j ; $\Delta^{(\varepsilon)}$ и $\Delta^{(\sigma)}$ – длины интервалов; N – длины выборок оценочных значений ε'_{2*} и σ_{2*} . Как уже было отмечено ранее, в данном случае $N = 500$.

Первоначально количество бинов было выбрано равным 12 для выборок значений обоих оцениваемых параметров, однако затем их количество было сокращено, поскольку те интервалы, в которых попадало по 5 элементов выборки или менее, объединялись с соседними интервалами гистограмм. Это является условием применимости критерия Пирсона (критерия χ^2) для проверки статистических гипотез [13].

Применим данный критерий для проверки предположения о том, что оценочные значения ε'_{2*} и σ_{2*} имеют нормальные распределения. С этой целью для каждой из гистограмм, соответствующей последовательности случайных величин x_n с выборочным средним

значением $\bar{m}_x = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N x_n$ и выборочной дисперсией $\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{n=1}^N (x_n - \bar{m}_x)^2$, вычислим

выборочные значения χ^2 -статистики Пирсона вида [13, 14]

$$\chi^2 = \sum_{k=1}^K \frac{(n_k - np_k)^2}{np_k}, \quad (10)$$

где K – число интервалов гистограммы; n_k – выборочные частоты; np_k – теоретические вероятности.

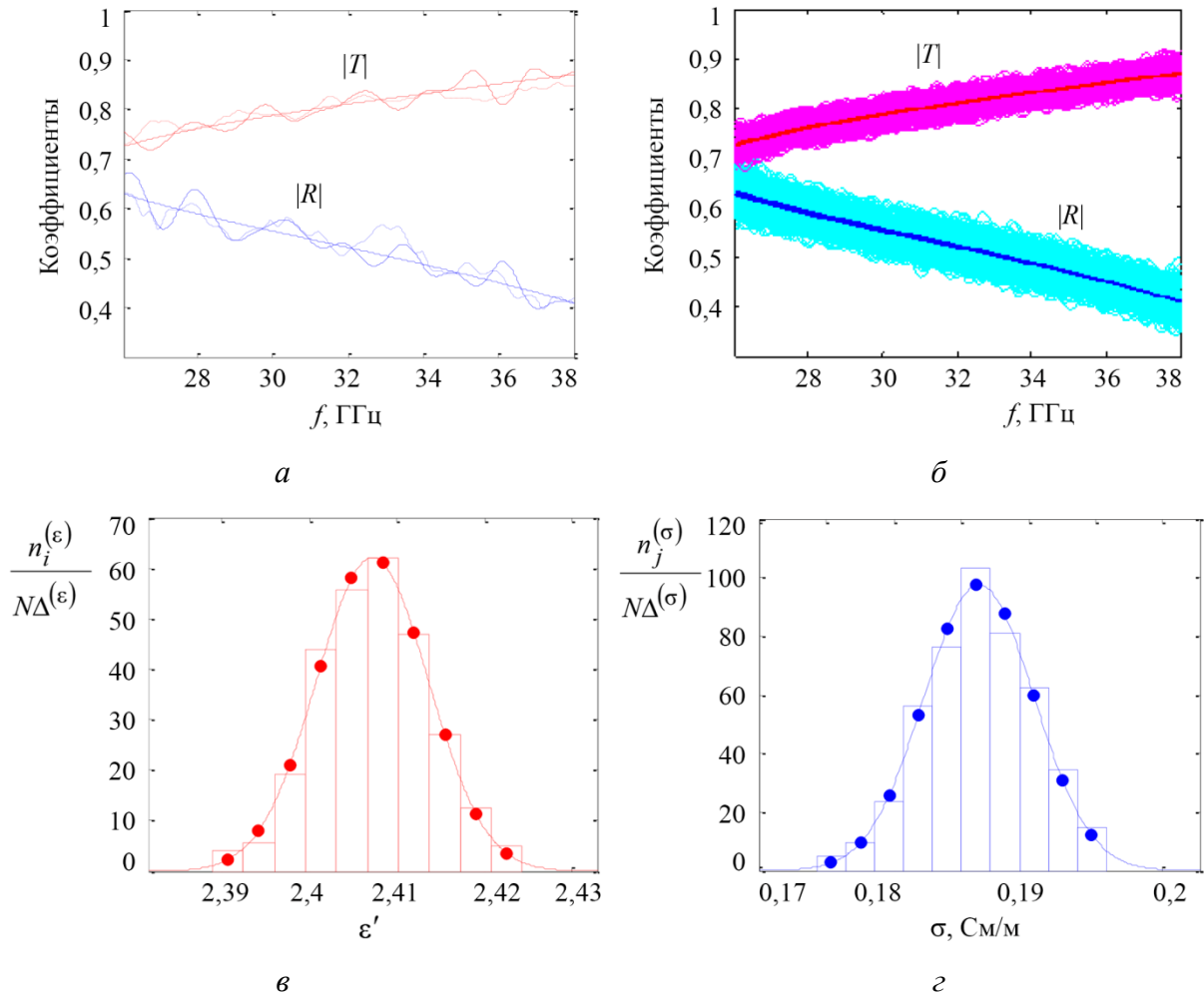


Рис. 3. Пример оценки погрешностей определения комплексных диэлектрических проницаемостей нанокompозитных сред: *a* – частотные зависимости модулей коэффициентов отражения и прохождения (экспериментальные – пунктирные линии, соответствующие им теоретические – сплошные линии без осцилляций, синтезированные – сплошные линии с осцилляциями); *б* – семейства синтезированных зависимостей и соответствующие им теоретические кривые (более темные линии); *в*, *г* – гистограммы относительных частот для оценочных значений ϵ'_2 и σ_2 , а также соответствующие плотности вероятности аппроксимирующих нормальных распределений

Функцию распределения вероятностей случайной величины x с распределением χ^2 можно записать в виде [13, 14]

$$F(x, \nu) = \int_0^x \frac{t^{\frac{\nu}{2}-1}}{2^{\frac{\nu}{2}} \Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)} \exp\left(-\frac{t}{2}\right) dt, \quad (11)$$

где ν – число степеней свободы распределения; $\Gamma(\dots)$ – гамма-функция Эйлера [15]. Квантиль распределения χ^2 порядка $1-\alpha$ с числом степеней свободы ν обозначается как $\chi_{1-\alpha}^2(\nu)$. Его значение определяется из решения уравнения $F(\chi_{1-\alpha}^2(\nu), \nu) = 1-\alpha$ с использованием формулы (11).

В том случае если для выборочного значения χ^2 -статистики Пирсона (10) выполняется условие $\chi^2 < \chi_{1-\alpha}^2(K-s-1)$, где s – число параметров теоретического распределения, оцениваемых по результатам наблюдений, то принимается гипотеза о том, что закон распределения выборки анализируемых случайных величин соответствует теоретическому распределению [13, 14], в качестве которого будем рассматривать нормальное распределение. Тогда вероятности p_k в формуле (10) будут иметь вид $p_k = \Phi\left(\frac{\tilde{x}_k - \bar{m}_x}{\sigma_x}\right) - \Phi\left(\frac{\tilde{x}_{k-1} - \bar{m}_x}{\sigma_x}\right)$, где

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt \quad (12)$$

есть функция распределения вероятностей для гауссовской случайной величины x , \tilde{x}_k – значения случайной последовательности, соответствующие серединам интервалов бинов гистограммы, причем $\tilde{x}_0 = -\infty$ и $\tilde{x}_K = +\infty$. Заметим, что при выборе нормального распределения в качестве теоретического необходимо полагать, что $s = 2$, поскольку имеется два оцениваемых параметра распределения: математическое ожидание и дисперсия.

На рис. 3 *в, г* на фоне гистограмм показаны кривые плотностей вероятности нормальных распределений, вычисленные по формуле (12) и соответствующие последовательностям оценочных значений ε'_{2*} и σ_{2*} , с параметрами $\bar{m}_\sigma = 0,1863$, $\sigma_\sigma = 0,0041$ и $\bar{m}_\varepsilon = 2,4072$, $\sigma_\varepsilon = 0,0064$.

При использовании квантиля χ^2 -распределения $1-\alpha = 0,95$ и $s = 2$ для выборок оценочных значений ε'_* и σ_* условия $\chi^2 < \chi_{1-\alpha}^2(K-s-1)$ принимают следующий вид: $3,196 < 14,067$ и $3,115 < 14,067$. Таким образом, гипотезы о том, что и ε'_{2*} и σ_{2*} имеют нормальные распределения, подтверждаются с вероятностью 0,95.

Известно [14], что случайная величина x с нормальным распределением принимает значения, лежащие в интервале от $\bar{m}_x - 3\sigma_x$ до $\bar{m}_x + 3\sigma_x$ с вероятностью 0,9973. Таким образом, в качестве оценок экстремальных значений относительных погрешностей определения ε'_2 и σ_2 можно использовать соотношения $\delta\varepsilon' = \pm \frac{3\sigma_\varepsilon}{\bar{m}_\varepsilon} \cdot 100$ и $\delta\sigma = \pm \frac{3\sigma_\sigma}{\bar{m}_\sigma} \cdot 100$. В результате получаем: $\delta\varepsilon' = \pm 0,80\%$ и $\delta\sigma = \pm 6,60\%$, что хорошо согласуется с результатами расчетов величин $\frac{\varepsilon'_{2*} - \varepsilon'_{2(0)}}{\varepsilon'_{2(0)}} \cdot 100$ и $\frac{\sigma_{2*} - \sigma_{2(0)}}{\sigma_{2(0)}} \cdot 100$, значения которых лежат в интервалах, соответственно, от $-0,82$ до $0,95\%$ и от $-6,97$ до $6,87\%$.

Проведенный анализ показывает, в частности, что использование результатов измерений коэффициентов отражения и прохождения, полученных в широком диапазоне частот, действительно позволяет существенно уменьшить влияние частотно-зависимых погрешностей измерения указанных коэффициентов, что наглядно проиллюстрировано на рис. 3 *а, б*. Здесь хорошо видно, что аппроксимирующие теоретические зависимости мало отличаются друг от друга, по сравнению с экспериментальными. Это обуславливает значительное

уменьшение погрешностей определения диэлектрических параметров при использовании интегральных критериев типа (8) и (9) по сравнению с получением оценок по результатам измерений на одной частоте.

Однако данная картина наблюдается только в том случае, когда параметры ϵ'_2 и σ_2 остаются постоянными в пределах рассматриваемого диапазона частот. Если же данное условие не выполняется, то экспериментальные зависимости невозможно аппроксимировать вышеуказанным методом с малой погрешностью. Это наглядно иллюстрирует рис. 4 *a*, на котором показаны зависимости для образца 3D-нанокompозита на основе искусственной опаловой матрицы с наночастицами Fe, Co и Ni [16]. Очевидно, что на экспериментальных кривых, наряду с небольшими осцилляциями с периодом около 2 ГГц, которые аналогичны показанным ранее на рис. 3 *a*, наблюдаются изменения более крупного масштаба и с большими амплитудами.

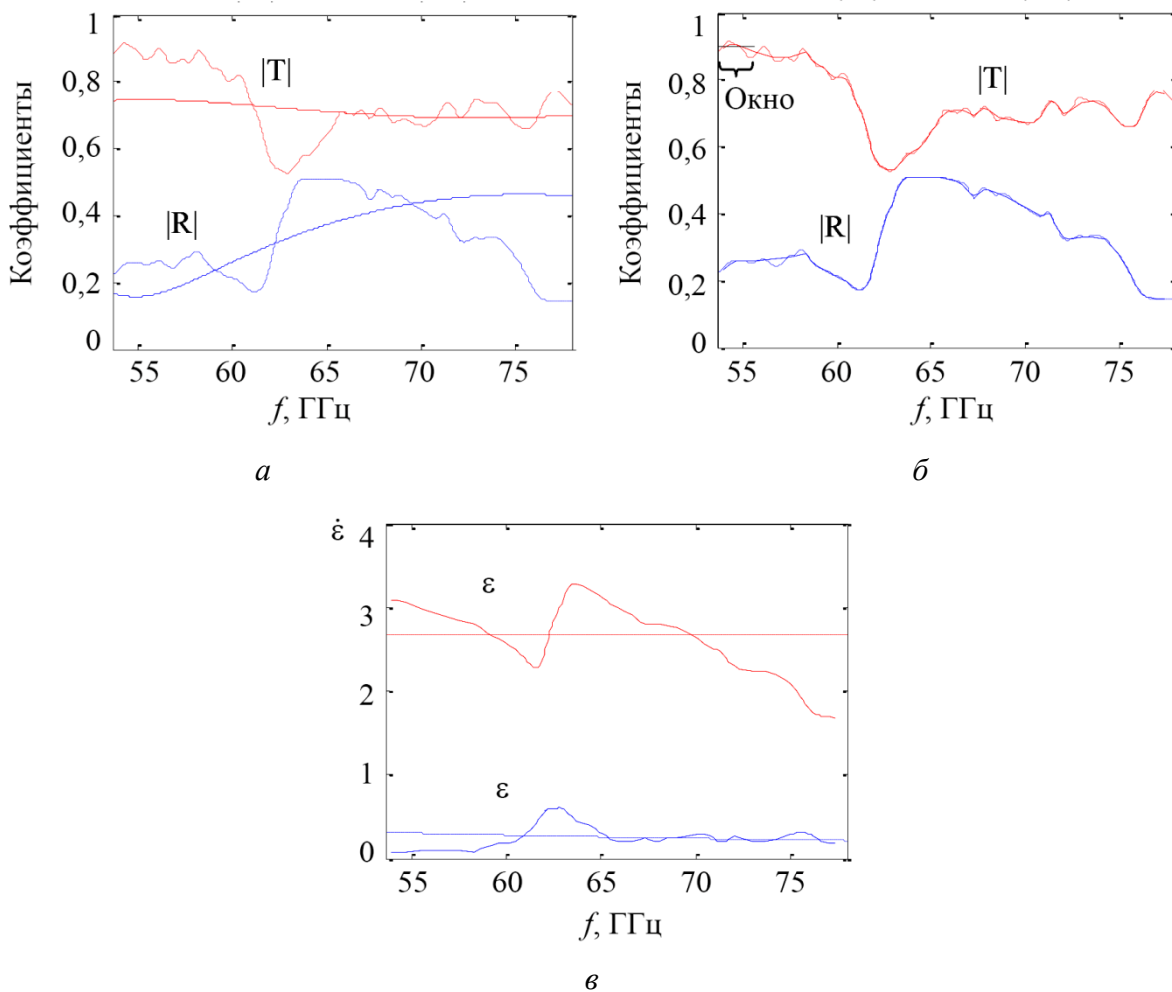


Рис. 4. Аппроксимации экспериментальных частотных зависимостей модулей коэффициентов отражения и прохождения (пунктирные линии) теоретическими кривыми (сплошные линии) во всем частотном диапазоне (*a*) и при использовании скользящего частотного окна (*б*), а также оценки комплексной диэлектрической проницаемости (*в*), соответствующие рисункам *a* (пунктирные линии) и *б* (сплошные линии)

Аппроксимирующие теоретические кривые, показанные на рис. 4 *a*, которые построены в соответствии с условиями (8) и (9), существенно отличаются по виду от экспериментальных зависимостей. В данном случае алгоритм дает следующие значения: $\epsilon'_{2*} = 2,6654$,

$\sigma_{2*} = 0,9358$ См/м, однако они могут рассматриваться только как довольно грубые оценки параметров. Возникшая здесь ситуация обусловлена частотной зависимостью диэлектрических параметров анализируемого материала, что не учитывается в используемой расчетной модели.

Одним из возможных подходов к повышению точности оценок параметров в подобных случаях является использование модификации метода со скользящим частотным окном. В этом случае экспериментальные зависимости анализируются не во всем диапазоне частот, использованном для измерений, а в некотором ограниченном поддиапазоне – «окне». Его ширина выбирается таким образом, чтобы, с одной стороны, в него попадал, по меньшей мере, один период осцилляций экспериментальных кривых, возникающих из-за неполного согласования элементов измерительного тракта, но, с другой стороны, период крупномасштабных изменений этих кривых, вызванных материальной дисперсией, должен быть существенно больше.

На рис. 4 б показаны результаты аппроксимации тех же экспериментальных данных, что и на рис. 4 а, но с использованием скользящего частотного окна шириной 2 ГГц, которое перемещалось по оси частот слева направо с шагом 0,5 ГГц. На рис. 4 в представлены соответствующие результаты определения комплексной диэлектрической проницаемости образца, которые демонстрируют наличие частотной дисперсии материала. Оценки для диэлектрических параметров, получаемые для каждого положения окна на оси частот, удовлетворяют условиям (8) и (9), в которых, однако, предполагается, что ε_2'' является постоянной в пределах окна, то есть мы определяем значения ε_{2*}' и ε_{2*}'' . Пунктиром на рис. 4 в показаны соответствующие оценки параметров, полученные для всего диапазона частот, причем $\varepsilon_{2*}'' = \langle \varepsilon_0 \sigma_{2*} \omega \rangle$, где $\langle \dots \rangle$ означает операцию усреднения по частоте.

Заметим, что алгоритм определения комплексной диэлектрической проницаемости, предлагаемый в данной работе, обладает целым рядом преимуществ по сравнению, например, с широко известным алгоритмом Николсона – Росса – Вейра [3], для реализации которого, во-первых, необходимо знать частотные зависимости комплексных коэффициентов отражения и прохождения, а не их модулей, что требует использования весьма дорогостоящих векторных анализаторов цепей. Во-вторых, алгоритм Николсона – Росса – Вейра не применим в тех случаях, когда толщина исследуемого образца кратна половине длины электромагнитной волны в нем или близка к этой величине. В-третьих, наличие осцилляций на частотных зависимостях коэффициентов отражения и прохождения вследствие наличия в измерительном тракте локальных нерегулярных особенностей будет воспроизводиться на полученных посредством алгоритма Николсона – Росса – Вейра зависимостях комплексной диэлектрической проницаемости, что потребует их дополнительной пост-обработки с целью регуляризации.

4. Заключение

Предложен алгоритм определения комплексной диэлектрической проницаемости немагнитных материалов по частотным зависимостям модулей коэффициентов отражения и прохождения при взаимодействии электромагнитных волн микроволнового диапазона с образцом в виде пластины, расположенной в поперечном сечении экранированного волновода прямоугольного сечения.

С использованием статистических методов анализа выполнена оценка погрешностей, возникающих при работе данного алгоритма, которые обусловлены неидеальным согласованием волноводного измерительного тракта с приемниками и генератором скалярного анализатора цепей в используемом диапазоне частот электромагнитных волн вследствие наличия

в тракте локальных нерегулярных особенностей в местах соединения волноводных элементов, коаксиально-волноводных переходов и т. п.

Показано, что предлагаемый в данной работе алгоритм, использующий результаты измерений коэффициентов отражения и прохождения в широком диапазоне частот, позволяет существенно уменьшить влияние частотно-зависимых погрешностей их измерения на точность оценки комплексной диэлектрической проницаемости.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ по темам «Спин» № 122021000036-3 и «Функция» № 122021000035-6.

Литература

1. Радиотехника : энциклопедия / под ред. Ю. Р. Мазора, Е. А. Мачусского, В. И. Правды. – М. : Изд. дом «Додэка-XXI», 2002. – 944 с.
2. Неразрушающий контроль и диагностика : справочник / под ред. В. В. Клюева. – М. : Машиностроение, 2003. – 656 с.
3. Microwave Electronics: Measurements and Material Characterization / L. F. Chen, S. K. Ong, C. P. Neo, V. V. Vardan, V. K. Vardan. – Chichester : John Wiley & Sons Ltd, 2004. – 537 p.
4. Никольский В. В., Никольская Т. И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М. : Наука, 1989. – 544 с.
5. Семенов Н. А. Техническая электродинамика. – М. : Связь, 1973. – 480 с.
6. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах. – М. : Наука, 1973. – 343 с.
7. Измеритель КСВН панорамный Р2-65. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Вильнюс, 1986. – 116 с.
8. Измеритель КСВН панорамный Р2-67. Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – Вильнюс, 1986. – 124 с.
9. Enhancement of microwave giant magnetoresistance effect in reflected wave / A. B. Rinkevich, D. V. Perov, E. A. Kuznetsov, O. V. Nemytova, M. A. Milyaev, V. V. Ustinov // Applied Physics Letters. – 2022. – Vol. 120, No. 23. – P. 233502. – DOI: 10.1063/5.0095405.
10. Millimeter waveband dielectric properties of nanocomposite materials based on opal matrices with particles of spinels / A. B. Rinkevich, D. V. Perov, Ya. A. Pakhomov, M. I. Samoylovich, E. A. Kuznetsov // Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves. – 2016. – Vol. 37, No. 11. – P. 1124–1138. – DOI: 10.1007/s10762-016-0308-3.
11. Быков В. В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. – М. : Советское радио, 1971. – 328 с.
12. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применение цифровой обработки сигналов. – М. : Мир, 1978. – 848 с.
13. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. – М. : Радио и связь, 1982. – 624 с.
14. Кунце Х.-И. Методы физических измерений. – М. : Мир, 1989. – 216 с.
15. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М. Абрамовица, И. Стиган. – М. : Наука, 1979. – 832 с.
16. Artificial crystals with 3d metal and palladium particles subjected to high-temperature heat treatment / A. B. Rinkevich, O. V. Nemytova, D. V. Perov, M. I. Samoylovich, E. A. Kuznetsov // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2018. – Vol. 451. – P. 38–46. – DOI: 10.1016/j.jmmm.2017.10.112.