

ВЕСТНИК

ТЮМЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Физико-математическое моделирование.

Нефть, газ, энергетика

Журнал основан в 1998 г.
Выходит 4 раза в год

Том 10. № 4 (40)

2024

Vol. 10. No. 4 (40)

TYUMEN STATE
UNIVERSITY

HERALD

Physical and Mathematical Modeling.

Oil, Gas, Energy

Founded in 1998
A quarterly journal

Издание включено в Перечень рецензируемых научных изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты
диссертаций на соискание ученых степеней кандидата и доктора наук



Главный редактор

А. Б. Шабаров, Тюмень, Россия

Заместители главного редактора

О. В. Ахметова, Стерлитамак, Россия

С. И. Грачев, Тюмень, Россия

А. А. Губайдуллин, Тюмень, Россия

А. А. Захаров, Тюмень, Россия

А. А. Кислицын, Тюмень, Россия

Ответственный секретарь

А. П. Садыкова, Тюмень, Россия

Редакционная коллегия

А. А. Афанасьев, Москва, Россия

С. П. Баутин, Екатеринбург, Россия

Г. Л. Бровко, Москва, Россия

А. А. Вакулин, Тюмень, Россия

Н. А. Гумеров, Колледж-Парк, Мэриленд, США

В. И. Гуров, Москва, Россия

Б. С. Добронец, Красноярск, Россия

С. В. Костюченко, Тюмень, Россия

С. И. Лежнин, Новосибирск, Россия

Е. А. Новиков, Красноярск, Россия

О. А. Степанов, Тюмень, Россия

С. В. Степанов, Тюмень, Россия

А. В. Стрекалов, Тюмень, Россия

А. В. Татосов, Тюмень, Россия

С. Ю. Удовиченко, Тюмень, Россия

Ю. В. Шорников, Новосибирск, Россия

Д. И. Эскин, Москва, Россия

В. В. Ягов, Москва, Россия

Редакционный совет

И. Ш. Ахатов, Сколково, Россия, США

А. Ю. Вараксин, Москва, Россия

Г. Г. Гилаев, Краснодар, Россия

Д. А. Губайдуллин, Казань, Россия

Зыонг Нгок Хай, Ханой, Вьетнам

А. Г. Ивашико, Тюмень, Россия

К. К. Нанди, Силигури, Индия

Р. И. Нигматулин, Москва, Россия

А. И. Фляровский, Вроцлав, Польша

В. М. Фомин, Новосибирск, Россия

В. В. Шайдуров, Красноярск, Россия

ISSN 2411-7978 (Print)

ISSN 2500-3526 (Online)

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-72159 выдано 29 декабря 2017 г. (ранее: ПИ № ФС77-60410 от 29 декабря 2014 г.) Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

Учредитель

ФГАОУ ВО «Тюменский государственный университет»

Издатель/редакция/типография

ТюмГУ-Press

625003, г. Тюмень, ул. Володарского, 6

+7 (3452) 59-75-34, 59-74-81

Прием статей

vestnik-energy-r@utmn.ru

Публикация статей для авторов бесплатна

Журнал распространяется

В открытом доступе <http://www.elibrary.ru>

<http://vestnik.utmn.ru>

По подписке

Каталог Российской прессы (индекс ПА230)

Editor-in-chief

A. B. Shabarov, Tyumen, Russia

Deputy editors-in-chief

O. V. Akhmetova, Sterlitamak, Russia

S. I. Grachev, Tyumen, Russia

A. A. Gubaidullin, Tyumen, Russia

A. A. Zakharov, Tyumen, Russia

A. A. Kisilitsin, Tyumen, Russia

Executive secretary

A. P. Sadykova, Tyumen, Russia

Editorial board

A. A. Afanasyev, Moscow, Russia

S. P. Bautin, Yekaterinburg, Russia

G. L. Brovko, Moscow, Russia

A. A. Vakulin, Tyumen, Russia

N. A. Gumerov, College Park, Maryland, USA

V. I. Gurov, Moscow, Russia

B. S. Dobronets, Krasnoyarsk, Russia

S. V. Kostyuchenko, Tyumen, Russia

S. I. Lezhnin, Novosibirsk, Russia

E. A. Novikov, Krasnoyarsk, Russia

O. A. Stepanov, Tyumen, Russia

S. V. Stepanov, Tyumen, Russia

A. V. Strekalov, Tyumen, Russia

A. V. Tatosov, Tyumen, Russia

S. Yu. Udovichenko, Tyumen, Russia

Yu. V. Shornikov, Novosibirsk, Russia

D. I. Eskin, Moscow, Russia

V. V. Yagov, Moscow, Russia

Editorial council

I. Sh. Akhatov, Skolkovo, Russia, USA

A. Yu. Varaksin, Moscow, Russia

G. G. Gilaei, Krasnodar, Russia

D. A. Gubaidullin, Kazan, Russia

Duong Ngoc Hai, Hanoi, Vietnam

A. G. Ivashko, Tyumen, Russia

K. K. Nandi, Siliguri, India

R. I. Nigmatulin, Moscow, Russia

A. I. Filarowski, Wrocław, Poland

V. M. Fomin, Novosibirsk, Russia

V. V. Shaidurov, Krasnoyarsk, Russia

ISSN 2411-7978 (Print)

ISSN 2500-3526 (Online)

Founded by

University of Tyumen

Published, edited and printed by

UTMN-Press

6 Volodarskogo St., Tyumen, 625003, Russia

+7 (3452) 59-75-34, 59-74-81

For article submission

vestnik-energy-r@utmn.ru

No publication charges

The journal is distributed

Accessed at

<http://www.elibrary.ru>

<http://vestnik.utmn.ru>

Subscription to

Russian Post catalogue (No. IIA230)

Содержание

Теплофизика и теоретическая теплотехника

- 6 Устройство для диагностики и определения энергоемкости работы насосного агрегата
Юлдашев Р. З., Юлдашев З. Ш., Касобов А. С.
- 18 Модернизация установки производства водорода методом короткоцикловой адсорбции с целью повышения качества продукции
Ибрагимова А. Т.
- 34 Измерительный преобразователь теплового расходомера, удовлетворяющего концепции «подрывной» инновации
Вакулин А. А., Монтанари С. Г.

Механика жидкости, газа и плазмы

- 50 Численное исследование устойчивости естественной конвекции
Томчик П. И., Кислицын А. А.

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Информационные технологии

- 68 Математическая модель свободных колебаний надземных участков трубопроводов, транспортирующих многофазную жидкость
Черенцов Д. А., Пирогов С. П.
- 79 Моделирование влияния неравномерного распределения отложений в проточной части нагнетателя на прецессию его ротора
Степанов М. С., Бунякин А. В., Гилаев Г. Г., Дунаев В. И.
- 95 Анализ точности решения задачи двухфазной фильтрации с применением методов нейросетевого моделирования
Пономарев Р. Ю., Вершинин В. Е., Ковалькова А. С.

Разработка и эксплуатация нефтяных и газовых месторождений

- 114 Критериальный анализ возникновения неустойчивости фронта вытеснения при заводнении нефтяных пластов
Кряжев Я. А., Гильманов А. Я., Федоров К. М., Шевелёв А. П.
- 132 Новые подходы к пробоподготовке образцов керн битуминозных пород-коллекторов Восточной Сибири
Загидуллин М. И., Потапов А. Г., Молоков П. С., Дудник А. Н., Михайленко О. В.

Contents

Thermal physics and thermology

- 6 Device for diagnostics and determination of energy consumption during the operation of a pumping unit
Yuldashev, R. Z., Yuldashev, Z. Sh., & Kasobov, L. S.
- 18 Modernization of the hydrogen production unit by pressure swing adsorption to improve product quality
Ibragimova, A. T.
- 34 Heat metering transducer, satisfying the concept of “subversive” innovation
Vakulin, A. A., & Montanari, S. G.

Fluid, plazma, and gas mechanics

- 50 Numerical study of natural convection stability
Tomchik, P. I., & Kislitsin, A. A.

Mathematical modeling, numerical methods, and software systems. Information technologies

- 68 Mathematical model of free vibrations in above-ground pipelines sections transporting multiphase fluid
Cherentsov, D. A., & Pirogov, S. P.
- 79 The influence of the uneven distribution of deposits in the flow part of the centrifugal blower on the precession of its rotor
Stepanov, M. S., Bunyakin, A. V., Gilaev, G. G., & Dunaev, V. I.
- 95 Accuracy analysis of solving two-phase filtration problem using neural network modeling methods
Ponomarev, R. Yu., Vershinin, V. E., & Kovalkova, A. S.

Development and operation of oil and gas fields

- 114 Criteria analysis of the displacement front instability occurring at waterflooding of oil reservoirs
Kryazhev, Ya. A., Gilmanov, A. Ya., Fedorov, K. M., & Shevelev, A. P.
- 132 New approaches to core samples preparation from bituminous reservoir rocks in Eastern Siberia
Zagidullin, M. I., Potapov, A. G., Molokov, P. S., Dudnik, A. N., & Mikhailenko, O. V.

Устройство для диагностики и определения энергоемкости работы насосного агрегата

Рауф Зарифджанович Юлдашев¹, Зарифджан Шарифович Юлдашев²,
Лоик Сафарович Касобов³✉

¹ частный консультант по энергетике, Душанбе, Таджикистан

² Таджикский аграрный университет им. Шириншо Шотемура, Душанбе, Таджикистан

³ Таджикский технический университет им. академика М. С. Осими, Душанбе,
Таджикистан

Контакт для переписки: loiknstu@mail.ru✉

Аннотация. В статье рассматривается разработанное устройство для диагностики и определения энергоемкости работы насосного агрегата. Приводится структурная схема устройства, последовательность определения энергоемкости работы насосного агрегата и его элементов, а также пример расчета по паспортным данным. Разработанное устройство позволяет контролировать энергоемкость работы насосного агрегата в период эксплуатации: при превышении допустимого значения энергоемкости на мониторе появится предупреждающее сообщение.

Ключевые слова: энергоемкость, насосный агрегат, электродвигатель, энергетический паспорт

Цитирование: Юлдашев Р. З., Юлдашев З. Ш., Касобов Л. С. 2024. Устройство для диагностики и определения энергоемкости работы насосного агрегата // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 4 (40). С. 6–17. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-6-17>

Поступила 23.10.2024; одобрена 12.12.2024; принята 16.12.2024

Device for diagnostics and determination of energy consumption during the operation of a pumping unit

Rauf Z. Yuldashev¹, Zarifjan Sh. Yuldashev², Loik S. Kasobov³✉

¹ Private Energy Consultant, Dushanbe, Tajikistan

² Tajik Agrarian University named Shirinsho Shotemur, Dushanbe, Tajikistan

³ Tajik Technical University named after academician M. S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan
Corresponding author: loiknstu@mail.ru✉

Abstract. This article presents a device developed for diagnosing and determining the energy consumption of a pumping unit. The authors provide a block diagram of the device and the sequence of determining the energy consumption during the operation of the pumping unit and its elements, accompanied by an example of calculation according to the device's passport data. The device aids in controlling the unit's energy consumption when operated, with a warning system in place in the cases of the energy consumption going beyond the permissible limit.

Keywords: energy consumption, pumping unit, electric motor, energy passport

Citation: Yuldashev, R. Z., Yuldashev, Z. Sh., & Kasobov, L. S. (2024). Device for diagnostics and determination of energy consumption during the operation of a pumping unit. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(4), 6–17. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-6-17>

Received Oct. 23, 2024; Reviewed Dec. 12, 2024; Accepted Dec. 16, 2024

Введение

В народном хозяйстве (например, в промышленности и АПК) насосный агрегат используется практически во всех энерготехнологических процессах (ЭТП) производства разных видов продукции, в том числе при орошении. Обоснование актуальности проблемы энергосбережения при использовании насосных агрегатов приведено, в частности, в работе П. Стасинопулоса и др. [2012].

Наибольший интерес вызывает устройство для определения энергетических параметров электродвигателя (ЭД) и относительной энергоемкости выполненной им работы. Оно содержит ведущий и ведомый валы, объединенные соединительным элементом. Ведомый вал, выполненный из двух частей, которые соединены друг с другом с помощью муфты, закреплен на подшипниковых опорах, позволяющих ограничить его линейное перемещение. На каждой части ведомого вала между подшипниковыми опорами установлены и жестко закреплены два металлических диска, при этом на этих подшипниковых

опорах таким же образом крепятся крестообразные магнитопроводы, на которых, в свою очередь, установлены электромагнитные катушки. В конце ведомого вала для измерения его скорости вращения установлен тахогенератор [Карпов и др., 2010, 2012].

Недостатки данного устройства [Юлдашев, 2010; Пиризода, Юлдашев, 2020]:

- Определяются только энергетические параметры ЭД.
- Не позволяет определять по элементам насосного агрегата их энергоемкость.
- Не позволяет проводить оперативный контроль энергоемкости работы насосного агрегата.

На основании обзора наиболее существенных устройств нами была поставлена и решена задача оперативного контроля энергетических параметров, в том числе энергоемкости работы насосного агрегата с получением его энергетического паспорта.

Материалы и методы

На основании литературного обзора и патентного поиска установлено, что существует множество устройств для диагностики и определения энергетических показателей выполнения ЭТП.

Например, рассмотрим устройство для определения потерь энергии в ЭТП. В нем используются: измеритель, аппаратура для измерения, пульт управления устройством, блок вычисления, монитор и др. [Карпов и др., 2010, 2012; Стасинопулос и др., 2012].

Устройству присущ ряд несовершенств:

- Нет регистрации текущего времени для сравнения результатов исследований.
- Отсутствует сравнение полученных результатов исследований ЭТП с базовыми данными (справочные данные, паспортные данные, предыдущие результаты исследований, современные инновационные ЭТП).
- Нет возможности получения энергетического паспорта ЭТП.
- Не предусмотрена выработка рекомендаций по дальнейшей эксплуатации исследуемого ЭТП.
- Нет возможности передачи результатов исследований на систему высшего уровня по известным каналам связи.

Цель настоящей статьи — разработать и усовершенствовать конструкцию устройства, которое будет предоставлять оперативную информацию об эффективном использовании энергии по двум измеряемым параметрам ЭТП, результат действия энергии и показатели эффективности использования энергии и энергетического паспорта ЭТП [Юлдашев, 2010].

На рис. 1 приведена структурная схема устройства для диагностики и определения энергоемкости работы насосного агрегата. Для удобства и упрощения чтения схемы группы соединений пронумерованы римскими цифрами.

Электронный регистратор предназначен для записи измеряемых величин, которые поступают от преобразователей напряжения и тока, измерителя $\cos \varphi$ и преобразователей крутящего момента, скорости вращения, напора и расхода.

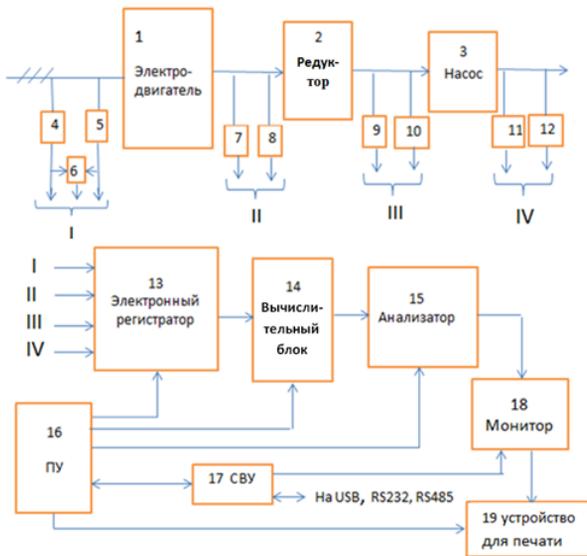


Рис. 1. Структурная схема устройства для диагностики и определения энергоемкости работы насосного агрегата: 1 — электродвигатель; 2 — редуктор; 3 — насос; 4 — измеритель напряжения; 5 — измеритель тока; 6 — измеритель $\cos \varphi$; 7 — измеритель крутящего момента; 8 — измеритель скорости вращения; 9 — датчик крутящего момента; 10 — датчик скорости вращения; 11 — измеритель напора; 12 — измеритель расхода; 13 — электронный регистратор; 14 — вычислительный блок; 15 — анализатор; 16 — пульт управления; 17 — система высшего уровня; 18 — монитор; 19 — устройство для печати; I, II, III, IV — группы соединений

Fig. 1. The block diagram of a device for diagnosing and determining the energy consumption of a pumping unit: 1 — electric motor; 2 — gearbox; 3 — pump; 4 — voltage meter; 5 — current meter; 6 — $\cos \varphi$ meter; 7 — torque meter; 8 — rotation speed meter; 9 — torque sensor; 10 — rotational speed sensor; 11 — pressure meter; 12 — flow meter; 13 — electronic recorder; 14 — computing unit; 15 — analyzer; 16 — control panel; 17 — top-level system; 18 — monitor; 19 — printing device; I, II, III, IV — connection groups

В качестве электронного регистратора для обработки результатов экспериментальных исследований по определению относительной энергоемкости элементов и ЭТП использовалась информационно-измерительная система на базе многоканального электронного регистратора Ф1771-АД, который имеет 16 каналов регистрации и 8 математических каналов («Вибратор», Санкт-Петербург).

Анализатор формирует энергетический паспорт насосного агрегата и производит сравнение результатов измерения с паспортными и/или ранее измеренными значениями, на основании которых на мониторе отражаются результаты вычислений. При повышении или снижении диагностируемых параметров, например при повышении энергоемкости работы насосного агрегата (ЭД + редуктор + насос), на анализаторе вырабатывается сигнал на принятие решения, который визуализируется на мониторе.

Пульт управления служит для:

- ввода исходных данных испытуемого насосного агрегата,
- задания количества измеряемых параметров на электронном регистраторе,
- задания алгоритма расчета энергетических параметров на вычислительном блоке,
- задания установок и принятия решений на анализаторе,
- визуализации результатов измерений и вычислений при диагностике на мониторе [Юлдашев и др., 2015],
- передачи паспортных данных испытуемого насосного агрегата,
- приема и передачи результатов измерений и вычислений в систему высшего уровня.

Устройство позволяет проводить все измерения при неразрушающем контроле, т. е. без вмешательства в схему ЭТП и технологию получения результата действия энергии.

После установки измерительных приборов при подаче питания на ЭД вращательное движение поступает на вход редуктора, который, в свою очередь, вращает насос, вследствие чего происходит подача жидкости с напором H и расходом q (процесс заливки насоса не рассматривается).

На каждой из фаз приборами измеряются величины тока и напряжения. На вход измерителя $\cos \varphi$ поступают от выходов измерителя тока и измерителя напряжения измеренные параметры. Измеритель $\cos \varphi$ определяет на каждой из фаз значение $\cos \varphi$. На электронном регистраторе непрерывно с задаваемым интервалом происходит регистрация измеренных значений, поступающих на вход: с выхода измерителя тока, измерителя напряжения и измерителя $\cos \varphi$; с выхода измерителя крутящего момента и измерителя скорости вращения, установленных на выходе ЭД; с выхода измерителя напора и измерителя расхода, установленных на выходе насоса. Длительность интервала регистрации зависит от поставленной задачи экспериментальных исследований, а также от быстротечности самого ЭТП подъема жидкости (динамических характеристик). Результаты регистрации с выхода электронного регистратора поступают на вход вычислительного блока, в котором происходит вычисление и расчет на входах ЭД, редуктора и насоса, а также на выходе насоса [Технический каталог, 2007].

На вычислительном блоке производятся следующие вычисления.

Потребляемая активная мощность каждой фазы во времени на входе ЭД:

$$\begin{aligned} P_a(t) &= U_a(t) I_a(t) \cos \varphi_a, \\ P_b(t) &= U_b(t) I_b(t) \cos \varphi_b, \\ P_c(t) &= U_c(t) I_c(t) \cos \varphi_c, \end{aligned} \quad (1)$$

где $U_a(t)$, $U_b(t)$, $U_c(t)$ — напряжение на соответствующих фазах; $I_a(t)$, $I_b(t)$, $I_c(t)$ — ток на соответствующих фазах; $\cos \varphi_a$, $\cos \varphi_b$, $\cos \varphi_c$ — коэффициент мощности на соответствующих фазах.

Потребляемая активная мощность ЭД во времени:

$$P_{\text{ЭД}}(t) = P_a(t) + P_b(t) + P_c(t). \quad (2)$$

Реактивная мощность каждой фазы во времени на входе ЭД:

$$\begin{aligned} Q_a(t) &= U_a(t) I_a(t) \sin \varphi_a, \\ Q_b(t) &= U_b(t) I_b(t) \sin \varphi_b, \\ Q_c(t) &= U_c(t) I_c(t) \sin \varphi_c, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\sin \varphi_a, \sin \varphi_b, \sin \varphi_c$ — коэффициент реактивной составляющей мощности на соответствующих фазах, $\sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}$.

Реактивная мощность ЭД во времени:

$$Q_{\text{ЭД}}(t) = Q_a(t) + Q_b(t) + Q_c(t). \quad (4)$$

Полная мощность ЭД во времени:

$$S_{\text{ЭД}}(t) = \sqrt{P_{\text{ЭД}}^2(t) + Q_{\text{ЭД}}^2(t)}. \quad (5)$$

Из электротехники также известно, что коэффициент мощности можно записать как отношение активной мощности к полной:

$$\cos \varphi_{\text{ЭД}}(t) = \frac{P_{\text{ЭД}}(t)}{S_{\text{ЭД}}(t)}. \quad (6)$$

Активная энергия, затраченная на фазах за время t :

$$\mathcal{E}_{a\text{ЭД}}(t) = P_a(t)t + P_b(t)t + P_c(t)t. \quad (7)$$

Реактивная энергия, затраченная на фазах за время t :

$$\mathcal{E}_{p\text{ЭД}}(t) = Q_a(t)t + Q_b(t)t + Q_c(t)t. \quad (8)$$

Активная энергия, потребленная ЭД из сети за время t :

$$\mathcal{E}_{\text{ЭД}}(t) = \mathcal{E}_a(t) + \mathcal{E}_b(t) + \mathcal{E}_c(t). \quad (9)$$

Мощность на входе редуктора (на выходе ЭД):

$$P_{\text{ред}}(t) = M_{\text{ред}}(t) \omega_{\text{ред}}(t), \quad (10)$$

где $M_{\text{ред}}(t)$ — момент на входе редуктора; $\omega_{\text{ред}}(t)$ — угловая скорость на входе редуктора.

Энергия, потребленная редуктором (энергия на выходе ЭД):

$$\mathcal{E}_{\text{ред}}(t) = P_{\text{ред}}(t)t. \quad (11)$$

Потребляемая мощность на входе насоса (мощность на выходе редуктора):

$$P_{\text{насос}}(t) = M_{\text{ред}}(t) \omega_{\text{ред}}(t), \quad (12)$$

где $M_{\text{ред}}(t)$ — момент на выходе редуктора; $\omega_{\text{ред}}(t)$ — угловая скорость на выходе редуктора.

Энергия, затраченная насосом:

$$\mathcal{E}_{\text{насос}}(t) = P_{\text{насос}}(t)t. \quad (13)$$

Энергоемкость работы ЭД определяется как отношение энергии на входе ЭД на энергию на выходе ЭД в момент времени t :

$$\mathcal{E}_{\text{э.ЭД}}(t) = \frac{\mathcal{E}_{\text{ЭД}}(t)}{\mathcal{E}_{\text{ред}}(t)}. \quad (14)$$

Энергоемкость работы редуктора определяется как отношение энергии на входе редуктора на энергию на выходе редуктора (на входе насоса) в момент времени t :

$$\mathcal{E}_{\text{э.ред}}(t) = \frac{\mathcal{E}_{\text{ред}}(t)}{\mathcal{E}_{\text{насос}}(t)}. \quad (15)$$

Мощность, необходимая на подъем жидкости на высоту H с расходом q , определяется как произведение g ($\text{м}/\text{с}^2$) на напор H (м) и на расход насоса ($\text{м}^3/\text{с}$):

$$P_{\text{вых насоса}}(t) = gHq. \quad (16)$$

Энергия, затраченная на подъем жидкости на высоту H с расходом q :

$$\mathcal{E}_{\text{вых насоса}}(t) = P_{\text{вых насоса}}(t)t. \quad (17)$$

Энергоемкость работы насоса определяется как отношение энергии на входе насоса на энергию на выходе насоса в момент времени t :

$$\mathcal{E}_{\text{э.насос}}(t) = \frac{\mathcal{E}_{\text{насос}}(t)}{\mathcal{E}_{\text{вых насоса}}(t)}. \quad (18)$$

Энергоемкость насосного агрегата определяется как произведение энергоемкости работы ЭД, энергоемкости работы редуктора и энергоемкости работы насоса:

$$\mathcal{E}_{\text{э.насос.агр}}(t) = \mathcal{E}_{\text{э.ЭД}}(t) \mathcal{E}_{\text{э.ред}}(t) \mathcal{E}_{\text{э.насос}}(t). \quad (19)$$

Определим энергоемкость работы насосного агрегата по измеренным параметрам (расход энергии на подъем 1 м^3 жидкости):

$$\mathcal{E}_{\text{э.насос.агр.расч}} = \frac{\mathcal{E}_{\text{ЭД}}(T)}{qT}, \quad (20)$$

где q — расход жидкости ($\text{м}^3/\text{с}$); T — время работы насосного агрегата (с).

Пример расчета энергоёмкости работы насосного агрегата по паспортным данным

Определим энергоёмкость работы насоса с учетом его паспортных данных:

$$\Theta_{\text{э насос}} = \frac{1}{\eta_{\text{насос}}} = \frac{1}{0,63} = 1,59, \quad (21)$$

где $\eta_{\text{насос}}$ — паспортное значение КПД насоса.

Энергоёмкость работы редуктора с учетом его паспортных данных:

$$\Theta_{\text{э ред}} = \frac{1}{\eta_{\text{ред}}} = \frac{1}{0,94} = 1,06, \quad (22)$$

где $\eta_{\text{ред}}$ — паспортное значение КПД редуктора.

Энергоёмкость работы ЭД с учетом его паспортных данных:

$$\Theta_{\text{э ЭД}} = \frac{1}{\eta_{\text{ЭД}}} = \frac{1}{0,84} = 1,19, \quad (23)$$

где $\eta_{\text{ЭД}}$ — паспортное значение КПД ЭД.

Определим энергоёмкость насосного агрегата как произведение энергоёмкости элементов:

$$\begin{aligned} \Theta_{\text{э насос.агр.пасп}} &= \Theta_{\text{э насос}} \Theta_{\text{э ред}} \Theta_{\text{э ЭД}} = \\ &= 1,59 \cdot 1,06 \cdot 1,19 = 2,006 = 1 + 1,006. \end{aligned} \quad (24)$$

Как видно из расчетов, паспортная энергоёмкость работы насосного агрегата: $\Theta_{\text{э насос.агр.пасп}} = 2,006$.

По результатам измерений параметров насосного агрегата определяются расчетное значение энергоёмкости работы насосного агрегата ($\Theta_{\text{э насос.агр.расч}}$) и паспортное (теоретическое) значение энергоёмкости работы насосного агрегата ($\Theta_{\text{э насос.агр.пасп}}$) [Юлдашев, Касобов, 2014].

На практике по мере эксплуатации насосного агрегата происходит:

- износ рабочего колеса, внутренней поверхности корпуса насоса, опорных подшипников насоса и ЭД, шестеренок и подшипников редуктора;
- ухудшение смазочных свойств масла редуктора;
- снижение сопротивления изоляции обмоток ЭД из-за высокой влажности, вследствие чего происходит нагрев его корпуса;
- износ и снижение сопротивления изоляции проводов и кабелей, питающих электроэнергией ЭД;
- изменение напора и расхода насоса по указанным выше причинам.

При последующих определениях энергоёмкости работы насосного агрегата этот показатель только ухудшается. Изменение показателя фиксируется в энергетическом

паспорте ЭД. При значительном повышении энергоемкости работы насосного агрегата (например, на 10–15%) необходимо своевременное обслуживание и ремонт.

Запишем аксиому для насосного агрегата по его показателю энергоемкости работы:

$$\mathcal{E}_{\text{э насос.агр.расч}}(T_0) \geq \mathcal{E}_{\text{э насос.агр.расч}}(T_1) \geq \mathcal{E}_{\text{э насос.агр.расч}}(T_2), \quad (25)$$

где $\mathcal{E}_{\text{э насос.агр.расч}}(T_0)$ — энергоемкость насосного агрегата при $T_0 = 0$ (новый насосный агрегат, который не был в эксплуатации); $\mathcal{E}_{\text{э насос.агр.расч}}(T_1)$ — энергоемкость насосного агрегата при $T_1 = T_0 + \Delta t_1$ (насосный агрегат, который был в эксплуатации в течение времени Δt_1); $\mathcal{E}_{\text{э насос.агр.расч}}(T_2)$ — энергоемкость насосного агрегата при $T_2 = T_1 + \Delta t_2$ (насосный агрегат, который был в эксплуатации в течение времени Δt_2).

При эксплуатации насосного агрегата в течение некоторого времени, например шести месяцев, из-за износа элементов насоса, редуктора и ЭД произойдет повышение их энергоемкости. Допустим, произошло повышение энергоемкости работы элементов насоса, редуктора и ЭД на 15% [Карпов и др., 2020].

Определим энергоемкость насосного агрегата при повышении энергоемкости элементов на 15%:

$$\mathcal{E}_{\text{э насос.агр}} = 1,15 \mathcal{E}_{\text{э насос}} \cdot 1,15 \mathcal{E}_{\text{э ред}} \cdot 1,15 \mathcal{E}_{\text{э ЭД}} = 3,050. \quad (26)$$

Из расчета видно, что повышение энергоемкости работы элементов насосного агрегата на 15% приводит к повышению энергоемкости работы насосного агрегата на 50% (было 2,006, после эксплуатации стало 3,050).

На практике энергоемкость работы насосного агрегата повышается до значения 5 и более.

На анализаторе с пульта управления устанавливаются уставки (значение превышения параметра, например, на 10–15%) на каждый измеряемый и вычисляемый параметр, при превышении которых на мониторе появляется сообщение о выходе параметров за пределы значения уставки.

На мониторе оперативно (в режиме реального времени) по команде с пульта управления оператор задает различные режимы вывода на экран измеряемых и вычисляемых параметров. По завершении исследований по определению энергоемкости работы насосного агрегата на мониторе визуализируется энергетический паспорт насосного агрегата, в котором отражаются результаты исследований (заводские данные, результаты измерений и вычислений при первом энергоаудите, результаты измерений и вычислений при втором энергоаудите и т. д.). С пульта управления эти данные оператор распечатывает и отправляет через систему высшего уровня (главный инженер, директор и др.) по известным каналам связи. Таким же образом вносятся изменения в программу исследований [Варжапетян и др., 2004].

Можно привести множество примеров повышения энергоемкости работы насосного агрегата (снижения энергоэффективности работы насосного агрегата):

- снижение напряжения сети приводит к снижению мощности ЭД;
- появление вибрации ЭД приводит к повышению потерь энергии;

- попадание влаги на обмотки ЭД снижает сопротивление изоляции обмоток, вызывает потери энергии на нагрев обмоток, приводит к пробое изоляции обмоток;
- снижение уровня масла в редукторе приводит к потере мощности, передаваемой редуктором;
- нарушение соосности соединительной муфты приводит к вибрации и потере мощности;
- по мере использования износ внутренней поверхности рабочего колеса насоса приводит снижению напора и расхода жидкости за единицу времени.

Одним из объектов исследований, где проводилась регистрация энергетических параметров, являлась насосная станция предприятия АПК («Тулома», Мурманская область). В водозаборе устанавливались сетевые насосные агрегаты первого подъема. Вода из водоема при помощи сетевых насосных агрегатов первого подъема через фильтр для очистки воды и расходомер подавалась в резервуар. Резервуар представлял собой капитальное инженерное сооружение емкостью 300 м³. Вода из резервуара по трубопроводу самотеком поступала на сетевые насосные агрегаты второго подъема и далее по трубопроводу подавалась в водопроводную сеть предприятия (на животноводческую ферму, молочный завод, котельную и другие производственные объекты). Мощность сетевых насосных (СН) агрегатов (два — рабочие, один — резерв) первого подъема составляла по 15 кВт, а мощность насосных агрегатов (три — рабочие, один — резерв) второго подъема — 30 кВт. Пульт управления (ПУ) СН первого и второго подъема, расходомер, фильтр и насосные агрегаты второго подъема располагались в здании насосной станции [Карпов, Юлдашев, 2014].

На насосных агрегатах первого подъема устанавливались трехфазные асинхронные двигатели АИР160S2У3; $P_{\text{ном}} = 15$ кВт; $U_{\text{ном}} = 380$ В; $I_{\text{ном}} = 30$ А; $n_{\text{ном}} = 2940$ об./мин.; $\eta_{\text{ном}} = 0,88$; $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,86$; $m = 118$ кг.

В каталогах заводов-изготовителей приведены для каждого типа нового ЭД зависимости $\cos \varphi$ и η от коэффициента загрузки K_z , например, при значениях 0,25, 0,50, 0,75, 1,0 и 1,25.

Результаты измерений на насосных агрегатах первого подъема и результаты расчета позволяют получить достоверные данные об энергетическом состоянии насосного агрегата, что делает возможным использование приведенного выше алгоритма расчета и на других ЭТП.

Заключение

С использованием разработанного устройства появляется возможность оперативно контролировать энергоемкость работы насосного агрегата в период эксплуатации. При повышении энергоемкости работы насосного агрегата или какого-либо его элемента (асинхронный двигатель, редуктор, насос), например, на 10–15% на мониторе появится предупреждающее сообщение, что позволит своевременно устранить недостатки и ввести необходимые корректировки на элементе (например, заменить его на более энергоэффективный).

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Варжапетян А. Г., Глущенко В. В., Глущенко П. В. 2004. Системность процессов создания и диагностики технических структур. СПб.: Политехника. 186 с.
- Карпов В. Н., Юлдашев З. Ш. 2014. Показатели энергетической эффективности действующих агроинженерных (технических) систем: монография. СПб.: СПбГАУ. 159 с.
- Карпов В. Н., Юлдашев З. Ш., Немцев А. А., Немцев И. А., Старостенков Ю. А. 2020. Устройство для определения потерь энергии в энерготехнологических процессах: пат. № 2726149 РФ / патентообладатели СПбГАУ, В. Н. Карпов. № 2017146053; заявл. 28.03.2017; опубл. 09.07.2020, Бюл. № 19.
- Карпов В. Н., Юлдашев З. Ш., Юлдашев Р. З. 2010. Стенд для определения энергетических параметров электродвигателя: мал. пат. № ТЈ362 / патентообладатель З. Ш. Юлдашев. № 1000455; заявл. 23.04.2010; опуб. 09.08.2010, Бюл. № 59 (3).
- Карпов В. Н., Юлдашев З. Ш., Юлдашев Р. З. 2012. Устройство для определения энергетических параметров электродвигателя и относительной энергоемкости выполненной им работы: пат. № 2449251 РФ / патентообладатели СПбГАУ, В. Н. Карпов. № 2010110913/28; заявл. 22.03.2010; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12.
- Пиризода Д. С., Юлдашев З. Ш. 2020. Экспериментальные исследования по определению энергетической эффективности работы насосных агрегатов на предприятиях АПК // Доклады Таджикской академии сельскохозяйственных наук. № 3 (65). С. 77–83. <https://www.elibrary.ru/adlmmv>
- Стасинопулос П., Смит М., Харгроувс К., Деша Ч. 2012. Проектирование систем как единого целого: интегральный подход к инжинирингу для устойчивого развития. М.: Эксмо. 288 с.
- Технический каталог. 2007. Владимир: Владимирский электромоторный завод. 108 с.
- Юлдашев З. Ш. 2010. Стенд для контроля энергетических параметров электродвигателей и относительной энергоемкости выполненной ими работы // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. № 21. С. 276–280.
- Юлдашев З. Ш., Касобов Л. С. 2014. Эффективность энергоиспользования и его контроль // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. № 1–1 (126). С. 82–86.
- Юлдашев Р. З., Юлдашев З. Ш., Гайратов М. Т. 2015. Энергетические параметры электродвигателей и методика их определения на испытательном стенде // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. № 1-5-2 (188). С. 201–204.

References

- Varjapetyan, A. G., Glushenko, V. V., & Gusshenko, P. V. (2004). *Consistency of the Processes of Creating and Diagnosing Technical Structures*. Politekhnika. [In Russian]
- Karpov, V. N., & Yuldashev, Z. Sh. (2014). *Indicators of Energy Efficiency of Existing Agro-Engineering (Technical) Systems*. St. Petersburg State Agrarian University. [In Russian]
- Karpov, V. N., Yuldashev, Z. Sh., Nemtsev, A. A., Nemtsev, I. A., & Starostenkov, Yu. A. (2020). *Device for Determining Energy Losses in Energy-Technological Processes* (RF Patent No. 2726149). St. Petersburg State Agrarian University. [In Russian]
- Karpov, V. N., Yuldashev, Z. Sh., & Yuldashev, R. Z. (2010). *Stand for Determining the Energy Parameters of an Electric Motor* (Republic of Tajikistan Patent No. TJ362). [In Russian]

- Karpov, V. N., Yuldashev, Z. Sh., & Yuldashev, R. Z. (2012). *A Device for Determining the Energy Parameters of an Electric Motor and the Relative Energy Intensity of the Work Performed* (RF Patent No. 2449251). St. Petersburg State Agrarian University. [In Russian]
- Pirizoda, Ja. S., & Yuldashev, Z. Sh. (2020). Experimental studies on determination energy efficiency of pumping units in AIC enterprises. *Reports of the Tajik Academy of Agricultural Sciences*, (3), 77–83. <https://www.elibrary.ru/adlmmv> [In Russian]
- Stansinoupolos, P., Smith, M., Hargroves, K., & Desha, Ch. (2012). *Whole System Design: An Integrated Approach to Sustainable Engineering*. Eksmo. [In Russian] (Original work published 2008, Routledge)
- RusElProm. (2007). *Technical Catalog*. Vladimir Electric Motor Plant. [In Russian]
- Yuldashev, Z. Sh. (2010). A stand for monitoring the energy parameters of electric motors and the relative energy intensity of the work performed by them. *Izvestia Saint Petersburg State Agrarian University*, (21), 276–280. [In Russian]
- Yuldashev, Z. Sh., & Kasobov, L. S. (2014). Energy efficiency and control. *The Bulletin of the Tajik National University. Series of Natural Sciences*, (1-1), 82–86. [In Russian]
- Yuldashev, R. Z., Yuldashev, Z. Sh., & Gayratov, M. T. (2015). Energy parameters of electric motors and methods for their determination on a test bench. *The Bulletin of the Tajik National University. Series of Natural Sciences*, (1-5-2), 201–204. [In Russian]

Информация об авторах

Рауф Зарифджанович Юлдашев, кандидат технических наук, частный консультант по энергетике, Душанбе, Таджикистан
raufyuldashev@gmail.ru

Зарифджан Шарифович Юлдашев, доктор технических наук, профессор, кафедра электрификации и автоматизации сельского хозяйства, Таджикский аграрный университет им. Шириншо Шотемура, Душанбе, Таджикистан
zarifjan_yz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9924-2952>

Лоик Сафарович Касобов, кандидат технических наук, доцент, кафедра электрических станций, Таджикский технический университет им. академика М. С. Осими, Душанбе, Таджикистан
loiknstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9271-6908>

Information about the authors

Rauf Z. Yuldashev, Cand. Sci. (Tech.), Private Energy Consultant, Dushanbe, Tajikistan
raufyuldashev@gmail.ru

Zarifjan Sh. Yuldashev, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Department of Electrification And Automation Of Agriculture, Tajik Agrarian University named Shirinsho Shotemur, Dushanbe, Tajikistan
zarifjan_yz@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9924-2952>

Loik S. Kasobov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Power Electrical Station, Tajik Technical University named after academician M. S. Osimi, Dushanbe, Tajikistan
loiknstu@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9271-6908>

Модернизация установки производства водорода методом короткоциклового адсорбции с целью повышения качества продукции

Анастасия Тимуровна Ибрагимова 

Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: at_ibragimova@tnnc.rosneft.ru 

Аннотация. Объектом исследования является установка производства водорода (УПВ) с применением технологии паровой конверсии метана. В статье рассматриваются современные тенденции развития водородных технологий, методы его производства и очистки. Основной проблемой при производстве водорода является недостаточная очистка продукта от загрязняющих газообразных примесей — CO, CO₂, CH₄. В работе предложен способ глубокой очистки водорода методом короткоциклового адсорбции (КЦА) и внедрения данной технологии в качестве способа усовершенствования установки. Результаты исследования показывают, что метод паровой конверсии метана является эффективным и экономически выгодным способом получения водорода, а внедрение адсорбционной установки значительно повышает чистоту получаемого водорода до 99,9% мольн. При этом технико-экономический анализ предложенного варианта показал положительную чистую текущую стоимость (NPV) в размере 45 условных единиц, что свидетельствует о большом потенциале реализации. Проведенное исследование может быть практически ценно предприятиям, занимающимся развитием водородных технологий, для проведения оценки потенциальной выгоды от применения КЦА.

Ключевые слова: производство водорода, паровая конверсия метана, короткоциклового адсорбция, очистка водорода, водородсодержащий газ, дизельное топливо, гидроочистка

Цитирование: Ибрагимова А. Т. 2024. Модернизация установки производства водорода методом короткоциклового адсорбции с целью повышения качества продукции // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 4 (40). С. 18–33. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-18-33>

Поступила 12.11.2024; одобрена 12.12.2024; принята 16.12.2024

Modernization of the hydrogen production unit by pressure swing adsorption to improve product quality

Anastasiya T. Ibragimova ✉

Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia
Corresponding author: at_ibragimova@tinn.rosneft.ru ✉

Abstract. The object of this study is a hydrogen production unit with methane steam reforming technology. The article discusses modern trends in the development of hydrogen technologies, methods of hydrogen production, and purification. The main problem in hydrogen production is insufficient purification of the product from contaminants — CO, CO₂, and CH₄. The authors propose a method for deep purification of hydrogen by pressure swing adsorption (PSA) and the introduction of this technology to improve the whole unit. The results show that the method of methane steam reforming is an effective and cost-effective way to produce hydrogen, and the introduction of an adsorption unit significantly increases the purity of the hydrogen obtained to 99.9% mol. Meanwhile, the technical and economic analysis of the proposed option showed a positive net present value (NPV) in the amount of 45 conventional units, which indicates great potential for implementation. This study can be valuable for enterprises of hydrogen technologies development and for assessing the potential benefits of using PSA.

Keywords: hydrogen production, steam methane reforming, pressure swing adsorption, hydrogen purification, hydrogen-containing gas, diesel fuel, hydro-treating

Citation: Ibragimova, A. T. (2024). Modernization of the hydrogen production unit by pressure swing adsorption to improve product quality. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(4), 18–33. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-18-33>

Received Nov. 12, 2024; Reviewed Dec. 12, 2024; Accepted Dec. 16, 2024

Введение

Водород применяется во многих нефтехимических процессах и производствах. Анализ и выбор технологии производства зависит от планируемых мощностей предприятия, требований к чистоте продукции и экономической эффективности. При синтезе водорода, помимо целевого продукта, образуются другие нежелательные вещества — CO, CO₂,

CH_4 , содержание которых в водородсодержащем газе (ВСГ) может достигать более 25% масс.¹

В наши дни производство высококачественного водорода для нефтехимической промышленности является актуальной задачей. В связи с этим растет интерес к технологиям очистки водорода, которые могут обеспечить максимальную чистоту продукта, поставляемого потребителям.

Синтез водорода высокой чистоты актуален в т. ч. и по следующим причинам:

1. Применение в нефтехимических процессах:

- гидрокрекинге — водород используется для расщепления больших молекул углеводородов на более мелкие, которые затем используются для производства бензина и других видов топлива;
- гидроочистке — водород используется для удаления примесей из сырой нефти, таких как соединения серы и азота, с целью производства более чистого топлива;
- гидрогенизации — процесс смешения водорода с ненасыщенными углеводородными соединениями для синтеза насыщенных углеводородов при производстве маргарина, мыла и других химических веществ.

Все эти процессы требуют водорода высокой чистоты для обеспечения максимальной эффективности и качества продукции — более 99,9% мольн.

2. Экологичность топлива. Водород считается экологически чистым топливом, которое производит только воду в качестве побочного продукта. Высокая чистота продукта гарантирует эффективность топлива, а также возможность снижения углеродного следа.
3. Использование топливных элементов — устройств, преобразующих химическую энергию в электрическую. Высокочистый водород необходим для эффективной работы топливных элементов, обеспечивая надежный и эффективный источник электроэнергии.

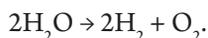
В целом ВСГ с концентрацией водорода от 99,9% мольн. применяется в различных отраслях промышленности, способствуя устойчивости и эффективности процессов при производстве высококачественной продукции.

Методы

Технологии производства водорода

Рассмотрим подробнее основные технологии производства H_2 .

1. *Электролиз воды.* По реакции электролиза образуется чистый водород с кислородом в виде побочного продукта [Дуников, 2017]:



¹ International Energy Agency. Global Hydrogen Review 2022. <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022> (дата обращения 12.12.2024).

Электролиз воды осуществляется в электролизере, принцип которого описан далее. Схематичное отображение процесса электролиза приведено на рис. 1.

Электролизер состоит из двух электродов — анода и катода, погруженных в водный раствор электролита — проводника электрического тока. При подаче напряжения под действием электрического поля положительные ионы движутся к катоду, а отрицательные — к аноду. Таким образом, молекулы воды расщепляются на кислород (O_2), протоны (H^+) и электроны (e^-). На анодной стороне образуется молекулярный кислород O_2 , на катодной стороне осуществляется соединение протонов и электронов с образованием H_2 [Тарамов и др., 2021].

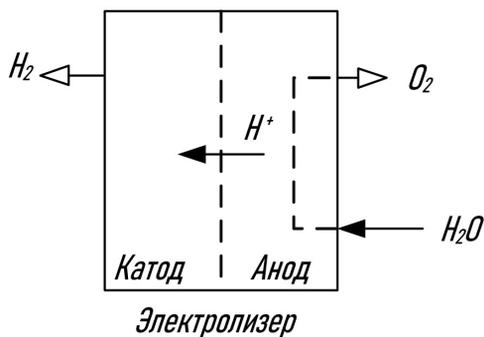


Рис. 1. Схема электролиза

Fig. 1. Electrolysis scheme

2. *Пиролиз метана.* Пиролиз метана заключается в термическом крекинге метана, т. е. его разделении на отдельные компоненты. В ходе целевой реакции образуется твердый углерод и водород:



Варианты технологической реализации процесса разнообразны [Urham и др., 2017]. На рис. 2 представлена схема пиролиза в расплаве металла.

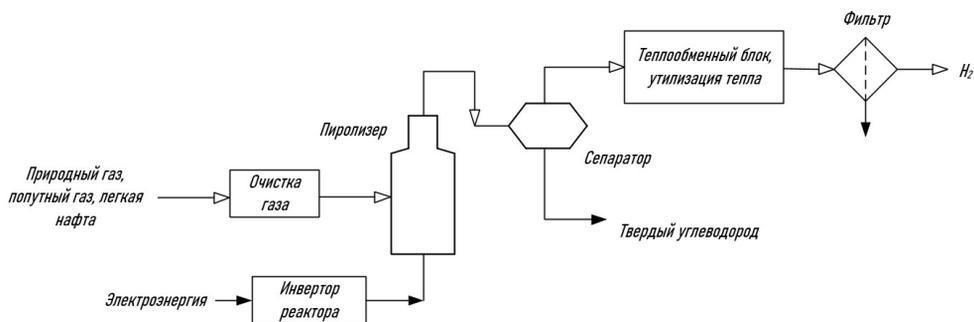


Рис. 2. Схема пиролиза в расплаве металла

Fig. 2. Pyrolysis scheme in a molten metal reactor

Реактор представляет из себя жидкостно-пузырьковый колонный аппарат с расплавленной средой (рис. 3): металлами (например, Ti, Pb, Sn, Ga, Fe), металлическими сплавами (Ni–Bi, Cu–Bi) или солями (KBr, NaBr, NaCl и др.), применяемыми в качестве теплоносителей и потенциальных катализаторов реакции.

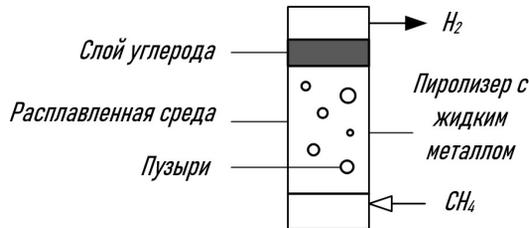


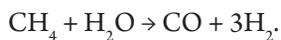
Рис. 3. Пиролизер с расплавленным металлом

Fig. 3. Pyrolyzer with molten metal

Работа жидкостно-пузырьковых колонных реакторов основана на образовании пузырьков в результате контакта между поднимающимся газообразным метаном и жидкой средой. Реакция протекает на границе раздела «жидкость — газ» между металлическим расплавом и пузырями соответственно. Пузырьки проходят реактор снизу вверх, увеличиваясь в размере ввиду молярного расширения из-за образования молекул водорода и слияния пузырьков. Вместе с тем формирующийся углерод осаждается на границе раздела «жидкость — газ». При достижении пузырями поверхности границы расплава происходит их раскрытие и выделение водорода и углерода. Газообразный H_2 уходит с верхней части реактора, а углерод осаждается поверх границы расплавленного слоя.

Пиролиз природного газа еще не получил коммерческого применения с точки зрения производства водорода [Кодряну и др., 2022].

3. *Паровая конверсия метана, или паровой риформинг* (steam methane reforming, SMR), представляет собой процесс, в котором поток природного газа (ПГ) реагирует с паром в присутствии катализатора с образованием водорода и двуокиси углерода [Schneider и др., 2020]:



На рис. 4 приведена типичная принципиальная схема установки риформинга метана [Мейерс, 2011].

Установка содержит следующие блоки:

- сероочистки сырья в колонне Р-1 на алюмокобальтмолибденовом катализаторе (в процессе гидрогенолиза сернистых соединений) и адсорбере А-1 на окиси цинка;
- риформинга метана в печи конверсии П-1 при температурах 800...900 °С;
- конверсии СО в реакторах среднетемпературной конверсии Р-2 на железохромовом катализаторе и низкотемпературной конверсии СО Р-3 над цинк-медным катализатором.

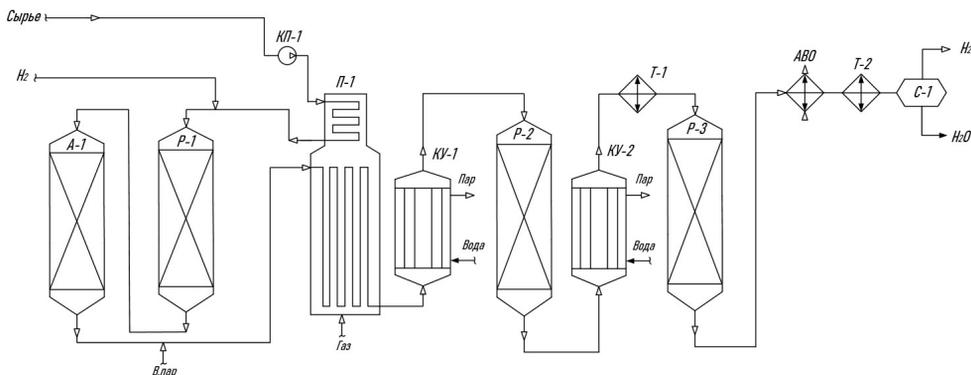


Рис. 4. Схема риформинга метана: А-1 — адсорбер; П-1 — печь риформинга; Р-1 — реактор гидрогенолиза; Р-3 — реактор конверсии; КП-1 — компрессор; КУ-1-2 — котел-утилизатор; Т-1-2 — теплообменник; С-1 — сепаратор; АВО — аппарат воздушного охлаждения

Fig. 4. Steam methane reforming: А-1 — adsorber; П-1 — reforming furnace; Р-1 — hydrogenolysis reactor; Р-2-3 — conversion reactor; КП-1 — compressor; КУ-1-2 — waste heat boiler; Т-1-2 — heat exchanger; С-1 — separator; АВО — air cooler

Стоит отметить, что паровая конверсия ПГ обеспечивает около половины мировых запасов водорода и остается наиболее часто используемым методом производства.

Воздействие на окружающую среду также является серьезной проблемой при проведении данного процесса, поскольку преобразование ПГ в водород приводит к такому же загрязнению окружающей среды и выбросу CO_2 , как и непосредственное сжигание ПГ [Sharma, Ghoshal, 2015].

По результатам обзора в табл. 1 представлена сравнительная оценка разных технологий синтеза водорода.

В данном исследовании в качестве технологии производства выбрана паровая конверсия метана. Процесс, несмотря на основной недостаток — высокую эмиссию оксидов углерода, является основополагающим, отличается высокой конверсией по сырью, дешевизной процесса и может быть модернизирован технологией улавливания и хранения CO_2 .

Технологии очистки водорода

Рассмотрим основные технологии очистки H_2 .

1. *Абсорбционная (мокрая) очистка* (рис. 5). Неочищенный ВСГ промывается в абсорбере К-1 жидким поглотителем — раствором слабого основания (карбонат калия или этаноламин). В колонне К-2 происходит регенерация абсорбента и отделение уловленных газообразных примесей. В реакторе Р-1 осуществляется процесс метанирования сырья, основной целью которого является удаление CO из газообразного водорода.

Представленная схема извлекает лишь кислые газы без возможности извлечения метана и других легких газов от ВСГ.

Табл. 1. Матрица вариантов технологий производства
Table 1. Matrix of hydrogen production technology options

Процесс	Паровая конверсия метана	Пиролиз метана	Электролиз воды	Углекислотная конверсия	Парциальное окисление метана	Пероксидордная конверсия
Реакция	$\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$	$\text{CH}_4 = \text{C} + 2\text{H}_2$	$2\text{H}_2\text{O} = \text{H}_2 + \text{O}_2$	$\text{CH}_4 + \text{CO}_2 = 2\text{CO} + 2\text{H}_2$	$\text{CH}_4 + 0,5\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2$	$\text{CH}_4 + 1,5\text{O}_2 = \text{CO} + 2\text{H}_2\text{O}$ $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} = \text{CO} + 3\text{H}_2$
t, °C	800...900	500...2 000	90	1 000...1 100	750...900	800...900
P, МПа	2...3	0,1...0,3	До 3	2...3	2,5...3,5	2...4
Условия проведения реакции	Избыток H_2O : сырье = (2...5) : 1	—	H_2O : сырье = (2...12) : 1	—	Избыток O_2 : CH_4 = (0,6...0,7) : 1	Присутствие кислорода CH_4 : O_2 = 1,0 : 0,55 Водяной пар : сырье = (0,6...3) : 1
H_2 : CO	(3...7) : 1	2 : 1	—	(1,14...2,15) : 1	(1,6...1,8) : 1	(1,6...2,7) : 1
Конверсия, %	90...92	60...80	60...80	≈100	100	90...92
Селективность, %	50...80	90...95	90...95	≈100	95	60...75
Чистота водорода, % молн.	98	99,85	99,77	—	—	—
Общие затраты энергии, кВт	262 150	289 268	903 600	—	—	—
Энергозатраты, кВт/лнм³ H₂	1,19	1,32	4,3	—	—	—
Катализаторы	Ni/Co на оксиде алюминия	Ni/Co на оксиде алюминия	Ni/Co на оксиде алюминия с 0,01...2% бланкетированных металлов	—	Ni на носителе	Ni/Co на оксиде алюминия
Катализаторы «ЭЭК Экотек» (Россия)	K-905-D1, АКМ, НИАП-03-01, ГИАП-8	K-905-D1, АКМ, НИАП-03-01, ГИАП-8	K-905-D1, ГИАП-8	—	K-905-D1, ГИАП-8	K-905-D1, НИАП-03-01
Катализаторы «НИАП-Катализатор» (Россия)	НИАП-10-01, НИАП-03-01, НИАП-03-01Ш, K-905-D1, ГИАП-8	НИАП-10-01, НИАП-03-01, НИАП-03-01Ш, K-905-D1, ГИАП-8	НИАП-10-01, НИАП-03-01, K-905-D1, ГИАП-8	—	НИАП-10-01, НИАП-03-01, K-905-D1, ГИАП-8	НИАП-04-02, НИАП-03-01, K-905-D1
Реактор	Трубчатый реактор	Реактор пиролиза	Электродный реактор	Трубчатый реактор	Реактор для парциального окисления	Шахтная печь со сплошным слоем катализатора

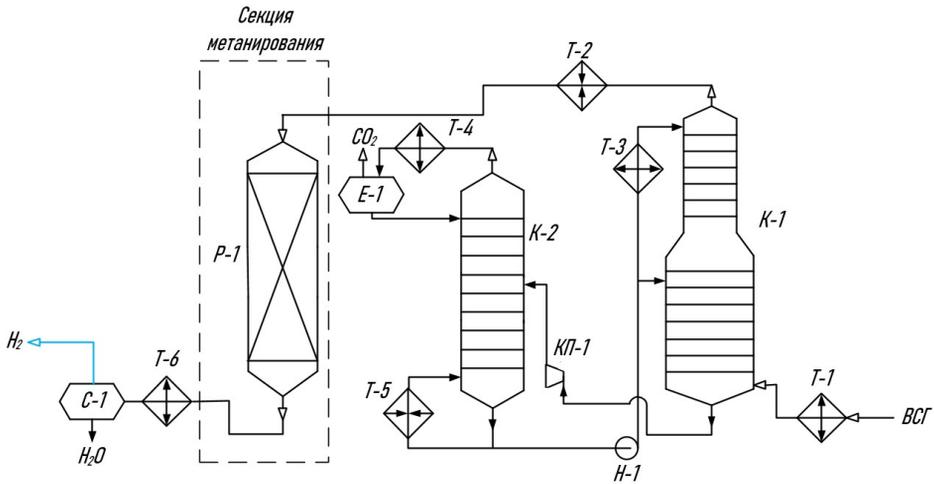


Рис. 5. Схема абсорбционной очистки: К-1 — абсорбер; К-2 — ректификационная колонна; P-1 — реактор; T-1–6 — теплообменник; E-1 — емкость; C-1 — сепаратор; H-1 — насос; КП-1 — компрессор

Fig. 5. Absorption purification scheme: K-1 — absorber; K-2 — distillation column; P-1 — reactor; T-1–6 — heat exchanger; E-1 — vessel; C-1 — separator; H-1 — pump; КП-1 — compressor

2. КЦА при переменном давлении (pressure swing adsorption, PSA) (рис. 6). Принцип технологии заключен в извлечении газообразных примесей из ВСГ в слое твердого адсорбента. При этом поглощение адсорбентом водорода в процессе незначительно. Преимущества процесса КЦА: высокая степень извлечения нежелательных примесей до 99,9% об. [Kalman и др., 2022], низкие эксплуатационные затраты и простота работы установки.

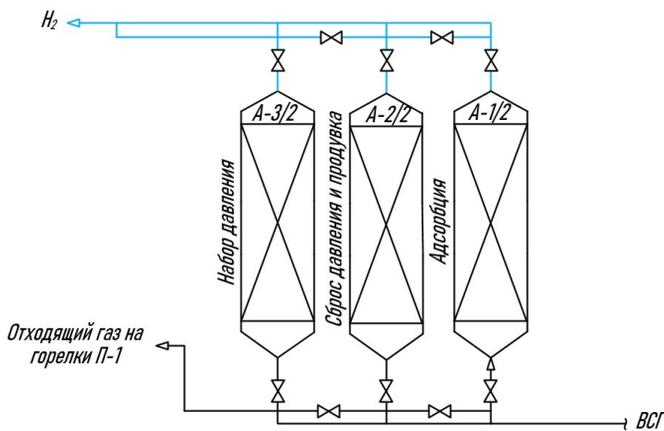


Рис. 6. Схема КЦА

Fig. 6. Pressure swing adsorption

Блок КЦА представляет собой установку, состоящую из минимум четырех адсорберов, каждый аппарат может быть заполнен поглотителем-адсорбентом. Слои сорбентов используются для удаления примесей и концентрирования газообразного водорода.

Поскольку нагрев или охлаждение не требуется, достигаются короткие циклы в пределах нескольких минут.

Каждый из адсорберов параллельно и попеременно переключается на следующие стадии:

- адсорбция,
- сброс давления,
- продувка,
- повышение давления.

Сначала сырьевая газовая смесь проходит через слой адсорбента, где примеси поглощаются из ВСГ. Когда слой адсорбента насыщается, начинается десорбция с параллельным сбросом давления. Часть потока очищенного H_2 применяют для увеличения давления в других адсорберах или для продувки. Для увеличения скорости десорбции проводится противоточный сброс давления. После окончания регенерации давление возвращается к уровню давления адсорбции и процесс начинается снова с самого начала. Отходящий газ блока КЦА может служить топливом в горелках печи конверсии.

3. *Мембранное разделение* (установка схематично отображена на рис. 7). Принцип действия заключен в различии скоростей диффузии газов при прохождении сквозь полупроницаемые мембраны (на основе палладия, к примеру твердый раствор Pd-Cu [Иевлев и др., 2019]).

Газообразная смесь водорода подается в установку с одной стороны мембраны. Поскольку водород обладает высокой проницаемостью через мембрану, он диффундирует через нее быстрее, чем другие газы. Нежелательные газообразные примеси задерживаются слоями мембраны и удаляются с другой стороны.

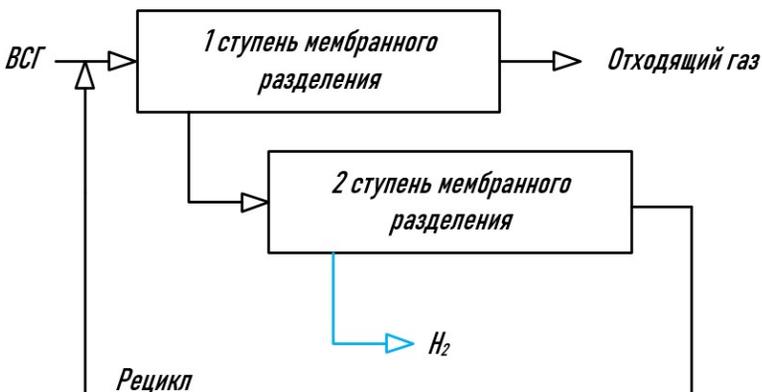


Рис. 7. Схема мембранной очистки

Fig. 7. Hydrogen membrane purification

Недостатком подобной системы очистки является потенциальное образование трещин и разрывов в мембране ввиду воздействия ароматических углеводородов, разъедающих слой мембраны, и жидкой фазы, способной закупорить проницаемые поры. Данная технология применима к малотоннажным установкам.

4. *Криогенное разделение.* Принцип работы установки заключен в охлаждении ВСГ и полной или частичной его конденсации. При содержании в обрабатываемом газе замерзающих компонентов (воды или CO_2) необходима предварительная подготовка сырья, что повышает капитальные вложения.

На рис. 8 отображена схема установки для очистки водорода в процессе гидрогенизации.

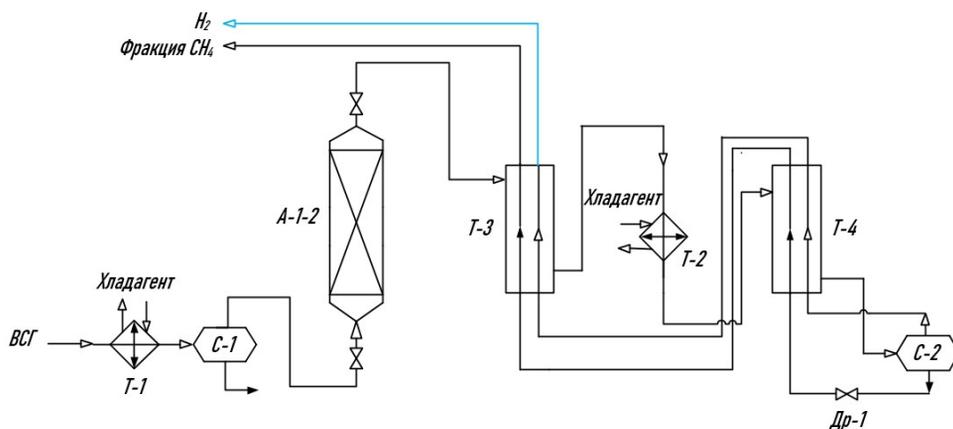


Рис. 8. Схема очистки отходящих газов процесса гидрогенизации криогенным методом: А-1-2 — адсорбер с алюмогелем и активированным углем; Т-1-4 — теплообменник; С-1-2 — сепаратор; Др-1 — дроссель

Fig. 8. Cryogenic method: А-1-2 — adsorber with alumolegel and activated carbon; Т-1-4 — heat exchanger; С-1-2 — separator; Др-1 — choke

Здесь на разделение в криогенный блок поступает смесь ВСГ с высоким содержанием водорода, в котором, кроме того, содержится некоторое количество тяжелых углеводородов от C_2 и выше.

Охлаждение в теплообменном оборудовании достигает следующих значений: Т-1 — охлаждение ВСГ до 5°C хладагентом, кипящим при 0°C ; Т-3 — охлаждение до -60°C обратными потоками водорода и метановой фракции; Т-2 — охлаждение до -65°C хладагентом, кипящим при -70°C ; Т-4 — стадия окончательного охлаждения до -145°C . Метановая фракция после С-2 дросселируется до $0,2\text{ МПа}$ [Словецкий, 2010].

5. *Металлогидридная технология очистки и хранения водорода.* Технология основана на принципе обратимой абсорбции газа металлогидридным материалом за счет протекания обратимой реакции поглощения и выделения водорода при образовании металлогидридов — соединений металлов с водородом.

Газообразный водород пропускают через интерметаллическое соединение (ИМС), которое поглощает примеси и нежелательные газы. Для хранения водорода металлогидриды

используют в качестве твердых носителей. Водород поглощается металлгидридом при высоком давлении и выделяется при низком, что позволяет компактно и безопасно хранить большие объемы газа в твердой форме.

Используемые металлгидридные материалы включают: лантанид-никелевые сплавы, интерметаллические соединения, комплексные гидриды.

На рис. 9 приведена упрощенная схема металлгидридной очистки водорода.

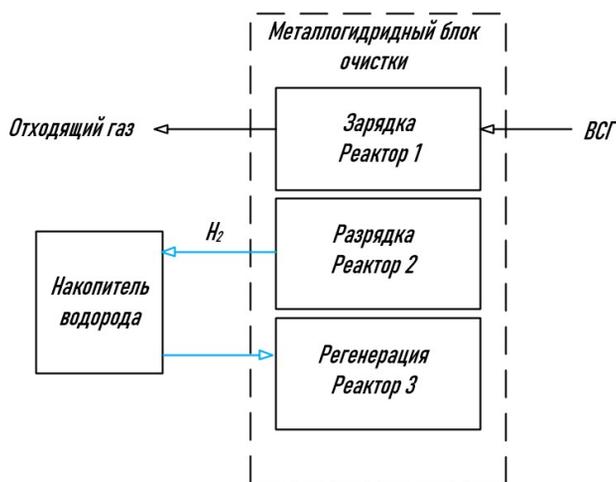


Рис. 9. Схема металлгидридной очистки

Fig. 9. Metal hydride purification

Для осуществления непрерывности работы установки применяют как минимум два металлгидридных реактора: один работает на стадии извлечения водорода из газообразной смеси, второй — на стадии выделения уловленного чистого H_2 .

Ключевым недостатком технологии является «отравляющее» воздействие на ИМС присутствия в ВСГ даже незначительной концентрации CO , SO_2 и H_2S [Блинов и др., 2021].

Таким образом, проанализировав рассмотренные технологии, можно отметить процесс КЦА как оптимальный вариант очистки водорода и интеграции в процесс парового риформинга. Преимуществами технологии является высокая степень очистки водорода, умеренная себестоимость, отсутствие необходимости подготовки сырьевого газа и средние значения давлений 1...4 МПа во время всего процесса.

Результаты

Моделирование и расчет установки производства водорода с блоком КЦА

Для оценки эффективности метода совершенствования технологии производства водорода путем ввода блока КЦА использовался материальный баланс, рассчитанный в ходе моделирования процесса риформинга метана в ПО Aspen Hysys (рис. 10).

В табл. 2 представлен материальный баланс установки производства водорода (УПВ) мощностью 2,75 т/час по водороду с реинжинирингом установки блоком КЦА в соответствии с построенной моделью.

Таким образом, установка с блоком КЦА повышает концентрацию водорода в ВСГ с 82 до 99,99% мольн., выход на сырье составляет $\approx 12\%$ масс. Отходящий газ направляется на горелки трубчатого реактора, вода после подготовки подается на смешение с сырьевым газом.

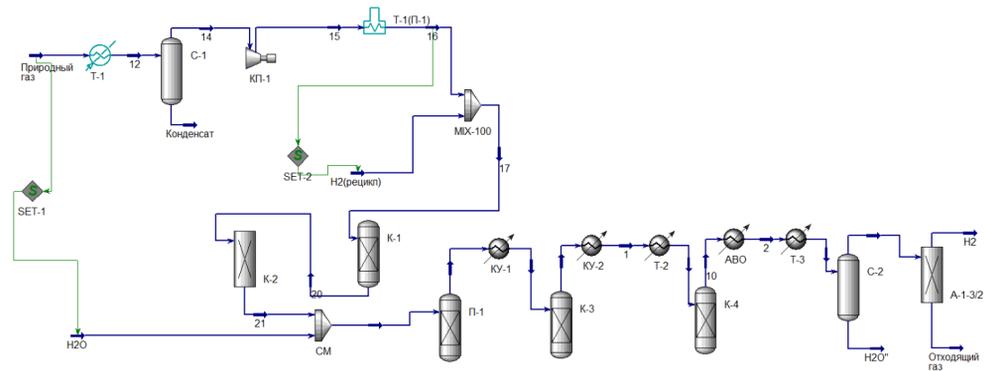


Рис. 10. Модель технологической схемы УПВ с КЦА

Fig. 10. Model of the production hydrogen unit with PSA

Табл. 2. Материальный баланс установки производства водорода

Table 2. Material balance of the hydrogen production unit

Вещество	% мольн.	% масс.	т/час	тыс. т/год
Приход:				
природный газ	33,00	31,05	7,21	57,70
вода	67,00	68,95	16,20	129,59
Всего	100,00	100,00	23,41	187,29
Расход:				
ВСГ, в т. ч.	—	11,77	2,76	22,05
водород	99,99	99,75	2,75	21,99
CO + CO ₂	0,01	0,25	0,01	0,06
вода	—	17,91	4,19	33,54
отходящий газ	—	70,32	16,46	131,70
CH ₄	21,78	9,64	1,59	12,69
CO ₂	68,80	83,53	13,75	110,01
CO	8,28	6,40	1,05	8,42
H ₂	0,30	0,02	0,00	0,02
H ₂ O	0,84	0,42	0,07	0,55
Всего	100,00	100,00	23,41	187,29

Далее проведем экономическую оценку возможности реализации предложенного метода реинжиниринга. Рассчитаем основные экономические показатели двух вариантов с реинжинирингом и без, а также NPV с учетом ставки дисконтирования 20%.

Капитальными затратами при реинжиниринге установки является оснащение УПВ адсорберами в количестве 6 единиц. Операционные затраты определены с учетом затрат на закупку адсорбента, его замену каждые 3 года, техническое обслуживание и ремонт оборудования. Денежные потоки на расчетный период представлены в табл. 3.

В результате за 11 лет достигается получение дополнительной прибыли в размере 45 условных единиц (у. е.).

Увеличение выручки достигается за счет продажи топлива высокого экологического класса марки Евро-5, получаемого при достижении высокой чистоты ВСГ на установке производства дизельного топлива (ДТ).

Отсутствие очистки на УПВ приводит к ограничению способности завода гидроочистки ДТ соответствовать высоким требованиям экологического класса дизельного топлива марки Евро-5, в котором содержание серы не превышает 0,001%. Использование слабоконцентрированного ВСГ в процессе гидроочистки приводит к снижению эффективности и селективности основных реакций и повышает риск побочных реакций.

Топливо, перерабатываемое на таком заводе, соответствует более низкому экологическому классу — Евро-3 (до 0,05% серы).

Табл. 3. Расчет денежных потоков, у. е.

Table 3. Cash flows, units

Год	Вар.	2024	2025	2026	2027	2028	2029	Σ1	Σ2
Выручка	B1	919	956	956	955	952	952	5 712	11 400
	B2	1 631	1 670	1 674	1 675	1 675	1 679	10 288	20 293
Налоги	B1	196	203	203	203	202	202	1 212	2 426
	B2	318	306	307	307	307	308	1 866	3 718
CAPEX	B1	—	—	—	—	—	—	—	0
	B2	2 800	—	—	—	—	—	—	2 800
OPEX	B1	—	—	—	—	—	—	—	0
	B2	210	—	—	210	—	—	420	840
ЧДП	B1	724	753	753	751	749	749	4 494	8 975
	B2	-1 697	1 364	1 368	1 158	1 368	1 372	8 004	12 935
NPV	B1	551	477	398	331	275	229	762	3 022
	B2	-1 291	865	722	510	502	419	1 341	3 067

Примечание. B1 — вариант УПВ по базовой технологии, продукт которой поступает на установку гидроочистки дизельного топлива мощностью 2 600 тыс. т/год; B2 — аналогичный вариант с включением блока КЦА в схему производства. Σ1 — сумма за период 2030–2035 гг.; Σ2 — итоговая сумма.

Note. B1 — a variant of the hydrogen production unit according to the basic technology, the product of which is supplied to the installation of diesel fuel with a capacity of 2,600 thousand tons/year; B2 — a similar option with PSA in the production scheme. Σ1 — the amount for the period 2030–2035; Σ2 — the total amount.

Оба проекта являются рентабельными. Однако отсутствие очистки приведет к получению водорода более низкой чистоты, что может ограничить способность завода соответствовать спецификациям клиентов и рыночному спросу. Это может привести к снижению доходов и рентабельности предприятия.

Производимый заводом водород более высокой чистоты позволит учесть требования клиентов и потенциально будет иметь более высокую цену на рынке. Как результат, у такого проекта более высокая доходность и предположительно более высокая прибыльность в долгосрочной перспективе.

Заключение

Предложено технологическое решение по совершенствованию базовой технологии производства водорода паровой конверсией путем установки блока КЦА с целью повышения чистоты продукта с 82 до 99,99% мольн. В ПО Hysys построена схема усовершенствованной УПВ и представлен материальный баланс установки.

Проведена технико-экономическая оценка УПВ с введением блока КЦА, оценены ключевые показатели эффективности разработанного варианта усовершенствования до 2035 г. Рост NPV составил 45 у. е.

Результаты могут быть полезны при проектировании, разработке и дальнейшем проведении исследований в области развития водородных технологий.

Список источников

- Блинов Д. В., Борзенко В. И., Бездудный А. В., Кулешов Н. В. 2021. Перспективные металлургические технологии хранения и очистки водорода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. Том 23. № 2. С. 149–160. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-149-160>
- Дуников Д. О. (ред.). 2017. Водородные энергетические технологии. М.: ОИВТ РАН. 190 с.
- Иевлев В. М., Донцов А. И., Прижимов А. С., Новиков В. И., Рошан Н. Р. 2019. Мембраны для глубокой очистки водорода: от фундаментального исследования к практической реализации // Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019): тезисы докладов междунар. науч. конф., 25–28 июня 2019 г. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС. С. 129. <https://www.elibrary.ru/nvgcvq>
- Кодряну Н. П., Ишмурзин А. А., Дауди Д. И., Насиров И. Р., Черных С. П. 2022. Теоретическая основа и практический анализ технологий для водородной стратегии Российской Федерации // Газовая промышленность. № 1 (827). С. 56–70. <https://neftegas.info/magazines/gas-industry/1/16> (дата обращения: 12.12.2024).
- Мейерс Р. А. 2011. Основные процессы нефтепереработки: справочник. СПб.: Профессия. 944 с.
- Словецкий Д. С. 2010. Сверхчистый водород // The Chemical Journal / Химический журнал. № 1-2. С. 33–35. https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2010_1-2_33-35_sverhchistyvododod.pdf (дата обращения: 12.12.2024).
- Тарамов Ю. Х., Ахъядов Р. И., Эльмурзаев А. А. 2021. Производство водорода электролизом воды из полимерной электролитной мембраны (ПЭМ) // Вестник ГГНТУ. Технические науки. Том 17. № 4 (26). С. 33–37. <https://www.elibrary.ru/cydnvj>

- Kalman V., Voigt J., Jordan C., Harasek M. 2022. Hydrogen purification by pressure swing adsorption: high-pressure PSA performance in recovery from seasonal storage // *Sustainability*. Vol. 14. No. 21. Article 14037. <https://doi.org/10.3390/su142114037>
- Schneider S., Bajohr S., Graf F., Kolb T. 2020. Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse // *Chemie Ingenieur Technik*. Vol. 92. No. 8. Pp. 1023–1032. <https://doi.org/10.1002/cite.202000021>
- Sharma S., Ghoshal S. K. 2015. Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 43. Pp. 1151–1158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.093>
- Upham D. C., Agarwal V., Khechfe A., Snodgrass Z. R., Gordon M. J., Metiu H., McFarland E. W. 2017. Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon // *Science*. Vol. 358. No. 6365. Pp. 917–921. <https://doi.org/10.1126/science.aao5023>

References

- Blinov, D. V., Borzenko, V. I., Bezdudny, A. V., & Kuleshov, N. V. (2021). Prospective metal hydride hydrogen storage and purification technologies. *Power Engineering: Research, Equipment, Technology*, 23(2), 149–160. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-2-149-160> [In Russian]
- Dunikov, D. O. (Ed.). (2017). *Hydrogen Energy Technologies*. Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences. [In Russian]
- Ievlev, V. M., Dontsov, A. I., Prizhimov, A. S., Novikov, V. I., & Roshan, N. R. (2019). Membranes for deep hydrogen purification: from fundamental research to practical implementation. In *Modern Materials and Advanced Manufacturing Technology (MMAMT-2019): Abstracts of Reports of the International Scientific Conference, June 25–28, 2019* (p. 129). POLYTECH-PRESS. <https://www.elibrary.ru/nvgcvq> [In Russian]
- Kodryanu, N. P., Ishmurzin, A. A., Daudi, D. I., Nasirov, I. R., & Chernykh, S. P. (2022). Theoretical basis and practical analysis of the technologies for the hydrogen strategy of the Russian Federation. *Gas Industry*, (1), 56–70. Retrieved Dec. 12, 2024, from <https://neftegas.info/magazines/gas-industry/1/16> [In Russian]
- Meiers, R. A. (2011). *The Main Processes of Oil Refining*. Professiya. [In Russian]
- Slovetskiy, D. S. (2010). Ultrapure hydrogen. *The Chemical Journal*, (1-2), 33–35. Retrieved Dec. 12, 2024, from https://tcj.ru/wp-content/uploads/2013/12/2010_1-2_33-35_sverhchisty-vodorod.pdf [In Russian]
- Taramov, Yu. Kh., Akhyadov, R. I., & Elmurzaev, A. A. (2021). Hydrogen production by electrolysis of water from polymer electrolyte membrane (PEM). *Herald of GSTOU. Technical Sciences*, 17(4), 33–37. <https://www.elibrary.ru/cydnvj> [In Russian]
- Kalman, V., Voigt, J., Jordan, C., & Harasek, M. (2022). Hydrogen purification by pressure swing adsorption: high-pressure PSA performance in recovery from seasonal storage. *Sustainability*, 14(21), Article 14037. <https://doi.org/10.3390/su142114037>
- Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F., & Kolb, T. (2020). Verfahrensübersicht zur Erzeugung von Wasserstoff durch Erdgas-Pyrolyse. *Chemie Ingenieur Technik*, 92(8), 1023–1032. <https://doi.org/10.1002/cite.202000021>

Sharma, S., & Ghoshal, S. K. (2015). Hydrogen the future transportation fuel: from production to applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 43, 1151–1158. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.093>

Upham, D. C., Agarwal, V., Khechfe, A., Snodgrass, Z. R., Gordon, M. J., Metiu, H., & McFarland, E. W. (2017). Catalytic molten metals for the direct conversion of methane to hydrogen and separable carbon. *Science*, 358(6365), 917–921. <https://doi.org/10.1126/science.aao5023>

Информация об авторе

Анастасия Тимуровна Ибрагимова, ведущий специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

at_ibragimova@tncn.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9519-0410>

Information about the author

Anastasiya T. Ibragimova, Leading Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia

at_ibragimova@tncn.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0005-9519-0410>

Измерительный преобразователь теплового расходомера, удовлетворяющего концепции «подрывной» инновации

Александр Анатольевич Вакулин[✉], Сергей Георгиевич Монтанари

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: a.a.vakulin@utmn.ru[✉]

Аннотация. Создание расходомеров в рамках концепции «подрывной» инновации является актуальной задачей, особенно в нашей стране. В соответствии с этой концепцией создаваемый расходомер должен удовлетворять минимально приемлемым для клиентов требованиям, изложенным в соответствующей нормативной документации. В настоящей статье представлены результаты экспериментального исследования одного из возможных вариантов измерительного преобразователя теплового расходомера. Отличительной особенностью измерительного преобразователя является использование нагревателя в контакте с единственным датчиком температуры. Исследования проводились на лабораторной установке, собранной на кафедре прикладной и технической физики Школы естественных наук Тюменского государственного университета (Тюмень, Россия). Приведены экспериментальные данные изменения температуры со временем при изменении массового расхода воздуха при различном взаимном расположении датчика температуры и нагревателя. Полученные результаты позволили рекомендовать установку единственного датчика температуры первым по ходу потока в непосредственном контакте с нагревателем. С целью расширения динамического диапазона за счет контролируемого изменения мощности нагревателя и снижения себестоимости теплового расходомера предложена замена промышленного измерителя-регистратора ИС-203.4 упрощенным вторичным преобразователем на базе микроконтроллерной системы, предназначенным для измерения, отображения, регистрации и управления измерительным преобразователем, и представлена его блок-схема.

Ключевые слова: тепловой расходомер, подрывная инновация, измерительный преобразователь, коэффициент теплоотдачи, расход газа, лабораторная установка, микроконтроллерная система

Благодарности: авторы выражают благодарность А. В. Шаталову, ведущему инженеру кафедры прикладной и технической физики Школы естественных наук Тюменского государственного университета, за помощь в подготовке экспериментов.

Цитирование: Вакулин А. А., Монтанари С. Г. 2024. Измерительный преобразователь теплового расходомера, удовлетворяющего концепции «подрывной» инновации // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 4 (40). С. 34–49. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-34-49>

Поступила 27.11.2024; одобрена 10.12.2024; принята 16.12.2024

Heat metering transducer, satisfying the concept of “subversive” innovation

Aleksandr A. Vakulin , Sergey G. Montanari

University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: a.a.vakulin@utmn.ru 

Abstract. Creating flow meters within the concept of “subversive” innovation is an urgent task for Russia. In accordance with this concept, the generated flowmeter must meet the minimum requirements acceptable to customers, contained in the relevant regulatory documents. This article presents the results of an experimental study on a possible option of a measuring converter of a heat flow meter. A distinctive feature of the measuring converter is the use of a heater in contact with a single temperature sensor. The research was carried out at the installation, assembled at the Department of Applied and Technical Physics of the School of Natural Sciences of the University of Tyumen (Tyumen, Russia). The experimental data provided includes temperature changes over time with a change in the mass flow of air at different mutual position of the temperature sensor and heater. The results obtained suggest installing the only temperature sensor first in the flow directly contacting the heater. To expand the dynamic range with a controlled change in the power of the heater and to reduce the cost of the heat meter, we suggest replacing the industrial meter-register IS-203.4 with a simplified secondary converter based on microcontroller system, which is intended for measurement, display, registration, and management of the metering transducer; its flowchart is provided.

Keywords: heat flow meter, subversive innovation, measuring transducer, heat transfer coefficient, gas flow rate, laboratory installation, microcontroller system

Acknowledgements: the authors would like to thank A. V. Shatalov, Leading Engineer of the Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, for his help in preparing the experiments.

Citation: Vakulin, A. A., & Montanari, S. G. (2024). Heat metering transducer, satisfying the concept of “subversive” innovation. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(4), 34–49. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-34-49>

Received Nov. 27, 2024; Reviewed Dec. 10, 2024; Accepted Dec. 16, 2024

Введение

Всё большую актуальность приобретает необходимость создания и совершенствования методов и средств измерения расхода и количества теплоносителей, особенно в связи с ограниченной возможностью в настоящее время пользоваться продукцией зарубежных фирм. В ранних работах [Вакулин и др., 2015, 2017; Михеев и др., 2017] одним из авторов статьи была сформулирована и обоснована концепция создания расходомеров для нефтегазовой отрасли в виде «подрывной» инновации [Кристенсен, Рейнор, 2004]. В соответствии с этой концепцией создаваемый расходомер «должен удовлетворять минимально приемлемым для клиентов требованиям, изложенным в соответствующей нормативной документации, в частности в ГОСТ Р 8.615–2005 ГСИ „Измерения количества извлекаемых из недр нефти и нефтяного газа. Общие метрологические и технические требования“. Кроме этого он должен быть дешевым, иметь простую и гибкую конструкцию, ремонтпригодность, возможность быстрой модернизации» [Михеев и др., 2017, с. 5, 6]. Наряду с частым использованием метода переменного перепада давления [Кремлевский, 1989, 2002; Вакулин и др., 2012, 2018] указанным выше требованиям может соответствовать тепловой метод измерения расхода. В ряде работ [Кремлевский, 1989, 2004; Шорников, 2003; Руденко, 2014; Земенков и др., 2023] приведен краткий обзор тепловых расходомеров. Их применяют в основном для измерения расхода газа и значительно реже для измерения расхода жидкости. По характеру теплового взаимодействия с потоком газа или жидкости тепловые расходомеры принято разделять на термоанемометрические, калориметрические (нагреватель расположен внутри трубы) и термоконвективные (нагреватель расположен снаружи трубы).

«Принцип действия (термоанемометрического расходомера. — А. В., С. М.) связан с использованием конвективного уноса тепла движущейся средой от нагретой поверхности» [Руденко, 2014, с. 47] и «основан на зависимости между скоростью потока и теплоотдачей проволоочки, помещенной в поток и нагретой электрическим током» [Руденко, 2014, с. 48]. «Чувствительным элементом такого анемометра является нагретая проволока или поверхность, обычно из платины или вольфрама» [Руденко, 2014, с. 47] (рис. 1).

Как правило, применяют два способа проведения измерений. В первом способе осуществляют омический нагрев постоянной мощности чувствительного элемента проходящим через него постоянным током и измеряют разность температур после и до элемента.

Во втором способе поддерживают постоянной температуру элемента с помощью изменения мощности нагрева. Мощность нагрева функционально связана с измеряемой скоростью. Термоанемометр в основном используют «для измерения скорости потока жидкости или газа от 0,1 м/сек и выше... Основная часть термоанемометра — мост измерительный, в одно плечо которого включен чувствительный элемент в виде нити из никеля, вольфрама или из платины длиной 3–12 мм и диаметром 0,005–0,15 мм, укрепленной на тонких электропроводных стержнях» [Руденко, 2014, с. 48]. Электрическая схема термоанемометрического расходомера показана на рис. 2.

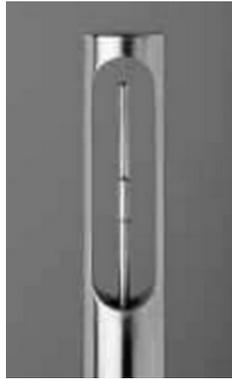


Рис. 1. Чувствительный элемент термоанемометрического расходомера [Руденко, 2014, с. 47]

Fig. 1. The sensitive element of the thermoanemometric flow meter (Rudenko, 2014, p. 47)

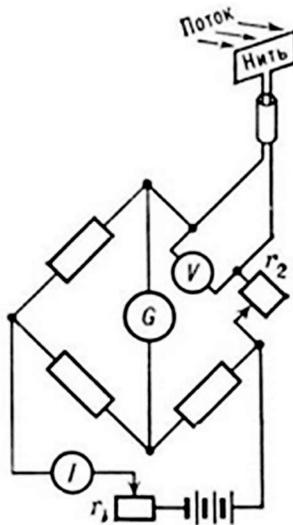


Рис. 2. Электрическая схема термоанемометрического расходомера [Руденко, 2014, с. 49]

Fig. 2. The electrical circuit of a thermoanemometric flow meter (Rudenko, 2014, p. 49)

«Количество тепла, передаваемого нагретой проволочкой потоку газа, зависит от нескольких факторов, таких как физические характеристики движущейся среды, геометрия и ориентация проволочки» [Земенков и др., 2023, с. 52]. С увеличением температуры проволочки чувствительность термоанемометра увеличивается. Благодаря малой инерционности, высокой чувствительности и компактности термоанемометр широко применяется при изучении неустановившихся движений и течений в пограничном слое вблизи стенки, для определения направления скорости потока (двух- и трехниточные) и главным образом турбулентности воздушных потоков. Термоанемометры используются для зондирования потоков как при обычных давлениях, так и при больших разрежениях [Земенков и др., 2023, с. 52].

У калориметрических и термоконвективных расходомеров датчики температуры расположены по ходу потока с обеих сторон от нагревателя. Измеряется разность температур газа/жидкости после и до нагревателя (при постоянной мощности нагрева) или же мощность нагрева (при постоянной разности температур). Относительно нагревателя датчики температуры располагают симметрично или несимметрично: первый по ходу потока датчик температуры находится далеко от нагревателя, второй — вблизи за нагревателем. Типичная схема несимметричного расположения датчиков и градуировочные кривые зависимости разности температур и мощности нагрева от массового расхода газа приведены на рис. 3 [Кремлевский, 1989, 2004].

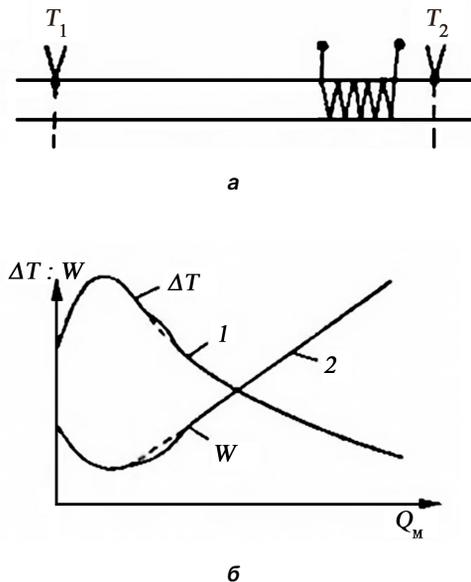


Рис. 3. Принципиальная схема (а). T_1, T_2 — датчики температуры. Поток движется от T_1 к T_2 . Градуировочные кривые (б). $\Delta T = T_2 - T_1$; W — мощность нагрева; Q_m — массовый расход. 1 — $W = \text{const}$; 2 — $\Delta T = \text{const}$

Fig. 3. Principle diagram (a). T_1, T_2 — temperature sensors. The flow moves from T_1 to T_2 . Grading curves (b). $\Delta T = T_2 - T_1$; W — heating capacity; Q_m — mass flow. 1 — $W = \text{const}$; 2 — $\Delta T = \text{const}$

Из рис. 3в (кривая 5) видно, что при постоянной мощности нагрева разность температур с увеличением массового расхода сначала растет практически линейно, достигает максимального значения, а затем падает по гиперболическому закону. Зависимость мощности нагрева от массового расхода при постоянной температуре (кривая б) иная: сначала значение мощности уменьшается с увеличением массового расхода, достигает минимума, а затем возрастает.

С целью создания в рамках «подрывной» инновации теплового расходомера была поставлена задача экспериментального изучения возможного измерительного преобразователя расходомера с использованием единственного датчика температуры при постоянной мощности нагрева.

Материалы и методы

Экспериментальные исследования проводились на лабораторной установке, собранной на кафедре прикладной и технической физики Школы естественных наук Тюменского государственного университета. Ее схема приведена на рис. 4.

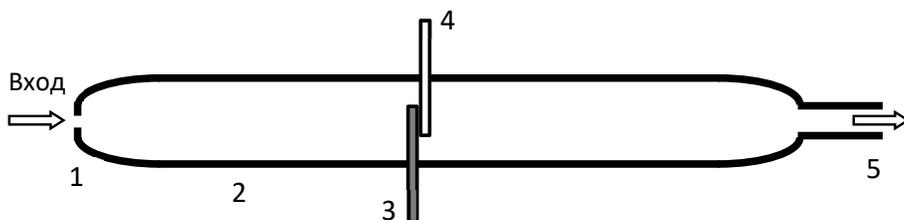


Рис. 4. Схема лабораторной установки: 1 — калиброванное отверстие, 2 — трубопровод, 3 — нагреватель, 4 — датчик температуры, 5 — входной патрубок пылесоса «Шмель-4». Диаметр трубопровода (2) — 90 мм, расстояние от входного отверстия (1) до нагревателя (3) — 140 мм, расстояние от нагревателя (3) до патрубка (5) — 340 мм, диаметры нагревателя и датчика температуры — 4 мм, длина их соприкосновения — 30 мм

Fig. 4. The installation scheme: 1 — the calibrated hole, 2 — the pipeline, 3 — the heater, 4 — the temperature sensor, 5 — the inlet tube of the vacuum cleaner. The pipeline's diameter (2) — 90 mm, distance from the inlet (1) to the heater (3) — 140 mm, distance from the heater (3) to the pipe (5) — 340 mm, the diameters of the heater and temperature sensor — 4 mm, the contact length — 30 mm

В качестве источника постоянного расхода воздуха использовался пылесос «Шмель-4» (разрежение — 8 кПа, электрическая мощность — 140 Вт). Воздух поступал из атмосферы через калиброванное отверстие (1) в трубопровод. Поскольку отношение давлений после и до входного отверстия было постоянным, то и массовый расход воздуха в течение эксперимента полагался постоянным [Брилл, Мукерджи, 2006; Вакулин и др., 2018]. Его величина определялась диаметром входного отверстия.

Для независимого определения величин постоянного расхода при различных диаметрах входного отверстия мы использовали вихревой расходомер ДРГ.М-160, установленный

в трубопровод после экспериментальной установки перед входным патрубком (5) пылесоса (рис. 4). Расходомер был соединен с многофункциональным вторичным прибором — теплоэнергоконтроллером ИМ 2300. Этот вторичный прибор часто используется в качестве тепловычислителя в системах учета тепловой энергии энергоресурсов, а также в качестве вычислителя в расходомерах — счетчиках газа. В табл. 1 приведены полученные с помощью ДРГ.М-160 и ИМ 2300 значения расхода воздуха и соответствующие им числа Рейнольдса при различных значениях калиброванного входного отверстия.

Табл. 1. Значения расхода воздуха и соответствующие им числа Рейнольдса (основная относительная погрешность 1%)

Table 1. Air consumption values and the relevant Reynolds nos. (basic relative error 1%)

Диаметр отверстия, мм	Объемный расход, м ³ /ч	Массовый расход, кг/с	Re
21	32,5	0,01088 ± 0,00011	8,5 · 10 ³
9	27,5	0,00921 ± 0,00009	7,2 · 10 ³
6	24,4	0,00817 ± 0,00008	6,4 · 10 ³

Постоянная электрическая мощность нагревателя (3) составляла 30 Вт. Температуру измеряли с помощью термопреобразователя сопротивления ТСМУ 9304 (диапазон 0... 100 °С, класс точности 0,5), соединенного с измерителем-регистратором ИС-203.4, и передавали на ЭВМ по RS-232. Изменение расхода производили с помощью быстрой смены калиброванного отверстия (1). Реакция температуры на ступенчатое входное воздействие хорошо известна, динамическая погрешность при измерении температуры уменьшается экспоненциально, и практически ею можно пренебречь, если отчет показаний температуры производить в моменты времени, которые больше $(3...4)T$, где T — постоянная времени датчика температуры [Тартаковский, Ястребов, 2002]. В нашем случае $T \approx 90$ сек. Типичный вид исходных данных о температуре в зависимости от расхода и времени показан на рис. 5.

На рис. 5 хорошо видно ступенчатое входное воздействие изменения расхода на значение температуры датчика.

Расположение выводов нагревателя и датчика температуры в противоположных точках по диаметру трубопровода было обусловлено простотой их монтажа в лабораторной установке (рис. 4). Очевидно, что в реальном расходомере датчик температуры и нагреватель должны быть расположены с одной стороны трубопровода из-за уменьшения количества отверстий в трубопроводе и связанных с этим различных преимуществ.

Как видно из рис. 4, измерительный преобразователь расходомера состоит из находящегося в непосредственном контакте нагревателя (3) и датчика температуры (4), вводимых в трубопровод в радиальном направлении. Такой расходомер, по сути, является промежуточной разновидностью между термоанемометрическим и калориметрическим расходомером. Обычно в подобных расходомерах используется специально изготовленный стержневой металлический теплопровод. Стержень нагревается обмоткой, которая может быть расположена на части стержня, находящейся вне или внутри трубы. С помощью термочувствительного элемента измеряется температура стержня, которая является функцией

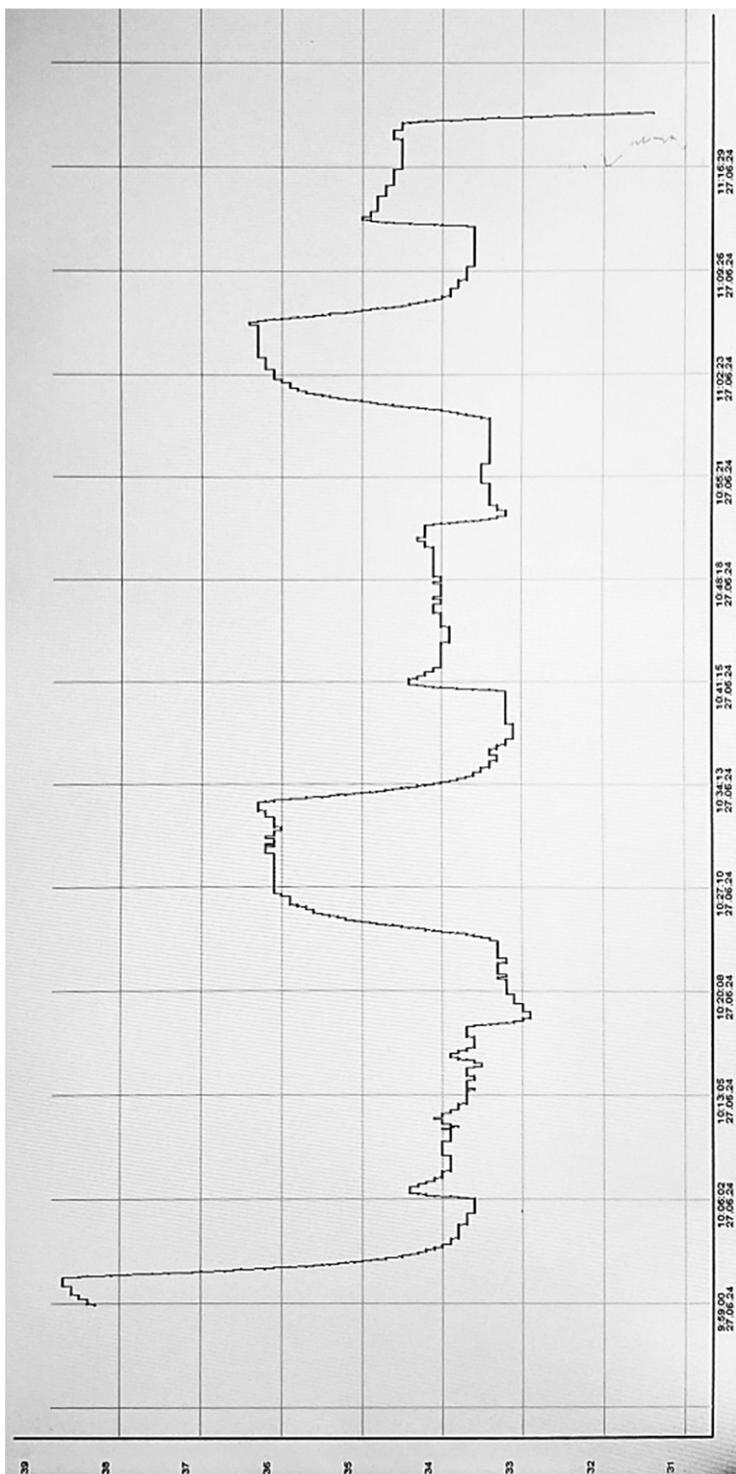


Рис. 5. Исходный график зависимости температуры (ось ординат) от расхода и времени (ось абсцисс)
Fig. 5. Baseline graph of temperature (y) vs. flow and time (x)

скорости или расхода потока [Кремлевский, 1989, 2004]. В нашем случае нет специально изготовленного теплопровода — имеются стандартный датчик температуры и нагреватель. Их взаимное расположение можно выбрать разным: расположить датчик температуры до нагревателя, после или под ним. Результаты экспериментов при различном взаимном расположении датчика температуры и нагревателя приведены на рис. 6–8. При измерениях постоянная мощность нагрева составляла 30 Вт, а изменение массового расхода (при изменении диаметра калиброванного отверстия) соответствует данным из табл. 1.

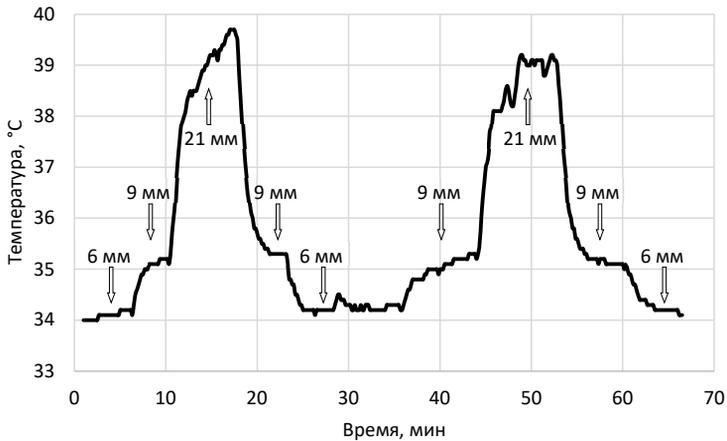


Рис. 6. Изменение температуры перед нагревателем со временем при изменении массового расхода воздуха

Fig. 6. Change in temperature before the heater with time when changing the mass flow of air

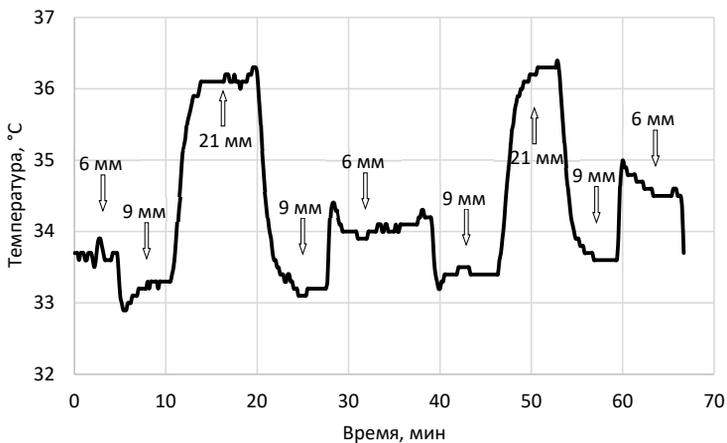


Рис. 7. Изменение температуры со временем после нагревателя при изменении массового расхода воздуха

Fig. 7. Change in temperature over time after the heater when changing the mass flow of air

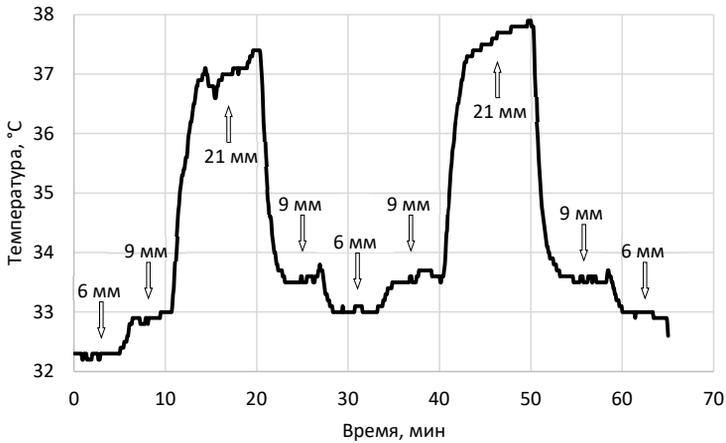


Рис. 8. Изменение температуры под нагревателем со временем при изменении массового расхода воздуха

Fig. 8. Change in temperature under the heater with time when changing the mass flow of air

Обращает на себя внимание существенно разная реакция температуры на увеличение расхода, наблюдаемая на рис. 6 и 8, с одной стороны, и на рис. 7 — с другой. Когда датчик температуры расположен перед нагревателем или под ним, температура увеличивается с увеличением расхода. Если же датчик температуры расположен за нагревателем, то с увеличением расхода температура сначала уменьшается, а затем увеличивается. Это иллюстрируется приведенной на рис. 9 зависимостью температуры от массового расхода при постоянной мощности нагрева.

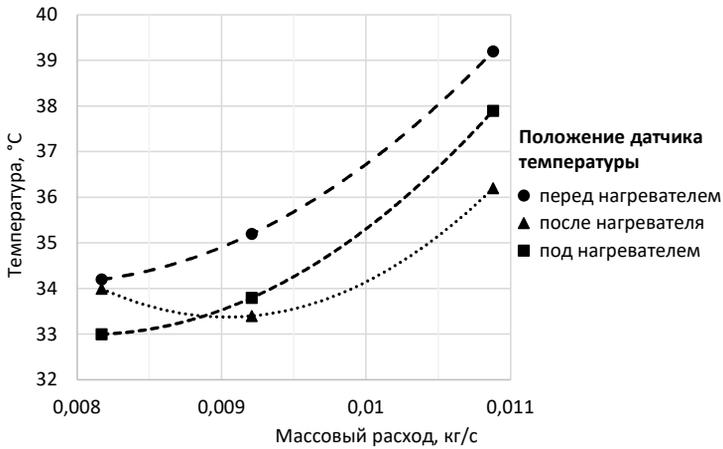


Рис. 9. Зависимость температуры от массового расхода при различном взаимном положении датчика температуры и нагревателя

Fig. 9. Temperature dependence on mass flow at different mutual position of the temperature sensor and heater

Из рис. 9 следует, что при минимальном расходе значения температуры при установке датчика до или после нагревателя примерно одинаковы и на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ниже, если датчик расположен под нагревателем. При среднем расходе наблюдается уменьшение температуры датчика, установленного за нагревателем, и увеличение температуры датчика, установленного перед нагревателем. Температура датчика, установленного под нагревателем, имеет промежуточное значение. При максимальном расходе наблюдается увеличение температуры при любом расположении датчиков, причем наибольшее значение температуры наблюдается у датчика, расположенного перед нагревателем.

Такое поведение температуры может быть вызвано двумя основными причинами: величиной массового расхода и разными значениями коэффициента теплоотдачи α_{φ} нагревателя в лобовой ($\varphi = 0^{\circ}$) и кормовой ($\varphi = 180^{\circ}$) части при его обтекании поперечным потоком воздуха. Действительно, коэффициент теплоотдачи имеет максимальное значение при наименьшей толщине пограничного слоя, наблюдаемой в лобовой части нагревателя (это соответствует случаю, когда датчик температуры расположен перед нагревателем). В кормовой части нагревателя относительный коэффициент теплоотдачи в 1,6 раза меньше [Луканин и др., 2002; Вакулин, 2019] (это соответствует случаю, когда датчик температуры расположен за нагревателем). С увеличением расхода разница в показаниях датчика температуры, установленного до и после нагревателя, увеличивается.

С целью расширения динамического диапазона расходомера за счет контролируемого изменения мощности нагревателя и дальнейшего снижения себестоимости теплового расходомера нам представляется возможным замена промышленного измерителя-регистратора ИС-203.4, предназначенного для решения очень широкого круга задач, специально изготовленным упрощенным вторичным преобразователем на базе микроконтроллерной системы, предназначенным для измерения, отображения, регистрации и управления измерительным преобразователем, состоящим из нагревателя и датчика температуры. В настоящее время микроконтроллеры широко применяются в самых различных областях, в том числе в контрольно-измерительных системах [Сташин и др., 1990; Тавернье, 2010; Сажнев, 2019; Григорьян и др., 2023].

На рис. 10 показана блок-схема возможного варианта такого вторичного преобразователя. Электрический аналоговый сигнал термодатчика (1), питающегося от стабилизированного источника (2), усиливается инструментальным дифференциальным усилителем (3) и поступает на вход аналого-цифрового преобразователя (4). В соответствии с программным алгоритмом (5) производится усреднение сигнала по заданному количеству отсчетов и расчет массового расхода газа с выводом информации на жидкокристаллический дисплей (8). Также при необходимости через последовательный интерфейс (9) данные могут отправляться на ЭВМ (10). Кроме того, посредством формирования управляющего сигнала с широтно-импульсной модуляцией (6) возможно осуществление автоматической подстройки мощности нагревателя (7) для предотвращения выхода величины регистрируемого сигнала за пределы заданного динамического диапазона.

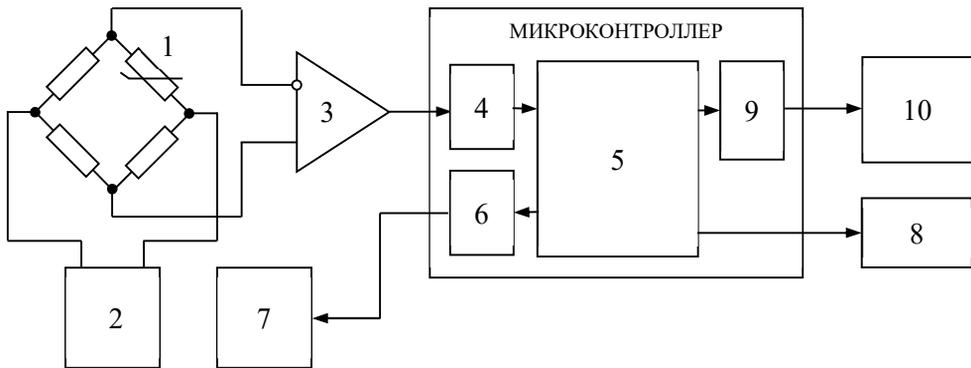


Рис. 10. Блок-схема упрощенного варианта вторичного преобразователя теплового расходомера: 1 — термодатчик, включенный в мостовую схему; 2 — стабилизированный блок питания; 3 — инструментальный усилитель; 4 — аналого-цифровой преобразователь; 5 — алгоритм преобразования, обработки, вычислений и управления; 6 — формирователь управляющего сигнала с широтно-импульсной модуляцией; 7 — управляемый блок нагревателя; 8 — жидкокристаллический дисплей; 9 — порт последовательного интерфейса (RS-232); 10 — ЭВМ

Fig. 10. The block diagram of a simplified version of the secondary converter of the heat flow meter: 1 — the temperature sensor included in the bridge circuit; 2 — the stabilized power supply; 3 — the instrumentation amplifier; 4 — the analog-to-digital converter; 5 — the conversion, processing, calculations, and control algorithm; 6 — the shaper of a control signal with pulse-width modulation; 7 — the controlled heater unit; 8 — a liquid crystal display; 9 — the serial interface port (RS-232); 10 — a computer

Заключение

1. Создана лабораторная установка для изучения измерительного преобразователя теплового расходомера.
2. Экспериментально показано, что возможно создание теплового расходомера, измерительный преобразователь которого состоит из единственного датчика температуры и нагревателя.
3. В результате проведенных исследований выявлено, что при использовании единственного датчика температуры его нужно устанавливать первым по ходу потока в непосредственном контакте с нагревателем.
4. При использовании единственного датчика температуры погрешность измерения температуры (и разности температур) меньше, чем погрешность измерения разности температур двумя отдельными датчиками, за счет отсутствия систематической погрешности.
5. Вместо использования промышленного измерителя-регистратора ИС-203.4 в тепловом расходомере может быть применен его упрощенный вариант на базе микроконтроллерной системы. Применение недорогого микроконтроллера

позволяет обеспечить существенное снижение себестоимости расходомера, а также дает возможность расширить динамический диапазон измерения расхода за счет управления мощностью нагревателя, входящего в состав измерительного преобразователя.

Нами выделяются следующие преимущества использования в тепловом расходомере описанного выше измерительного преобразователя, состоящего из единственного датчика температуры и нагревателя.

- Более широкий диапазон измерений за счет изменения мощности нагревателя.
- Возможность радиальной врезки в трубопровод измерительного преобразователя в виде зонда.
- Проведение поверки и калибровки без демонтажа измерительного преобразователя с использованием природного газа или воздуха.
- Отсутствие строгих требований к прямым участкам до и после расходомера.
- Вполне приемлемое реагирование температуры на изменения расхода газа (постоянная времени расходомера с одним датчиком температуры не выше, чем с двумя датчиками).
- Низкая себестоимость и простота конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Брилл Дж. П., Мукерджи Х. 2006. Многофазный поток в скважинах / пер. с англ. Ю. В. Русских; под ред. М. Н. Кравченко. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований. 384 с.
- Вакулин А. А. 2019. Теплофизика и теоретическая теплотехника. Тюмень. Изд-во Тюменского гос. ун-та. 196 с.
- Вакулин А. А., Аксенов Б. Г., Татосов А. В., Вакулин А. А. 2012. Измерение расхода многофазного потока дисперсной структуры // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математические науки. Информатика. № 4. С. 42–46. <https://vestnik.utmn.ru/energy/vypuski-arhiv/2012/112636/> (дата обращения: 05.12.2024).
- Вакулин А. А., Голубев Е. В., Вакулин Ал. А. 2015. К вопросу импортозамещения в нефтегазовом приборостроении // Нефтегазовое дело. Том 13. № 4. С. 208–213. <https://ngdelo.ru/article/view/4027> (дата обращения: 05.12.2024).
- Вакулин А. А., Черкашов Е. М., Михеев В. А. 2017. Проблемы создания и продвижения подрывных инноваций в нефтегазовой отрасли // Нефтегазовое дело. Том 15. № 1. С. 198–203. <https://ngdelo.ru/article/view/4896> (дата обращения: 05.12.2024).
- Вакулин А. А., Шабаров А. Б., Вакулин А. А. 2018. Течение влажного воздуха через дроссельный канал (штуцер). Результаты // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 4. № 4. С. 48–63. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2018-4-4-48-63>
- Григорьян Л. Р., Богатов Н. М., Григорьян Р. Л. 2023. Применение микроконтроллеров в программно-конфигурируемом измерительном тракте коммутационно-тактовой фазоизмерительной аппаратуре // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. № 1. С. 45–55. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2023-1-6>

- Земенков Ю. Д., Вакулин А. А., Шабаров А. Б. 2023. Измерение расхода углеводородов. Тюмень. Изд-во Тюменского индустр. ун-та. 180 с. <https://www.elibrary.ru/lpqfhh>
- Кремлевский П. П. 1989. Расходомеры и счетчики количества. 4-е изд. Л.: Машиностроение. 701 с.
- Кремлевский П. П. 2002. Расходомеры и счетчики количеств. Кн. 1: Расходомеры переменного перепада давления, расходомеры переменного уровня, тахометрические расходомеры и счетчики. 5-е изд. СПб.: Политехника. 409 с.
- Кремлевский П. П. 2004. Расходомеры и счетчики количества веществ. Кн. 2: Расходомеры: обтекания, силовые, тепловые, оптические, ионизационные, ядерно-магнитные, концентрационные, меточные, корреляционные, вихревые, электромагнитные, ультразвуковые (акустические). 5-е изд. СПб.: Политехника. 412 с.
- Кристенсен К. М., Рейнор М. Е. 2004. Решение проблемы инноваций в бизнесе: как создать растущий бизнес и успешно поддерживать его рост / пер. с англ. Е. Калининой. М.: Альпина Бизнес Букс. 289 с.
- Луканин В. Н., Шатров М. Г., Камфер Г. М. и др. 2002. Теплотехника / под ред. В. Н. Луканина. 3-е изд. М.: Высшая школа. 671 с.
- Михеев В. А., Вакулин А. А., Черкашов Е. М. 2017. Бессепарационный многофазный расходомер как «подрывная» инновация в нефтегазовой отрасли и проблемы ее продвижения // Наука и бизнес: пути развития. № 3 (69). С. 5–13. <https://www.elibrary.ru/ymzpsf>
- Руденко В. А. 2014. Разработка и исследование системы метрологического обеспечения измерений и учета попутного нефтяного газа (на примере ОАО «Саратовнефтегаз»): дис. ... канд. техн. наук. М.: Всероссийский научно-исследовательский институт метрологической службы. 160 с. <https://www.vniims.ru/download/doc/sovet/Disser-Rydenko.pdf>
- Сажнев А. М. 2019. Цифровые устройства и микропроцессоры: учеб. пос. для академического бакалавриата. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт. 139 с.
- Сташин В. В., Урусов А. В., Мологонцева О. Ф. 1990. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллерах. М.: Энергоатомиздат. 224 с.
- Тавернье К. 2010. PIC-микроконтроллеры. Практика применения: пер. с фр. М.: ДМК Пресс. 272 с.
- Тартаковский Д. Ф., Ястребов А. С. 2002. Метрология, стандартизация и технические средства измерений. М.: Высшая школа. 205 с.
- Шорников Е. А. 2003. Расходомеры и счетчики газа, узлы учета. СПб.: Политехника. 127 с.

References

- Brill, J. P., & Mukherjee, H. (2006). *Multiphase Flow in Wells* (Yu. V. Russkikh, Trans.; M. N. Kravchenko, Ed.). Institut kompyuternykh issledovaniy. [In Russian] (Original work published 1999, Henry L. Doherty Memorial Fund of Aime, Society of Petroleum Engineers)
- Vakulin, A. A. (2019). *Thermophysics and Theoretical Thermotechnics*. UTMN-Press. [In Russian]
- Vakulin, A. A., Aksenov, B. G., Tatosov, A. V., & Vakulin, A. A. (2012). Measuring flowrate of dispersion structure multiphase flow. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Sciences. Informatics*, (4), 42–46. Retrieved Dec. 5, 2024, from <https://vestnik.utm.ru/energy/vypuski-arhiv/2012/112636/> [In Russian]

- Vakulin, A. A., Golubev, E. V., & Vakulin, A. A. (2015). The issue import substitution for oil and gas instrumentation. *Petroleum Engineering*, 13(4), 208–213. Retrieved Dec. 5, 2024, from <https://ngdelo.ru/article/view/4027> [In Russian]
- Vakulin, A. A., Cherkashov, E. M., & Mikheev, V. A. (2017). Problems creating and promoting subversive innovation in the oil and gas industry. *Petroleum Engineering*, 15(1), 198–203. Retrieved Dec. 5, 2024, from <https://ngdelo.ru/article/view/4896> [In Russian]
- Vakulin, A. A., Shabarov, A. B., & Vakulin, A. A. (2018). Current of humid air via the cylindrical channel. Results. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 4(4), 48–63. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2018-4-4-48-63> [In Russian]
- Grigoryan, L. R., Bogatov, N. M., & Grigoryan, R. L. (2023). Application of microcontrollers in a softwareconfigurable measuring switching-clock path phase measuring equipment. *Measuring. Monitoring. Management. Control*, (1), 45–55. <https://doi.org/10.21685/2307-5538-2023-1-6> [In Russian]
- Zemenkov, Yu. D., Vakulin, A. A., & Shabarov, A. B. (2023). *Measurement of Hydrocarbon Flow*. Tyumen Industrial University Publishing House. <https://www.elibrary.ru/lpqfhx> [In Russian]
- Kremlevskiy, P. P. (1989). *Flow Meters and Quantity Counters* (4th ed.). Mashinostroenie. [In Russian]
- Kremlevskiy, P. P. (2002). *Flow Meters and Quantity Counters. Vol. 1* (5th ed.). Polytechnica. [In Russian]
- Kremlevskiy, P. P. (2004). *Flow Meters and Quantity Counters. Vol. 2* (5th ed.). Polytechnica. [In Russian]
- Christensen, C. M., & Raynor, M. E. (2004). *The Innovator's Solution: Creating and Sustaining Successful Growth* (E. Kalinina, Trans.). Alpina Business Books. [In Russian] (Original work published 2003, Harvard Business School Press)
- Lukanin, V. N., Shatrov, M. G., Kamfer, G. M., et al. (2002). *Thermotechnics* (3rd ed.). Vysshaya shkola. [In Russian]
- Mikheev, V. A., Vakulin, A. A., & Cherkashov, E. M. (2017). Multiphase flow meter without separation of phases as a disruptive innovation in oil and gas industry and challenges of its promotion. *Science and Business: Development Ways*, (3), 5–13. <https://www.elibrary.ru/ymzpsf> [In Russian]
- Rudenko, V. A. (2014). *Development and Research System Metrological Support Measurements and Accounting Associated Petroleum Gas (On Example JSC Saratovneftegaz)* [Cand. Sci. (Tech.) dissertation, All-Russian Research Institute of Metrological Service]. Retrieved Dec. 5, 2024, from <https://www.vniims.ru/download/doc/sovet/Disser-Rydenko.pdf> [In Russian]
- Sazhnev, A. M. (2019). *Digital Devices and Microprocessors* (2nd ed.). Yurait. [In Russian]
- Stashin, V. V., Urusov, A. V., & Mologontseva, O. F. (1990). *Design of Digital Devices on Single-Crystal Microcontrollers*. Energoatomizdat. [In Russian]
- Tavernier, C. (2010). *Les microcontrôleurs PIC: Applications*. DMK Press. [In Russian]
- Tartakovskiy, D. F., & Yastrebov, A. S. (2002). *Metrology, Standardization and Technical Measurement Tools*. Vysshaya shkola. [In Russian]
- Shornikov, E. A. (2003). *Gas Flow Meters and Counters, Accounting Units*. Polytechnica. [In Russian]

Информация об авторах

Александр Анатольевич Вакулин, доктор технических наук, профессор, почетный работник науки и высоких технологий РФ, профессор кафедры прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
a.a.vakulin@utmn.ru

Сергей Георгиевич Монтанари, кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
s.g.montanari@utmn.ru

Information about the authors

Aleksandr A. Vakulin, Dr. Sci. (Tech.), Honorary Worker of Science and High Technologies of the Russian Federation, Professor, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia
a.a.vakulin@utmn.ru

Sergey G. Montanari, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia
s.g.montanari@utmn.ru

Численное исследование устойчивости естественной конвекции

Павел Иванович Томчик[✉], Анатолий Александрович Кислицын

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Контакт для переписки: p.i.tomchik@utmn.ru[✉]

Аннотация. Аналитическая теория устойчивости естественной конвекции, основы которой были созданы в середине XX в., на практике применима лишь для анализа достаточно простых модельных объектов: жидкости между твердыми плоскостями, в полостях шаровой и кубической формы, в каналах круглого, прямоугольного и кольцевого сечений и ряда других. Анализ современных технических систем требует привлечения численных методов — наиболее мощных в рамках математического анализа в настоящее время. Тем не менее аналитические методы необходимы для тестирования расчетных кодов и верификации результатов, полученных с помощью численных методов. В статье выполнен цикл численных экспериментов с целью исследования устойчивости стационарных одно- и двухвихревых режимов конвекции, установлены области бифуркации, в которых происходят переходы между этими режимами, и связь этих переходов с изменениями энергетических параметров конвективных течений. Численное моделирование выполнялось в квадратных ячейках на сетке 21×21 методом контрольных объемов с помощью алгоритма SIMPLER. В качестве жидкости была взята вода в диапазоне температур от 20 до 50 °C и чисел Грасгофа от 100 до 22 400. При моделировании учитывалась зависимость числа Прандтля от температуры. В результате исследований установлены 4 области бифуркации, в которых установившийся вид конвективных потоков теряет устойчивость и переходит в другой вид: $313,6 < Gr < 396,8$; $3\ 135,8 < Gr < 3\ 527,3$; $10\ 913,3 < Gr < 13\ 307,2$; $Gr > 22\ 406,0$. Установлены 4 критических числа Рэлея, соответствующие этим областям, которые с учетом зависимости числа Pr от температуры равны: $Ra_{кр1} = 1\ 790,7$; $Ra_{кр2} = 14\ 738,3$; $Ra_{кр3} = 45\ 835,9$; $Ra_{кр4} = 79\ 317,2$. Показано, что все эти области бифуркации связаны с переходами потенциальной энергии жидкости в кинетическую и обратно. Установлено, что границе применимости приближения Буссинеска соответствует значение $Gr \approx 13\ 307,2$, или $Ra \approx 55\ 890,2$. Сравнение значений критических чисел Рэлея, полученных

в численных экспериментах, с числами аналитической теории показывает совпадение первых двух критических чисел $Ra_{кр1}$ и $Ra_{кр2}$. Значения $Ra_{кр3}$ совпадают по порядку величины, а $Ra_{кр4}$ различаются почти в 2 раза, что объясняется тем, что значение $Ra_{кр4}$ выходит за пределы области применимости приближения Буссинеска и, строго говоря, не имеет физического смысла.

Ключевые слова: естественная конвекция, приближение Буссинеска, аналитическая теория устойчивости, численные методы, алгоритм SIMPLER

Цитирование: Томчик П. И., Кислицын А. А. 2024. Численное исследование устойчивости естественной конвекции // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 4 (40). С. 50–67. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-50-67>

Поступила 11.12.2024; одобрена 12.12.2024; принята 16.12.2024

Numerical study of natural convection stability

Pavel I. Tomchik , Anatoliy A. Kislitsin

University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: p.i.tomchik@utmn.ru 

Abstract. The analytical theory of natural convection stability, founded in the middle of the 20th c., is practically applicable only to the analysis of simple model objects: liquid between solid planes, in cavities of spherical and cubic shape, in channels of round, rectangular and annular sections, among others. The analysis of modern technical systems requires the use of numerical methods, which are currently the most powerful methods of mathematical analysis. Yet, analytical methods are necessary for testing calculation codes and verifying the results obtained using numerical methods. This article presents a series of numerical experiments aimed at investigating the stability of stationary one- and two-vortex convection regimes, establishing bifurcation regions in which transitions between these regimes occur, and the relationship of these transitions with changes in the energy parameters of convective flows. Numerical simulation was performed in square cells on a 21×21 grid using the control volume method and the SIMPLER algorithm. In place of a liquid, water was taken in the temperature range of 20–50 °C, and Grashof numbers from 100 to 22,400. The dependence of the Prandtl number on temperature was considered in the simulation. The results have established 4 bifurcation regions in which the established type of convective flows loses stability and changes to another form: $313.6 < Gr < 396.8$; $3135.8 < Gr < 3527.3$; $10913.3 < Gr < 13307.2$; $Gr > 22406.0$. Four critical Rayleigh numbers corresponding to these regions have been

found, which, considering the dependence of the number Pr of the temperature is equal to: $Ra_{cr1} = 1,790.7$; $Ra_{cr2} = 14,738.3$; $Ra_{cr3} = 45,835.9$; $Ra_{cr4} = 79,317.2$. All these bifurcation regions are associated with transitions of the potential energy of the liquid into kinetic energy and vice versa. The limit of the Boussinesq approximation applicability corresponds to the values $Gr \approx 13,307.2$, or $Ra \approx 55,890.2$. The comparison of the values of the critical Rayleigh numbers obtained in numerical experiments with the numbers of the analytical theory shows a very good coincidence of the first two critical numbers Ra_{cr1} and Ra_{cr2} . The Ra_{cr3} values coincide in order of magnitude, and Ra_{cr4} differ almost twofold, which is explained by the Ra_{cr4} value going beyond the scope of the Boussinesq approximation, and, strictly speaking, has no physical meaning.

Keywords: natural convection, Boussinesq approximation, analytical stability theory, numerical methods, SIMPLER algorithm

Citation: Tomchik, P. I., & Kislitsin, A. A. (2024). Numerical study of natural convection stability. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(4), 50–67. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-50-67>

Received Dec. 11, 2024; Reviewed Dec. 12, 2024; Accepted Dec. 16, 2024

Введение

Естественная конвекция играет важную роль как в природе, так и в работе многих технических устройств, поэтому ее изучение, прежде всего с точки зрения возникновения и устойчивости, остается актуальной задачей для многих областей современной науки и техники.

Основы аналитической теории устойчивости естественной конвекции были заложены в середине XX в. [Остроумов, 1952; Сорокин, 1953; Гершуни, Жуховицкий, 1972; Джозеф, 1981; Ландау, Лифшиц, 1988; Гершуни и др., 1989]. Но аналитическое исследование конвекции даже в простейшей системе из слоя жидкости между двумя твердыми плоскостями является, как будет показано ниже, сложной задачей. Анализ более сложных систем требует преодоления еще больших трудностей. Г. А. Остроумов [1952] привел результаты исследования естественной конвекции в вертикальной цилиндрической трубе круглого сечения, а также в наклонной щели. Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицкий [1972] рассмотрели еще несколько достаточно простых модельных задач: устойчивость вязкой несжимаемой жидкости в полостях шаровой и кубической формы, в каналах эллиптического, прямоугольного и кольцевого сечений.

Дальнейшее усложнение объектов исследования требует привлечения численных методов. В монографиях Джозефа [1981] и Г. З. Гершуни с соавторами [1989] для анализа влияния на устойчивость осложняющих факторов (таких как магнитные и электрические поля, неоднородность состава, температурная зависимость вязкости, неньютоновские жидкости и др.) уже применялись методы Галеркина, пошагового интегрирования и Рунге — Кутты. В дальнейшем широкое применение получили сеточные численные методы

[Пасконов и др., 1984; Андерсон и др., 1990] и метод контрольного объема [Патанкар, 1984]. На основе этих методов разработаны расчетные коды SABENA, SIMPLER и др., на которых выполняются современные численные эксперименты.

В ядерной энергетике результаты экспериментальных исследований реакторов на быстрых нейтронах [Сорокин и др., 2020] показывают опасность возникновения в аварийных режимах кипения теплоносителя (жидкого металла) в активной зоне реактора. В этом случае устойчивость естественной циркуляции теплоносителя является решающим условием, позволяющим сохранить необходимую интенсивность и продолжительность охлаждения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) и тем самым минимизировать последствия аварии. А. П. Сорокин и др. [2021, 2022] представили результаты экспериментальных и теоретических исследований теплообмена и устойчивости естественной конвекции теплоносителя:

«Полученные результаты показывают, что процесс кипения жидких металлов в ТВС¹ формируется под воздействием различных факторов, имеет сложную структуру, характеризуется как устойчивыми, так и пульсационными режимами с значительными колебаниями технологических параметров (расхода, давления, температуры), которые могут продолжаться в течение десятков секунд и обуславливать кризис теплообмена» [Сорокин и др., 2020, с. 151].

При этом «режим устойчивого пузырькового кипения... отмечается лишь в ограниченной области тепловых потоков» [Сорокин и др., 2020, с. 164], а возникновение неустойчивого пульсационного режима приводит к увеличению амплитуды колебаний расхода теплоносителя, к росту температуры теплоносителя и перегреву оболочек ТВЭЛов. Численные эксперименты, выполненные с помощью кода SABENA-3D, позволяют промоделировать эти процессы и выработать рекомендации сохранения устойчивости теплообмена. А. П. Сорокин и др. [2024] представили итоги анализа и обобщения результатов исследований. Главным итогом является «экспериментальное и расчетное подтверждение возможности устойчивого охлаждения активной зоны в процессе протекания аварии с кипением натрия в тепловыделяющих сборках твэлов (ТВС) активной зоны, изучение границы устойчивого охлаждения активной зоны, получение данных для валидации модели процесса кипения натрия и верификации расчетных кодов» [Сорокин и др., 2024, с. 155]. Приведены результаты сравнения расчетов и экспериментальных исследований: «впервые... показано, что обеспечивается длительное охлаждение ТВС... при плотности теплового потока на поверхности имитаторов твэлов до 140 кВт/м² в режиме естественной конвекции» [Сорокин и др., 2024, с. 170].

В современной технике часто используются жидкости с особыми свойствами, для которых методика исследований естественной конвекции, основанная на приближении Буссинеска, неприменима. Например, М. М. Рамазанов [2012, 2014] исследовал условия возникновения и устойчивости естественной конвекции в сжимаемых жидкостях и газах. В частности, «рассмотрена задача о стационарной конвекции околоскритического газа Ван-дер-Ваальса в пористом, тонком кольце в теплопроводной плоскости с заданным на бесконечности градиентом температуры» [Рамазанов, 2012, с. 76], находящегося вблизи критической точки, для которого одно из основных допущений приближения

¹ ТВС — тепловыделяющие сборки ТВЭЛов (П. Т., А. К.).

Буссинеска — слабая сжимаемость — в этой области параметров не выполняется. Показано, что в этом случае в систему уравнений перепад температуры входит не только через число Рэлея: «Изучены различные предельные случаи, найдены соответствующие асимптотики критического числа Рэлея–Дарси в зависимости от близости к термодинамической критической точке» [Рамазанов, 2012, с. 76]; «в параметрической плоскости число Рэлея — заданный перепад температуры имеет область, где конвекция не возникает ни при каких числах Рэлея» [Рамазанов, 2014, с. 27]. Выведены «необходимое и достаточное условия абсолютной конвективной устойчивости» [Рамазанов, 2014, с. 32] и критерий, определяющий границу этой области.

Другой важной областью применения численных моделей конвективных потоков являются исследования фильтрации грунтовых вод:

«В последние годы все более актуальной становится проблема качества грунтовых вод. Недостаток питьевой воды, воды для орошения сельскохозяйственных культур ощущается, в первую очередь, в засушливых регионах. Качество грунтовых вод определяется происходящими в грунтах физико-химическими и биологическими процессами, которые могут быть техногенного происхождения или вызываться природными явлениями... Показатели качества грунтовых вод зависят от наличия растворенных примесей или примесей в виде мелкодисперсных частиц или включений. Поэтому движения примесей вместе с потоком... играют ключевую роль в рассматриваемых явлениях» [Соболева, Цыпкин, 2014, с. 81].

В статье Е. Г. Соболевой, Г. Г. Цыпкина [2014] выполнено численное моделирование конвективных потоков грунтовых вод. Изучено естественно-конвективное ламинарное течение и его взаимодействие с вынужденной конвекцией в пористых средах, состоящих из твердого скелета, насыщенного водой. Исследована динамика изменения концентрации соли в воде в процессе ее фильтрации. Результаты моделирования показали наличие устойчивого и неустойчивого режимов движения. Определен порог устойчивости вынужденного течения и воздействие на него естественной конвекции.

Особую роль естественная конвекция играет в производстве элементной базы микроэлектронных устройств. Качество получаемых монокристаллов напрямую зависит от устойчивости процессов конвекции и теплообмена при их выращивании из расплавов. О. А. Бессонов [2017] привел результаты многолетних поисков решения проблемы повышения эффективности выращивания кристаллов методом Чохральского:

«Представлены результаты расчетов и анализ влияния... на устойчивость течений в широком диапазоне чисел Прандтля (от 0.01 до 10). Определены режимы с повышенным порогом устойчивости... Построена сводная диаграмма (карта) предельных режимов естественной и смешанной конвекций. Представлена методика контроля и анализа двумерной и пространственной мод неустойчивости» [Бессонов, 2017, с. 44].

Результаты численного исследования внесли значительный вклад в «... понимание практических вопросов повышения устойчивости течения и устранения колебаний расплава при выращивании кристаллов методом Чохральского» [Бессонов, 2017, с. 55].

Таким образом, численные методы являются в настоящее время наиболее мощными методами математического анализа; с их помощью можно детально проанализировать практически любой объект с учетом осложняющих факторов, фазовых переходов, зависимостей

физических параметров от температуры и давления и т. п.; применимость этих методов ограничена только производительностью суперкомпьютеров. Но аналитические методы по-прежнему необходимы для тестирования расчетных кодов и верификации результатов, полученных с помощью численных методов.

Ранее [Томчик и др., 2024] нами были опубликованы предварительные результаты численного моделирования естественной конвекции несжимаемой жидкости в квадратной области. В данной статье мы представляем результаты более детальных численных экспериментов и их сравнение с результатами аналитической теории устойчивости естественной конвекции. Целью исследований является установление критериев устойчивости стационарных режимов конвекции и переходов между этими режимами («точек бифуркации»).

Аналитическая теория устойчивости естественной конвекции

Для идеальной жидкости условие равновесия имеет вид [Ландау, Лифшиц, 1988]:

$$-\frac{dT}{dy} < \frac{g\beta T}{c_p}, \quad (1)$$

где T — температура, c_p — теплоемкость при постоянном давлении, β — коэффициент теплового расширения жидкости, g — ускорение свободного падения, y — координата, направленная вертикально вверх. Согласно этой формуле, при нормальных условиях конвекция в воде должна начаться при градиенте температур $\approx 1,5 \cdot 10^{-4}$ К/м, а в воздухе — $\approx 0,01$ К/м. Однако, как показывает опыт, свободная конвекция начинается при гораздо больших градиентах температуры. Это означает, что в данном случае вязкостью жидкости или газа пренебрегать нельзя и надо исследовать устойчивость естественной конвекции на основе уравнения Навье — Стокса.

Метод аналитического исследования устойчивости естественной конвекции заключается в том, что на исследуемое стационарное (т. е. не зависящее явно от времени) решение накладываются малые возмущения, зависимость которых от времени определяется множителем $e^{-i\omega t}$. «Сами частоты ω возмущений не произвольны, а определяются в результате решения уравнений (движения)» [Ландау, Лифшиц, 1988, с. 138]. В данном случае это уравнения стационарной конвекции в приближении Буссинеска:

$$(\mathbf{v}\nabla)\mathbf{v} = -\frac{\nabla p'}{\rho} + \nu\Delta\mathbf{v} - \beta\mathbf{g}T', \quad (2)$$

$$\operatorname{div}\mathbf{v} = 0, \quad (3)$$

$$\mathbf{v}\nabla T' = a\Delta T', \quad (4)$$

где \mathbf{v} — скорость жидкости; a , ν , ρ — температуропроводность, кинематическая вязкость, плотность жидкости соответственно; T' и p' — отклонение температуры и давления от значений стационарного решения; векторы выделены жирным шрифтом.

«Эти частоты... комплексны. Если имеются такие ω , мнимая часть которых положительна, то $e^{-i\omega t}$ будет неограниченно возрастать со временем. Другими словами, такие возмущения, раз возникнув, будут возрастать, т. е. движение будет неустойчивым... Для устойчивости движения необходимо, чтобы у всех возможных частот ω мнимая часть была отрицательна. Тогда возникающие возмущения будут экспоненциально затухать со временем» [Ландау, Лифшиц, 1988, с. 138].

Применительно к простейшей системе — горизонтальному слою жидкости толщиной h между двумя твердыми плоскостями — метод аналитического исследования на устойчивость естественной конвекции жидкости в процессе ее нагрева выглядит следующим образом. В исходном состоянии жидкость неподвижна, а ее температура во всем объеме постоянна и равна T_c . В начальный момент времени температура нижней плоскости («дна») быстро («скачком») устанавливается равной $T_h > T_c$ и затем поддерживается на этом уровне, а температура верхней плоскости («крышки») остается и поддерживается равной T_c . Начинается прогрев слоя жидкости снизу, в некоторый момент времени равновесие нарушается, и начинается конвекция. Еще через некоторое время поток тепла от нижней стенки к верхней достигает стационарного значения, а линии тока конвективного течения приобретают стационарную форму в виде одного или нескольких вихрей. При дальнейшем повышении температуры скорость конвективных потоков и поток тепла увеличивается, структура вихрей теряет устойчивость, в некоторый момент происходит ее перестройка, и моделирование можно продолжать до тех пор, пока приближение Буссинеска не станет неприменимым.

Наложение возмущения на температуру и давление означает представление T' и p' в виде:

$$T' = T'_0 + \tau_0 \cdot e^{-i\omega t}, \quad p' = p'_0 + \rho w_0 \cdot e^{-i\omega t}, \quad (5)$$

где $\tau_0 \cdot e^{-i\omega t}$ и $w_0 \cdot e^{-i\omega t}$ — возмущения температуры и давления, а T'_0 и p'_0 соответствуют неподвижной жидкости и, следовательно, удовлетворяют уравнениям (2) и (4) при $\mathbf{v} = 0$, т. е.

$$\frac{dp'_0}{dy} + \rho \beta g T'_0 = 0, \quad (6)$$

$$\Delta T'_0 = \frac{d^2 T'_0}{dy^2} = 0. \quad (7)$$

Уравнение (7) легко интегрируется. С учетом того, что T'_0 — это отклонение температуры от равновесного значения, получаем:

$$T'_0 = -Ay, \quad (8)$$

где координата y отсчитывается вертикально вверх, $A = (T_h - T_c)/h$ — константа интегрирования, причем $A > 0$.

Кроме этого, надо учесть, что на первом этапе возникновения конвекции скорость \mathbf{v} также является малой величиной, поскольку невозмущенная скорость отсутствует. Соответственно, скорость \mathbf{v} в данном случае также надо рассматривать как возмущение, зависящее от времени:

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_0 \cdot e^{-i\omega t}. \quad (9)$$

Подстановка (5), (8) и (9) в уравнения (2) и (4) с сохранением только членов 1-го порядка малости дает:

$$-i\omega \mathbf{v} = -\nabla w + \nu \Delta \mathbf{v} - \beta \tau \mathbf{g}, \quad (10)$$

$$-i\omega \tau - \nu_y A = a \Delta \tau. \quad (11)$$

Чтобы привести эти уравнения к безразмерному виду, надо выбрать характерные значения величин, которые фигурируют в этих уравнениях (их можно назвать также единицами измерения этих величин). Для длины такая единица измерения очевидна — это толщина слоя h . Для динамических переменных надо подобрать такие комбинации физических параметров жидкости, которые имеют соответствующую размерность: для частоты — ν/h^2 , для скорости — ν/h , для давления — $\rho \nu^2/h^2$, для температуры — $A h \nu/a$. Далее, принимая условие, что теперь все буквы обозначают соответствующие безразмерные динамические переменные, получаем систему уравнений для определения частот ω :

$$-i\omega \mathbf{v} = -\nabla w + \Delta \mathbf{v} - \text{Ra} \tau \mathbf{n}, \quad (12)$$

$$-i\omega \tau \text{Pr} = \Delta \tau + \nu_y, \quad (13)$$

$$\text{div} \mathbf{v} = 0, \quad (14)$$

$$\text{Gr} = \frac{g\beta(T_h - T_c)h^3}{\nu^2}, \quad \text{Ra} = \text{Gr} \cdot \text{Pr} = \frac{g\beta(T_h - T_c)h^3}{\nu \cdot a},$$

где \mathbf{n} — единичный вектор, направленный по оси y вертикально вверх, $\text{Pr} = \nu/a$ — число Прандтля, Gr и Ra — числа Грасгофа и Рэлея соответственно.

Простейшие граничные условия, отвечающие идеальным теплопроводящим стенкам, имеют вид:

$$\mathbf{v} = 0, \tau = 0. \quad (15)$$

Умножим уравнения (12) и (13) на $\mathbf{v}^* = \mathbf{v}_0 \cdot e^{+i\omega t}$ и на $\tau^* = \tau_0 \cdot e^{+i\omega t}$ соответственно и проинтегрируем их по всему объему, занимаемому жидкостью:

$$-i\omega \int |\mathbf{v}|^2 dV = -\int (\mathbf{v}^* \nabla w + \mathbf{v}^* \Delta \mathbf{v} - \text{Ra} \tau \nu_y^*) dV,$$

$$-i\omega \text{Pr} \int |\tau|^2 dV = \int (\tau^* \Delta \tau + \tau^* \nu_y) dV.$$

С помощью формул векторного анализа и нулевых граничных условий (15) эти уравнения можно упростить и преобразовать к виду:

$$-i\omega \int |\mathbf{v}|^2 dV = \int \left(-|\text{rot} \mathbf{v}|^2 + \text{Ra} \tau \nu_y^* \right) dV, \quad (16)$$

$$-i\omega \text{Pr} \int |\tau|^2 dV = \int \left(-|\text{grad} \tau|^2 + \tau^* \nu_y \right) dV. \quad (17)$$

Вычтем из уравнений (16) и (17) уравнения, которые являются им комплексно-сопряженными:

$$-i(\omega + \omega^*) \int |\mathbf{v}|^2 dV = \text{Ra} \int (\tau v_y^* - \tau^* v_y) dV, \quad (18)$$

$$-i(\omega + \omega^*) \text{Pr} \int |\tau|^2 dV = - \int (\tau v_y^* - \tau^* v_y) dV. \quad (19)$$

Теперь умножим обе части уравнения (19) на число Рэлея (Ra) и сложим с уравнением (18). Правые части при этом взаимно уничтожатся:

$$-i(\omega + \omega^*) \int (|\mathbf{v}|^2 + \text{Ra Pr} |\tau|^2) dV = 0, \quad (20)$$

а сумма $(\omega + \omega^*)$ будет равна удвоенной действительной части частоты ω . Интеграл в уравнении (20) всегда положителен, поэтому действительная часть частоты ω равна нулю. Таким образом, частота ω возмущений, случайно возникающих в стационарном конвективном движении, является чисто мнимой: $\omega = i\gamma$.

Чтобы определить значение γ , умножим уравнение (19) на число Рэлея (Ra) и сложим с уравнением (18):

$$i\omega \int (|\mathbf{v}|^2 + \text{Ra Pr} |\tau|^2) dV = \int (|\text{rot } \mathbf{v}|^2 + \text{Ra} |\text{grad } \tau|^2 - 2\text{Ra} \tau v_y^*) dV. \quad (21)$$

Обозначим:

$$\int (|\mathbf{v}|^2 + \text{Ra Pr} |\tau|^2) dV = N, \quad (22)$$

$$\int (|\text{rot } \mathbf{v}|^2 + \text{Ra} |\text{grad } \tau|^2 - 2\text{Ra} \tau v_y^*) dV = J. \quad (23)$$

Учитывая, что $i\omega = i \cdot i\gamma = -\gamma$, получим из уравнения (21) для значения γ следующее выражение:

$$\gamma = -J/N. \quad (24)$$

Интеграл N всегда положителен, а знак интеграла J зависит от числа Рэлея: при $\text{Ra} \rightarrow 0$, очевидно, $J > 0$, значит $\gamma < 0$, и случайно возникающие возмущения затухают. При $\text{Ra} \rightarrow \infty$ происходит смена знака интеграла J , причем неоднократно. Тогда возможны несколько критических значений $\text{Ra}_{\text{кр}}$, при которых происходит смена знака декремента γ . Физический смысл имеют несколько первых из них, а именно те значения, для которых еще применимо приближение Буссинеска, и сохраняется ламинарный режим течения. Чтобы найти эти значения, надо положить в уравнениях (12)–(14) частоту ω равной 0:

$$\Delta \mathbf{v} - \nabla w + \text{Ra} \tau \mathbf{n} = 0,$$

$$\Delta \tau = -v_y, \quad \text{div } \mathbf{v} = 0.$$

Эта система уравнений решается стандартными методами, и с учетом граничных условий (15) она приводит к системе алгебраических уравнений, условие совместимости которых дает трансцендентное уравнение, корни которого и определяют искомые значения $\text{Ra}_{\text{кр}}$. Детали этих громоздких вычислений достаточно подробно изложены Г. З. Гершуни, Е. М. Жуховицким [1972], а первые 4 значения $\text{Ra}_{\text{кр}}$ приведены в табл. 1.

Постановка задачи и алгоритм численных экспериментов

Рассматривается конвективное движение несжимаемой жидкости в квадратной области x, y , находящейся в поле действия силы тяжести \mathbf{g} , которая направлена вертикально вниз по оси y . Верхняя и нижняя стенки области горизонтальны, боковые стенки вертикальны и теплоизолированы. Размер стороны квадрата h принят за единицу длины, в направлении третьей координаты область не ограничена. Система уравнений, описывающих естественную нестационарную конвекцию в приближении Буссинеска, имеет вид [Ландау, Лифшиц, 1988]:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \nabla) \mathbf{v} = -\frac{\nabla p'}{\rho} + \nu \Delta \mathbf{v} - \beta \mathbf{g} T',$$

$$\frac{\partial T'}{\partial t} + \mathbf{v} \nabla T' = a \Delta T', \quad \operatorname{div} \mathbf{v} = 0$$

с теми же обозначениями, что и в уравнениях (2)–(4).

Алгоритм численных экспериментов соответствует описанному выше методу аналитического исследования на устойчивость. В исходном состоянии жидкость (вода) неподвижна, ее температура во всем объеме равна T_c . В начальный момент времени температура нижней стенки устанавливается равной $T_h > T_c$, температура верхней стенки остается равной T_c , наблюдается процесс прогрева жидкости до установления равновесия. Если разность температур $(T_h - T_c)$ соответствует числу Рэлея $Ra < Ra_{кр1}$, то условие механического равновесия не нарушается, и через некоторое время устанавливается стационарное температурное поле в неподвижной жидкости. Если же разность температур $(T_h - T_c)$ соответствует числу $Ra > Ra_{кр1}$, то равновесие в жидкости нарушается, и начинается конвекция. Через некоторое время линии тока конвективного течения приобретают стационарную форму в виде одного или нескольких вихрей, а поток тепла от нижней стенки к верхней достигает стационарного значения. При еще большей разности температур число Рэлея превысит не только 1-е, но и 2-е, 3-е и т. д. критические значения, что позволит наблюдать форму конвективных потоков, и сравнить теоретические значения критических чисел Рэлея со значениями, полученными в численных экспериментах.

По описанному алгоритму нами были выполнены 30 численных экспериментов с шагом разности температур $(T_h - T_c)$ в 1°C до тех пор, пока характер конвективных потоков не начал приобретать признаки турбулентности. Начальная температура соответствовала нормальным условиям: $T_c = 20^\circ\text{C}$. Расчеты выполнялись на сетке 21×21 методом контрольных объемов с помощью алгоритма SIMPLER, адаптированного для компилятора GNU Fortran [Патанкар, 1984]. В каждом эксперименте фиксировалось время стабилизации (в единицах безразмерного времени $\tau = h^2/\nu$) безразмерного температурного поля $\theta = (T - T_c)/(T_h - T_c)$, потенциальная и кинетическая энергия жидкости во всей области, вид линий тока конвективного течения, а также числа Рэлея и Рейнольдса. Более подробно постановка задачи, математическая модель и алгоритм численных экспериментов описаны нами в предыдущей статье [Томчик и др., 2024].

Результаты моделирования

Цель экспериментов заключалась в определении значений числа Рэлея, при которых наблюдается возникновение конвекции ($Ra_{кр1}$), в наблюдении перестройки характера конвективных потоков ($Ra_{кр2}$, $Ra_{кр3}$ и т. д.), в определении изменений потенциальной и кинетической энергии. Результаты приведены на рис. 1–4 и в табл. 1.

Одно из преимуществ метода численного моделирования перед аналитической теорией заключается, как отмечено выше, в возможности учета зависимости числа Прандтля от температуры, меняющейся в процессе развития конвекции. Поэтому в численных экспериментах в качестве параметра бралось число Грасгофа, которое зависит от температуры значительно слабее, чем число Прандтля, а вычисления выполнялись при фиксированном значении числа Прандтля $Pr = 6,96$, соответствующем температуре 20°C [Варгафтик, 1972]. В дальнейшем число Рэлея бралось как произведение числа Gr на число Pr , соответствующее значению T_μ .

На рис. 1 представлена зависимость времени стабилизации температурного поля θ от числа Грасгофа, зависимости потенциальной (E_p) и кинетической (E_k) энергий, а также их изменения при изменении числа Грасгофа. Четко видно, что резкие изменения значений времени, E_p и E_k на всех графиках происходят при одних и тех же числах Gr . Эти числа (точки бифуркации) обозначены буквами a, b, c, d, e, f, g и соответствуют возникновению конвекции ($Ra_{кр1}$), а также переходам между одновихревым и двухвихревым течением ($Ra_{кр2}$, $Ra_{кр3}$ и $Ra_{кр4}$).

В области левее точки a жидкость неподвижна, конвекция отсутствует, кинетическая энергия равна нулю, число Рейнольдса $Re = 0$, идет накопление потенциальной энергии. В точке a ($Gr = 313,6$) достигается значение $Ra_{кр1} = 1\,790,7$, часть накопленной потенциальной энергии переходит в кинетическую, и возникает конвекция. В точке b ($Gr = 396,8$, $Ra = 2\,261,8$, $Re = 144,0$) происходит стабилизация конвекции, и устанавливается стационарное одновихревое течение (рис. 2).

В области от точки b до точки c идет увеличение кинетической энергии. В точке c ($Gr = 3\,135,8$, $Ra = Ra_{кр2} = 14\,738,3$, $Re = 418,4$) одновихревое течение переходит в двухвихревое, при этом часть кинетической энергии переходит в потенциальную. В точке d ($Gr = 3\,527,3$, $Ra = 16\,578,3$, $Re = 317,6$) происходит стабилизация конвекции и устанавливается стационарное двухвихревое течение (рис. 3).

В области от точки d до точки e идет увеличение кинетической энергии, скорости движения жидкости и среднего значения числа Рейнольдса. В точке e ($Gr = 10\,913,3$, $Ra = Ra_{кр3} = 45\,835,9$, $Re = 579,1$) часть кинетической энергии переходит в потенциальную, и заканчивается область стабильной двухвихревой конвекции. Линии тока, соответствующие этой точке, практически еще не отличаются от линий, представленных на рис. 3, но увеличенное время стабилизации указывает на начинающуюся область неустойчивости. В точке f ($Gr = 13\,307,2$, $Ra = 55\,890,2$, $Re = 615,6$) время стабилизации достигает максимума, а вид линий конвективного тока (рис. 4) уже заметно отличается от стационарных линий на рис. 3. В точке f , по-видимому, заканчивается область применимости приближения Буссинеска.

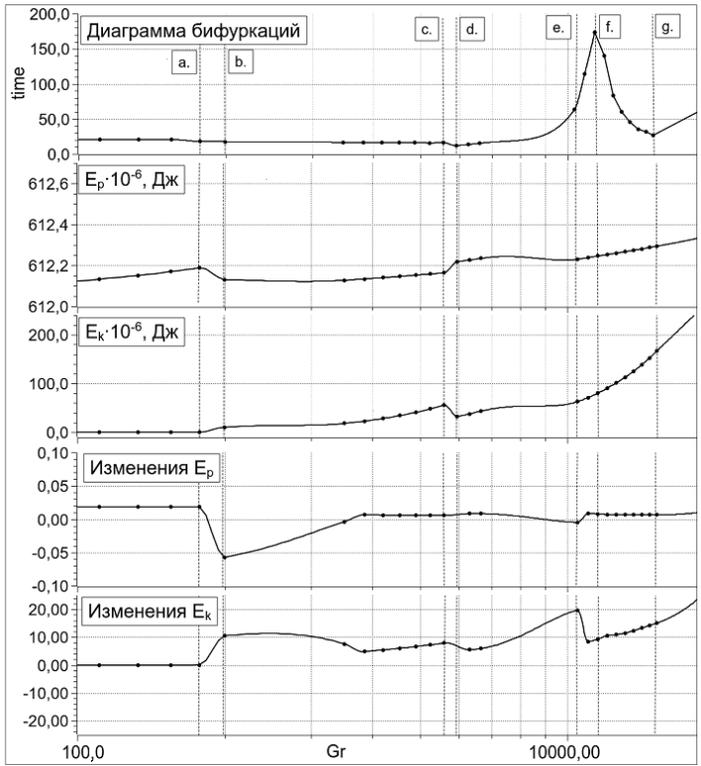


Рис. 1. Зависимость времени стабилизации (time) температурного поля θ , потенциальной (E_p) и кинетической (E_k) энергий конвективных потоков от числа Грасгофа

Fig. 1. Dependence of the stabilization time of the temperature field θ , potential (E_p) and kinetic (E_k) energies of convective flows on the Grashof no.

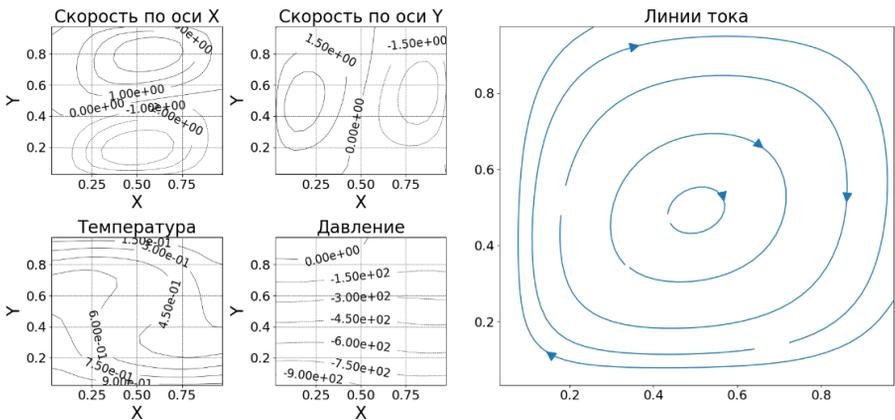


Рис. 2. Одновихревое течение (точка *b* на рис. 1, $Gr = 313,6$, $Ra = 1\,790,7$)

Fig. 2. Single-vortex flow (point *b* in Fig. 1, $Gr = 313.6$, $Ra = 1,790.7$)

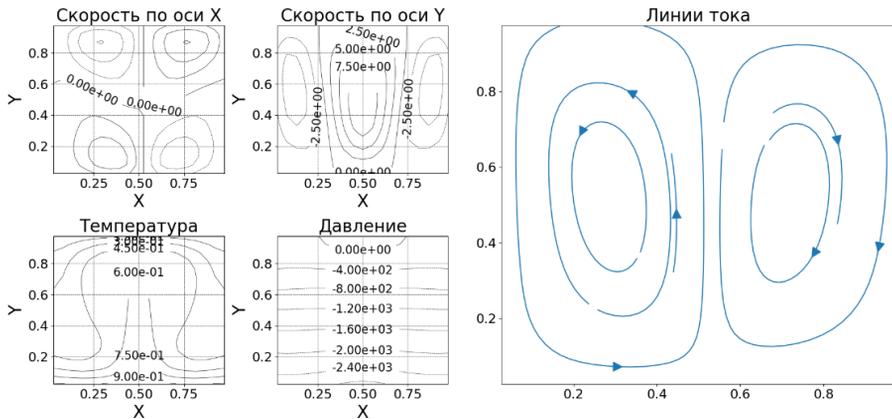


Рис. 3. Двухвихревое течение (точка с на рис. 1, $Gr = 3\,135,8$, $Ra = 14\,550,1$)
Fig. 3. Two-vortex flow (point c in Fig. 1, $Gr = 3,135.8$, $Ra = 14,550.1$)

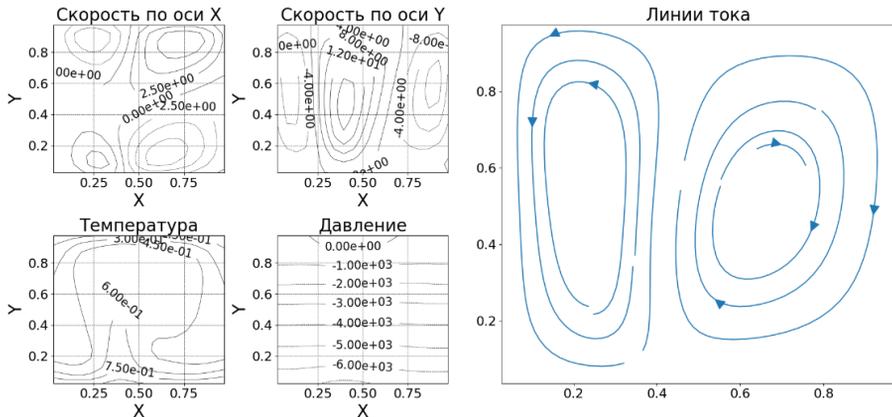


Рис. 4. Смещенное двухвихревое течение (точка f на рис. 1, $Gr = 13\,307,2$, $Ra = 55\,890,2$)
Fig. 4. Offset two-vortex flow (point f in Fig. 1, $Gr = 13,307.2$, $Ra = 55,890.2$)

В точке g ($Gr = 22\,406,0$, $Ra = Ra_{кр4} = 79\,317,2$, $Re = 889,0$) достигается минимальное время стабилизации температурного поля, зарождается трехвихревой режим конвекции (рис. 5), но, несмотря на стабильность температурного поля, картина линий тока трехвихревой конвекции остается нестабильной, что указывает на переход к турбулентному режиму конвекции.

В табл. 1 приведены основные результаты выполненных численных экспериментов. При сравнении теоретических значений $Ra_{кр}$ и значений $Ra_{кр}$, полученных в численных экспериментах, надо учитывать, что в аналитической теории число Рэлея считается константой, не зависящей от температуры, и сравнивать два последних столбца таблицы. Видно, что совпадение первых двух критических чисел Рэлея очень хорошее. Параметры конвективного течения, соответствующего точке e, находятся на границе области

применимости приближения Буссинеска, а точка *g*, как показано выше, уже выходит за пределы этой области. Соответственно, значения $Ra_{кр3}$, совпадающие по порядку величины, надо рассматривать как приближенные, а последние значения $Ra_{кр4}$, различающиеся почти в 2 раза, по-видимому, уже не имеют физического смысла.

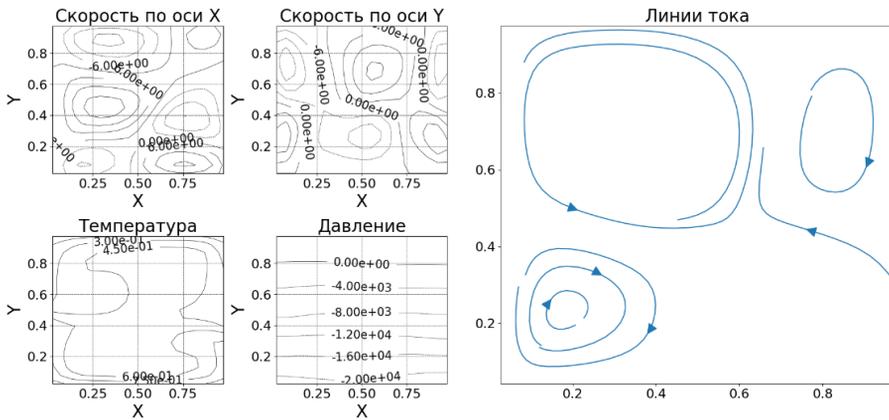


Рис. 5. Разрушение двухвихревого течения, переход к турбулентному режиму конвекции (точка *g* на рис. 1, $Gr = 22\,406,0$, $Ra = 79\,317,0$, $Re = 889,0$)

Fig. 5. Destruction of the two-vortex flow, transition to a turbulent convection regime (point *g* in Fig. 1, $Gr = 22,406.0$, $Ra = 79,317.0$, $Re = 889.0$)

Табл. 1. Значения критических чисел Рэлея

Table 1. Values of Rayleigh critical nos.

Точка на рис. 1	$Gr_{числ}$	$T_{н'}$, °C	Pr	$Ra_{кр\ числ}$	$Ra_{кр\ теор}$	$Ra_{кр\ числ}^*$
a	313,6	28	5,70	1 787,5	1 707,8	1 787,5
c	3 135,8	37	4,70	14 738,3	17 610,4	17 874,1
e	10 913,3	42	4,20	45 835,9	75 709,8	62 205,8
g	22 406,0	50	3,54	79 317,2	219 885,0	127 714,2

Примечание. $Gr_{числ}$ — числа Грасгофа, полученные в численном эксперименте; Pr [Варгафтик, 1972] — число Прандтля для воды, соответствующее температуре $T_{н'}$; $Ra_{кр\ числ}$ — критические числа Рэлея, полученные в численном эксперименте с учетом зависимости Pr от температуры; $Ra_{кр\ теор}$ [Гершуни, Жуховицкий, 1972] — критические числа Рэлея, полученные в аналитической теории устойчивости естественной конвекции; $Ra_{кр\ числ}^* = Gr \cdot 5,7$ — критические числа Рэлея, полученные в численном эксперименте без учета зависимости Pr от температуры.

Note. $Gr_{числ}$ — Grashof nos. obtained in the numerical experiment; Pr (Vargaftik, 1972) — Prandtl no. of water corresponding to the temperature $T_{н'}$; $Ra_{кр\ числ}$ — Rayleigh critical nos. obtained in the numerical experiment accounting for Pr depending on the temperature; $Ra_{кр\ теор}$ (Gershuni & Zhukhovitsky, 1972) — Rayleigh critical nos. obtained in the analytical theory of natural convection stability; $Ra_{кр\ числ}^* = Gr \cdot 5.7$ — Rayleigh critical nos. obtained in the numerical experiment without accounting for Pr depending on the temperature.

Заключение

Выполнен цикл численных экспериментов с целью исследования устойчивости стационарных одно- и двухвихревых режимов конвекции, установлены области бифуркации, в которых происходят переходы между этими режимами, и связь этих переходов с изменениями энергетических параметров конвективных течений. Численное моделирование выполнялось в квадратных ячейках на сетке 21×21 методом контрольных объемов с помощью алгоритма SIMPLER. В качестве жидкости была взята вода в диапазоне температур от 20 до 50 °С и чисел Грасгофа от 100 до 22 400.

В результате исследований выявлены 4 области бифуркации, в которых установившийся вид конвективных потоков теряет устойчивость и переходит в другой вид. Найдены 4 критических числа Рэлея, соответствующих этим областям. Показано, что все эти переходы связаны с переходами потенциальной энергии жидкости в кинетическую и обратно.

В первой области бифуркации первоначально неподвижная жидкость в процессе нагрева накапливает потенциальную энергию, и при значении $Gr = 313,6$ часть накопленной потенциальной энергии переходит в кинетическую, в результате возникает конвекция. При значении $Gr = 396,8$ происходит стабилизация конвекции, и устанавливается стационарное одновихревое течение.

Во второй области бифуркации наблюдается обратный процесс. Накопившаяся в процессе нагрева кинетическая энергия при значении $Gr = 3 135,8$ частично переходит в потенциальную, и одновихревое течение переходит в двухвихревое. При $Gr = 3 527,3$ происходит стабилизация конвекции и устанавливается стационарное двухвихревое течение.

В третьей области накопившаяся кинетическая энергия при $Gr = 10 913,3$ частично переходит в потенциальную, заканчивается область стабильной двухвихревой конвекции. Двухвихревой режим сохраняется, но вихри становятся несимметричными, а время стабилизации достигает максимума. При $Gr = 13 307,2$ и $Re = 615,6$, по-видимому, заканчивается область применимости приближения Буссинеска.

В четвертой области при $Gr = 22 406,0$ зарождается трехвихревой режим конвекции, но стабилизации этого режима не происходит, что указывает на переход к турбулентному режиму конвекции и выход за пределы области применимости приближения Буссинеска.

Сравнение значений критических чисел Рэлея, полученных в численных экспериментах, с числами аналитической теории показывает очень хорошее совпадение первых двух критических чисел $Ra_{кр1}$ и $Ra_{кр2}$. Значения $Ra_{кр3}$ совпадают по порядку величины, а $Ra_{кр4}$ различаются почти в 2 раза, но, по-видимому, уже не имеют физического смысла.

Список источников

- Андерсон Д., Таннехилл Дж., Плетчер Р. 1990. Вычислительная гидромеханика и теплообмен: в 2 т. / пер. с англ. М.: Мир. Т. 1. 384 с.; Т. 2. 392 с.
- Бессонов О. А. 2017. Анализ смешанной конвекции в модели метода Чохральского в широком диапазоне чисел Прандтля // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 3. С. 44–56. <https://doi.org/10.7868/S0568528117030057>

- Варгафтик Н. Б. 1972. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М.: Наука. 720 с.
- Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М. 1972. Конвективная устойчивость несжимаемой жидкости. М.: Наука. 392 с.
- Гершуни Г. З., Жуховицкий Е. М., Непомнящий А. А. 1989. Устойчивость конвективных течений. М.: Наука. 320 с.
- Джозеф Д. 1981. Устойчивость движений жидкости. М.: Мир. 640 с.
- Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. 1988. Теоретическая физика: в 10 т. / отв. ред. Л. П. Питаевский. Том 6: Гидродинамика. М.: Наука. 736 с.
- Остроумов Г. А., 1952. Свободная конвекция в условиях внутренней задачи. М.-Л.: ГИТТЛ. 256 с.
- Пасконов В. М., Полежаев В. И., Чудов Л. А. 1984. Численное моделирование процессов тепло- и массообмена. М.: Наука. 288 с.
- Патанкар С. В. 1984. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / пер. с англ. под. ред. В. Д. Виленского. М.: Энергоатомиздат. 150 с.
- Рамазанов М. М. 2012. Аналитическое исследование стационарной конвекции околокритического газа Ван дер Ваальса в пористом тонком кольцевом цилиндре в теплопроводном пространстве // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 2. С. 64–77.
- Рамазанов М. М. 2014. О критериях абсолютной конвективной устойчивости сжимаемой жидкости и газа // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 5. С. 27–37.
- Соболева Е. Г., Цыпкин Г. Г. 2014. Численное моделирование конвективных течений в грунте при испарении воды, содержащей растворенную примесь // Известия РАН. Механика жидкости и газа. № 5. С. 81–92.
- Сорокин В. С. 1953. Вариационный метод в теории конвекции // Прикладная математика и механика. Том XVII. С. 39–48.
- Сорокин А. П., Денисова Н. А., Иванов Е. Ф., Кузина Ю. А., Низовцев А. А., Привезенцев В. В., Сорокин Г. А. 2020. Экспериментальные и расчетные исследования теплообмена при кипении жидких металлов на моделях ТВС быстрых реакторах в аварийных режимах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. № 2. С. 150–172. <https://www.elibrary.ru/xaурут>
- Сорокин А. П., Иванов Е. Ф., Кузина Ю. А., Денисова Н. А., Низовцев А. А., Привезенцев В. В., Сорокин Г. А. 2021. Экспериментальные и расчетные исследования теплообмена и устойчивости циркуляции при кипении жидких металлов в аварийных режимах в сборках реакторов на быстрых нейтронах // Теплоэнергетика. № 10. С. 24–36. <https://doi.org/10.1134/S0040363621090095>
- Сорокин А. П., Кузина Ю. А., Денисова Н. А., Сорокин Г. А. 2022. Моделирование процесса кипения жидких металлов в модельных сборках быстрых реакторов в аварийных режимах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. № 2. С. 204–220. <https://www.elibrary.ru/cofzrv>
- Сорокин А. П., Кузина Ю. А., Денисова Н. А., Сорокин Г. А. 2024. Обобщение результатов экспериментального и численного моделирования кипения щелочных жидких металлов в активной зоне быстрых реакторов (картограмма режимов, теплоотдача) // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Ядерно-реакторные константы. № 1. С. 154–178. <https://www.elibrary.ru/yhjpps>

Томчик П. И., Зубков П. Т., Кислицын А. А. 2024. Численное исследование механической устойчивости течения в условиях естественной конвекции // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 3 (39). С. 71–87. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-3-71-87>

References

- Anderson, D., Tannehill, J., & Pletcher, R. (1990). *Computational Hydromechanics and Heat Transfer in 2 vols.* Mir. [In Russian]
- Bessonov, O. A. (2017). Analysis of mixed convection in the model of the Czochralski method in a wide range of Prandtl numbers. *Izvestiya RAS. Mechanics of Liquid and Gas*, (3), 44–56. <https://doi.org/10.7868/S0568528117030057> [In Russian]
- Vargaftik, N. B. (1972). *Handbook of Thermophysical Properties of Gases and Liquids.* Nauka. [In Russian]
- Gershuni, G. Z., & Zhukhovitsky, E. M. (1972). *Convective Stability of an Incompressible Fluid.* Nauka. [In Russian]
- Gershuni, G. Z., Zhukhovitsky, E. M., & Nepomnyashchy, A. A. (1989). *Stability of Convective Currents.* Nauka. [In Russian]
- Joseph, D. (1981). *Stability of Fluid Movements.* Mir. [In Russian]
- Landau, L. D., & Lifshits, E. M. (1988). *Theoretical Physics: in 10 vols. Vol. 6: Hydrodynamics* (L. P. Pitaevsky, Ed.). Nauka. [In Russian]
- Ostroumov, G. A. (1952). *Free Convection in the Conditions of an Internal Problem.* GITTL. [In Russian]
- Paskonov, V. M., Polezhaev, V. I., & Chudov, L. A. (1984). *Numerical Modeling of Heat and Mass Transfer Processes.* Nauka. [In Russian]
- Patankar, S. V. 1984. *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow* (V. D. Vilenky, Trans.). Energoatomizdat. [In Russian]
- Ramazanov, M. M. (2012). Analytical study of stationary convection of near-critical Van der Waals gas in a porous thin annular cylinder in a thermally conductive space. *Izvestiya RAS. Mechanics of Liquid and Gas*, (2), 64–77. [In Russian]
- Ramazanov, M. M. (2014). On the criteria of absolute convective stability of a compressible liquid and gas. *Izvestiya RAS. Mechanics of Liquid and Gas*, (5), 27–37. [In Russian]
- Soboleva, E. G., & Tsympkin, G. G. (2014). Numerical modeling of convective flows in soil during evaporation of water containing dissolved admixture. *Izvestiya RAS. Mechanics of Liquid and Gas*, (5), 81–92. [In Russian]
- Sorokin, V. S. (1953). The variational method in the theory of convection. *Applied Mathematics and Mechanics*, 17, 39–48. [In Russian]
- Sorokin, A. P., Denisova, N. A., Ivanov, E. F., Kuzina, Yu. A., Nizovtsev, A. A., Priezentssev, V. V., & Sorokin, G. A. (2020). Experimental and computational studies of the boiling process of liquid metal during the development of an accident in a fast reactor: heat transfer and circulation stability. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*, (2), 150–172. <https://www.elibrary.ru/xaypyt> [In Russian]
- Sorokin, A. P., Ivanov, E. F., Kuzina, Yu. A., Denisova, N. A., Nizovtsev, A. A., Priezentssev, V. V., & Sorokin, G. A. (2021). Experimental and numerical investigations into heat exchange and stability

of circulation during liquid metals' boiling in assemblies of fast neutron reactors in accident regimes. *Теплоэнергетика*, (10), 24–36. <https://doi.org/10.1134/S0040363621090095> [In Russian] (English version: *Thermal Engineering*, 68(10), 752–762)

Sorokin, A. P., Kuzina, Yu. A., Denisova, N. A., & Sorokin, G. A. (2022). Simulation of the boiling process of liquid metals in model assemblies of fast reactors in accident regimes. *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*, (2), 204–220. <https://www.elibrary.ru/cofzrv> [In Russian]

Sorokin, A. P., Kuzina, Yu. A., Denisova, N. A., & Sorokin, G. A. (2024). Generalization of the results of experimental and numerical simulation of boiling of alkaline liquid metals in the core of fast reactors (cartogram of two-phase flow regimes, heat transfer). *Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear and Reactor Constants*, (1), 154–178. <https://www.elibrary.ru/yhjjs> [In Russian]

Tomchik, P. I., Zubkov, P. T., & Kislitsin, A. A. (2024). Numerical study of the mechanical stability of the flow under the conditions of natural convection. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(3), 71–87. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-3-71-87> [In Russian]

Информация об авторах

Павел Иванович Томчик, аспирант, кафедра фундаментальной математики и механики, Школа компьютерных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
p.i.tomchik@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6960-4097>

Анатолий Александрович Кислицын, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
a.a.kislicyn@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3863-0510>

Information about the authors

Pavel I. Tomchik, Postgraduate Student, Department of Fundamental Mathematics and Mechanics, School of Computer Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia
p.i.tomchik@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6960-4097>

Anatoliy A. Kislicyn, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia
a.a.kislicyn@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3863-0510>

Математическая модель свободных колебаний надземных участков трубопроводов, транспортирующих многофазную жидкость

Дмитрий Андреевич Черенцов¹✉, Сергей Петрович Пирогов^{1,2}

¹ Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия

² Государственный аграрный университет Северного Зауралья, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: cherentsovda@bk.ru✉

Аннотация. В районах строительства с преобладанием вечной мерзлоты часто используется надземная прокладка трубопроводов. Нормативные документы регламентируют величину пролета между опорами, однако для учета вихревого возбуждения, вызванного ветровой нагрузкой, необходимо предусмотреть корректировку этой величины. В этой работе предложен метод нахождения длины участка между опорами в зависимости от ветровой нагрузки, вызывающей колебания трубопровода. Для его реализации необходимо определение частот свободных колебаний. В статье изложено описание подхода, позволяющего определить собственные частоты колебаний надземных трубопроводов с учетом внутреннего давления и скорости фаз перекачиваемой многофазной жидкости, рассматриваемых при стационарных режимах течения. Представлена математическая модель, разработанная на основе стержневой теории с учетом транспортирующей многофазной жидкости. Численное решение приведено с использованием метода Бубнова — Галеркина, при этом найдено достаточное количество членов, которые надо сохранить в приближенном решении.

Ключевые слова: математическое моделирование, численные методы, частоты свободных колебаний, проектирование трубопроводов, надземные трубопроводы, многофазная жидкость, определение величины пролета трубопровода

Благодарности: работа выполнена при поддержке Национального проекта «Наука и университеты» Министерства науки и высшего образования РФ (грант № FEWN-2024-0005).

Цитирование: Черенцов Д. А., Пирогов С. П. 2024. Математическая модель свободных колебаний надземных участков трубопроводов, транспортирующих многофазную жидкость // Вестник Тюменского государственного университета.

Mathematical model of free vibrations in above-ground pipelines sections transporting multiphase fluid

Dmitry A. Cherentsov¹✉, Sergey P. Pirogov^{1,2}

¹ Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia

Corresponding author: cherentsovda@bk.ru✉

Abstract. In construction areas with prevailing permafrost, above-ground pipeline installation is often used. Regulatory documents determine the span between supports; however, this value's correction should be possible to account for the vortex excitation caused by the wind load. This paper proposes a method for finding the length of the section between supports depending on the wind load that causes vibrations of the pipeline. Its implementation requires determining the frequency of the external voltage. The article describes a coupling that allows one to determine the natural vibrations of above-ground pipelines, accounting at stationary flow conditions for the internal pressure and phase velocity of the pumped multiphase liquid. A mathematical model developed on the rod theory accounting for a transporting multiphase fluid is presented. A numerical solution was carried out using the Bubnov–Galerkin method, and enough members were found that require preservation in an approximate state.

Keywords: mathematical modeling, numerical methods, free vibration frequencies, pipeline design, above-ground pipelines, multiphase fluid, determination of pipeline span

Acknowledgements: the work was supported by the National Project “Science and Universities” of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (grant No. FEWN-2024-0005).

Citation: Cherentsov, D. A., & Pirogov, S. P. (2024). Mathematical model of free vibrations in above-ground pipelines sections transporting multiphase fluid. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(4), 68–78. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-68-78>

Received May 6, 2024; Reviewed Oct. 10, 2024; Accepted Dec. 16, 2024

Введение

Преимущественный выбор надземного способа прокладки трубопроводов обусловлен преобладающим наличием вечной мерзлоты в районах строительства объектов транспорта нефти и газа в многофазном состоянии.

Определение величины пролета между опорами трубопровода является основной задачей при использовании надземного способа прокладки. Минимальное значение величины расстояний между опорами трубопроводов регламентируется нормативными документами Российской Федерацииⁱ, а также зачастую используется программный комплекс «Старт-Проф»ⁱⁱ. При возникновении случая невыполнения условий отстройки от резонансных частот, соответствующей проверке на резонанс от ветровой нагрузки, необходимо уточнить величину пролета.

Требуемое значение длины участка трубопровода между строительными опорами может быть определено по следующему алгоритму (рис. 1).

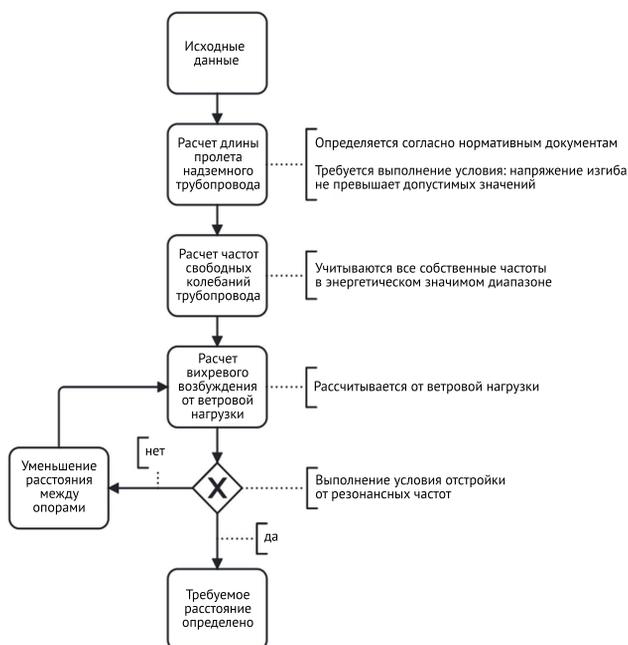


Рис. 1. Алгоритм для определения шага между опорами надземного трубопровода с учетом вихревого резонанса

Fig. 1. Algorithm for determining the pitch between the supports of an overhead pipeline considering vortex resonance

ⁱ СА 03-003-07. Расчеты на прочность и вибрацию стальных технологических трубопроводов. М.: НТП Трубопровод, 2007. 70 с.; ГОСТ Р 58367—2019. Обустройство месторождений нефти на суше. Технологическое проектирование. М.: Стандартинформ, 2019. 120 с.

ⁱⁱ Старт-Проф. Текущая версия 4.86 R4 // НТП Трубопровод. <https://www.truboprovod.ru/software/start> (дата обращения: 01.01.2024).

При некорректном расчете частот свободных колебаний трубопровода возможен рост амплитуд колебаний пролета выше предельных значений, что может привести к аварийным режимам. Поэтому оценке свободных частот трубопроводов должно уделяться особое значение.

В СА 03-003-07 при определении собственных частот используется стержневая теория; параметры перекачиваемой жидкости, такие как давление и скорость, не учитываются, однако учтена дополнительная масса потока. В рассмотренных авторами исследованиях [Феодосьев, 1952; Соколов, Березнёв, 2004, 2005; Чуба и др., 2007; Ефимов, 2008; Ильин, Соколов, 2010; Миронов и др., 2010; Черенцов и др., 2014; Зарипов, 2016; Шакирьянов, 2016; Ганиев и др., 2017; Pirogov и др., 2018, 2020; Пирогов и др., 2019; Петров и др., 2023] собственные частоты трубопроводов определены с помощью стержневой и оболочечной теории (и та и другая позволяют учесть давление и скорость однофазной жидкости).

В данной работе представлена математическая модель определения собственных частот колебаний трубопроводов, учитывающая внутреннее давление и параметры перекачиваемой многофазной жидкости при стационарных режимах течения.

Методы

Было получено [Брилл, Мукерджи, 2006; Пирогов, Черенцов, 2023] уравнение колебаний трубопровода с учетом изменения давления вдоль длины:

$$\left(\rho_{\text{тр}} S_{\text{тр}} + \rho_{\text{ж}} S_{\text{ж}}\right) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \right) - P_x \left(\mu \frac{S_{\text{тр}} d_{\text{вн}}}{2\delta} \right) \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0, \quad (1)$$

где w — прогиб оси трубопровода в поперечном направлении; P_x — внутреннее давление в координате x ; E — модуль упругости материала трубопровода; J — момент инерции сечения трубопровода; μ — коэффициент Пуассона; $d_{\text{вн}}$ — внутренний диаметр трубопровода; δ — толщина стенки трубы; $S_{\text{тр}}$ — площадь сечения трубопровода; $\rho_{\text{тр}}$ — плотность материала трубы; $S_{\text{ж}}$ — площадь сечения, занимаемая жидкостью; $\rho_{\text{ж}}$ — плотность многофазной жидкости.

Давление в сечении с координатой x при известном начальном давлении ($P_{\text{н}}$) может быть определено как

$$P_x = P_{\text{н}} - \frac{dP}{dx} x, \quad (2)$$

где dP/dx — градиент давления (потеря давления на единицу длины трубопровода).

Выражение для определения градиента давления для многофазного потока получено из условия представления флюида в виде однородной смеси:

$$\frac{dP}{dx} = \frac{f \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}}^2}{2d_{\text{вн}}} + \rho_{\text{ж}} g \sin \theta + \rho_{\text{ж}} v_{\text{ж}} \frac{dv_{\text{ж}}}{dx}, \quad (3)$$

где f — коэффициент гидравлического сопротивления потока многофазной жидкости; $\rho_{ж}$ — плотность многофазной жидкости; $v_{ж}$ — приведенная скорость многофазной жидкости; θ — угол отклонения от вертикали участка трубопровода.

Для определения градиента давления используются эмпирические и механистические корреляции [Pirgov и др., 2018], учитывающие эффект проскальзывания фаз на восходящих и нисходящих участках и режимы течения. Режим течения многофазной жидкости зависит от соотношения приведенных скоростей фаз (от объемного соотношения жидкой и газовой фазы, рис. 2).

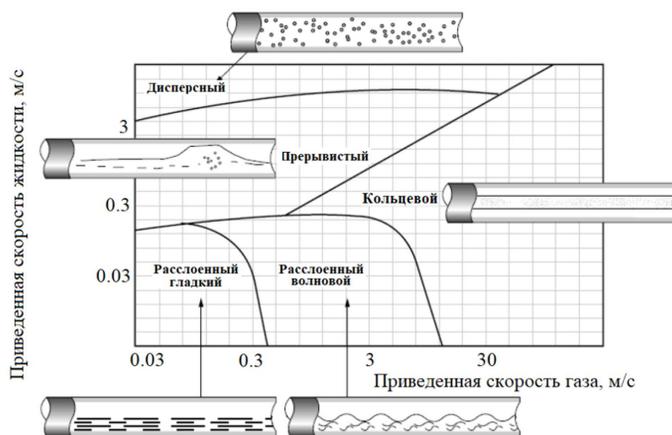


Рис. 2. Режимы течения многофазной жидкости

Fig. 2. Multiphase fluid flow regimes

Прерывистый (пробковый) режим течения относится к нестационарным режимам течения, характеризующимся непостоянной структурой течения жидкости во времени. Перекачка в таком режиме может вызвать интенсивные колебания трубы. Далее будут рассматриваться стационарные режимы течения (расслоенный гладкий, дисперсный, кольцевой) с целью определения собственных частот колебаний.

Решение (1) с учетом (3) может быть получено методом Бубнова — Галеркина. В качестве граничных условий используются жесткие заделки ($\vartheta = w = 0$) — аналог неподвижных опор.

Искомая функция может быть представлена как

$$w(x, t) = w(x) \sin(kt + \beta), \tag{4}$$

где $w(x)$ — функция перемещений в поперечном направлении; k — круговая частота колебаний; β — сдвиг фаз.

После подстановки (4) в (1) и преобразований получено уравнение:

$$\left(\rho_{тр} S_{тр} + \rho_{ж} S_{ж}\right) w(x) k^2 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} \right) - P_x \left(\mu \frac{S_{тр} d_{вн}}{2\delta} \right) \frac{\partial^2 w(x)}{\partial x^2} = 0. \tag{5}$$

Приближенное решение $w(x)$ представляется в виде ряда

$$w(x) = \sum_{i=1}^n a_i w_i = a_1 w_1 + a_2 w_2 + \dots + a_n w_n. \quad (6)$$

При подстановке (6) в (5) получим неравенство нулю — невязку решения, зависящую от неопределенных коэффициентов a_i , входящих в (6). Базисная функция w_i примет вид:

$$w_i(x) = \sin\left(i\pi \frac{x}{l}\right). \quad (7)$$

Получено условие ортогональности невязки решения и базисной функции:

$$\begin{aligned} & -a_1 \int_0^L \left(\rho_{\text{тр}} S_{\text{тр}} + \rho_{\text{ж}} S_{\text{ж}} \right) k^2 w_1 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} \right) - P_x \left(\mu \frac{S_{\text{тр}} d_{\text{вн}}}{2\delta} \right) \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} w_1 dx + \\ & + \dots - a_n \int_0^L \left(\rho_{\text{тр}} S_{\text{тр}} + \rho_{\text{ж}} S_{\text{ж}} \right) k^2 w_n + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 w_n}{\partial x^2} \right) - P_x \left(\mu \frac{S_{\text{тр}} d_{\text{вн}}}{2\delta} \right) \frac{\partial^2 w_n}{\partial x^2} w_n dx = 0. \\ & \dots \\ & -a_1 \int_0^L \left(\rho_{\text{тр}} S_{\text{тр}} + \rho_{\text{ж}} S_{\text{ж}} \right) k^2 w_1 + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} \right) - P_x \left(\mu \frac{S_{\text{тр}} d_{\text{вн}}}{2\delta} \right) \frac{\partial^2 w_1}{\partial x^2} w_n dx + \\ & + \dots - a_n \int_0^L \left(\rho_{\text{тр}} S_{\text{тр}} + \rho_{\text{ж}} S_{\text{ж}} \right) k^2 w_n + \frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EJ \frac{\partial^2 w_n}{\partial x^2} \right) - P_x \left(\mu \frac{S_{\text{тр}} d_{\text{вн}}}{2\delta} \right) \frac{\partial^2 w_n}{\partial x^2} w_n dx = 0. \end{aligned}$$

Удерживая различное количество членов в приближенном решении w_i , получим систему линейных уравнений порядка n . Выражение для определения собственных частот может быть получено из условия равенства нулю определителя матрицы такой системы уравнений.

Результаты

Определение необходимого количества членов ряда в (6) производилось для надземного участка трубопровода со следующими характеристиками:

- диаметр и толщина стенки — 159×8 мм;
- длина участка — 3 км;
- длина пролета — 10 м;
- расход жидкости — $800 \text{ м}^3/\text{сут}$;
- обводненность объемная — 50%;
- газовый фактор — $200 \text{ м}^3/\text{м}^3$;
- давление в конце участка — $10 \text{ кгс}/\text{см}^2$ (избыточное).

Изменение давления и скоростей фаз вдоль участка трубопровода по корреляции Беггза и Брилла [Брилл, Мукерджи, 2006] представлены на рис. 3.

При увеличении количества членов ряда в (6) первая собственная частота колебаний стремится к предельному значению (рис. 4).

Устойчивое решение может быть получено при удержании трех членов в приближенном решении.

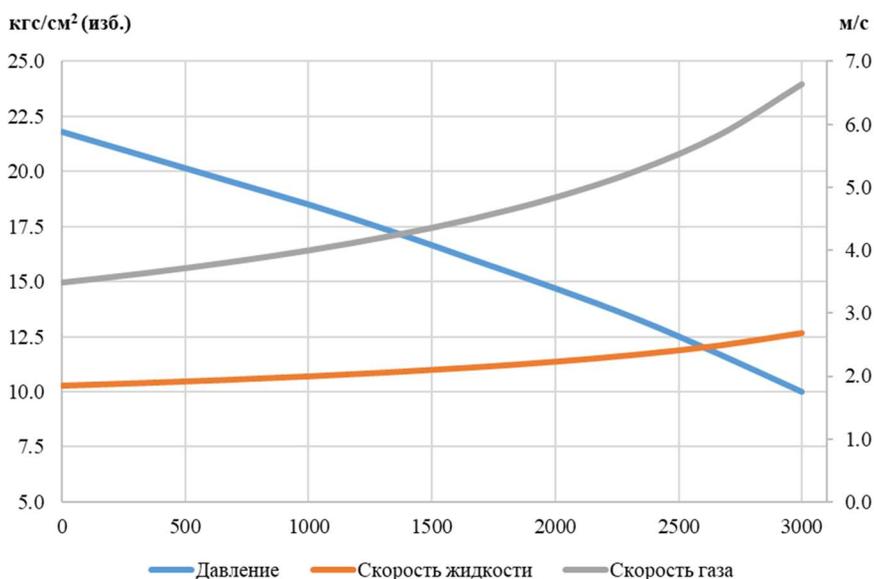


Рис. 3. Результаты гидравлического расчета по корреляции Беггса и Брилла
 Fig. 3. Results of hydraulic calculations using Beggs and Brill correlation

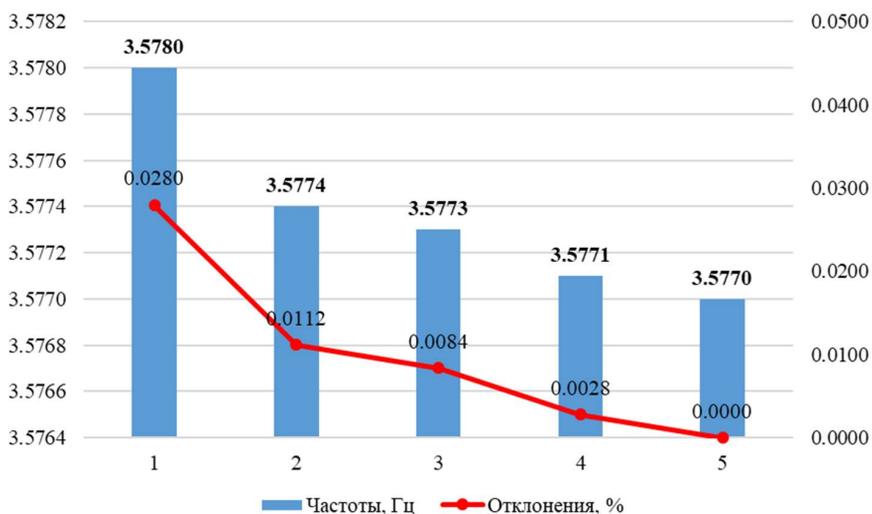


Рис. 4. Определение необходимого количества членов ряда в (6)
 Fig. 4. It is necessary to determine the number of terms of the series in (6)

Заключение

Требуемое значение длины участка трубопровода между строительными опорами, определяемое по предложенному алгоритму на рис. 1, позволит избавиться от итеративных расчетов при расстановке опор вдоль всей трассы трубопроводов при проектировании объектов сбора скважинной продукции.

Полученная математическая модель дает возможность оценить влияние внутреннего давления и параметров перекачиваемой многофазной жидкости при стационарных режимах течения на частоты свободных колебаний надземных участков трубопроводов.

С помощью данной модели возможно оценить влияние параметров многофазной жидкости, таких как объем жидкости, обводненность и газовый фактор, на собственные частоты колебаний и, как следствие, величину пролета между опорами.

Список источников

- Брилл Дж. П., Мукерджи Х. 2006. Многофазный поток в скважинах / пер. с англ. Ю. В. Русских; под ред. М. Н. Кравченко. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований. 384 с.
- Ганиев Р. Ф., Ильгамов М. А., Хакимов А. Г., Шакирьянов М. М. 2017. Пространственные неперiodические колебания трубопровода под действием переменного внутреннего давления // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 2. С. 3–12. <https://www.elibrary.ru/ykvaqx>
- Ефимов А. А. 2008. Свободные колебания подводных нефтепроводов // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 1 (67). С. 49–55.
- Зарипов Д. М. 2016. Нелинейные колебания трубопровода под действием внутреннего ударного давления в жидкости // Труды Института механики им. Р. Р. Мавлютова УНЦ РАН. Том 11. № 1. С. 136–140. <https://www.elibrary.ru/xeridj>
- Ильин В. П., Соколов В. Г. 2010. Исследование свободных колебаний кривой трубы с потоком жидкости // Успехи строительной механики и теории сооружений: сб. науч. ст. / под ред. Н. Ф. Морозова. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т. С. 88–93.
- Миронов М. А., Пятаков П. А., Андреев А. А. 2010. Вынужденные изгибные колебания трубы с потоком жидкости // Акустический журнал. Том 56. № 5. С. 684–692. <https://www.elibrary.ru/mvnxkz>
- Петров Д. А., Черенцов Д. А., Пирогов С. П. 2023. Влияние ветровой нагрузки на величину пролета между опорами надземного трубопровода // Нефтегазовый терминал: материалы Междунар. науч.-техн. конф. / под общ. ред. Ю. Д. Земенкова. Тюмень: Тюмен. индустр. ун-т. Вып. 25. С. 287–290. <https://www.elibrary.ru/lbvpah>
- Пирогов С. П., Черенцов Д. А., Воронин К. С. 2019. Уравнения математической физики в задачах трубопроводного транспорта нефти и газа: учеб. пос. Тюмень: Тюмен. индустр. ун-т. 95 с.
- Пирогов С. П., Черенцов Д. А. 2023. Определение частот свободных колебаний надземных участков трубопроводов, транспортирующих несжимаемую жидкость // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 3 (159). С. 84–94. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2023-3-84-94>

- Соколов В. Г., Березнёв А. В. 2004. Уравнения движения криволинейного участка трубопровода с потоком жидкости // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 6 (48). С. 76–80.
- Соколов В. Г., Березнёв А. В. 2005. Решение задачи о свободных колебаниях криволинейных участков трубопроводов с протекающей жидкостью // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 1 (49). С. 80–84.
- Феодосьев В. И. 1952. О колебаниях и устойчивости трубы при протекании через нее жидкости // Инженерный сборник. Том 10. С. 169–170.
- Черенцов Д. А., Пирогов С. П., Дорофеев С. М. 2014. Математическая модель манометрической пружины в вязкой среде // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математические науки. Информатика. № 7. С. 234–241.
- Чуба А. Ю., Смолин Н. И., Пирогов С. П. 2007. Определение собственных частот колебаний изогнутых труб некругового поперечного сечения // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 1 (61). С. 77–82.
- Шакирьянов М. М. 2016. Пространственные хаотические колебания трубопровода в сплошной среде под действием переменного внутреннего давления // Известия Уфимского научного центра РАН. № 4. С. 35–47.
- Pirogov S. P., Chuba A. Yu., Cherentsov D. A. 2018. Effect of section shape on frequencies of natural oscillations of tubular springs // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 357. No. 1. Article 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/357/1/012032>
- Pirogov S. P., Cherentsov D. A., Voronin K. S., Yakupov A. U. 2020. Simulation of the stress-strain state of the working body of the system for the development of the pipeline trench // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 952. No. 1. Article 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/952/1/012011>

References

- Brill, J. P., & Mukherjee, H. (2006). *Multiphase Flow in Wells* (Yu. V. Russkikh, Trans.; M. N. Kravchenko, Ed.). Institut kompyuternykh issledovaniy. [In Russian] (Original work published 1999, Henry L. Doherty Memorial Fund of Aime, Society of Petroleum Engineers)
- Ganiev, R. F., Il'gamov, M. A., Khakimov, A. G., & Shakiryaynov, M. M. (2017). Spatial aperiodic vibrations of the pipelines under transient internal pressure. *Problemy mashinostraeniya i nadezhnosti mashin*, (2), 3–12. <https://www.elibrary.ru/ykvaqx> (English version: *Journal of Machinery Manufacture and Reliability*, 46(2), 87–95)
- Efimov, A. A. (2008). Natural oscillation of underwater pipelines. *Oil and Gas Studies*, (1), 49–55. [In Russian]
- Zaripov, D. M. (2016). Non-linear vibrations of the pipeline under the action of impact pressure in internal fluid. *Proceedings of the Mavlyutov Institute of Mechanics*, 11(1), 136–140. <https://www.elibrary.ru/xeridj> [In Russian]
- Ilyin, V. P., & Sokolov, V. G. (2010). Study of dynamic deformation of a pipe with liquid flow. In N. F. Morozov (Ed.), *Advances in Structural Mechanics and Theory of Structures* (pp. 88–93). Yuri Gagarin State Technical University of Saratov. [In Russian]
- Mironov, M. A., Pyatakov, P. A., & Andreev, A. A. (2010). Forced flexural vibrations of a pipe with a liquid flow. *Akusticheskij zhurnal*, 56(5), 684–692. <https://www.elibrary.ru/mvnxkz> (English version: *Acoustical Physics*, 56(5), 739–747)

- Petrov, D. A., Cherentsov, D. A., & Pirogov, S. P. (2023). Estimation of wind load on the average span between the supports of an overhead pipeline. In Yu. D. Zemenkov (Ed.), *Oil and Gas Terminal: Proceedings of the International Scientific and Technical Conference* (Vol. 25, pp. 287–290). Industrial University of Tyumen. <https://www.elibrary.ru/lbvpah> [In Russian]
- Pirogov, S. P., Cherentsov, D. A., & Voronin, K. S. (2019). *Simplification of Mathematical Physics in Problems of Pipeline Transport of Oil and Gas*. Industrial University of Tyumen. [In Russian]
- Cherentsov, D. A., & Pirogov, S. P. (2023). Determination of the natural frequencies of the above-ground sections of pipelines transporting an incompressible fluid. *Oil and Gas Studies*, (3), 84–94. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2023-3-84-94> [In Russian]
- Sokolov, V. G., & Bereznev, A. V. (2004). Equation of motion of a curved section of a pipeline with liquid flow. *Oil and Gas Studies*, (6), 76–80. [In Russian]
- Sokolov, V. G., & Bereznev, A. V. (2005). Solution of the problem of dynamic vibrations of curved sections of pipelines with flowing liquid. *Oil and Gas Studies*, (1), 80–84. [In Russian]
- Feodosyev, V. I. (1952). On vibrations and stability of a pipe when liquid flows through it. *Inzhenernyy sbornik*, 10, 169–170. [In Russian]
- Cherentsov, D. A., Pirogov, S. P., & Dorofeyev, S. M. (2014). Mathematical model of manometric spring in a viscous medium. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Sciences. Informatics*, (7), 234–241. [In Russian]
- Chuba, A. Yu., Smolin, N. I., & Pirogov, S. P. (2007). Determination of natural frequencies of oscillation of bended pipes with a non-circular cross section. *Oil and Gas Studies*, (1), 77–82. [In Russian]
- Shakiryaynov, M. M. (2016). Spatial chaotic vibrations of a pipeline in the continuous medium under the impact of alternating internal pressure. *Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre*, (4), 35–47. [In Russian]
- Pirogov, S. P., Chuba, A. Yu., & Cherentsov, D. A. (2018). Effect of section shape on frequencies of natural oscillations of tubular springs. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 357(1), Article 012032. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/357/1/012032>
- Pirogov, S. P., Cherentsov, D. A., Voronin, K. S., & Yakupov, A. U. (2020). Simulation of the stress-strain state of the working body of the system for the development of the pipeline trench. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 952(1), Article 012011. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/952/1/012011>

Информация об авторах

Дмитрий Андреевич Черенцов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры транспорта углеводородных ресурсов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
cherentsovda@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8072-6183>

Сергей Петрович Пирогов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной механики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия; профессор кафедры лесного хозяйства, деревообработки и прикладной механики, Государственный аграрный университет Северного Зауралья, Тюмень, Россия
piro-gov@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5171-8942>

Information about the authors

Dmitry A. Cherentsov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Transport of Hydrocarbon Resources, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
cherentsovda@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8072-6183>

Sergey P. Pirogov, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Professor of the Department of Applied Mechanics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia; Professor of the Department of Forestry, Woodworking and Applied Mechanics, Northern Trans-Ural State Agricultural University, Tyumen, Russia
piro-gow@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5171-8942>

Моделирование влияния неравномерного распределения отложений в проточной части нагнетателя на прецессию его ротора

Михаил Сергеевич Степанов¹✉, Алексей Вадимович Бунякин²,
Гани Гайсинович Гилаев¹, Владислав Игоревич Дунаев¹

¹ Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия

² Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия

Контакт для переписки: m.s.stepanov@mail.ru ✉

Аннотация. В работе рассмотрена динамическая модель прецессии вала центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата с двумя ступенями сжатия и подшипниками скольжения. Прецессия характеризуется траекторией плавления вала на одном из опорных подшипниковых узлов или на двух узлах синхронно. Проведена приближенная оценка силы дисбаланса, возникающей вследствие неравномерности отложений на двух ступенях сжатия (двух рабочих колесах нагнетателя природного газа). Рассчитанные характеристики соотнесены с данными измерений на газоперекачивающем агрегате в процессе его эксплуатации. В работе получено аналитическое выражение для оценки силы, обуславливающей прецессию вала и создающей его дисбаланс. Результаты исследования могут быть использованы для диагностики наличия отложений на рабочих колесах нагнетателя.

Ключевые слова: прецессия, дисбаланс, углы Эйлера, отложения, момент инерции, ротор, крутящий момент

Цитирование: Степанов М. С., Бунякин А. В., Гилаев Г. Г., Дунаев В. И. 2024. Моделирование влияния неравномерного распределения отложений в проточной части нагнетателя на прецессию его ротора // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 4 (40). С. 79–94. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-79-94>

Поступила 04.09.2024; одобрена 09.12.2024; принята 16.12.2024

The influence of the uneven distribution of deposits in the flow part of the centrifugal blower on the precession of its rotor

Mikhail S. Stepanov¹✉, Alexey V. Bunyakin², Gani G. Gilaev¹,
Vladislav I. Dunaev¹

¹ Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

² Kuban State University, Krasnodar, Russia

Corresponding author: m.s.stepanov@mail.ru✉

Abstract. This article considers a dynamic precession model of the shaft in a centrifugal supercharger of a gas pumping unit with two compression stages and sliding bearings. Precession is characterized by the trajectory of the shaft floating on one of the supporting bearing units or on two nodes synchronously. The authors have assessed the imbalance force resulting from uneven deposits at two compression stages (two impellers of natural gas supercharger). The calculated characteristics are compared with the measurement data on the gas pumping unit during its operation. This article provides analytical expressions for estimating the force causing the precession of the shaft and creating its imbalance. The results can be used to diagnose the presence of deposits on the impellers of the supercharger.

Keywords: precession, imbalance, Euler angles, deposits, moment of inertia, rotor, torque

Citation: Stepanov, M. S., Bunyakin, A. V., Gilaev, G. G., & Dunaev, V. I. (2024). The influence of the uneven distribution of deposits in the flow part of the centrifugal blower on the precession of its rotor. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(4), 79–94. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-79-94>

Received Sep. 4, 2024; Reviewed Dec. 9, 2024; Accepted Dec. 16, 2024

Введение

Общим вопросам диагностирования технического состояния центробежного нагнетателя посвящены работы С. И. Перевощикова [2020], А. М. Поздеевой, А. Б. Петровича [2020]. Наличие дисбаланса приводит к ускоренному износу подшипников, валов и других механизмов, повышает вибрации и уменьшает КПД [Байков и др., 1999]. Так, В. Г. Гадяка и др. [2017], Д. Е. Якимов и др. [2019] рассматривают преимущества выполнения балансировки ротора непосредственно на компрессорной станции в условиях

эксплуатации, а также после проведения ремонтных работ в проточной части агрегата [Салыхов, Футин, 2020]. При балансировке ротора важно максимально уменьшить его прецессию [Герике, 2006; Мормуль и др., 2018].

Одним из факторов, влияющих на появление дисбаланса в процессе эксплуатации центробежного нагнетателя, является образование отложений в его проточной части [Кунина и др., 2018]. Для их уменьшения совершенствуют методики подготовки газа к транспорту [Воробьева, Смирнова, 2007; Стуликов, Ефимов, 2017; Ефимов и др., 2018]. Также существует множество методик очистки проточной части роторных динамических машин от отложений [Манькина и др., 2005; Дадонов, 2021; Егоров и др., 2021].

По мнению авторов, в настоящее время недостаточно представлены аналитические подходы, опирающиеся на физико-математическое моделирование явления дисбаланса, обусловленного наличием отложений в проточной части центробежного нагнетателя, очистка которой в результате проводится по среднему значению времени наработки агрегата.

Таким образом, целью исследования является построение математической модели, позволяющей по данным, допускающим непосредственное измерение, оценивать величину дисбаланса ротора центробежного нагнетателя, вызванного наличием отложений. Это позволяет проводить мероприятия по очистке не по среднему времени наработки агрегата, а непосредственно по его текущему техническому состоянию.

Отложения в проточной части центробежного нагнетателя (рис. 1) наиболее выражены на первой его ступени и постепенно уменьшаются на последующих ступенях сжатия. Неравномерность распределения отложений по рабочим колесам порождает дисбаланс ротора, приводящий к увеличению прецессии его вала. Далее приводится приближенная оценка динамических характеристик этого дисбаланса, которые могут соотноситься с данными измерительных систем.

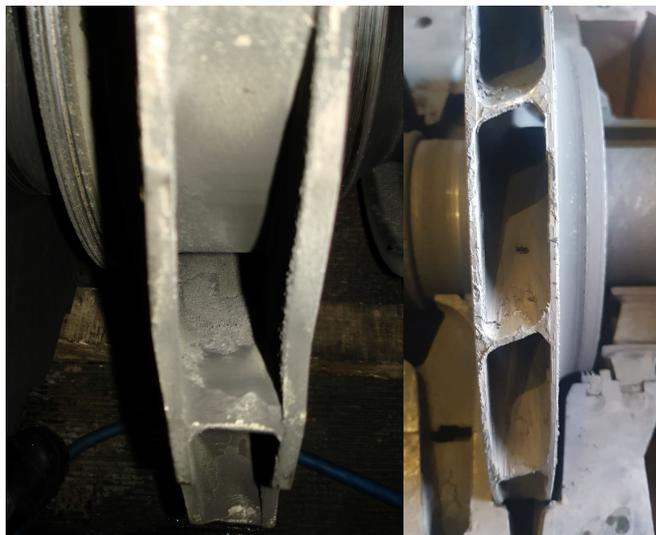


Рис. 1. Отложения на рабочих колесах ротора центробежного нагнетателя

Fig. 1. Deposits on the impellers of the centrifugal supercharger rotor

Методы

Используются методы математического моделирования с такими допущениями, которые позволяют получить аналитические выражения (формулы), соотносящиеся с данными измерений.

В качестве обобщенных координат, задающих положение ротора относительно корпуса газоперекачивающего агрегата (ГПА), принимаются углы Эйлера φ , θ , ψ [Уиттекер, 2004].

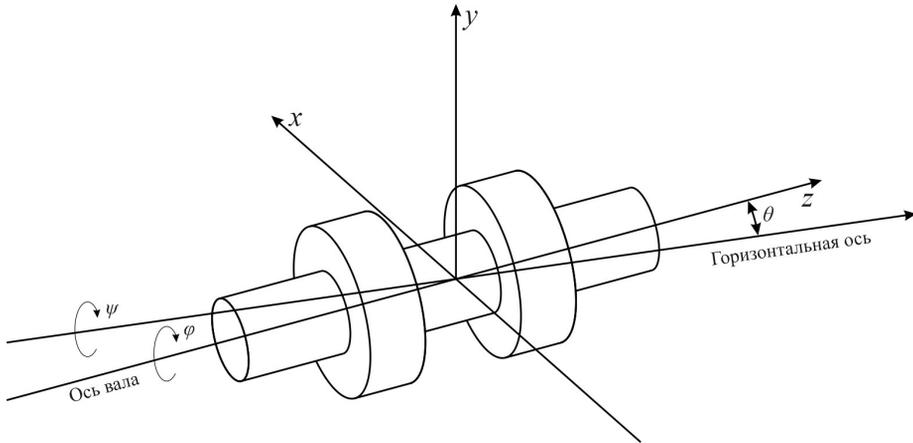


Рис. 2. Расположение оси вала относительно горизонтальной оси
Fig. 2. The location of the shaft axis relative to the horizontal axis

На рис. 2 изображен вал с рабочими колесами центробежного нагнетателя ГПА, где ψ — угол прецессии, θ — угол нутации, φ — угол собственного вращения.

Преобразование $\vec{r} = A\vec{r}_0$ координат декартовой системы от первоначального положения, жестко связанного с корпусом устройства, к текущему положению ротора задается произведением матриц:

$$A = A_z(\varphi)A_x(\theta)A_z(\psi),$$

$$A_z(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos\varphi & -\sin\varphi & 0 \\ \sin\varphi & \cos\varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A_x(\theta) = \begin{pmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{pmatrix},$$

$$A_z(\psi) = \begin{pmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

при этом $A^* = A^{-1}$ — ортогональная матрица.

С учетом зависимости углов $\varphi(t)$, $\theta(t)$, $\psi(t)$ от времени, дифференцирование равенства $\vec{r} = A\vec{r}_0$ по времени дает:

$$\dot{\vec{r}} = \dot{A}\vec{r}_0, \text{ или } \dot{\vec{r}} = \dot{A}A^*\vec{r} = \Omega_A^*\vec{r},$$

где $\Omega_A = \dot{A}A^* = -A\dot{A}^* = -\Omega_A^*$ — кососимметрическая матрица угловой скорости.

$$\Omega_A = \begin{pmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{pmatrix} = \dot{A}_z(\varphi)A_z^{-1}(\varphi) + \tag{2}$$

$$+ A_z(\varphi)(\dot{A}_x(\theta)A_x^{-1}(\theta) + A_x(\theta)\dot{A}_z(\psi)A_z^{-1}(\psi)A_x^{-1}(\theta))A_z^{-1}(\varphi).$$

Из матричного равенства (1) с учетом выражения (2) получаются компоненты вектора угловой скорости в системе координат, связанной с текущим положением ротора [Лурье, 1961]:

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\theta} \cos \varphi + \dot{\psi} \sin \varphi \sin \theta, \\ \omega_y &= \dot{\theta} \sin \varphi - \dot{\psi} \cos \varphi \sin \theta, \\ \omega_z &= \dot{\varphi} + \dot{\psi} \cos \theta. \end{aligned} \tag{3}$$

Приведем выражения для момента инерции J_x^0 однородного диска относительно оси x , лежащей в плоскости диска, в прямоугольной системе координат [Голубев, 2000; Тарг, 2010].

$$J_x^0 = \rho_2 \iint_S y^2 dS = \rho_2 \int_0^R r^3 dr \int_0^{2\pi} \sin^2 \alpha d\alpha = \frac{mR^2}{4}. \tag{4}$$

В выражении (4) ρ_2 — плотность, приведенная к единице площади, т. е. $\rho_2 \pi R^2 = m$, m — масса. Верхний индекс «0» в обозначении момента означает, что это момент инерции относительно центра масс.

Для момента инерции J_z однородного цилиндра относительно оси z (полярный момент) в прямоугольной системе координат имеем выражение:

$$J_z = \rho_2 \iint_S r^2 dS = 2\pi \rho_2 \int_0^R r^3 dr = \frac{mR^2}{2}. \tag{5}$$

Приведем такое выражение для момента инерции J_y однородного цилиндра относительно оси y , отстоящей от центра масс, которое будет использовано в дальнейшем и которое будет основано на приведенных выше выражениях.

Момент инерции цилиндра относительно оси y (рис. 3) находится по теореме Кёнига [Журавлев, 2001]:

$$J_y = \overbrace{\rho_3 \pi R^2 \int_{z_1}^{z_2} z^2 dz}^{J_y^{1,2}} + \frac{\rho_3 \pi R^4}{4} \int_{z_1}^{z_2} dz. \tag{6}$$

В этом выражении ρ_3 — объемная плотность, $\rho_3(z_2 - z_1)\pi R^2 = m$.
Из равенства (6) получим выражение для момента J_y :

$$J_y = \underbrace{\frac{m}{3}(z_2^2 + z_1 z_2 + z_1^2)}_{J_y^{1,2}} + \frac{mR^2}{4}. \quad (7)$$

Величина $J_y^{1,2}$ характеризует отклонение оси вращения от центра масс. Последнее слагаемое в выражении (7) представляет момент инерции однородного диска J_x^0 (4).

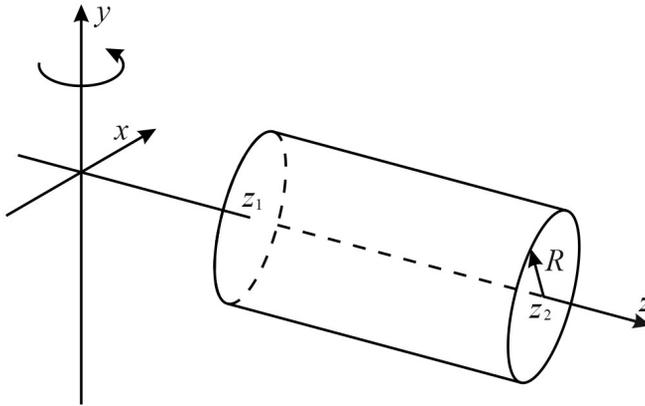


Рис. 3. Момент инерции цилиндра относительно оси y
Fig. 3. The moment of inertia of the cylinder relative to the y axis

Ось z является осью инвариантного вращения (круговая симметрия), следовательно, $J_x = J_y$.

Система уравнений Эйлера движения твердого тела в главных осях инерции, жестко связанных с вращающимся телом (ротором), имеет вид [Трусделл, 1975]:

$$\begin{aligned} J_x \dot{\omega}_x &= (J_y - J_z)\omega_y \omega_z + M_x, \\ J_y \dot{\omega}_y &= (J_z - J_x)\omega_z \omega_x + M_y, \\ J_z \dot{\omega}_z &= (J_x - J_y)\omega_x \omega_y + M_z, \end{aligned} \quad (8)$$

где M_x — момент силы относительно оси x , M_y — момент силы относительно оси y , M_z — момент силы относительно оси z .

В выражениях, которые будут приведены ниже, введены обозначения: $J_y = J_x = J$, $J - J_z = J_0$.

Тогда первое и второе уравнение системы Эйлера имеет вид:

$$J \dot{\omega}_x = J_0 \omega_y \omega_z + M_x, \quad J \dot{\omega}_y = -J_0 \omega_z \omega_x + M_y. \quad (9)$$

Далее будут сформированы допущения, из которых третье уравнение системы Эйлера (8) дает $M_z = 0$. Это означает, что влияние на прецессию вала крутящего момента

на валу нагнетателя, непосредственно связанного с мощностью ГПА, т. е. с мощностью, передаваемой газовому потоку, не учитывается. Для учета прецессии вала и связанного с этим дисбаланса допускается, что вал — твердое тело, а течение газа внутри него влияет лишь на величину крутящего момента M_z . Это допущение в математической модели оправдывается тем, что плотность газового потока значительно ниже, чем плотность материала ротора (металла).

Рассмотрим график прецессии вала нагнетателя газоперекачивающего агрегата в масляном слое подшипника скольжения, характерный для отсутствия отложений (рис. 4).

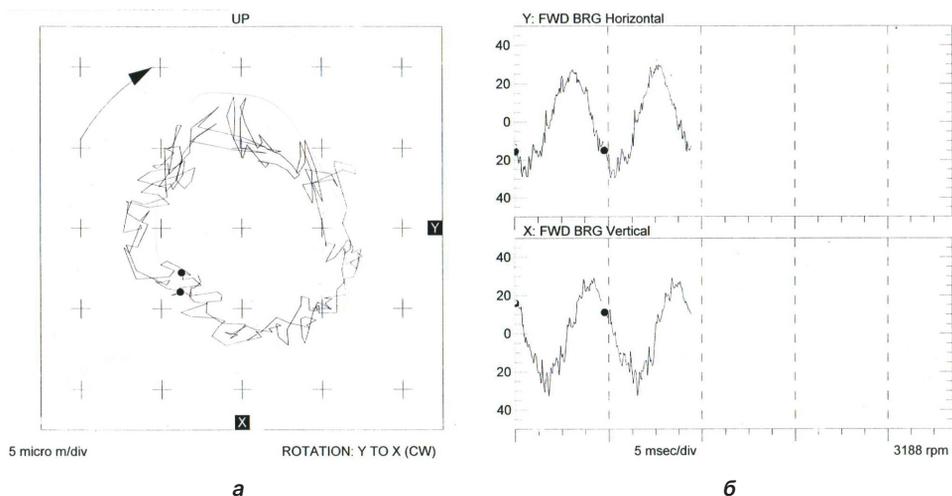


Рис. 4. График прецессии (плавания) вала нагнетателя газоперекачивающего агрегата в масляном слое подшипника скольжения, характерный для отсутствия отложений: а — траектория прецессии (плавания) вала; б — зависимость координат смещения вала от времени. Стрелка показывает направление вращения вала, а расхождение точек — нестабильность траектории

Fig. 4. The graph of precession (swimming) of the shaft of the gas pumping unit supercharger in the oil layer of the sliding bearing, characteristic of the absence of deposits: а — is the trajectory of precession (swimming) of the shaft; б — is the dependence of the coordinates of the shaft displacement on time. The arrow indicates the direction of the shaft rotation, the dots divergence — the trajectory's instability

Проанализируем график прецессии (плавания) вала нагнетателя ГПА в подшипнике скольжения (рис. 4) и сделаем некоторые допущения.

Допущение 1. Радиус δ плавания вала в масляном слое подшипникового узла вследствие прецессии равен 5 мк, т. е. $\delta = 5 \cdot 10^{-6}$ м (рис. 4а), расстояние между отметками на размерной сетке равно 5 мк.

Исходя из (рис. 4б), определим частоту вращения вала ν в Гц:

$$\nu = \frac{n}{60} = \frac{3188}{60} \approx 53 \text{ Гц.}$$

Тогда находим период обращения:

$$T = \frac{1}{\nu} \approx 0,018 \text{ с.}$$

Для угловой скорости собственного вращения вала имеем:

$$\omega = 2\pi\nu \approx 333 \text{ рад/с.}$$

Отметим, что из рис. 4б также можно определить период прецессии. Он приблизительно равен 0,019 с, т. е. приблизительно равен T .

Допущение 2. $\dot{\psi} = \text{const} \approx \omega$ — угол прецессии вала. Из рис. 4б видно, что основная мода — это почти гармонические колебания с оборотной частотой ω .

Допущение 3. Траектория прецессии вала близка к окружности, поэтому можно сделать следующие допущения, формулируемые в виде приближенных равенств:

$$\dot{\varphi} \approx \omega \approx \dot{\psi}, \quad \dot{\theta} \approx 0. \quad (10)$$

Последнее объясняется тем, что кривая (усредненная) траектория прецессии вала (рис. 4а) близка к окружности.

Из уравнений (3) с учетом допущений (10) и $\cos \theta \approx 1$ получим:

$$\begin{aligned} \omega_x &\approx \omega \sin \varphi \sin \theta, \\ \omega_y &\approx -\omega \cos \varphi \sin \theta, \\ \omega_z &\approx \omega + \omega \cos \theta \approx 2\omega. \end{aligned} \quad (11)$$

Дифференцирование выражений (11) по времени с учетом указанных допущений дает (далее знак приближенного равенства указывает на использование этих допущений):

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_x &= \omega (\dot{\varphi} \cos \varphi \sin \theta + \dot{\theta} \sin \varphi \cos \theta) \approx \omega^2 \sin \theta \cos \varphi, \\ \dot{\omega}_y &= \omega (\dot{\varphi} \sin \varphi \sin \theta - \dot{\theta} \cos \varphi \cos \theta) \approx \omega^2 \sin \theta \sin \varphi, \\ \dot{\omega}_z &\approx 0, \text{ следовательно, } M_z = 0. \end{aligned}$$

Тогда с учетом этих равенств из системы уравнений (9) получим:

$$\begin{aligned} J\omega^2 \sin \theta \cos \varphi &= -2J_0\omega^2 \sin \theta \cos \varphi + M_x, \\ J\omega^2 \sin \theta \sin \varphi &= -2J_0\omega^2 \sin \theta \sin \varphi + M_y. \end{aligned}$$

Для момента силы, обуславливающей прецессию вала, имеем:

$$M = M_x \cos \varphi + M_y \sin \varphi = (J + 2J_0)\omega^2 \sin \theta = F_p L, \quad (12)$$

где F_p — прецессионная сила, L — расстояние между опорами подшипников ротора.

С учетом равенства $J + 2J_0 = J + 2(J - J_z) = 3J - 2J_z$ для силы F_p имеем выражение:

$$F_p = \frac{(3J - 2J_z)\omega^2}{L} \sin \theta.$$

Для приближенной оценки этой силы разбиваем ротор на 14 аппроксимирующих цилиндров (рис. 5).

Масса и размер каждого цилиндра ротора нагнетателя приведены в табл. 1.

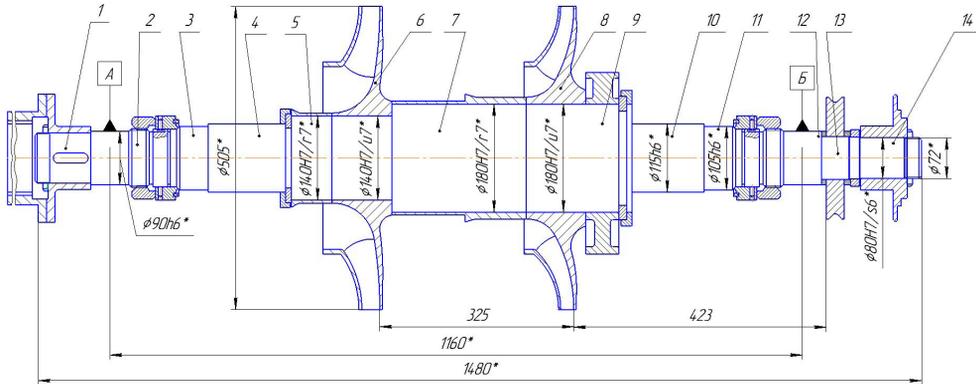


Рис. 5. Ротор центробежного нагнетателя, разбитый на 14 аппроксимирующих цилиндров

Fig. 5. The rotor of the centrifugal supercharger, divided into 14 approximating cylinders

Табл. 1. Размер и масса элементов ротора нагнетателя

Table 1. Size and mass of the supercharger rotor elements

№	Размер цилиндра, м	Вес, кг
1	0,080 × 0,092	3,63
2	0,090 × 0,142	7,09
3	0,010 × 0,050	3,08
4	0,105 × 0,140	9,51
5	0,140 × 0,052	6,28
6	0,320 × 0,115	72,57
7	0,180 × 0,220	43,92
8	0,320 × 0,115	72,57
9	0,180 × 0,800	15,97
10	0,115 × 0,120	9,78
11	0,105 × 0,050	3,40
12	0,090 × 0,140	6,99
13	0,080 × 0,045	1,77
14	0,072 × 0,120	3,83

Используя формулу (5) и данные табл. 1, найдем моменты инерции цилиндров J_{zi} относительно оси z .

Используя формулу (6) и круговую симметрию, найдем моменты инерции J_{xi} цилиндров относительно оси x .

Табл. 2. Моменты инерции аппроксимирующих цилиндров относительно оси z и x
Table 2. Moments of inertia of the approximating cylinders relative to the z and x axes

№ цилиндра	Момент инерции (J_{zi} , кг · м ²) отн-но	
	оси z	оси x
1	0,0029	1,7549
2	0,0072	2,3800
3	0,0038	0,7166
4	0,0131	1,4493
5	0,0153	0,5390
6	0,9789	3,6540
7	0,1778	0,3346
8	0,9289	1,7334
9	0,0647	1,0450
10	0,0149	1,1885
11	0,0046	0,5736
12	0,0070	1,8011
13	0,0014	0,6340
14	0,0024	1,7794

$$J_z = \sum_{i=1}^{14} J_{zi} = 2,1734 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ — общий момент инерции относительно оси } z.$$

$$J_x = \sum_{i=1}^{14} J_{xi} = 19,5836 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ — общий момент инерции относительно оси } x.$$

$$3J > 2J_z.$$

Для F_p , т. е. силы, обуславливающей прецессию вала (как следствие дисбаланса), принимая $\omega = 333 \text{ рад/с}$ (рис. 4б) и учитывая приближенное равенство $\sin \theta \approx \theta \approx 2\delta/L$, где $\delta = 5 \cdot 10^{-6} \text{ м}$ (рис. 4а), а $L = 1,16 \text{ м}$ (рис. 5), получим:

$$F_p = \frac{(3J - 2J_z)\omega^2}{L} \sin \theta = 45,28 \text{ Н}.$$

Рассмотрим график прецессии вала нагнетателя газоперекачивающего агрегата в масляном слое подшипника скольжения, характерный для неравномерного расположения отложений по ступеням сжатия (рис. 6).

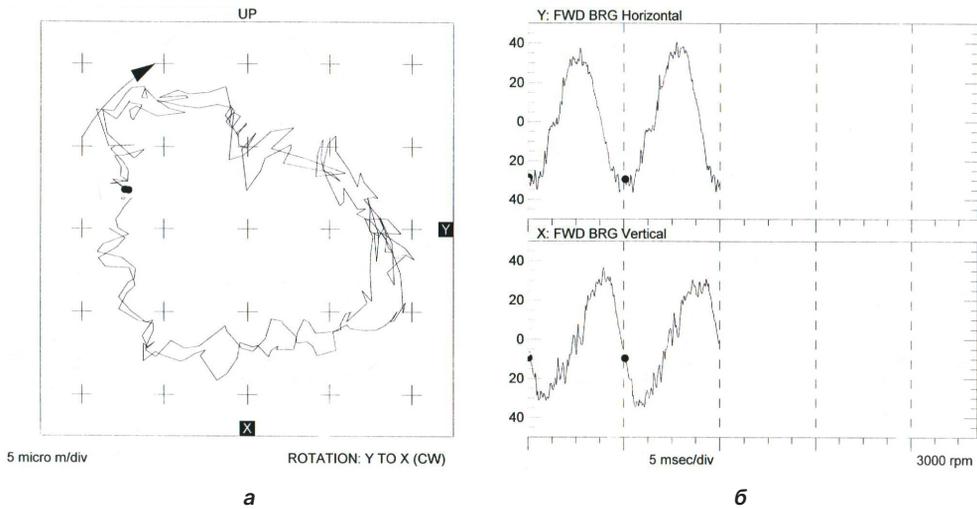


Рис. 6. График прецессии (плавания) вала нагнетателя газоперекачивающего агрегата в масляном слое подшипника скольжения, характерный для неравномерного расположения отложений по ступеням сжатия: а — траектория прецессии (плавания) вала; б — зависимость координат смещения вала от времени

Fig. 6. The precession (swimming) graph for the shaft of the gas pumping unit supercharger in the oil layer of the sliding bearing, characteristic of the uneven arrangement of deposits along the compression stages: а — the precession (swimming) trajectory of the shaft; б — the dependence of the shaft's displacement coordinates on time

Исходя из рис. 6а, средний радиус δ плавания вала в масляном слое подшипникового узла вследствие прецессии равен 8 мк, т. е. $\delta = 8 \cdot 10^{-6}$ м, а максимальное значение прецессии может достигать 10 мк.

Из рис. 6б определим частоту вращения вала ν в Гц:

$$\nu = \frac{n}{60} = \frac{3000}{60} \approx 50 \text{ Гц.}$$

Для угловой скорости собственного вращения вала имеем:

$$\omega = 2\pi\nu \approx 314 \text{ рад/с.}$$

Допущения, сделанные для рис. 4, справедливы и для рис. 6. Считаем, что отложения существенно изменяют радиус δ плавания вала в масляном слое подшипникового узла ввиду увеличения дисбаланса, при этом они несущественно меняют массу ротора, и значения табл. 1 остаются прежними, вследствие чего моменты инерции J_x и J_z также можно считать неизменными.

Тогда значение силы F_p , обуславливающей прецессию вала:

$$F_p = \frac{(3J - 2J_z)\omega^2}{L} \sin\theta = 64,42 \text{ Н.}$$

Можно полагать, что сила, возникающая при прецессии ротора, оказывает динамическую нагрузку на подшипниковые узлы, что приводит к появлению вибраций вблизи значения оборотной частоты. Это проявляется на таких измерительных данных, как траектория плавания вала (рис. 6).

Результаты и обсуждение

Увеличение толщины слоя отложений до нескольких миллиметров (рис. 1) влечет за собой увеличение силы F_p , которая непосредственно связана с дисбалансом ротора (вала нагнетателя ГПА). На графике траектории прецессии вала это проявляется в виде увеличения усредненного радиуса плавания вала δ (см. рис. 4 по сравнению с рис. 6), а следовательно, и угла θ .

Увеличение же значения силы F_p (с увеличением угла θ) приводит к увеличению вибраций на оборотной частоте, т. к. эта сила постоянна в системе координат, жестко связанной с валом (12).

Корреляция между вибрационными измерениями на двух опорных подшипниках вала (переднем и заднем) дает ожидаемый диагностический признак увеличения слоя отложений — максимум корреляционной функции на полпериода оборота вала.

При отсутствии возможности таких корреляционных измерений менее существенным диагностическим признаком увеличения слоя отложений может быть увеличение радиуса траектории плавания вала δ (рис. 6).

Заключение

Рассмотрена динамическая модель прецессии вала центробежного нагнетателя газоперекачивающего агрегата с двумя ступенями сжатия и подшипниками скольжения. Проведена приближенная оценка силы дисбаланса, возникающей вследствие неравномерности отложений на двух ступенях сжатия (двух рабочих колесах нагнетателя природного газа). Рассчитанные характеристики соотнесены с данными измерений на газоперекачивающем агрегате в процессе его эксплуатации. В работе получены выражения для силы, создающей дисбаланс ротора. Результаты исследования могут быть использованы для диагностики отложений на рабочих колесах нагнетателя.

Следует отметить, что помимо дисбаланса, вызванного неравномерностью распределения отложений по ступеням сжатия, которая обуславливает прецессию вала, существенное влияние могут оказывать неравномерность распределения отложений по каналам рабочего колеса первой ступени. Учет этой неравномерности, сводящийся к отказу от допущения $M_z = 0$, является предметом дальнейшего исследования дисбаланса ротора нагнетателя.

Список источников

- Байков И. Р., Смородов Е. А., Смородова О. В. 1999. Генерация сверхнизких частот при работе газоперекачивающих агрегатов и их влияние на спектр вибрации // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 4. С. 62–67.

- Воробьева С. В., Смирнова В. О. 2007. Машины, агрегаты и процессы для предотвращения, перехвата, концентрирования и удаления отложений на контактных поверхностях // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 3 (63). С. 58–65.
- Гадяка В. Г., Лазаренко А. Д., Марцинковский В. С., Юрко В. И. 2017. Сравнительная оценка применения магнитных подшипников и подшипников скольжения в центробежных компрессорах // Компрессорная техника и пневматика. № 6. С. 39–44.
- Герике Б. А. 2006. Диагностика технического состояния энергомеханического оборудования на основе анализа прецессии ротора // Вибрация машин: измерение, снижение, защита. № 1. С. 40–44.
- Голубев Ю. Ф. 2000. Основы теоретической механики: учеб. М.: Московский гос. ун-т им. М. В. Ломоносова. 719 с.
- Дадонов Д. Д. 2021. Исследование и совершенствование метода очистки проточных частей ГТД // Аллея науки. Том 1. № 11 (62). С. 116–122.
- Егоров А. Г., Шарфеев Р. Ф., Сагбиев И. Р. 2021. Применение инновационного метода очистки сменной проточной части центробежного компрессора ГПА без остановки на ремонт // Компрессорная техника и пневматика. № 4. С. 41–44.
- Ефимов В. В., Халиулин Д. В., Халиулина Л. Э. 2018. Осложнение очистки промысловой продукции сеноманской залежи Ямбургского месторождения на завершающей стадии разработки // Наука и образование сегодня. № 12 (35). С. 17–21.
- Журавлев В. Ф. 2001. Основы теоретической механики. 2-е изд., испр., перераб. М.: Наука. 320 с.
- Кунина П. С., Величко Е. И., Степанов М. С., Бунякин А. В., Музыкантова А. В., Кесова Е. Ф., Шиян С. И. 2018. Влияние отложений на лопатках на работу нагнетателя газоперекачивающего агрегата // Нефть. Газ. Новации. № 5. С. 55–57.
- Лурье А. И. 1961. Аналитическая механика. М.: Физматгиз. 824 с.
- Манькина Н. Н., Овечкина О. В., Загретдинов И. Ш. 2005. Опыт применения парокислородной очистки, пассивации и консервации проточных частей паровых турбин // Теплоэнергетика. № 2. С. 47–52.
- Мормуль Р. В., Павлов Д. А., Сальников А. Ф. 2018. Вибродиагностика и структурный анализ исследования нелинейных динамических процессов роторных турбомашин с магнитным подвесом // Дефектоскопия. № 7. С. 37–44. <https://doi.org/10.1134/S0130308218070059>
- Перевощиков С. И. 2020. Анализ методик параметрической диагностики технического состояния центробежных нагнетателей природного газа // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. № 6 (144). С. 99–106. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2020-6-99-106>
- Поздеева А. М., Петроченков А. Б. 2020. Методы технической диагностики центробежного нагнетателя на газоперекачивающем агрегате // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. Том 1. С. 40–49.
- Саяхов Р. Х., Футин В. А. 2020. Балансировка ротора осевого компрессора и турбины высокого давления стационарной газотурбинной установки в условиях компрессорной станции // Компрессорная техника и пневматика. № 2. С. 31–33.
- Стуликов Д. А., Ефимов В. В. 2017. Совершенствование технологического процесса подготовки газа // Научный форум. Сибирь. Том 3. № 1. С. 12–13.
- Тарг С. М. 2010. Краткий курс теоретической механики: учеб. для студ. техн. вузов. Изд. 20-е, стер. М.: Высшая школа. 416 с.

- Трусделл К. 1975. Первоначальный курс рациональной механики сплошных сред / пер. с англ. Р. В. Гольдштейна, В. М. Ентова; под ред. П. А. Жилина, А. И. Лурье. М.: Мир. 592 с.
- Уиттекер Э. Т. 2004. Аналитическая динамика / пер. с англ. И. Г. Малкина. Изд. 2-е, испр. М.: УРСС. 500 с.
- Якимов Д. Е., Хуснутдинов И. Ф., Футин В. А. 2019. Доводка центробежного нагнетателя 7ГЦ2-660/56-76 УХЛ 3.1 газоперекачивающего агрегата ГПА-Ц-25НК.РС мощностью 25 МВт // Компрессорная техника и пневматика. № 2. С. 38–41.

References

- Baykov, I. R., Smorodov, E. A., & Smorodova, O. V. (1999). Generation of ultra-low frequencies during operation of gas pumping units and their effect on the vibration spectrum. *Oil and Gas Studies*, (4), 62–67. [In Russian]
- Vorobyova, S. V., & Smirnova, V. O. (2007). Machines, aggregates and processes for the prevention, interception, concentration and removal of deposits on contact surfaces. *Oil and Gas Studies*, (3), 58–65. [In Russian]
- Gadyaka, V. G., Lazarenko, A. D., Martsynkovskyy, V. S., & Yurko, V. I. (2017). The comparison of magnet and thrust bearings usage in centrifugal compressors. *Compressors and Pneumatics*, (6), 39–44. [In Russian]
- Gericke, B. L. (2006). Diagnostics of the technical condition of power-mechanical equipment based on the analysis of the precession of the rotor. *Machine Vibration: Measurement, Reduction, Protection*, (1), 40–44. [In Russian]
- Golubev, Yu. F. (2000). *Textbook on Fundamentals of Theoretical Mechanics*. Lomonosov Moscow State University. [In Russian]
- Dadonov, D. D. (2021). Research and improvement of the method of cleaning the flow parts of the gas turbine engine. *Alley of Science*, 1(11), 116–122. [In Russian]
- Egorov, A. G., Sharafiev, R. F., & Sagbiev, I. R. (2021). Application of an innovative method of cleaning the replaceable flow part of a turbocompressor of a gas pumping unit without stopping for repair. *Compressors and Pneumatics*, (4), 41–44. [In Russian]
- Efimov, V. V., Khaliulin, D. V., & Khaliulina, L. E. (2018). Complication of cleaning of commercial products of the Cenomanian deposit of the Yamburgskoye field at the final stage of development. *Science and Education Today*, (12), 17–21. [In Russian]
- Zhuravlev, V. F. (2001). *Fundamentals of Theoretical Mechanics*. Nauka. [In Russian]
- Kunina, P. S., Velichko, E. I., Stepanov, M. S., Bunyakin, A. V., Muzykantova, A. V., Kesova, E. F., & Shiyani, S. I. (2018). Effect of blade deposits upon operation of gas compressor booster. *Neft. Gas. Novacii*, (5), 55–57. [In Russian]
- Lurie, A. I. (1961). *Analytical Mechanics*. Fizmatgiz. [In Russian]
- Man'kina, N. N., Ovechkina, O. V., & Zagretidinov, I. S. (2005). Experience from using steam-oxygen flushing, passivation, and preservation for steam turbine flow paths. *Теплоэнергетика*, (2), 47–52. [In Russian] (English version: *Thermal Engineering*, 52(2), 133–138)
- Mormul, R. V., Pavlov, D. A., & Sal'nikov, A. F. (2018). Vibration-based diagnostics and structural analysis of research on nonlinear dynamic processes in maglev-suspension rotor turbomachines. *Defektoskopiya*, (7), 37–44. <https://doi.org/10.1134/S0130308218070059> [In Russian]

- (English version: *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 54(7), 487–494. <https://doi.org/10.1134/S1061830918070057>)
- Perevoschikov, S. I. (2020). Analysis of parametric diagnostics techniques of the technical condition of centrifugal blowers of natural gas. *Oil and Gas Studies*, (6), 99–106. <https://doi.org/10.31660/0445-0108-2020-6-99-106> [In Russian]
- Pozdeeva, A. M., & Petrochenkov, A. B. (2020). Methods of technical diagnostics of a centrifugal supercharger on a gas pumping unit. *Energetika. Innovative Directions in the Energy Sector. CALS-Technologies in The Energy Sector*, 1, 40–49. [In Russian]
- Salyahov, R. H., & Futin, V. A. (2020). Balancing of axial compressor rotor and high turbine pressure of stationary gas turbine plant under conditions of compressor station. *Compressors and Pneumatics*, (2), 31–33. [In Russian]
- Stulikov, D. A., & Efimov, V. V. (2017). Improvement of the technological process of gas preparation. *Scientific Forum. Siberia*, 3(1), 12–13. [In Russian]
- Targ, S. M. (2010). *A Short Course in Theoretical Mechanics: A Textbook for Students of Technical Universities*. Vysshaya shkola. [In Russian]
- Truesdell, K. (1975). *A First Course in Rational Continuum Mechanics*. Mir. [In Russian] (Original work published 1972, Johns Hopkins University)
- Whittaker, E. T. (2004). *A Treatise on the Analytical Dynamics of Particles and Rigid Bodies* (I. G. Malkin, Trans.; 2nd rev. ed.). URSS. [In Russian] (Original work published 1904, Cambridge University Press)
- Yakimov, D. E., Khusnutdinov, I. F., & Phutin, V. A. (2019). Final adjustment of a centrifugal supercharger 7GC2-660 / S6-76 UHL 3.1 of a gas compressor unit GPA-C-25NK.R.S of “Zavoizhskaya” CS with a capacity of 25 MW. *Compressors and Pneumatics*, (2), 38–41. [In Russian]

Информация об авторах

Михаил Сергеевич Степанов, старший преподаватель, кафедра газонефтегазотранспортных систем и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Институт нефти, газа и энергетики, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия m.s.stepanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0513-2681>

Алексей Вадимович Бунякин, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра математических и компьютерных методов, Факультет математики и компьютерных наук, Кубанский государственный университет, Краснодар, Россия alex.bunyakin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1849-1667>

Гани Гайсинович Гилаев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой нефтегазового дела имени профессора Г. Т. Вартумяна, директор Института нефти, газа и энергетики, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия gggilaev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9461-1512>

Владислав Игоревич Дунаев, доктор физико-математических наук, профессор, кафедра газонефтегазотранспортных систем и оборудования нефтяной и газовой промышленности, Институт нефти, газа и энергетики, Кубанский государственный технологический университет, Краснодар, Россия dunayev1964@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4166-6808>

Information about the authors

Mikhail S. Stepanov, Senior Lecturer, Department of Gas and Oil Transportation Systems and Equipment of the Oil and Gas Industry, Institute of Oil, Gas and Power Engineering, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
m.s.stepanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0513-2681>

Alexey V. Bunyakin, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Mathematical and Computer Methods, Faculty of Computer Technology and Applied Mathematics, Kuban State University, Krasnodar, Russia
alex.bunyakin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1849-1667>

Gani G. Gilaev, Dr. Sci. (Tech.), Professor, Head of the Department of Oil and Gas named after Professor G. T. Vartumyan, Director of the Institute of Oil, Gas and Power Engineering, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
gggilaev@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9461-1512>

Vladislav I. Dunaev, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Gas and Oil Transportation Systems and Equipment of the Oil and Gas Industry, Institute of Oil, Gas and Power Engineering, Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia
dunayev1964@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4166-6808>

Анализ точности решения задачи двухфазной фильтрации с применением методов нейросетевого моделирования

Роман Юрьевич Пономарев¹, Владимир Евгеньевич Вершинин^{1,2}✉,
Анастасия Сергеевна Ковалькова¹

¹ Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

² Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: ve_vershinin2@tnnc.rosneft.ru✉

Аннотация. При проектировании разработки нефтегазовых месторождений требуется применение методов математического моделирования для выбора оптимального варианта разработки месторождений. Одной из важных задач является моделирование динамики обводнения добывающих скважин при действующей системе поддержания пластового давления. Целевыми параметрами для моделирования является время прорыва воды в добывающую скважину и величина обводнения продукции в момент прорыва. На практике подобные расчеты проводят на гидродинамических 3D-симуляторах, основанных на численном решении дифференциальных уравнений фильтрации. Точность численного моделирования при этом очень сильно зависит от качества построения сеточной области расчета, которая, в свою очередь, существенно зависит от формы области расчета. Увеличение размеров сеточных блоков, типичное для гидродинамического моделирования, отрицательно сказывается на точности расчета. Одним из альтернативных методов моделирования физических процессов является нейросетевое моделирование. В последнее время широкое распространение находят физически-информированные нейронные сети, способные с высокой точностью аппроксимировать точные решения дифференциальных уравнений. Ключевой особенностью такого подхода является организация процесса обучения нейронной сети как на точно известных начальных и граничных значениях, так и на выполнении заранее определенных систем дифференциальных и алгебраических уравнений. Обученная нейронная сеть в таком случае позволяет вычислить значение искомых величин в любой точке из области определения, а не только в узловых точках, как происходит при использовании конечно-разностных способов решения. Целью работы является

исследование возможностей нейросетевого подхода к решению задач двухфазной фильтрации в крупномасштабном приближении и оценка точности получаемых решений. В работе приводится сравнительный анализ решений одномерной задачи Бакли — Леверетта, имеющей точное решение. Рассмотрены три метода получения решений: точное аналитическое решение, численное решение, полученное конечно-разностными методами, и бессеточная нейросетевая аппроксимация на основе физически информированной нейросети. В качестве конечно-разностного метода использовался метод *upwind*, позволяющий наиболее точно воспроизводить скачки насыщенности. В качестве физически-информированной нейронной сети использовался многослойный персептрон с двумя видами функций активации. Для определения положения скачка насыщенности требуется включение в функционал ошибки дополнительного условия, соответствующего закону сохранения массы на скачке. Результаты расчета показали, что после обучения нейросетевое решение способно с высокой точностью воспроизводить эволюцию волн разряжения и скачков насыщенности. Плотность расположения узлов обучающей выборки может быть уменьшена без значимого снижения точности нейросетевой аппроксимации. Полученные результаты могут быть использованы при разработке гибридных алгоритмов моделирования процессов вытеснения нефти.

Ключевые слова: машинное обучение, физико-информированные нейронные сети, PINN, искусственная нейронная сеть, задача Бакли — Леверетта

Цитирование: Пономарев Р. Ю., Вершинин В. Е., Ковалькова А. С. 2024. Анализ точности решения задачи двухфазной фильтрации с применением методов нейросетевого моделирования // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 4 (40). С. 95–113. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-95-113>

Поступила 17.10.2024; одобрена 26.11.2024; принята 16.12.2024

Accuracy analysis of solving two-phase filtration problem using neural network modeling methods

Roman Yu. Ponomarev¹, Vladimir E. Vershinin^{1,2}✉, Anastasia S. Kovalkova¹

¹ Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia

² University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: ve_vershinin2@tnnc.rosneft.ru✉

Abstract. When designing the development of oil and gas fields, the use of mathematical modeling methods is required to select the optimal option for field development.

One of the key tasks is to simulate the dynamics of flooding producing wells with an operating reservoir pressure maintenance system. The target modeling parameters include the time of water breakthrough into the producing well and the amount of product flooding at the breakthrough time. Practically, such calculations are performed on 3D hydrodynamic simulators based on the numerical solution of differential filtration equations. The accuracy of numerical modeling in this case largely depends on the quality of constructing the grid calculation area, while the quality significantly depends on the shape of the calculation area. The increase in the size of grid blocks, typical for hydrodynamic modeling, has a negative effect on the calculation accuracy. One of the alternative methods of modeling physical processes is neural network modeling. A recent widespread method is physically informed neural networks capable of approximating exact solutions of differential equations with high accuracy. The key feature of this approach is organizing neural network learning process both on precise initial and boundary values, as well as on the execution of predefined systems of differential and algebraic equations. In this case, a trained neural network can calculate desired values at any point in the definition area, and not only at the nodal points when using finite difference solutions. Thus, this works aims to develop neural network methods for calculating phase saturation in large-scale modeling of two-phase filtration; and to evaluate the accuracy of the solutions obtained. The article provides a comparative analysis of solutions to the one-dimensional Buckley–Leverett problem. Three methods of obtaining solutions are considered: an exact analytical solution; a numerical solution obtained by finite difference methods; and a grid-less neural network approximation based on a multilayer perceptron model. The upwind method was used as a finite difference method, which provides the most accurate reproduction of saturation changes. A multilayer perceptron with two types of activation functions was used as a physically informed neural network. An additional condition, which corresponds to the law of conservation of mass at the jump, needed to be included in the error functional in order to determine the position of the saturation jump. The results showed that after training, the neural network solution can reproduce the evolution of rarefaction waves and saturation jumps with high accuracy. The nodes density of the training sample can be reduced without significantly reducing the accuracy of the neural network approximation. The results obtained can be used in the development of hybrid algorithms for modeling oil displacement processes.

Keywords: machine learning, physically informed neural networks, PINN, artificial neural network, Buckley–Leverett problem

Citation: Ponomarev, R. Yu., Vershinin, V. E., & Kovalkova, A. S. (2024). Accuracy analysis of solving two-phase filtration problem using neural network modeling methods. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(4), 95–113. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-95-113>

Received Oct. 17, 2024; Reviewed Nov. 26, 2024; Accepted Dec. 16, 2024

Введение

При проектировании разработки нефтегазовых месторождений требуется применение методов математического моделирования для выбора оптимального варианта разработки месторождений. Одной из важных задач является моделирование динамики обводнения добывающих скважин при действующей системе поддержания пластового давления. Целевыми параметрами для моделирования является время прорыва воды в добывающую скважину и величина обводнения продукции в момент прорыва. Процесс двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей при условии пренебрежения капиллярными силами и сжимаемостью флюидов описывается системой уравнений, получившей название «задача Бакли — Леверетта» [Басниев и др., 1993]. Задача Бакли — Леверетта дает приближенное решение, обычно используемое для оценки времени прорыва воды и средней нефтенасыщенности в пласте.

На практике подобные расчеты проводят на гидродинамических 3D-симуляторах, основанных на численном решении дифференциальных уравнений фильтрации. Точность численного моделирования очень сильно зависит от размеров ячеек и качества построения сеточной области расчета, которая, в свою очередь, существенно зависит от формы области расчета [Овчаров, 2014].

Одним из альтернативных методов прогнозирования физических процессов является нейросетевое моделирование. В его основе лежит процесс обучения нейронной сети (НС) на точно известных значениях искомой функции. А. Н. Колмогоровым [1957] показано, что теоретически НС могут воспроизвести практически любую сложную немонотонную функцию многих переменных. Это делает НС универсальным аппроксиматором и придает методу универсальный характер. По сравнению с традиционными конечно-разностными методами на основе сеток, машинное обучение представляет собой бессеточный метод аппроксимации искомого решения. Используя различные типы НС можно успешно прогнозировать работу добывающих и нагнетательных скважин на месторождениях [Иваненко, 2014; Бриллиант и др., 2017, 2019, 2020; Vershinin и др., 2020; Ponomarev, Vershinin, 2021]. При этом для высокой точности прогнозирования требуется значительный объем входных данных о режимах работы скважин. Источником такого количества данных может являться, например, адаптированная на историю добычи цифровая модель месторождения. Однако в целом ряде задач краткосрочного прогнозирования подобный подход неприменим по причине недостаточной детализации и точности цифровых моделей. В таком случае наблюдаемых данных о режиме работы скважин оказывается недостаточно для обучения НС, и в качестве дополнительного источника данных может выступать система дифференциальных уравнений, описывающая процесс фильтрации. Подход к обучению НС, основанный на выполнении как граничных (начально-краевых) условий, так и систем дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих физические свойства модели, называется физико-информированным. Такого рода НС называют физико-информированными нейронными сетями (physical informed neural network, PINN). Это направление в последнее время получило достаточно широкое развитие и всё чаще используется при нахождении приближенного

нейросетевого решения краевых задач для дифференциальных уравнений [Васильев и др., 2015, 2016; Коваленко и др., 2017; Хайкин, 2019; Зрелова, Ульянов, 2022; Вершинин, Пономарев, 2023].

Уравнение Бакли — Леверетта относится к дифференциальным уравнениям в частных производных гиперболического типа первого порядка. Его решение представляется в виде волны, участки которой движутся с различной скоростью, что может приводить к формированию скачков насыщенности, на которых уравнение не выполняется [Басниев и др., 1993]. Это создает определенные сложности при построении приближенных аппроксимаций решения. Проблема построения решений с разрывом применительно к задачам теории фильтрации представляется актуальной и активно изучается исследователями. Например, рассмотрено применение PINN-сетей для решения одномерной задачи Бакли — Леверетта [Fuks, Tchelerpi, 2020]. При этом авторами не раскрыт механизм формирования скачка насыщенности в нейросетевом решении, что является одной из ключевых особенностей в моделировании распределения водонасыщенности. В других работах [Gasmı, Tchelerpi, 2021, 2022] авторы попытались обойти проблему формирования и последующего движения разрыва-скачка за счет введения диффузионных слагаемых. При этом задача изменяет свой тип и становится задачей параболического типа с размыванием скачка.

В данной работе приводится сравнительный анализ точности решений классической задачи Бакли — Леверетта, получаемых различными методами. Рассмотрены три вида решений: точное аналитическое решение, численное конечно-разностное решение и бессеточная нейросетевая аппроксимация на основе модели многослойного перцептрона.

Моделирование процесса вытеснения нефти

Рассмотрим одномерную задачу двухфазной фильтрации в прямолинейном горизонтальном образце. В начальный момент времени образец полностью заполнен нефтью, водонасыщенность (s_w) равна нулю. В начальный момент времени происходит закачка воды, что выражается в скачкообразном изменении водонасыщенности (рис. 1). Фильтрация происходит в области $x > 0$. Цель — смоделировать распространение водонасыщенности в пласте в различные моменты времени. Функции фазовых проницаемостей задавались с помощью корреляции Кори (1); они имеют вид, представленный на рис. 2.

$$K_{rw} = K_{rwr} \cdot s_w^{N_w}, \quad K_{ro} = K_{rot} \cdot (1 - s_w)^{N_o}, \quad (1)$$

где s_w — водонасыщенность; $K_{rwr} = 1$ — относительная проницаемость воды при остаточной нефтинасыщенности; $K_{rot} = 1$ — относительная проницаемость нефти при критической водонасыщенности; $N_w, N_o = 2$ — параметры модели Кори.

Процесс вытеснения нефти водой описывается гиперболическим дифференциальным уравнением Бакли — Леверетта [Aziz, Settari, 1979; Басниев и др., 1993]:

$$m \frac{\partial s_w}{\partial t} + V(t) \cdot f'(s_w) \frac{\partial s_w}{\partial x} = 0, \quad f(s_w) = \frac{K_{rw}}{K_{rw} + \eta K_{ro}}, \quad (2)$$

где m — пористость; s_w — водонасыщенность; V — скорость закачки флюида; $f(s_w)$ — функция Бакли — Лаверетта; $\eta = (\eta_w/\eta_o) = 1$ — соотношение вязкостей воды (η_w) и нефти (η_o), а $f'(s_w)$ — ее производная (рис. 3).

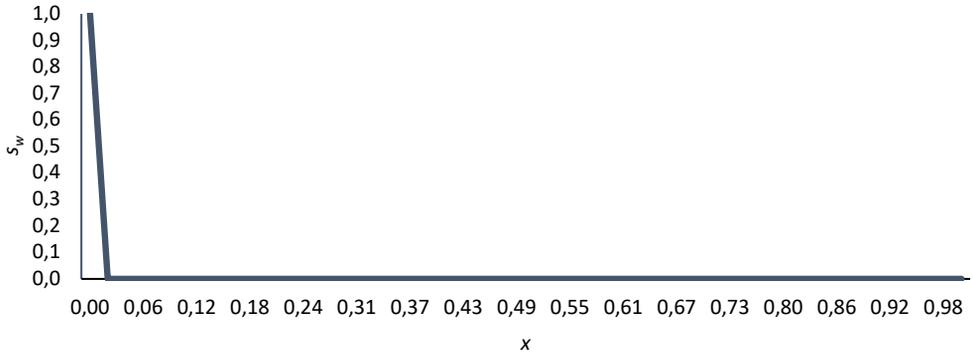


Рис. 1. Начальное насыщение водой

Fig. 1. Initial water saturation

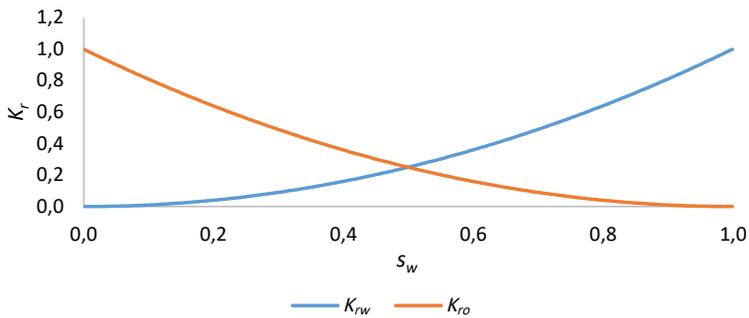


Рис. 2. Фазовые проницаемости

Fig. 2. Functions of relative phase permeabilities

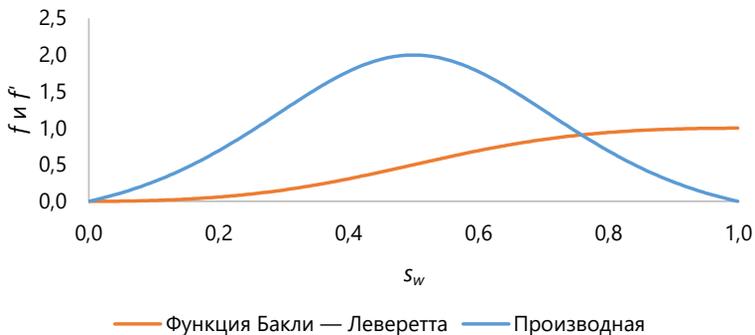


Рис. 3. Функция Бакли — Лаверетта и ее производная при $\eta = 1$

Fig. 3. The Buckley-Leverett function and its derivative at $\eta = 1$

Уравнение (2) независимо от вида начальных и граничных условий имеет точное решение для одномерного случая, получаемое методом характеристик [Басниев и др., 1993]:

$$x(s_w) = \frac{V(t)}{m} f'(s_w) t + x_0. \quad (3)$$

Аналитическое решение (3) при начально-граничных условиях, соответствующих рис. 1, дает «нефизичное» многозначное поведение водонасыщенности (рис. 4а). В некоторых точках пласта одному значению координаты соответствуют три значения водонасыщенности. Искусственное введение скачка насыщенности позволяет устранить многозначность решения (рис. 4б).

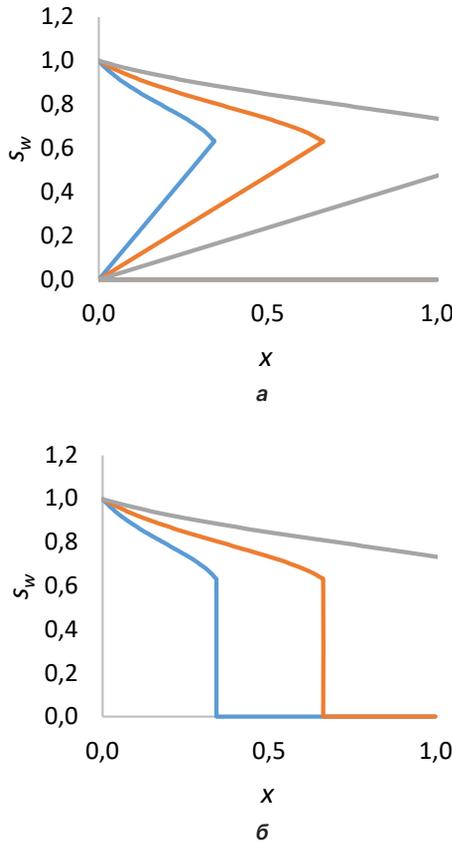


Рис. 4. Аналитическое решение задачи Бакли — Леверетта: а — до введения скачка насыщенности; б — после введения скачка

Fig. 4. Analytical solution of the Buckley–Leverett problem: а — before the introduction of the saturation jump; б — after the introduction of the jump

Определение положения скачка и его величина определяются исходя из условия Ренкина — Гюгоньо, выражающего закон сохранения массы [Басниев и др., 1993].

При многомерной фильтрации аналитическое решение вида (2) остается справедливым вдоль линий тока, определение положения которых представляется отдельной нетривиальной задачей [Баренблатт и др., 1984]. Поэтому на практике при трехмерном случае задачи многофазной фильтрации решают численными конечно-разностными методами с привлечением сеточного разбиения, точность которого зависит от численной схемы и параметров сеточной области. В литературе приводится анализ различных численных схем для моделирования решения задачи Бакли — Леверетта [Aziz, Settari, 1979]. Одним из наиболее точных является численный метод upwind.

Сравнение численного решения, полученного на сеточной области с разбиением 50 точек по x и 100 точек по t , с точными расчетами для одномерного случая представлено на рис. 5. Шаг по координате 0,2 м. Шаг по времени 0,2 с.

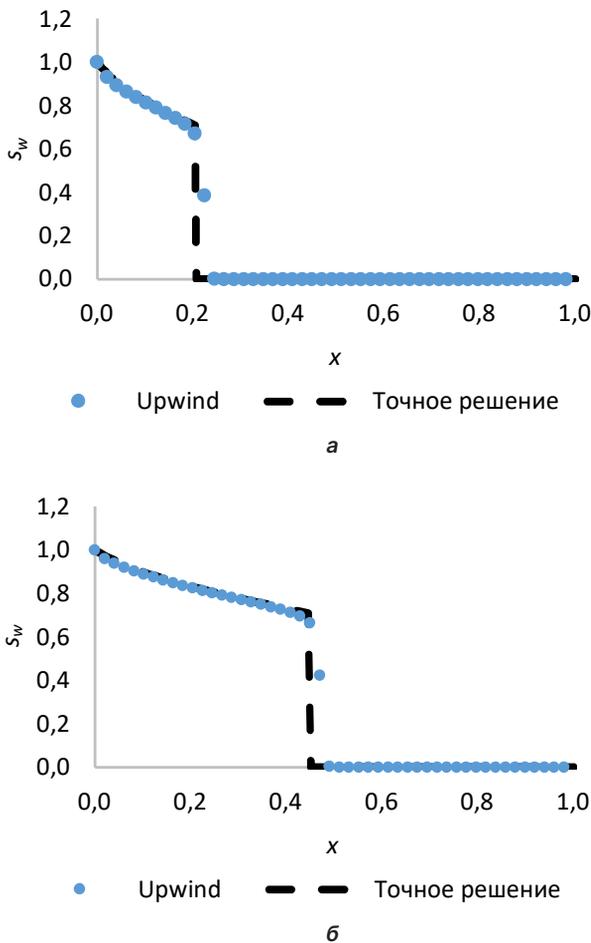


Рис. 5. Сравнение численного и аналитических решений: а — $t = 0,17$ с; б — $t = 0,37$ с, $\eta = 1$

Fig. 5. Comparison of numerical and analytical solutions: а — $t = 0.17$ s; б — $t = 0.37$ s, $\eta = 1$

При анализе графиков на рис. 5 видно, что положение и высота фронта водонасыщенности при численном решении на сетке с размером ячеек 0,2 м соответствует точному решению. Важно отметить, что при увеличении размеров расчетных ячеек происходит размытие скачка и возрастает погрешность в определении времени прорыва воды, а также конечной средней нефтенасыщенности [Овчаров, 2014]. Эта проблема становится весьма значимой в задачах гидродинамического моделирования с размерами ячеек в десятки и сотни метров и делает актуальной задачу поиска методов, нечувствительных к размерам ячеек.

Нейросетевая аппроксимация уравнения Бакли — Леверетта

Для реализации нейросетевой аппроксимации в целом используется методика обучения, описанная авторами ранее [Вершинин, Пономарев, 2023]. Ключевой особенностью задачи обучения PINN — нейронной сети является высокая сложность вывода и расчета производных, необходимых для выполнения дифференциального уравнения. В данной работе в отличие от предыдущей [Вершинин, Пономарев, 2023] были использованы алгоритмы автоматического дифференцирования, реализованные в открытой библиотеке TensorFlow.

В качестве основной нейросетевой модели для реализации обучения был взят многослойный перцептрон с тангенциальной функцией активации внутренних слоев и сигмоидальной на последнем слое. Гиперпараметры модели, такие как количество слоев и количество нейронов, подбирались при обучении нейронной сети исходя из критерия минимизации ошибки обучения. Оптимальное количество скрытых слоев составило 4, количество нейронов на скрытых слоях — 500–300–300–200 соответственно.

Целевая функция обучения имела вид:

$$loss = \left(m \frac{\partial s_w}{\partial t} + V(t) \cdot f'(s) \frac{\partial s_w}{\partial x} \right)^2 + (s_{w_{\text{ну}}} - s_{t=0})^2 + (s_{w_{\text{гн}}} - s_{x=0})^2 \rightarrow 0, \quad (4)$$

где $s_w = f(x, t)$ — вычисляемая нейросетевая функция; $s_{w_{\text{ну}}}$ — начальная водонасыщенность; $s_{w_{\text{гн}}}$ — водонасыщенность на левой границе. Вид $loss$ -функции соответствует одновременному учету уравнения (2) и начально-краевых условий (см. рис. 1).

Обучение производилось в течение 20 000 эпох на сеточной области размерностью 10 точек по оси координат Ox (шаг 0,1 м) и 20 точек по оси времени t . Время обучения модели занимает порядка 10 минут. Итоговая водонасыщенность, рассчитанная на мелкой сетке с шагом 0,05 м, представлена на рис. 6 и 7.

Из рис. 6 и 7 следует, что обученная на грубой сетке физически информированная нейронная сеть корректно определяет фронтальную водонасыщенность, соответствующую верхней и нижней ветвям многозначного решения (рис. 7а).

Нейросетевое решение, являясь непрерывной функцией, формирует скачок, связывающий эти ветви в области максимума производной функции Бакли — Леверетта (рис. 7а, б). В этой области верхняя ветвь точного решения переходит в среднюю ветвь.

Нейросетевая аппроксимация, являясь однозначной функцией, не может воспроизводить среднюю ветвь одновременно с верхней. Заметим, что средняя ветвь в точном решении заменяется вертикальным скачком для исключения многозначности. Положение и амплитуда скачка при этом находятся исходя из дополнительного условия материального баланса (метод Welge [Басниев и др., 1993]). Воспроизвести положение такого скачка нейросеть, обученная на выполнении дифференциального уравнения, не может, поскольку само уравнение не содержит в себе информации о скачке. В этой области нейронная сеть пренебрегает дифференциальным уравнением, для того чтобы выполнить его максимально точно в других точках расчета (рис. 8).

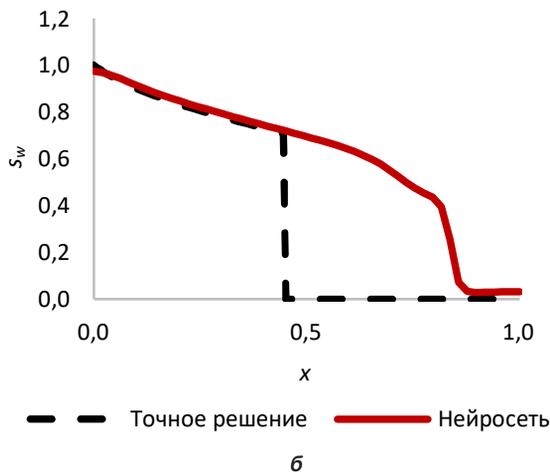
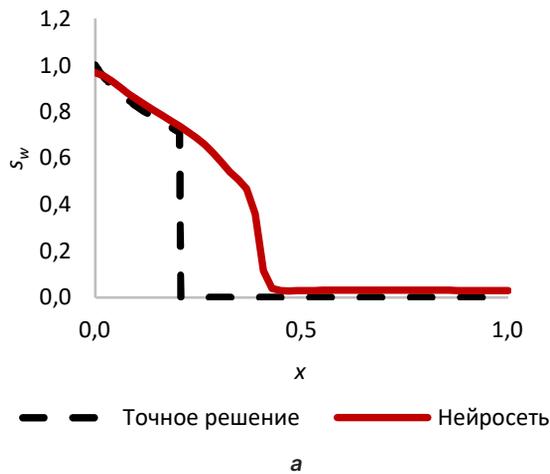
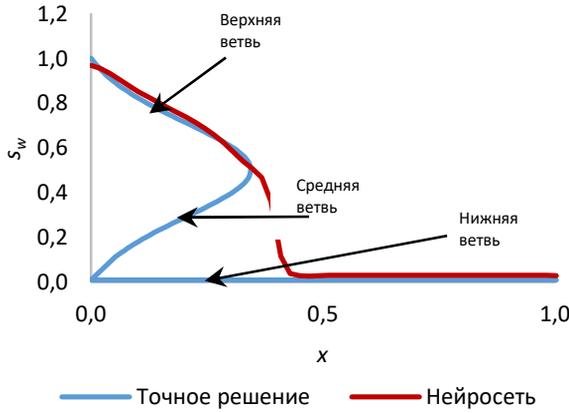
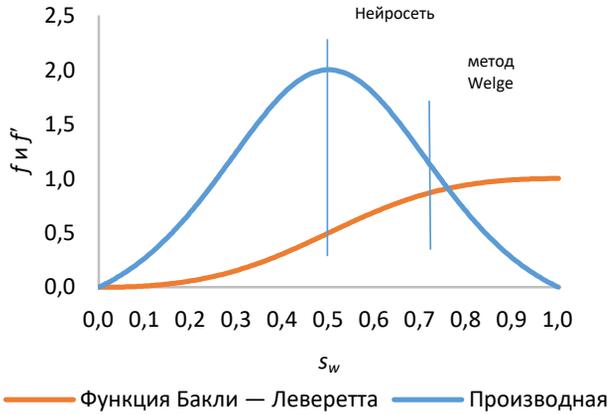


Рис. 6. Нейросетевое решение для распределения водонасыщенности:
а — $t = 0,17$ с; б — $t = 0,37$ с, $\eta = 1$

Fig. 6. Neural network solution for the distribution of water saturation:
а — $t = 0.17$ s; б — $t = 0.37$ s, $\eta = 1$



а



б

Рис. 7. Анализ решения нейросети: а — нейронная сеть и аналитическое решение без скачка; б — фронтальная водонасыщенность на функции Бакли — Леверетта

Fig. 7. Analysis of the neural network solution: а — neural network and analytical solution without leap; б — frontal water saturation on the Buckley–Leverett function

Закономерно, что параметры (амплитуда, скорость, положение) сформированного нейросетью вынужденного скачка, который никак не связан с законами сохранения массы, отличаются от параметров скачка в точном решении.

Для получения физически корректной нейросетевой аппроксимации точного решения нужно при обучении добавить информацию — условие об искусственно вводимом скачке. При нулевых значениях остаточной водонасыщенности в модельных ОФП (см. рис. 2), фронтальная водонасыщенность на скачке s^* определяется условием (5) [Басниев и др., 1993]:

$$f'(s^*) = \frac{f(s^*)}{s^*}. \quad (5)$$

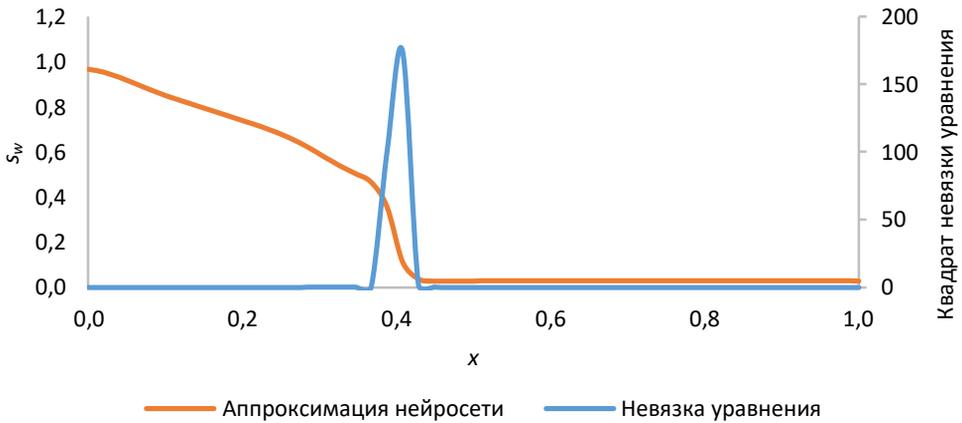


Рис. 8. Поведение невязки дифференциального уравнения для нейросетевого решения по оси x

Fig. 8. Discrepancy of the differential equation for the neural network solution along the x axis

В момент достижения фронтальной водонасыщенности нейронная сеть должна перестать выполнять дифференциальное уравнение и сформировать скачок. Это достигается за счет добавления проверки условий по насыщенности и дополнительного слагаемого в функции ошибки обучения:

$$loss = \left(m \frac{\partial s_w}{\partial t} + V(t) \cdot f'(s) \frac{\partial s_w}{\partial x} \right)_{s < s^*}^2 + (s_{w_{\text{ны}}} - s_{t=0})^2 + (s_{w_{\text{гн}}} - s_{x=0})^2 + (s_{w_{\text{ны}}} - s_{s > s^*})^2 \rightarrow 0. \tag{6}$$

После корректировки функции обучения нейронная сеть успешно воспроизводит скачок водонасыщенности (рис. 9).

Дополнительно была исследована точность нейросетевой аппроксимации при различных соотношениях вязкости флюидов: $\eta = 0,01, 0,1, 8$. Соотношение вязкостей напрямую влияет на график функции Бакли — Леверетта, фронтальную водонасыщенность и скорость распространения скачка (рис. 10).

Случай $\eta = 8$ соответствует вытеснению, близкому к поршневому (с максимальным скачком водонасыщенности). Случай $\eta = 0,01$ соответствует вытеснению высоковязкой нефти водой с минимальным значением скачка. Распределение водонасыщенности, полученное всеми рассмотренными выше методами для каждого варианта соотношения вязкостей в момент времени 0,17 с, представлено на рис. 11.

По результатам расчетов можно сделать вывод, что предлагаемый способ обучения нейронной сети позволяет с высокой точностью найти распределение водонасыщенности в широком диапазоне соотношений вязкости. Можно отметить, что при отличии вязкостей в 100 раз ($\eta = 0,01$) конечно-разностный метод upwind на исходной сетке с шагом 0,2 м формирует неверное скачкообразное решение, которое не соответствует

точному решению задачи Бакли — Леверетта (рис. 11а). Расхождение между точным и численным решением начинает проявляться уже при $\eta = 0,1$ (рис. 11б). Для повышения точности в этих случаях потребуется дополнительное измельчение расчетной сетки как по координате, так и по времени (рис. 12). Нейросетевой подход лишен такого недостатка. Данный вывод можно продемонстрировать с помощью обучения нейронной сети на различных расчетных сетках (рис. 13).

Как следует из рис. 13, при измельчении расчетной сетки нейросетевая аппроксимация становится незначительно точнее в отдельных точках, однако основной вид решения принципиально не изменяется.

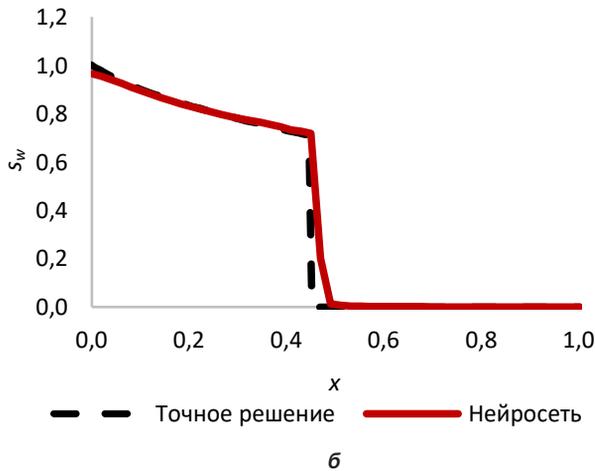
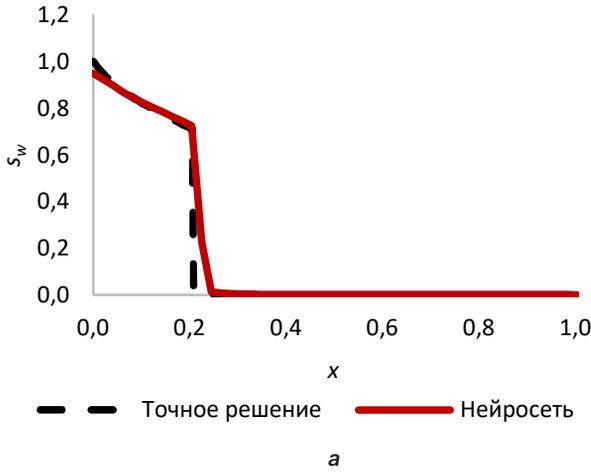


Рис. 9. Нейросетевое решение для распределения водонасыщенности: а — $t = 0,17$ с; б — $t = 0,37$ с, $\eta = 1$

Fig. 9. Neural network solution for the distribution of water saturation: а — $t = 0.17$ s; б — $t = 0.37$ s, $\eta = 1$

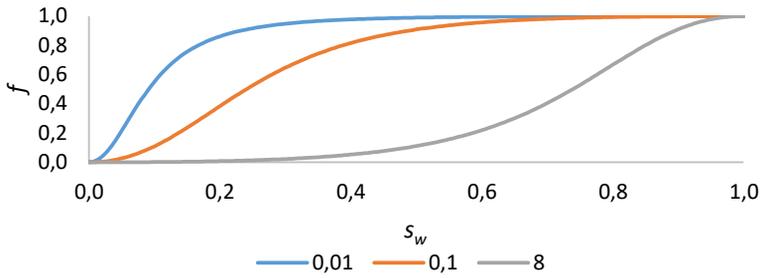


Рис. 10. Функция Бакли — Лаверетта при соотношениях вязкости $\eta = 0,01, 0,1, 8$

Fig. 10. Buckley-Leverett function for viscosity ratios: $\eta = 0.01, 0.1, 8$

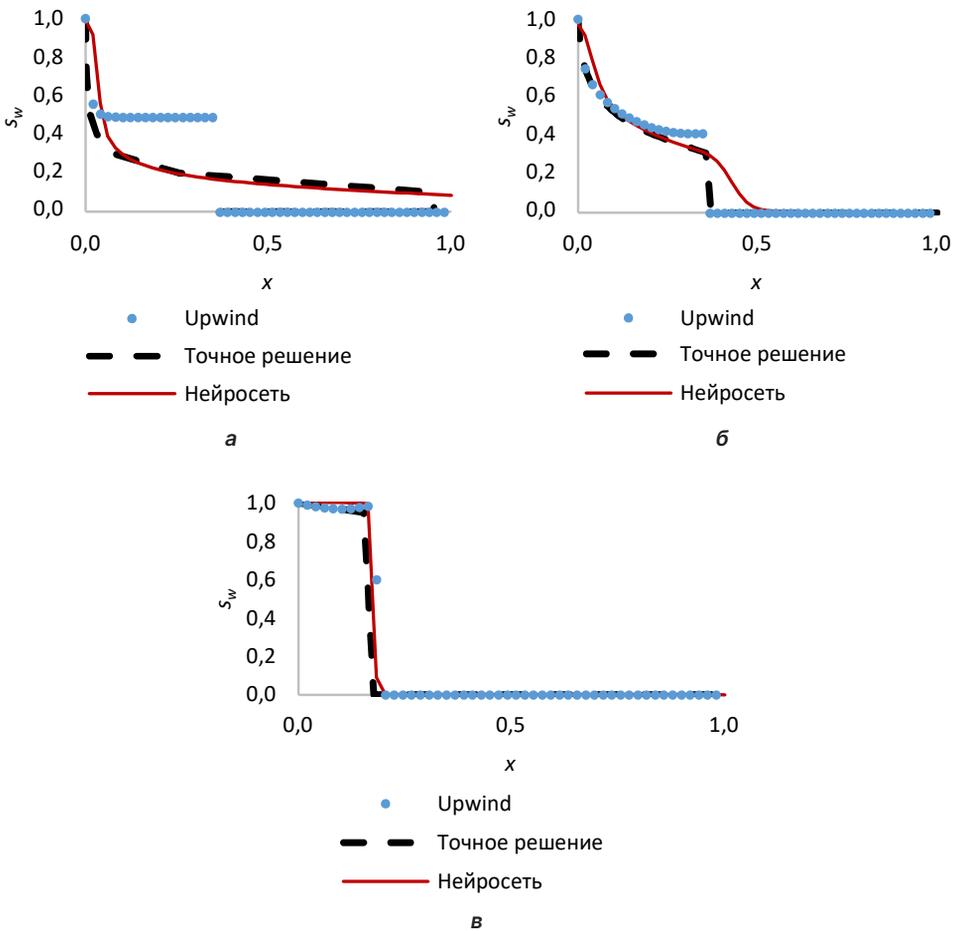


Рис. 11. Распределение водонасыщенности при различных отношениях вязкостей в момент времени $t = 0,17$ с: а — $\eta = 0,01$; б — $\eta = 0,1$; в — $\eta = 8$

Fig. 11. Distribution of water saturation at different viscosity ratios at time $t = 0.17$ s: а — $\eta = 0.01$; б — $\eta = 0.1$; в — $\eta = 8$

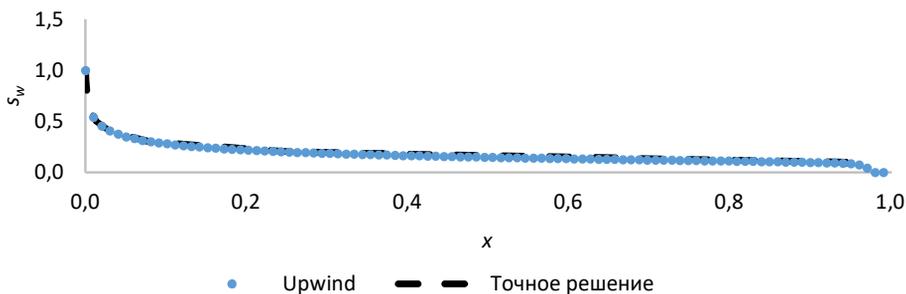


Рис. 12. Распределение водонасыщенности при отношении вязкостей $\eta = 0,01$ в момент времени $t = 0,17$ с на измельченной сетке. Шаг по координате $0,02$ м. Шаг по времени $0,02$ с

Fig. 12. The distribution of water saturation with a viscosity ratio of $\eta = 0.01$ at time $t = 0.17$ s on a crushed grid. The coordinate step is 0.02 m. The time step is 0.02 s

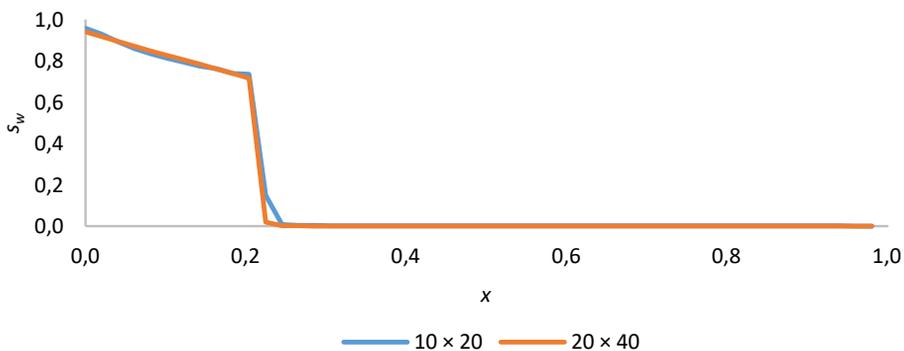


Рис. 13. Распределение водонасыщенности при отношении вязкостей $\eta = 1$ в момент времени $t = 0,17$ с на различных сетках (10×20 и 20×40)

Fig. 13. The distribution of water saturation with a viscosity ratio of $\eta = 1$ at time $t = 0.17$ s on various grids (10×20 and 20×40)

Заклучение

Нейросетевое моделирование на основе физически-информированных нейронных сетей перцептронного типа с тангенциальными и сигмоидальными функциями активации позволяет получать аналитическую аппроксимацию решения начально-краевых задач для уравнения Бакли — Леверетта с различными начальными и граничными условиями. Для получения физически корректного результата, содержащего слабый разрыв, необходимо использовать дополнительное условие на скачок насыщенности в функции обучения нейронной сети. Результаты моделирования при различных соотношениях вязкости показывают, что метод достаточно устойчив в широком диапазоне соотношения вязкостей флюидов при получении аналитической аппроксимации решения заданного уравнения. Получаемая при этом аппроксимация нечувствительна к размерам сетки, на которой производится обучение. Поэтому обучение можно производить на закругленной сетке.

Это выгодно отличает метод нейросетевой аппроксимации от конечно-разностных численных методов, где для достижения заданной точности необходимо проводить измельчение расчетной сетки.

Основным ограничивающим фактором применения нейронных сетей в данный момент является скорость обучения моделей, которая ниже, чем расчет численной аппроксимации. В свою очередь, обученные нейронные сети позволяют получить результат в каждой точке пространства без переобучения нейронной сети и, как следствие, намного быстрее получить результат при переменных начальных и граничных условиях. Это дает преимущество при решении задач многовариантного моделирования и оптимизации разработки нефтяных месторождений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рьжик В. М. 1984. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра. 211 с.
- Басниев К. С., Кочина И. Н., Максимов В. М. 1993. Теория двухфазной фильтрации несмешивающихся жидкостей // Подземная гидромеханика: учеб. для вузов. М.: Недра. С. 227–251.
- Бриллиант Л. С., Горбунова Д. В., Завьялов А. С., Симаков Е. А., Бескурский В. В., Рябец Д. А. 2019. Управление добычей на основе нейросетевой оптимизации режимов работы скважин на объекте БС₈ Западно-Малобалыкского месторождения // Деловой журнал «Neftegaz.RU». № 6. С. 92–98.
- Бриллиант Л. С., Завьялов А. С., Данько М. Ю., Елишева А. О., Цинкевич О. В. 2020. Методика тестирования алгоритмов прокси-моделирования // Недропользование XXI век. № 4 (87). С. 128–137. <https://www.elibrary.ru/obkwbfb>
- Бриллиант Л. С., Комягин А. И., Бляшук М. М., Цинкевич О. В., Журавлёва А. А. 2017. Способ оперативного управления заводнением пластов: пат. 2614338 РФ / патенто-обладатель Тюменский институт нефти и газа. № 2015156293; заявл. 25.12.2015; опубл. 24.03.2017, Бюл. № 9.
- Васильев А. Н., Тархов Д. А., Шемякина Т. А. 2015. Нейросетевой подход к задачам математической физики. СПб.: Нестор-История. 259 с.
- Васильев А. Н., Тархов Д. А., Шемякина Т. А. 2016. Приближенные аналитические решения обыкновенных дифференциальных уравнений // Современные информационные технологии и ИТ-образование. Том 12. № 3-2. С. 188–195. <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/141> (дата обращения: 04.12.2024).
- Вершинин В. Е., Пономарев Р. Ю. 2023. Применение методов нейросетевого моделирования при решении начально-краевых задач для дифференциальных уравнений в частных производных // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 9. № 3 (35). С. 132–147. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-3-132-147>
- Зрелова Д. П., Ульянов С. В. 2022. Модели физически информированных / осведомленных классических Лагранжевых / Гамильтоновых нейронных сетей в глубоком обучении. Современные информационные технологии и ИТ-образование. Том 18. № 2. С. 310–325. <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202202.310-325>

- Иваненко Б. П. 2014. Нейросетевое имитационное моделирование нефтяных месторождений и гидрогеологических объектов. Томск: Изд. дом ТГУ. 188 с.
- Коваленко А. Н., Черноморец А. А., Петина М. А. 2017. О применении нейронных сетей для решения дифференциальных уравнений в частных производных // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. № 9 (258). С. 103–110.
- Колмогоров А. Н. 1957. О представлении непрерывных функций нескольких переменных в виде суперпозиций непрерывных функций одного переменного и сложения // Доклады Академии наук. Том 114. № 5. С. 953–956.
- Овчаров В. В. 2014. Модификация функций относительных фазовых проницаемостей для регуляризации численного решения задачи вытеснения нефти водой // Нефтяное хозяйство. № 3. С. 102–105.
- Хайкин С. 2019. Нейронные сети: полный курс: пер. с англ. Изд. 2-е, испр. М.; СПб.: Диалектика. 1103 с.
- Aziz K., Settari A. 1979. Petroleum Reservoir Simulation. London: Applied Science Publishers. 476 pp.
- Fuks O., Tchelepi H. A. 2020. Limitations of physics informed machine learning for nonlinear two-phase transport in porous media // Journal of Machine Learning for Modeling and Computing. Vol. 1. No. 1. Pp. 19–37. <https://doi.org/10.1615/JMachLearnModelComput.2020033905>
- Gasmi C. F., Tchelepi H. 2021. Physics informed deep learning for flow and transport in porous media // arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.02629>
- Gasmi C. F., Tchelepi H. 2022. Uncertainty quantification for transport in porous media using parameterized physics informed neural networks // arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.12730>
- Ponomarev R. Yu., Vershinin V. E. 2021. Long-term forecasting and optimization of non-stationary well operation modes through neural networks simulation // SPE Russian Petroleum Technology Conference (12–15 October 2021, virtual). Paper SPE-206529-MS. <https://doi.org/10.2118/206529-MS>
- Vershinin V. E., Ponomarev R. Yu., Strekalov A. V. 2020. Neural network as a tool for predicting and controlling the technological regime of production wells // SPE Russian Petroleum Technology Conference (26–29 October 2020, virtual). Paper SPE-201937-MS. <https://doi.org/10.2118/201937-MS>

References

- Barenblatt, G. I., Entov, V. M., & Ryzhik, V. M. (1984). *Movement of Liquids and Gases in Natural Formations*. Nedra. [In Russian]
- Basniev, K. S., Kochina, I. N., & Maksimov, V. M. (1993). Theory of two-phase filtration of immiscible liquids. In *Underground Hydromechanics* (pp. 227–251). Nedra. [In Russian]
- Brilliant, L. S., Gorbunova, D. V., Zavyalov, A. S., Simakov, E. A., Beskursky, V. V., & Ryabets, D. A. (2019). Production management based on neural network optimization of well operating modes at the BS₈ facility of the Zapadno-Malobalyksoye field. *Business Magazine "Neftegaz.RU"*, (6), 92–98. [In Russian]
- Brilliant, L. S., Zavyalov, A. S., Danko, M. Yu., Elisheva, A. O., & Tsinkevich, O. V. (2020). Procedure of proxy modelling algorithms testing. *Nedropolzovanie XXI vek*, (4), 128–137. <https://www.elibrary.ru/obkwbf> [In Russian]

- Brilliant, L. S., Komyagin, A. I., Blyashuk, M. M., Tsinkevich, O. V., & Zhuravleva, A. A. (2017). *Method of Real-Time Control of Reservoir Flooding* (R.F. Patent No. 2614338). RF Federal Service for Intellectual Property. [In Russian]
- Vasiliev, A. N., Tarkhov, D. A., & Shemyakina, T. A. (2015). *Neural Network Approach to Problems of Mathematical Physics*. Nestor-Istoriya. [In Russian]
- Vasiliev, A. N., Tarkhov, D. A., & Shemyakina, T. A. (2016). Approximate analytical solutions of ordinary differential equations. *Modern Information Technologies and IT-Education*, 12(3-2), 188–195. Retrieved Dec. 4, 2024, from <http://sitito.cs.msu.ru/index.php/SITITO/article/view/141> [In Russian]
- Vershinin, V. E., & Ponomarev, R. Yu. (2023). Application of neural network modeling methods in solving initial boundary value problems for partial differential equations. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 9(3), 132–147. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2023-9-3-132-147> [In Russian]
- Zrelava, D. P., & Ulyanov, S. V. (2022). Physics-informed classical Lagrange / Hamilton neural networks in deep learning. *Modern Information Technologies and IT-Education*, 18(2), 310–325. <https://doi.org/10.25559/SITITO.18.202202.310-325> [In Russian]
- Ivanenko, B. P. (2014). *Neural Network Simulation of Oil Fields and Hydrogeological Objects*. Publishing House of National Research Tomsk State University. [In Russian]
- Kovalenko, A. N., Chernomorets, A. A., & Petina, M. A. (2017). On the neural networks application for solving of partial differential equations. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information Technologies*, (9), 103–110. [In Russian]
- Kolmogorov, A. N. (1957). On the representation of continuous functions of many variables by superposition of continuous functions of one variable and addition. *Doklady Akademii Nauk SSSR*, 114(5), 953–956. [In Russian]
- OVcharov, V. V. (2014). Scaling of relative permeability functions as a method of regularizing numerical solution of the water-oil displacement problem. *Oil Industry*, (3), 102–105. [In Russian]
- Haykin, S. (2019). *Neural Networks* (2nd ed.). Dialektika. [In Russian] (Original work published 2001, Prentice Hall)
- Aziz, K., & Settari, A. (1979). *Petroleum Reservoir Simulation*. Applied Science Publishers.
- Fuks, O., & Tchelepi, H. A. (2020). Limitations of physics informed machine learning for nonlinear two-phase transport in porous media. *Journal of Machine Learning for Modeling and Computing*, 1(1), 19–37. <https://doi.org/10.1615/JMachLearnModelComput.2020033905>
- Gasmi, C. F., & Tchelepi, H. (2021). *Physics informed deep learning for flow and transport in porous media*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.02629>
- Gasmi, C. F., & Tchelepi, H. (2022). *Uncertainty quantification for transport in porous media using parameterized physics informed neural networks*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.12730>
- Ponomarev, R. Yu., & Vershinin, V. E. (2021, Oct. 12–15). *Long-term forecasting and optimization of non-stationary well operation modes through neural networks simulation* [Conference paper SPE-206529-MS]. SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual. <https://doi.org/10.2118/206529-MS>
- Vershinin, V. E., Ponomarev, R. Yu., & Strekalov, A. V. (2020, Oct. 26–29). *Neural network as a tool for predicting and controlling the technological regime of production wells* [Conference paper SPE-201937-MS]. SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual. <https://doi.org/10.2118/201937-MS>

Информация об авторах

Роман Юрьевич Пономарев, менеджер, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия
ryonomarev@tnnc.rosneft.ru

Владимир Евгеньевич Вершинин, главный специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия; доцент, кафедра моделирования физических процессов и систем, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
ve_vershinin2@tnnc.rosneft.ru

Анастасия Сергеевна Ковалькова, ведущий специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия
as_kovalkova@tnnc.rosneft.ru

Information about the authors

Roman Yu. Ponomarev, Manager, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia
ryonomarev@tnnc.rosneft.ru

Vladimir E. Vershinin, Chief Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia; Associate Professor, Department of Physical Processes and Systems Modeling, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia
ve_vershinin2@tnnc.rosneft.ru

Anastasia S. Kovalkova, Leading Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia
as_kovalkova@tnnc.rosneft.ru

Критериальный анализ возникновения неустойчивости фронта вытеснения при заводнении нефтяных пластов

Ярослав Александрович Кряжев✉, Александр Янович Гильманов,
Константин Михайлович Федоров, Александр Павлович Шевелёв

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: kryazhev_yar@mail.ru✉

Аннотация. Оценка устойчивости фронта вытеснения нефти водой необходима для проектирования системы разработки нефтяных месторождений при поддержании пластового давления. Многомерные динамические модели устойчивости фронта вытеснения нефти водой носят вероятностный характер, а критериальные подходы подробно проработаны только для классических задач. В работе впервые учитываются гравитационные силы в рамках модели Рапопорта — Лиса. Целью работы является развитие подхода Саффмана — Тейлора для оценки устойчивости фронта вытеснения нефти водой с учетом капиллярных и гравитационных сил. В основе предлагаемой модели лежат законы сохранения массы воды и нефти и законы Дарси для этих фаз в одномерном приближении. В качестве замыкающих соотношений используются корреляции Кори для относительных фазовых проницаемостей и уравнение для капиллярного давления как разности давлений нефти и воды в пористой среде. Для оценки устойчивости фронта вытеснения нефти водой используются условия Саффмана — Тейлора. Проводится процедура обезразмеривания используемых соотношений. С использованием явной конечно-разностной схемы рассчитывается насыщенность вытесняющей жидкости на фронте. Определяются критические значения введенных безразмерных комплексов, при которых вытеснение нефти водой еще является устойчивым. При проведении анализа возникновения неустойчивого вытеснения было показано, что гравитационные и капиллярные силы могут оказывать стабилизирующее воздействие в случае, когда подвижность вытесняющего флюида выше подвижности вытесняемого. Установлено, что капиллярные силы оказывают более высокое стабилизирующее воздействие, чем гравитационные силы. Проведенный анализ устойчивости на модельных данных позволил определить диапазон вязкости

нефти, в котором вязких сил недостаточно для роста возмущений и образования «языков» обводненности.

Ключевые слова: устойчивость фронта вытеснения, двухфазная фильтрация, задача Бакли — Леверетта, влияние гравитационных и капиллярных сил, критериальный анализ, задача Рапопорта — Лиса, закон Дарси, подвижность флюида, подземная гидромеханика, высоковязкая нефть

Цитирование: Кряжев Я. А., Гильманов А. Я., Федоров К. М., Шевелёв А. П. 2024. Критериальный анализ возникновения неустойчивости фронта вытеснения при заводнении нефтяных пластов // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 4 (40). С. 114–131. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-114-131>

Поступила 20.09.2024; одобрена 18.10.2024; принята 16.12.2024

Criteria analysis of the displacement front instability occurring at waterflooding of oil reservoirs

Yaroslav A. Kryazhev✉, Alexander Ya. Gilmanov, Konstantin M. Fedorov, Alexander P. Shevelev

University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: kryazhev_yar@mail.ru✉

Abstract. The assessment of the stability of oil displacement front by water is necessary for design of an oil field development system while maintaining the reservoir pressure. Multidimensional dynamic models of the stability of front are probabilistic in nature, and criterion approaches have been developed only for classical problems. Gravitational forces are considered in the framework of Rapoport-Leas model only in this article. The objective of research is to develop the Saffman–Taylor approach for assessing the stability of oil displacement front, considering capillary and gravitational forces. The proposed model is based on the laws of conservation of mass for water and oil and Darcy’s laws for these phases in a one-dimensional approximation. Corey correlations for relative phase permeabilities and the equation for capillary pressure are used as additional relations. Saffman–Taylor conditions are used to assess the stability of oil displacement front. The procedure for introducing dimensionless complexes for equations used is carried out. Using an explicit finite difference scheme, the saturation of displacing liquid at the front is calculated. The critical values are

determined for the introduced dimensionless complexes, in which the displacement of oil by water is still stable. The results have shown that gravitational and capillary forces can have a stabilizing effect when the mobility of displacing fluid is higher than the mobility of the displaced one. Capillary forces have a higher stabilizing effect than gravitational forces. The stability analysis performed on the model data helped to determine the oil viscosity range at which viscous forces are insufficient for the formation of viscous fingers.

Keywords: stability of the displacement front, two-phase filtration, Buckley–Leverett model, influence of gravitational and capillary forces, criteria analysis, Rapoport–Leas model, Darcy’s law, fluid mobility, underground hydromechanics, high-viscosity oil

Citation: Kryazhev, Ya. A., Gilmanov, A. Ya., Fedorov, K. M., & Shevelev, A. P. (2024). Criteria analysis of the displacement front instability occurring at waterflooding of oil reservoirs. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(4), 114–131. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-114-131>

Received Sep. 20, 2024; Reviewed Oct. 18, 2024; Accepted Dec. 16, 2024

Введение

Поддержание пластового давления является самым длительным этапом разработки месторождения нефти. В силу больших запасов пластовых вод в качестве традиционного флюида при реализации такой системы в Западной Сибири используется вода [Пятков, Косяков, 2017]. Более 50% нефти в России характеризуется высокими значениями коэффициента динамической вязкости [Башкирцева, 2014]. Процесс вытеснения такой нефти водой может быть неустойчивым, что означает возникновение «языков» преждевременного прорыва воды в добывающие скважины. Прогнозирование распространения этих «языков» практически невозможно, в силу флуктуационного характера их развития [Баренблатт и др., 1984]. Поэтому существующие в настоящее время подходы позволяют предсказывать только возможность образования неустойчивого фронта вытеснения нефти водой [Perkins, Johnston, 1969; Байков, Бахтизин, 1986; Mishra и др., 2007; Уиллхайт, 2009].

Основы классической теории устойчивости фронта вытеснения нефти водой были заложены Саффманом и Тейлором [Saffman, Taylor, 1958] с использованием обобщения экспериментальных данных Хеле-Шоу. Ключевым положением сформулированной теории для устойчивости фронта вытеснения является условие неразрывности потока, выраженное в равенстве скоростей флюидов на фронте [Zhu, Gates, 2017]. Если в результате флуктуаций давления его значение перед фронтом вытеснения окажется меньше, чем за фронтом, то возможно образование «языка» или канала прорыва вытесняющего флюида [Mishra и др., 2007; Mcdowell и др., 2016; Moortgat, 2016]. Фундаментальным критерием устойчивости этого фронта в рамках такой теории является соотношение подвижностей вытесняющего и вытесняемого флюидов, введенных как отношения фазовых

проницаемостей флюидов к их коэффициентам динамических вязкостей [Зазовский, 1986; Федоров, Шарафутдинов, 1989].

Наличие капиллярных сил в случае гидрофильной пористой среды частично нивелирует эффект «языкообразования» за счет их растягивания по вертикали [Melrose, 1974]. Процесс вытеснения нефти водой при наличии этих сил описывается моделью Раппорта — Лиса [Rappoport, Leas, 1953]. Однако в этой модели нет учета гравитационных сил [Dietz, 1953], необходимого в случае наклонных пластов, что отмечалось в работах И. А. Чарного [1963].

Другим подходом к моделированию процесса устойчивости фронта вытеснения нефти водой является идея Г. И. Баренблатта и др. [1984] о внесении малых возмущений, описываемых флуктуациями функции давления по координатам, в уравнения многофазной фильтрации. Такой подход позволяет рассматривать процесс образования «языков» и их рост в динамике [Peters, Flock, 1981; Yuan и др., 2019; Бублик, Семин, 2020]. Тем не менее в силу вероятностного характера формирования каналов прорыва воды рассматриваемый подход позволяет определить динамику только интегральных характеристик, а не точную форму фронта вытеснения.

Исходя из вышеизложенного, целью работы является развитие подхода Саффмана — Тейлора для оценки устойчивости фронта вытеснения нефти водой с учетом капиллярных и гравитационных сил. Учет гравитационных сил в рамках модели Раппорта — Лиса проводится впервые.

Математическая модель вытеснения нефти водой

В настоящей работе рассматривается несмешивающаяся фильтрация несжимаемых флюидов в процессе изотермического вытеснения нефти водой в наклонно-направленном пласте в изотропной пористой среде (рис. 1). При этом полагается, что пористая среда представляет собой односвязную область, граница которой является непроницаемой.

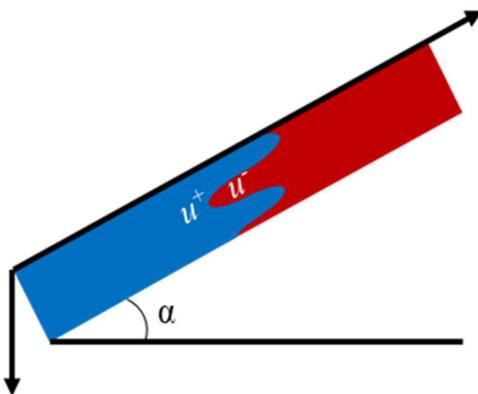


Рис. 1. Схематичное изображение модели вытеснения

Fig. 1. Schematic representation of the displacement model

Уравнения сохранения массы для воды и нефти имеют вид (1)–(2):

$$m\rho_w \frac{\partial}{\partial t}(s_w) + \rho_w \nabla(\mathbf{u}_w) = 0, \quad (1)$$

$$m\rho_o \frac{\partial}{\partial t}(s_o) + \rho_o \nabla(\mathbf{u}_o) = 0, \quad (2)$$

где t — время, m — пористость, ρ_w — плотность воды, ρ_o — плотность нефти, s_w — водонасыщенность, s_o — нефтенасыщенность, \mathbf{u}_w — скорость фильтрации воды, \mathbf{u}_o — скорость фильтрации нефти.

Закон сохранения импульсов для фаз записывается с помощью законов Дарси для воды (3) и нефти (4):

$$\mathbf{u}_w = -k \frac{k_{rw}}{\mu_w} (\nabla P_w - \rho_w g \nabla z), \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_o = -k \frac{k_{ro}}{\mu_o} (\nabla P_o - \rho_o g \nabla z), \quad (4)$$

где k — абсолютная проницаемость пористой породы, k_{rw} — относительная фазовая проницаемость (ОФП) породы по воде, k_{ro} — ОФП породы по нефти, μ_w — динамическая вязкость воды, μ_o — динамическая вязкость нефти, P_w — давление воды, P_o — давление нефти, g — ускорение свободного падения, z — пространственная координата по оси, направленной вертикально вниз.

Давления фаз связаны между собой согласно закону (5), а насыщенности фаз подчиняются замыкающему соотношению (6):

$$P_o - P_w = P_c, \quad (5)$$

$$s_w + s_o = 1, \quad (6)$$

где P_c — капиллярное давление, функция, зависящая от свойств породы, свойств фаз и насыщенности породы фазами.

В настоящей работе для модельных расчетов капиллярное давление и ОФП будут рассчитываться по корреляциям Кори (7):

$$\begin{cases} k_{rw} = k_{rw}(s_{or}) \left(\frac{s_w - s_{wr}}{1 - s_{wr} - s_{or}} \right)^2, \\ k_{ro} = k_{ro}(s_{wr}) \left(\frac{1 - s_w - s_{or}}{1 - s_{wr} - s_{or}} \right)^3, \\ P_c = P_c(s_{wr}) \left(\frac{1 - s_w - s_{or}}{1 - s_{wr} - s_{or}} \right)^4, \end{cases} \quad (7)$$

где s_{wr} — критическая водонасыщенность, s_{or} — критическая нефтенасыщенность.

Графически данные корреляции представлены на рис. 2 и 3.

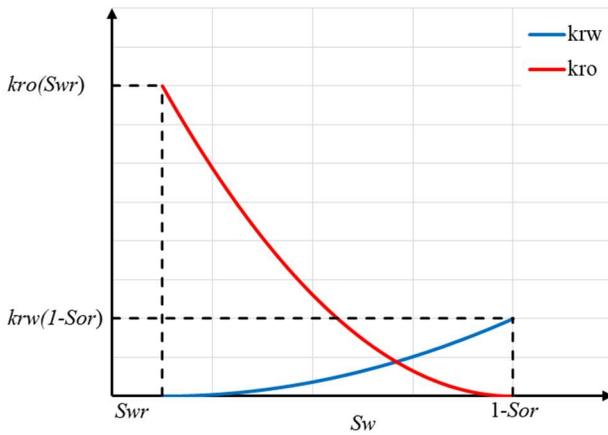


Рис. 2. ОФП по корреляции Кори

Fig. 2. Corey relative phase permeability correlation

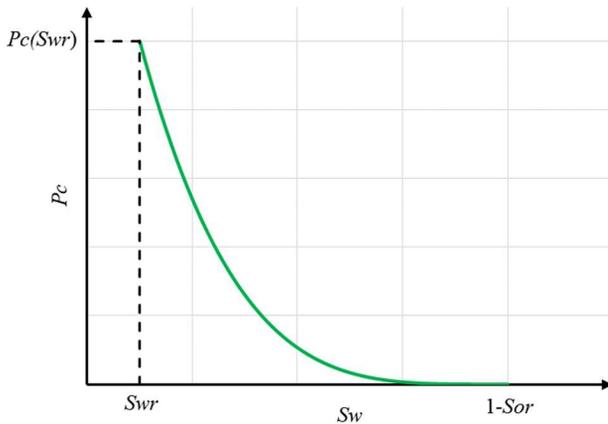


Рис. 3. Капиллярное давление по корреляции Кори

Fig. 3. Corey capillary pressure correlation

Складывая (1) и (2) с учетом (6), можно получить следующее соотношение (8):

$$\nabla(\mathbf{u}_w + \mathbf{u}_o) = \nabla \mathbf{u} = 0, \quad (8)$$

где \mathbf{u} — общая скорость фильтрации жидкости.

Для получения уравнения относительно насыщенностей флюидов вводится параметр F согласно системе (9):

$$\begin{cases} \mathbf{u}_w = F\mathbf{u}, \\ \mathbf{u}_o = (1-F)\mathbf{u}. \end{cases} \quad (9)$$

Далее будет рассматриваться одномерная фильтрация. Подставив (9) в (3) и (4) и учитывая, что $\nabla z = -\sin(\alpha)$, где α — угол наклона пласта, можно получить соотношение для введенного параметра F (9):

$$\left\{ \begin{array}{l} F = F_{base} + F_{grav} + F_{cap}, \\ F_{base} = \frac{1}{1 + \frac{k_{ro} \mu_w}{k_{rw} \mu_o}}, \\ F_{grav} = -\frac{\frac{kk_{ro}}{\mu\mu_o} (\rho_w - \rho_o) g \sin(\alpha)}{1 + \frac{k_{ro} \mu_w}{k_{rw} \mu_o}}, \\ F_{cap} = \frac{\frac{kk_{ro}}{\mu\mu_o} \frac{\partial P_c}{\partial x}}{1 + \frac{k_{ro} \mu_w}{k_{rw} \mu_o}}. \end{array} \right. \quad (10)$$

Можно заметить, что первое слагаемое F_{base} — это функция Бакли — Леверетта, а слагаемые F_{grav} и F_{cap} — это дополнительные функции, учитывающие влияние гравитационных и капиллярных сил. Подставив (9) и (10) в (3), можно получить уравнение (11), решение которого позволяет найти распределение водонасыщенности вдоль рассматриваемой пористой среды.

$$m \frac{\partial}{\partial t} (s_w) + u \frac{\partial}{\partial x} (F_{base} + F_{grav} + F_{cap}) = 0. \quad (11)$$

Стоит заметить, что без учета гравитационных и капиллярных сил данное уравнение сводится к задаче Бакли — Леверетта, а без учета только гравитационных — к задаче Рапопорта — Лиса. В безразмерном виде соотношение (11) имеет вид (12):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial s_w}{\partial T} + \frac{\partial}{\partial X} (F_{base} + F_{grav} + F_{cap}) = 0, \\ X = \frac{x}{L}, \\ T = \frac{t}{t_0} = \frac{t}{\frac{Lm}{u}}. \end{array} \right. \quad (12)$$

где T — безразмерное время, X — безразмерная пространственная координата вдоль пласта, L — длина пласта.

Графическое представление типового результата решения уравнения (12) представлено на рис. 4.

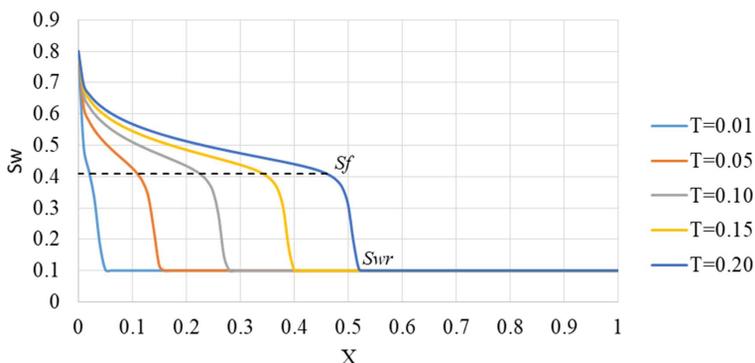


Рис. 4. Распределение водонасыщенности вдоль пласта при вытеснении нефти водой в различные моменты времени

Fig. 4. Distribution of water saturation along the formation during oil–water displacement

Таким образом, было получено безразмерное уравнение, решение которого позволяет определить распределение водонасыщенности в пласте при вытеснении нефти водой в наклонно-направленном пласте при учете гравитационных и капиллярных сил. В настоящей работе особое значение будет иметь определение водонасыщенности на фронте вытеснения.

Устойчивость водонефтяного фронта

Возникновение неустойчивости фронта вытеснения нефти водой определяется подвижностями флюидов и градиентами давления до и после фронта вытеснения. Условие, при котором процесс будет неустойчивым, можно записать в виде системы (13):

$$\begin{cases} \lambda^+ > \lambda^-, \\ |\nabla P|^+ < |\nabla P|^-, \end{cases} \quad (13)$$

где λ^+ и λ^- — подвижности флюида до и после фронта вытеснения, определяющиеся соотношениями (14) и (15):

$$\lambda^+ = \left(\frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{ro}}{\mu_o} \right)_{s_f}, \quad (14)$$

$$\lambda^- = \left(\frac{k_{rw}}{\mu_w} + \frac{k_{ro}}{\mu_o} \right)_{s_{wr}}, \quad (15)$$

где s_f — водонасыщенность на фронте вытеснения.

Выполнение условий в системе (13) соответствует случаю, когда более подвижная жидкость вытесняет менее подвижную, при этом из-за малого возмущения на фронте

вытеснения более подвижная жидкость (в рассматриваемом случае — вода) попадает в область с более высоким градиентом давления, из-за чего это возмущение начинает расти, образуются «языки» обводненности, что приводит к преждевременным прорывам воды в добывающие скважины [Уиллхайт, 2009].

Скорость фильтрации смеси воды и нефти в одномерном случае, в соответствии с введенной ранее математической моделью, записывается в виде (16) с учетом, что градиенты давлений являются отрицательными величинами, давление в нефтяной фазе определяется через уравнение (5), а индекс w у давления в водяной фазе опущен.

$$u = k \frac{k_{rw}}{\mu_w} \left(\left| \frac{\partial P}{\partial x} \right| - \rho_w g \sin(\alpha) \right) + k \frac{k_{ro}}{\mu_o} \left(\left| \frac{\partial P}{\partial x} \right| - \rho_o g \sin(\alpha) \right) - k \frac{k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial P_c}{\partial x}. \quad (16)$$

Уравнение (16) можно преобразовать к следующему виду (17):

$$u = k \lambda \left| \frac{\partial P}{\partial x} \right| - k \left(\lambda \rho_o + \frac{k_{rw}}{\mu_w} (\rho_w - \rho_o) \right) g \sin(\alpha) - k \frac{k_{ro}}{\mu_o} \frac{\partial P_c}{\partial x}. \quad (17)$$

Полученное соотношение можно привести к безразмерному виду (18):

$$\left\{ \begin{array}{l} U = \frac{\lambda}{\lambda^-} \left| \frac{\partial \bar{P}}{\partial X} \right| - G_U - C_U, \\ U = \frac{uL}{k \lambda^- (P_{inj} - P_{res})}, \\ \bar{P} = \frac{P - P_{res}}{P_{inj} - P_{res}}, \\ \bar{P}_c = \frac{P_c}{P_c(s_{wr})}, \\ G_U = \left(\frac{\lambda}{\lambda^-} \rho_o + \frac{k_{rw}}{\mu_w \lambda^-} (\rho_w - \rho_o) \right) \frac{L g \sin(\alpha)}{P_{inj} - P_{res}}, \\ C_U = \frac{k_{ro} P_c(s_{wr})}{\lambda^- \mu_o (P_{inj} - P_{res})} \frac{\partial \bar{P}_c}{\partial X}, \end{array} \right. \quad (18)$$

где U — безразмерная скорость фильтрационного потока, \bar{P} — безразмерное давление, \bar{P}_c — безразмерное капиллярное давление, P_{inj} — давление закачки воды, P_{res} — начальное пластовое давление, G_U и C_U — безразмерные коэффициенты, отвечающие за гравитационные и капиллярные силы соответственно.

Условие неразрывности потока вытеснения на фронте имеет вид (19), представленный ниже:

$$U^+ = U^-. \quad (19)$$

Подставив (18) в (19), можно получить соотношение между градиентами давления до и после фронта вытеснения (20) с безразмерными комплексами подобия (21):

$$M \left| \frac{\partial \bar{P}}{\partial X} \right|^+ = \left| \frac{\partial \bar{P}}{\partial X} \right|^- + G + C, \quad (20)$$

$$\begin{cases} M = \frac{\lambda^+}{\lambda^-}, \\ G = G_u^+ - G_u^- = \left(\rho_o (M-1) + \frac{k_{rw}^+ - k_{rw}^-}{\mu_w \lambda^-} (\rho_w - \rho_o) \right) \frac{L g \sin(\alpha)}{P_{inj} - P_{res}}, \\ C = C_u^+ - C_u^- = \frac{P_c(s_{wr})}{\lambda^- \mu_o (P_{inj} - P_{res})} \left(k_{ro}^+ \left(\frac{\partial P_c}{\partial X} \right)^+ - k_{ro}^- \left(\frac{\partial P_c}{\partial X} \right)^- \right). \end{cases} \quad (21)$$

В уравнении (20) безразмерный коэффициент M определяет соотношение подвижностей флюидов до и после фронта вытеснения. Безразмерные коэффициенты G и C определяют влияние гравитационных и капиллярных сил. Проанализировав систему (21) и характер изменения капиллярного давления при изменении водонасыщенности, можно определить, что при $M > 1$ коэффициенты C и G являются положительными, когда пористая среда гидрофильная, а угол наклона пласта находится в интервале от 0 до 180 градусов (вытесняемая нефть находится выше вытесняющей воды).

Когда гравитационные и капиллярные силы не учитываются, то $G = 0$ и $C = 0$. Возникновение неустойчивости фронта вытеснения полностью определяется коэффициентом M . Если $M < 1$, то процесс вытеснения является устойчивым, если $M > 1$ — неустойчивым [Федоров и др., 2019], т. к. в этом случае выполняются оба неравенства в системе (13).

В случае с учетом гравитационных и капиллярных сил, когда $G \neq 0$ и $C \neq 0$, если $M > 1$, то выполняется первое условие в системе (13), которое характеризуется отношением подвижностей флюидов до и после фронта вытеснения, однако второе условие, которое определяется соотношением величин градиентов давлений, может и не выполняться, т. к. коэффициенты G и C являются положительными. На рис. 5 представлена зависимость между модулями безразмерных градиентов давлений до и после фронта вытеснения.

Из рис. 5 видно, что существует некоторое критическое значение градиента давления, после превышения которого процесс заводнения становится неустойчивым, однако если градиент давления ниже критического, то гравитационные и капиллярные силы стабилизируют фронт вытеснения. Такое критическое значение градиента давления, а также соответствующая ему фильтрационная скорость флюида представлены в уравнениях (22) и (23):

$$\left| \frac{\partial \bar{P}}{\partial X} \right|_{cr} = \frac{G + C}{M - 1}, \quad (22)$$

$$U_{cr} = \frac{\lambda}{\lambda^-} \frac{G + C}{M - 1} - G_u - C_u. \quad (23)$$

Таким образом, процесс может быть устойчивым в случае, когда более подвижная жидкость вытесняет менее подвижную, если скорость фильтрации не превышает критического значения, что позволяет капиллярным и гравитационным силам подавить возникающие возмущения. Также стоит отметить, что для расчета всех введенных критических параметров M , G и C необходимо знать водонасыщенность на фронте вытеснения, которую можно определить, решив систему (13).

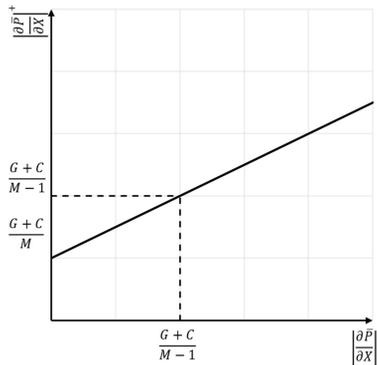


Рис. 5. Отношение модулей безразмерных градиентов давления

Fig. 5. Ratio of modules of dimensionless pressure gradients

Модельный расчет

Для проведения модельного расчета задаются следующие входные данные, представленные в табл. 1.

Табл. 1. Входные параметры расчета

Table 1. Calculation input parameters

Параметр	Значение	Ед. изм.
s_{wr}	0,1	—
s_{or}	0,2	—
$k_{rw}(s_{wr})$	0,2	—
$k_{ro}(s_{or})$	0,8	—
$P_c(s_{wr})$	1	МПа
P_{inj}	15	МПа
P_{res}	10	МПа
μ_w	0,001	Па · с
k	1 000	мД
ρ_w	1 000	кг/м ³
ρ_o	800	кг/м ³
α	20	град.
L	100	м

В данной работе для определения насыщенности на фронте вытеснения решается уравнение в частных производных (12) с помощью конечно-разностной схемы (24) с использованием одного из противопоточных методов при начальных и граничных условиях (25):

$$\frac{s_{wi}^{n+1} - s_{wi}^n}{\Delta T} + \frac{F_{i+1/2}^n - F_{i-1/2}^n}{\Delta X} = 0, \quad (24)$$

$$\begin{cases} s_{wi}^0 = s_{wr}, & i = 1, \dots, I-1, \\ s_{w0}^n = 1 - s_{or}, & n = 0, \dots, N, \\ s_{wI}^n = s_{wI-1}^n, & n = 0, \dots, N. \end{cases} \quad (25)$$

Стоит отметить, что для расчета критической скорости необходимо определить насыщенность на фронте вытеснения, для чего нужно решить уравнение (24), куда входит скорость фильтрации, поэтому для определения критической скорости был использован метод простой итерации согласно нижеприведенному алгоритму:

1. Задается начальное приближение для U .
2. Решается уравнение (24) и определяется фронтальная водонасыщенность.
3. По формуле (23) рассчитывается новое приближение U .
4. Происходит возвращение в п. 2.
5. Расчет прекращается, если разница между значениями скорости на соседних итерациях не превышает заданной точности.

Расчет критических параметров M и U_{cr} , которые определяют устойчивость процесса вытеснения, производился для различных значений вязкости нефти в диапазоне от 0,005 до 0,05 Па · с (от 5 до 50 сПз) и вязкости воды, равной 0,001 Па · с (1 сПз). При этом рассматривалось три случая: фильтрация с учетом гравитационных сил ($G \neq 0$, $G_U \neq 0$, $C = 0$, $C_U = 0$), фильтрация с учетом капиллярных сил ($G = 0$, $G_U = 0$, $C \neq 0$, $C_U \neq 0$) и фильтрация с учетом гравитационных и капиллярных сил ($G \neq 0$, $G_U \neq 0$, $C \neq 0$, $C_U \neq 0$).

Результаты расчетов в зависимости от относительной вязкости нефти, а также расчетные значения безразмерных параметров G и C представлены на рис. 6–9.

Видно, что с повышением вязкости нефти критическое число M монотонно возрастает. В области, где $M > 1$, вязкие силы становятся достаточно высокими, чтобы возникла неустойчивость фронта вытеснения.

Критическая скорость, при которой гравитационные и капиллярные силы еще способны подавить возмущения, монотонно убывает при увеличении вязкости нефти. Следовательно, для высоковязких нефтей требуется меньшая скорость закачки для предотвращения появления «языков» обводненности.

Также стоит заметить, что при уменьшении вязкости нефти до значения, при котором $M = 1$, критическая скорость асимптотически возрастает; таким образом, для маловязких нефтей верхняя граница скорости для устойчивого вытеснения достаточно высока или вообще отсутствует (при $M < 1$).

Помимо этого, при сравнении результатов трех расчетов видно, что капиллярные силы оказывают более высокое стабилизирующее воздействие на фронт вытеснения, чем гравитационные силы. Это согласуется с результатами расчета безразмерных чисел S и G , из которого видно, что на всем рассматриваемом диапазоне вязкостей нефти поправка за счет капиллярных сил выше поправки за счет гравитации.

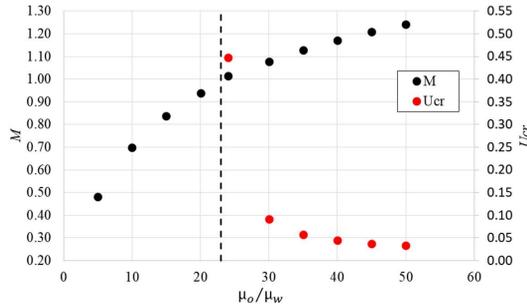


Рис. 6. Критические числа для вытеснения нефти с учетом гравитационных сил
Fig. 6. Critical oil displacement numbers considering gravitational forces

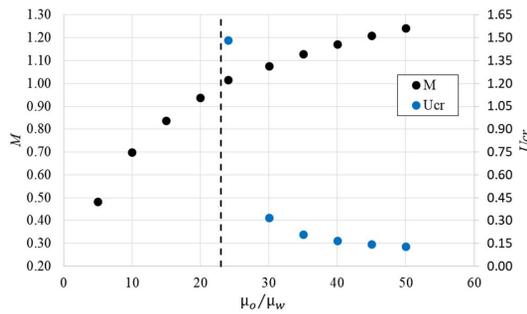


Рис. 7. Критические числа для вытеснения нефти с учетом капиллярных сил
Fig. 7. Critical oil displacement numbers considering capillary forces

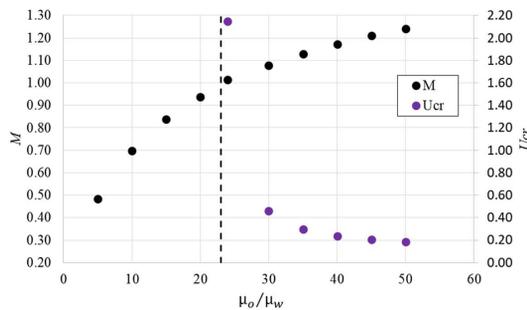


Рис. 8. Критические числа для вытеснения нефти с учетом гравитационных и капиллярных сил
Fig. 8. Critical oil displacement numbers considering gravitational and capillary forces

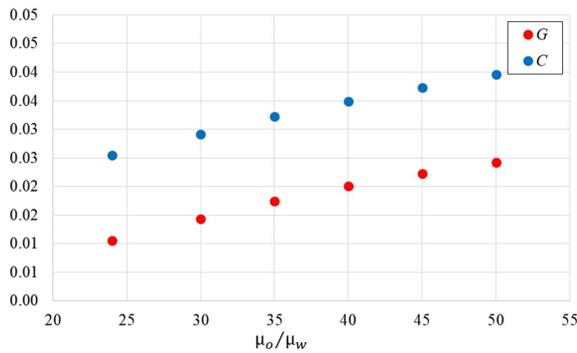


Рис. 9. Зависимость безразмерных параметров G и C от относительной вязкости нефти

Fig. 9. Dependence of G and C dimensionless parameters on the relative oil viscosity

Заклучение

В настоящей работе была получена математическая модель вытеснения нефти водой, которая является обобщением модели Бакли — Леверетта за счет учета гравитационных и капиллярных сил.

Анализ возникновения неустойчивого вытеснения показал, что гравитационные и капиллярные силы могут оказывать стабилизирующее воздействие в случае, когда подвижность вытесняющего флюида выше подвижности вытесняемого.

Введенные безразмерные параметры M , G , C позволяют проанализировать влияние вязких, гравитационных и капиллярных сил на фронт вытеснения в процессе заводнения. Установлено, что капиллярные силы оказывают более высокое стабилизирующее воздействие, чем гравитационные.

Помимо этого, проведенный анализ устойчивости на модельных данных позволил определить диапазон вязкости нефти ($M < 1$), в котором вязких сил недостаточно для роста возмущений и образования «языков» обводненности, а для диапазона вязкостей со значениями $M > 1$ был произведен расчет критической скорости, при которой гравитационные и капиллярные силы еще могут стабилизировать рост возмущений.

Список источников

- Байков В. А., Бахтизин Р. Н. 1986. Распространение волн возмущений в смолосодержащих нефтях // Инженерно-физический журнал. Том 51. № 2. С. 240–242.
- Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рыжик В. М. 1984. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра. 211 с.
- Башкирцева Н. Ю. 2014. Высоковязкие нефти и природные нефти // Вестник Казанского технологического университета. Том 17. № 19. С. 296–299.
- Бублик С. А., Семин М. А. 2020. Исследование неустойчивости Саффмана — Тейлора в нефтесодержащем пласте в двумерной постановке задачи // Математическое моделирование. Том 32. № 7. С. 127–142. <https://doi.org/10.20948/mm-2020-07-08>

- Зазовский А. Ф. 1986. Об устойчивости фронтального вытеснения жидкостей в пористой среде при наличии межфазного массообмена и фазовых переходов // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. № 2. С. 98–103.
- Пятков А. А., Косяков В. П. 2017. Исследование процессов фильтрации высоковязкой нефти в трещиновато-пористом коллекторе // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 3. № 3. С. 40–51. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2017-3-3-40-51>
- Уиллхайт Г. П. 2009. Заводнение пластов / пер. с англ. Н. В. Романенко; под общ. ред. В. А. Коротовских, В. А. Краснова, Т. Р. Мусабирова и др. М.; Ижевск: Институт компьютерных исследований; Регулярная и хаотическая динамика. 788 с.
- Федоров К. М., Шарафутдинов Р. Ф. 1989. К теории неизотермической фильтрации с фазовыми переходами // Известия АН СССР. Механика жидкости и газа. № 5. С. 78–85.
- Федоров К. М., Поспелова Т. А., Шевелёв А. П., Кряжев Я. А., Кряжев В. А. 2019. К вопросу устойчивости фронтов вытеснения нефти из терригенных и карбонатных коллекторов // Нефтепромысловое дело. № 11 (611). С. 69–72. [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-11\(611\)-69-72](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-11(611)-69-72)
- Чарный И. А. 1963. Подземная гидрогазодинамика. М: Гостоптехиздат. 396 с.
- Dietz D. N. 1953. A theoretical approach to the problem of encroaching and by-passing edge water // Proceedings of Akademie van Wetenschappen. Vol. 56-B. Pp. 83–92.
- McDowell A., Zarrouk S. J., Clarke R. 2016. Modelling viscous fingering during reinjection in geothermal reservoirs // Geothermics. Vol. 64. Pp. 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.06.003>
- Melrose J. C. 1974. Role of capillary forces in determining microscopic displacement efficiency for oil recovery by waterflooding // Journal of Canadian Petroleum Technology. Vol. 13. No. 4. Pp. 54–62. <https://doi.org/10.2118/74-04-05>
- Mishra M., Martin M., De Wit A. 2007. Miscible viscous fingering with linear adsorption on the porous matrix // Physics of Fluids. Vol. 19. No. 7. Article 073101. <https://doi.org/10.1063/1.2743610>
- Moortgat J. 2016. Viscous and gravitational fingering in multiphase compositional and compressible flow // Advances in Water Resources. Vol. 89. Pp. 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.01.002>
- Perkins T. K., Johnston O. C. 1969. A study of immiscible fingering in linear models // Society of Petroleum Engineers Journal. Vol. 9. No. 01. Pp. 39–46. <https://doi.org/10.2118/2230-PA>
- Peters E. J., Flock D. L. 1981. The onset of instability during two-phase immiscible displacement in porous media // Society of Petroleum Engineers Journal. Vol. 21. No. 02. Pp. 249–258. <https://doi.org/10.2118/8371-PA>
- Rapoport L. A., Leas W. J. 1953. Properties of linear waterfloods // Journal of Petroleum Technology. Vol. 5. No. 05. Pp. 139–148. <https://doi.org/10.2118/213-G>
- Saffman P. G., Taylor G. I. 1958. The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid // Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences. Vol. 245. No. 1242. Pp. 312–329. <https://doi.org/10.1098/rspa.1958.0085>
- Yuan Q., Zhou X., Wang J., Zeng F., Knorr K. D., Imran M. 2019. Control of viscous fingering and mixing in miscible displacements with time-dependent rates // AIChE Journal. Vol. 65. No. 1. Pp. 360–371. <https://doi.org/10.1002/aic.16359>

Zhu D., Gates I. D. 2017. Unveiling the causes of fingering in steam-assisted heavy oil recovery — linear instability analysis and numerical simulation // SPE Reservoir Simulation Conference (20–22 February 2017, Montgomery, Texas, USA). <https://doi.org/10.2118/182631-MS>

References

- Baikov, V. A., & Bakhtizin, R. N. (1986). Perturbation-wave propagation in petroleum containing tar. *Inzhenerno-fizicheskiy zhurnal*, 51(2), 240–242. [In Russian] (English version: *Journal of Engineering Physics*, 51(2), 927–929. <https://doi.org/10.1007/BF00871191>)
- Barenblatt, G. I., Entov, V. M., & Ryzhik, V. M. (1984). *Movement of Liquids and Gases in Natural Formations*. Nedra. [In Russian]
- Bashkirtseva, N. Yu. (2014). High viscosity oils and natural oils. *Herald of Kazan Technological University*, 17(19), 296–299. [In Russian]
- Bublik, S. A., & Semin, M. A. (2020). Study on the formation of Saffman–Taylor instability in oil reservoir in two-dimensional formulation. *Matematicheskoe modelirovanie*, 32(7), 127–142. <https://doi.org/10.20948/mm-2020-07-08> [In Russian]
- Zazovskii, A. F. (1986). Stability of frontal displacement of fluids in a porous medium in the presence of interphase mass transfer and phase transitions. *Izvestia RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, (2), 98–103. [In Russian] (English version: *Fluid Dynamics*, 21(2), 251–256. <https://doi.org/10.1007/BF01050177>)
- Pyatkov, A. A., & Kosyakov, V. P. (2017). Study of filtration of high-viscosity oil in fractured-porous reservoir. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 3(3), 40–51. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2017-3-3-40-51> [In Russian]
- Willhite, G. P. (2009). *Waterflooding* (N. V. Romanenko, Trans.). Institute for Computer Science; Regular and Chaotic Dynamics Center. [In Russian] (Original work published 1986, Society of Petroleum Engineers)
- Fedorov, K. M., & Sharafutdinov, R. F. (1989). Contribution to the theory of nonisothermal flow through porous media with phase transitions. *Izvestia RAN. Mekhanika zhidkosti i gaza*, (5), 78–85. [In Russian] (English version: *Fluid Dynamics*, 24(5), 721–727. <https://doi.org/10.1007/BF01051725>)
- Fedorov, K. M., Pospelova, T. A., Shevelev, A. P., Kryazhev, Ya. A., & Kryazhev, V. A. (2019). Stability of the oil displacement front for terrigenous and carbonate reservoirs. *Oilfield Engineering*, (11), 69–72. [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-11\(611\)-69-72](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-11(611)-69-72) [In Russian]
- Charny, I. A. (1963). *Underground Hydrogas Dynamics*. Gostoptehizdat. [In Russian]
- Dietz, D. N. (1953). A theoretical approach to the problem of encroaching and by-passing edge water. *Proceedings of Akademie van Wetenschappen*, 56-B, 83–92.
- Mcdowell, A., Zarrouk, S. J., & Clarke, R. (2016). Modelling viscous fingering during reinjection in geothermal reservoirs. *Geothermics*, 64, 220–234. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.06.003>
- Melrose, J. C. (1974). Role of capillary forces in detennining microscopic displacement efficiency for oil recovery by waterflooding. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 13(4), 54–62. <https://doi.org/10.2118/74-04-05>
- Mishra, M., Martin, M., & De Wit, A. (2007). Miscible viscous fingering with linear adsorption on the porous matrix, *Physics of Fluids*, 19(7), Article 073101. <https://doi.org/10.1063/1.2743610>

- Moortgat, J. (2016). Viscous and gravitational fingering in multiphase compositional and compressible flow. *Advances in Water Resources*, 89, 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.01.002>
- Perkins, T. K., & Johnston, O. C. (1969). A study of immiscible fingering in linear models. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 9(01), 39–46. <https://doi.org/10.2118/2230-PA>
- Peters, E. J., & Flock, D. L. (1981). The onset of instability during two-phase immiscible displacement in porous media. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 21(02), 249–258. <https://doi.org/10.2118/8371-PA>
- Rapoport, L. A., & Leas, W. J. (1953). Properties of linear waterfloods. *Journal of Petroleum Technology*, 5(05), 139–148. <https://doi.org/10.2118/213-G>
- Saffman, P. G., & Taylor, G. I. (1958). The penetration of a fluid into a porous medium or Hele-Shaw cell containing a more viscous liquid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 245(1242), 312–329. <https://doi.org/10.1098/rspa.1958.0085>
- Yuan, Q., Zhou, X., Wang, J., Zeng, F., Knorr, K. D., & Imran, M. (2019). Control of viscous fingering and mixing in miscible displacements with time-dependent rates. *AIChE Journal*, 65(1), 360–371. <https://doi.org/10.1002/aic.16359>
- Zhu, D., & Gates, I. D. (2017, February 20–22). *Unveiling the causes of fingering in steam-assisted heavy oil recovery — linear instability analysis and numerical simulation* [Conference paper SPE-182631-MS]. Montgomery, Texas, USA. <https://doi.org/10.2118/182631-MS>

Информация об авторах

Ярослав Александрович Кряжев, аспирант, кафедра моделирования физических процессов и систем, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

kryazhev_yar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9382-7378>

Александр Янович Гильманов, кандидат физико-математических наук, доцент, кафедра моделирования физических процессов и систем, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

a.y.gilmanov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

Константин Михайлович Федоров, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

k.m.fedorov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0347-3930>

Александр Павлович Шевелёв, кандидат физико-математических наук, доцент, профессор кафедры моделирования физических процессов и систем, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

a.p.shevelev@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

Information about the authors

Yaroslav A. Kryazhev, Postgraduate Student, Department of Modeling of Physical Processes and Systems, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia

kryazhev_yar@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9382-7378>

Alexander Ya. Gilmanov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Modeling of Physical Processes and Systems, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia

a.y.gilmanov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7115-1629>

Konstantin M. Fedorov, Dr. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Professor of the Department of Modeling of Physical Processes and Systems, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia

k.m.fedorov@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0347-3930>

Alexander P. Shevelev, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Professor, Department of Modeling of Physical Processes and Systems, School of Natural Sciences, University of Tyumen, Tyumen, Russia

a.p.shevelev@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0017-4871>

Новые подходы к пробоподготовке образцов керна битуминозных пород-коллекторов Восточной Сибири

Максим Ильварович Загидуллин [✉], Артем Геннадьевич Потапов,
Павел Сергеевич Молоков, Алина Николаевна Дудник,
Ольга Владимировна Михайленко

Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: mizagidullin2@tnnc.rosneft.ru [✉]

Аннотация. В работе рассматривается вопрос подбора оптимального растворителя и времени экстракции для удаления подвижных нефтяных углеводородов и максимально возможного сохранения битума в поровом пространстве, а также оценка содержания битума в образцах керна пиролитическим методом до и после экстракции. Объектом исследований являются породы нефтенасыщенного пласта Б1 одного из месторождений Восточной Сибири. На основании данных пиролитического метода и визуального осмотра были отобраны образцы керна с сохраненной насыщенностью из максимально битумонасыщенной зоны. Экстракция была проведена на дробленой породе в 8 различных растворителях от 1 до 72 ч. По результатам экстрагирования дробленой породы были выбраны 2 растворителя для щадящей экстракции образцов — гексан и петролейный эфир — и 2 растворителя для полной экстракции образцов — толуол и хлороформ. На следующем этапе проведена экстракция консолидированных образцов. Для проведения исследований были отобраны 2 битумонасыщенных образца и 10 плашек (образец и плашки отобраны с одного места взятия) пласта Б1, представленных битумонасыщенным доломитом. Исследования на образцах керна проводились пиролитическим методом, методом ЯМР и газоволюметрическим методом при сохраненной насыщенности и после экстракции от 1 ч до 28 сут. Для определения общей пористости битуминизированных образцов керна нет необходимости в проведении полной экстракции. Пористость можно определить в любой момент проведения экстракции, даже в том случае, если экстракция еще не завершена или проведена только щадящая экстракция с сохранением битумов.

Ключевые слова: битум, оптимальный растворитель для щадящей экстракции, время экстракции, Восточная Сибирь, пиролитический метод, газоволюметрический метод, ЯМР, общая пористость

Цитирование: Загидуллин М. И., Потапов А. Г., Молоков П. С., Дудник А. Н., Михайленко О. В. 2024. Новые подходы к пробоподготовке образцов керна битуминозных пород-коллекторов Восточной Сибири // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 4 (40). С. 132–148. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-132-148>

Поступила 29.11.2024; одобрена 13.12.2024; принята 16.12.2024

New approaches to core samples preparation from bituminous reservoir rocks in Eastern Siberia

Maxim I. Zagidullin , Artem G. Potapov, Pavel S. Molokov, Alina N. Dudnik, Olga V. Mikhailenko

Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia
Corresponding author: mizagidullin2@tnnc.rosneft.ru 

Abstract. Numerous bitumen occurrences are widely developed on the territory of the Siberian platform, some of which are not infrequently associated with oil and gas condensate deposits. Bitumen accumulations from small inclusions to large zones in reservoirs negatively affect the filtration-capacitance properties of the rock and have low productivity during well testing. This paper studies the selection of optimal solvent and extraction time for removal of mobile oil hydrocarbons and maximum possible preservation of bitumen in the pore space, as well as the estimation of bitumen content in core samples by pyrolytic method before and after extraction. The object of research is rocks of oil-saturated formation B1 of one of the fields of Eastern Siberia. Using the pyrolytic method and visual inspection, core pieces with preserved saturation were selected from the maximum bituminous-saturated zone. Extraction was carried out on crushed rock in 8 different solvents from 1 to 72 hours. Based on the results of the extraction of crushed rock, 2 solvents were chosen for gentle extraction of samples — hexane and petroleum ether — and 2 solvents for complete extraction of samples — toluene and chloroform. The next step involved the extraction of samples: 2 bitumen-saturated samples and 10 plugs (the sample

and plugs were taken from the same sampling site) of the B1 formation, represented by bitumen-saturated dolomite. Studies on core samples were carried out by pyrolytic method, nuclear magnetic resonance (NMR), and gas-volumetric method at preserved saturation and after extraction from 1 hour to 28 days. A full extraction is not necessary to determine the total porosity of bituminised core samples. Porosity can be determined at any time of extraction, even if extraction is not yet complete or only a gentle extraction with bitumen preservation has been carried out.

Keywords: bitumen, optimal solvent for gentle extraction, extraction time, Eastern Siberia, pyrolytic method, gas-volumetric method, NMR, total porosity

Citation: Zagidullin, M. I., Potapov, A. G., Molokov, P. S., Dudnik, A. N., & Mikhailenko, O. V. (2024). New approaches to core samples preparation from bituminous reservoir rocks in Eastern Siberia. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(4), 132–148. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-4-132-148>

Received Nov. 29, 2024; Reviewed Dec. 13, 2024; Accepted Dec. 16, 2024

Введение

На территории Сибирской платформы широко развиты многочисленные битумопроявления, часть из которых нередко ассоциируются с нефтяными и газоконденсатными залежами [Баженова, 2019]. Скопления битумов от мелких включений до крупных зон в резервуарах негативно влияют на фильтрационно-емкостные свойства породы и при испытании скважины имеют низкую продуктивность.

Достоверная оценка пустотного пространства карбонатных коллекторов необходима для корректной оценки запасов УВ сырья, а также для планирования эффективной системы разработки таких объектов. Наибольший объем данных по петрофизическим свойствам горных пород получают при выполнении геофизических исследований скважин (ГИС), однако для получения достоверных результатов интерпретации материалов ГИС необходима надежная петрофизическая основа, которая создается в результате комплексного изучения керна [Фадеев, Гильманов, 2023]. В настоящее время для выделения битуминозных зон на нефтегазоконденсатных месторождениях Восточной Сибири используется комплекс ГИС, в т. ч. ядерно-магнитный каротаж (ЯМК). Наиболее широко применяемые методики интерпретации данных ЯМК основаны на результатах исследований образцов керна методом ядерно-магнитного резонанса (ЯМР).

Важной особенностью изучения битумов является разная чувствительность методов ГИС и лабораторных исследований керна к битуму. При скважинных измерениях плотностным методом битум входит в состав флюидов, т. к. плотность флюидов в промытой зоне (фильтрат бурового раствора и остаточная нефть) близка к плотности битума, таким образом, на пористость по ГИС битумы не влияют. При проведении лабораторных исследований существует традиционная схема изучения образцов керна,

закрывающаяся в очистке порового пространства путем экстракции от УВ, определении ФЕС образцов керна различными методами в соответствии с ГОСТ 26450.0–85ⁱ, ГОСТ 26450.1–85ⁱⁱ или другой аттестованной методикой. Но в битуминизированных породах невозможно полностью удалить битумы методом экстракции, поэтому на открытую пористость, определенную по керну, битумы влияют. За счет этого пористость, определенная по керну, должна быть ниже пористости по ГИС.

С другой стороны, при проведении специальных и потоковых исследований важно, чтобы смачиваемость была максимально близка к пластовой. Восстановить битумы после исчерпывающей экстракции, которая подразумевает полное удаление УВ, кроме части битума, нерастворимой при экстракции, из изовязкозной модели нефти, которая обычно используется для восстановления смачиваемости, вряд ли удастся. Поэтому для образцов, на которых запланированы специальные исследования, должна применяться щадящая экстракция с максимальным сохранением битумов в образце.

В данной работе под битумом понимаются сложные органические соединения, представляющее собой продукт природного преобразования нефти.

В структуру любого битума входят: твердая, аморфная и жидкая составляющая (фаза). Твердая составляющая представлена асфальтенами, продуктами их преобразования (карбены и карбониды) и парафинами с молекулярной массой 1 000... 5 000 г/моль и плотностью выше 1 г/см³. К аморфной составляющей относятся смолы с молекулярной массой 500... 1 000 г/моль и плотностью около 1 г/см³. Жидкая составляющая представлена маслами (насыщенные и ароматические углеводороды) с молекулярной массой менее 500 г/моль и плотностью ниже 1 г/см³ [Колесникова и др., 2022]. Соотношение между этими фазами определяет состав и свойства битума. Часть компонентов битума может быть растворена с использованием различных растворителей (хлороформ, спиртобензольная смесь, гексан, петролейный эфир и т. д.).

В данной работе рассматривается вопрос подбора оптимального растворителя и времени экстракции для удаления подвижных нефтяных УВ и максимально возможного сохранения битума в поровом пространстве, а также оценка содержания битума в образцах керна пиролитическим методом до и после экстракции. Объектом исследований являются породы нефтенасыщенного пласта Б1 одного из месторождений Восточной Сибири.

Характеристика объекта исследований

Рассматриваемые объекты исследований расположены в пределах Непско-Ботуобинской нефтегазоносной области, входящей в состав Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции. В тектоническом плане участок расположен на юго-западном склоне Непско-Ботуобинской антеклизы на западе Непского свода.

ⁱ ГОСТ 26450.0–85. Породы горные. Общие требования к отбору и подготовке проб для определения коллекторских свойств. М.: Издательство стандартов, 1985. 4 с.

ⁱⁱ ГОСТ 26450.1–85. Породы горные. Метод определения коэффициента открытой пористости жидкостенасыщением. М.: Издательство стандартов, 1985. 12 с.

Нефтеносность и газоносность пород пласта Б1 связана с органогенными постройками усольской свиты нижнего кембрия. Породы сложены преимущественно доломитами и известняками, в т. ч. доломитистыми и доломитовыми, в меньшем объеме — глинисто-карбонатными породами, ангидритами и каменной солью.

Неоднородное строение пластов обуславливает наличие коллекторов сложного типа, кроме того, породы осложнены вторичными процессами (галитизация, ангидритизация), что приводит к сильной изменчивости фильтрационно-емкостных свойств [Чертину и др., 2024; Дистанова и др., 2022].

Объектами исследования являются образцы ядра с сохраненной насыщенностью диаметром 30 мм, отобранные из карбонатных отложений нижнего кембрия (пласт Б1). По литологическому описанию образцы представлены доломитами неравномерно битумо-нефтенасыщенными, неравномерно пористыми. Тип коллектора — порово-каверновый, неравномерно галитизированный, в различной степени насыщенный нефтью и битумом.

Оценка общей пористости образцов ядра выполнялась путем комплексирования результатов газовольюметрического метода и метода ЯМР.

Схема исследований приведена на рис. 1.

Подбор оптимального растворителя и времени экстракции дробленых проб

Одной из целей работы является подбор оптимального растворителя и времени экстракции для удаления подвижных нефтяных УВ и максимально возможного сохранения битума в поровом пространстве.

На основании данных пиролизического метода [Марков и др., 2022] и визуального осмотра были отобраны несколько образцов ядра с сохраненной насыщенностью из максимально битумонасыщенной зоны. Куски были раздроблены и разделены на 41 часть, в каждую из которых в равных пропорциях попал дробленый ядр. Одна из частей сразу была отправлена на пиролизические исследования. Сорок частей были помещены в индивидуальные пакетики из фильтровальной бумаги и отправлены в экстракцию. Для проведения щадящей и полной экстракции были выбраны 8 растворителей. Под термином щадящая экстракция нами понимается очистка образцов ядра от УВ с использованием органического растворителя, в процессе которой удаляются подвижные нефтяные УВ и при этом максимально возможно сохраняется битум в поровом пространстве. Длительность экстракции составляла от 1 до 72 ч в течение 5 этапов. После каждого этапа экстрагирования 8 пакетиков с дроблеными образцами (по 1 на каждый растворитель) были отправлены на исследования пиролизическим методом (рис. 1а).

Для определения массовой доли битума в породе проводили пиролизический анализ измельченных образцов ядра с использованием анализатора Rock-Eval 6 Standard по модифицированному методу PAM-RE (petroleum assessment method for Rock-Eval) (табл. 1).

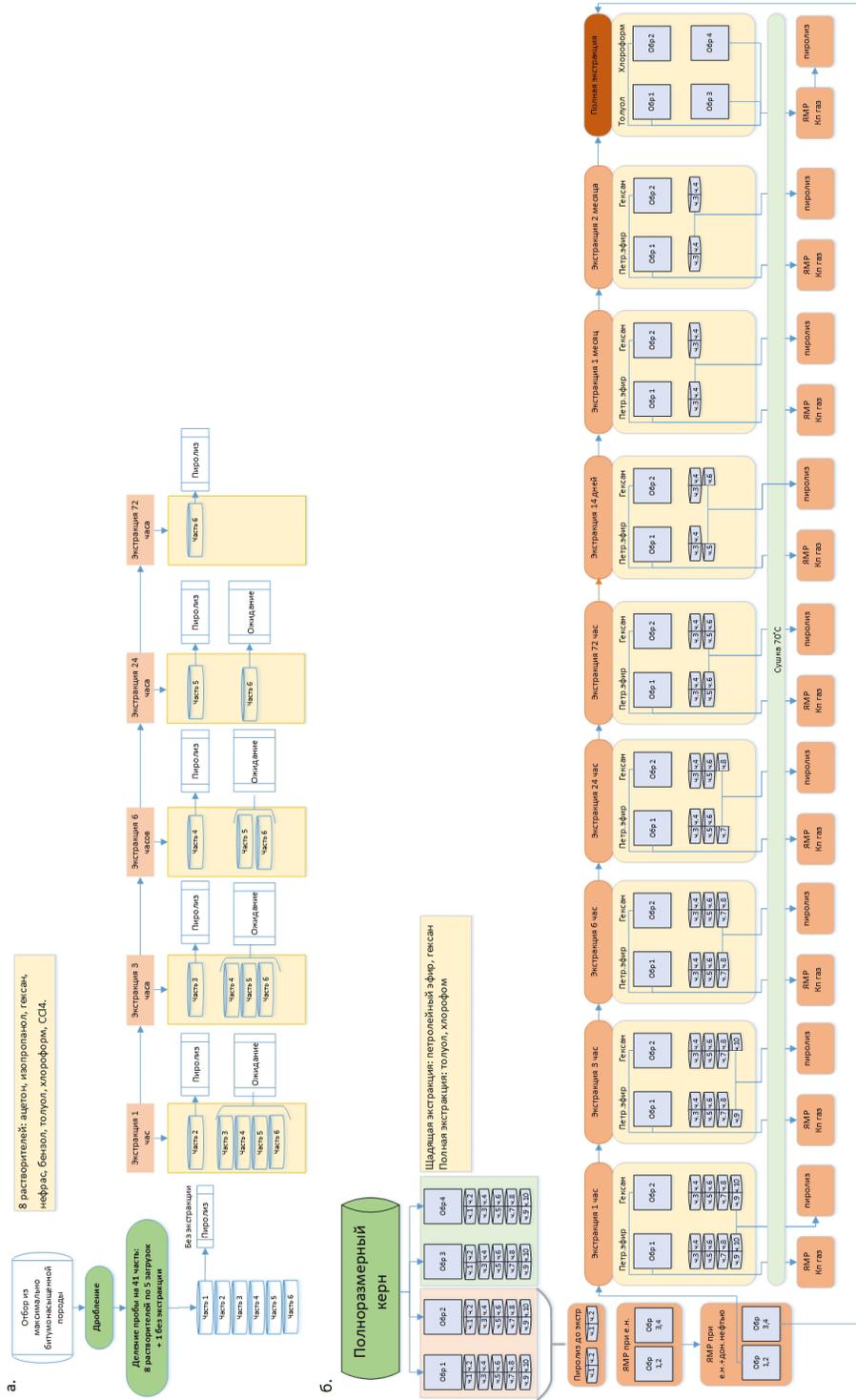


Рис. 1. Схема исследований: а — на дробленной породе, б — на плашках
 Fig. 1. Scheme of research: а — on crushed rock, б — on plugs

Табл. 1. Параметры, определяемые в методе PAM-RE

Table 1. Parameters defined in the RAM-RE method

Параметр г/г	Oil1	Oil2	Oil3	CAB*	S ₄ CO, S ₄ CO ₂	NSO
Темп. режим нагрева	до 90 °С	до 180 °С	до 350 °С	до 650 °С	до 650 °С	Расчет. параметр**
Состав фракции	легкая нефть	легкая нефть	тяжелая нефть	смолы и ас-фальтены	кокс	Суммар. содержание CAB*

* CAB — смолисто-асфальтеновые вещества

** NSO = CAB + (S₄CO × 12/28 × 0,1 + S₄CO₂ × 12/44 × 0,1)/0,09 [Эспиталье и др., 1994]

* ARC — asphaltene resin compounds

** NSO = ARC + (S₄CO × 12/28 × 0,1 + S₄CO₂ × 12/44 × 0,1)/0,09 (Espitalie et al., 1994)

После экстракции (1, 3, 6, 24, 72 ч) перед исследованием образцы выветривались в вытяжном шкафу, а затем высушивались не менее 24 ч при температуре 60 °С. Результаты изменения пиролитических параметров приведены на рис. 2. Графики изменения основных пиролитических параметров от времени экстрагирования приведены на рис. 3.

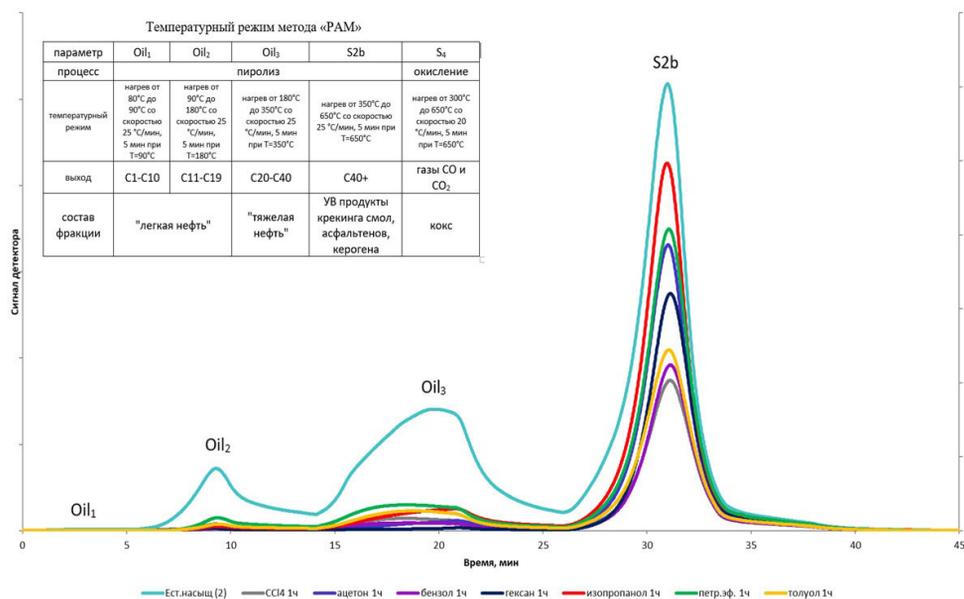


Рис. 2. Результаты пиролиза дробленой породы в различных растворителях

Fig. 2. Results of pyrolysis of crushed rock in different solvents

Из результатов пиролиза (рис. 3) видно, что основную работу по удалению нефтяных УВ и растворению битумов каждый растворитель сделал уже в первый час экстракции. Дальнейшее изменение значений, характеризующих остаточное содержание битума,

после 3, 6, 24 ч экстракции уже не столь критичное. Небольшое увеличение значений некоторых параметров на промежуточных этапах экстракции можно объяснить погрешностью прибора.

Как видно из рис. 3, легкую нефть (фракцию Oil1) все растворители удалили в течение 1 ч. Легкую нефть (фракцию Oil2) гексан, ацетон и хлороформ удалили в течение 1 ч. Остальные растворители удалили фракцию Oil2 в течение 3 ч. Тяжелую нефть (фракцию Oil3) гексан удалил в течение 1 ч. Остальные растворители удалили фракцию Oil3 в течение 3 ч. Смолисто-асфальтеновые вещества (фракцию S2b) хлороформ, толуол, бензол и четыреххлористый углерод удалили от 60 до 85%, остальные удалили от 40 до 60%. Время удаления фракции S2b составило у всех растворителей 3 ч. Оптимальное время экстрагирования дробленой породы составило 3 ч независимо от растворителя. Все растворители так или иначе удаляют битум. Ни один растворитель не удаляет битум полностью.

На основании экспериментальных данных в качестве щадящих растворителей были выбраны ацетон, гексан и петролейный эфир, а в качестве более агрессивных растворителей — хлороформ, толуол, бензол и четыреххлористый углерод. Несмотря на то, что изопропанол также подходит для щадящей экстракции, в этой работе мы его не будем использовать, т. к. он растворяет соли, входящие в состав породы.

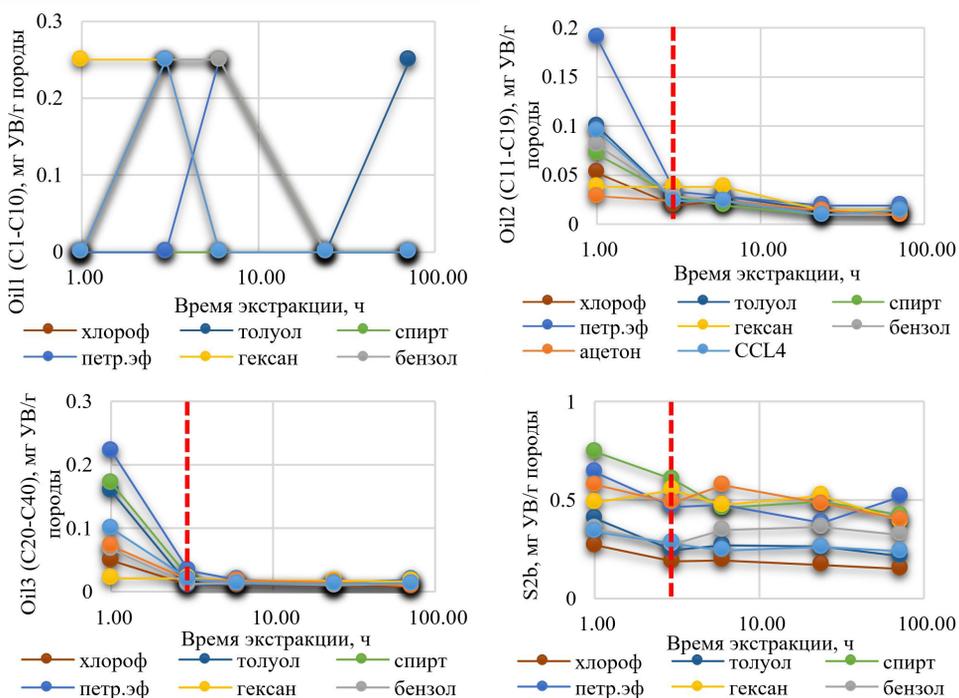


Рис. 3. Изменения основных пиролизических параметров от времени экстракции дробленой породы в различных растворителях

Fig. 3. Variations of the main pyrolytic parameters from the extraction time of crushed rock in different solvents

Подбор оптимального растворителя и времени экстракции плашек

После получения результатов экстракции дробленой породы на следующем этапе проведена экстракция консолидированных образцов. Для проведения исследований были отобраны 2 битумонасыщенных образца и 10 плашек (образец и плашки к нему отобраны с одного места взятия) пласта Б1 одного из месторождений Восточной Сибири, представленных битумонасыщенным доломитом (рис. 4). Под плашкой подразумевается спиленная в поперечном направлении часть цилиндрического образца толщиной 5...10 мм. Каждая плашка была разделена пополам (рис. 1б).

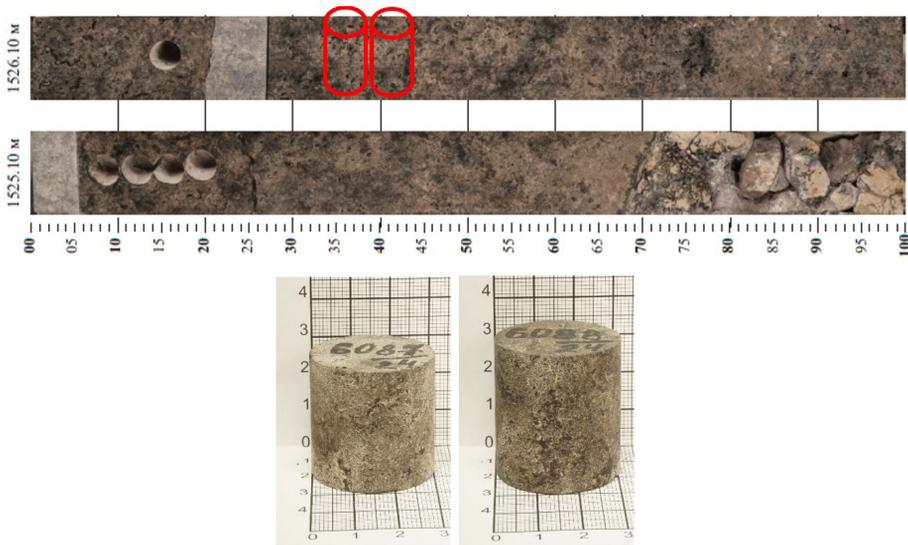


Рис. 4. Место отбора и фото образцов пласта Б1 одного из месторождений Восточной Сибири

Fig. 4. Sampling location and photo of samples from the B1 reservoir of one of the East Siberian fields

На основании результатов экстрагирования дробленой породы были выбраны 2 растворителя для щадящей экстракции образцов — гексан и петролейный эфир и 2 растворителя для полной экстракции — толуол и хлороформ. Исследования проводились пиролитическим методом, методом ЯМР и газовольюметрическим методом при сохраненной насыщенности и после экстракции от 1 ч до 28 сут. Графики изменения основных пиролитических параметров от времени экстрагирования приведены на рис. 5. Полученные результаты приведены в табл. 2 и на рис. 6.

Газовольюметрические исследования выполнены с помощью пермеметра «ПИК-ПП». ЯМР-исследования проведены на 2 битуминозных образцах при сохраненной насыщенности, после донасыщения сырой нефтью и после экстракции от 1 ч до 28 сут с использованием ЯМР-спектрометра GeoSpec DRX-HF с резонансной частотой 2,3 МГц.

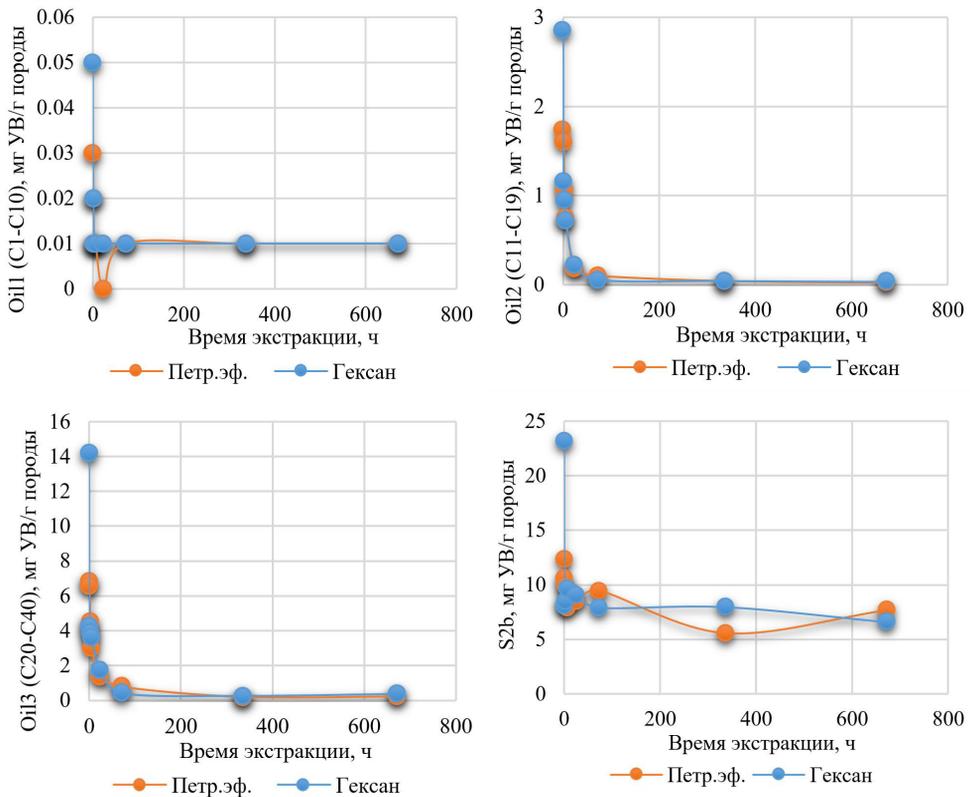


Рис. 5. Изменения основных пиролитических параметров от времени экстракции плашек в различных растворителях

Fig. 5. Variations of the main pyrolytic parameters from the time of extraction of diesters in different solvents

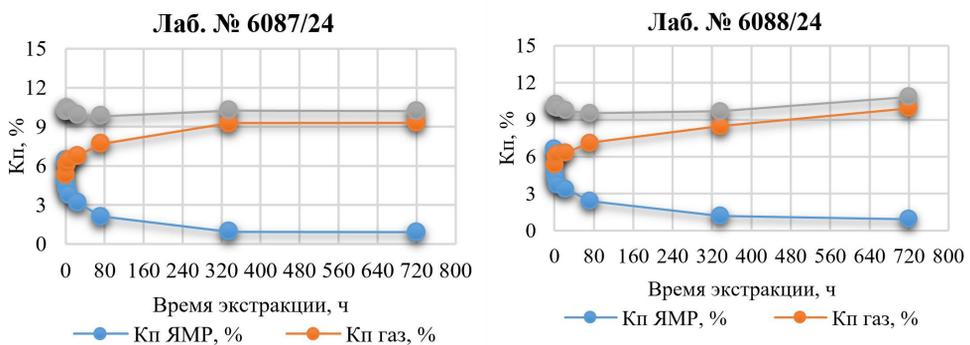


Рис. 6. Зависимости пористости разными методами (ЯМР и газовольюметрический) от времени экстракции

Fig. 6. Dependences of porosity by different methods (NMR and gas-volumetric) on extraction time

Табл. 2. Результаты определения емкостных свойств цилиндрических образцов при различном времени экстракции**Table 2.** Results of determining capacitive properties of cylindrical samples at different extraction times

№ обр.	Объем. флюидонасыщ. по ЯМР, %	Кп ЯМР донасыщ. нефтью, %		
6087/24	6,45	8,46		
6088/24	6,63	7,97		

Время, ч	№ обр.	Кп ЯМР*, %	Кп гелий**, %	Кп общ***, %
1	6087/24	4,85	5,37	10,22
	6088/24	4,69	5,35	10,04
3	6087/24	4,33	6,13	10,46
	6088/24	4,25	6,03	10,29
6	6087/24	3,83	6,45	10,28
	6088/24	3,71	6,24	9,96
24	6087/24	3,17	6,77	9,94
	6088/24	3,41	6,31	9,72
72	6087/24	2,12	7,69	9,81
	6088/24	2,42	7,12	9,54
336	6087/24	0,95	9,29	10,24
	6088/24	1,20	8,49	9,69
720	6087/24	0,92	9,30	10,22
	6088/24	0,92	9,92	10,84

* Кп ЯМР — объемное содержание флюидов в матрице породы по ЯМР на данном этапе экстракции, %

** Кп гелий — открытая пористость по гелию на данном этапе экстракции, %

*** Кп общ. — общая пористость на данном этапе экстракции, %

* Кп ЯМР — volumetric content of fluids in the rock matrix by NMR at the given extraction stage, %

** Кп гелий — open porosity by helium at this extraction stage, %

*** Кп общ. — total porosity at this extraction stage, %

Результатом обработки регистрируемого сигнала ЯМР является распределение сигнала ЯМР по временам поперечной релаксации T_2 , соответствующим разным скоростям релаксации флюида в порах разного размера. Поскольку время релаксации пропорционально размеру пор, то, следовательно, дифференциальное (инкрементное) распределение пористости по временам релаксации характеризует также и распределение пористости по размерам пор. Таким образом, наблюдаемое распределение сигнала T_2 является отображением распределения порового пространства породы [Coates и др., 1999]. Для большей наглядности дифференциальный спектр может быть пересчитан в парциальный спектр (кумулятивная кривая). Этот вид спектра используется для определения пористости.

Спектры T2 при сохраненной насыщенности имеют двухмодальное распределение (рис. 7). После донасыщения нефтью часть пор, занятых воздухом, стали заполнены нефтью. Ширина спектров практически не изменилась, но увеличилась амплитуда.

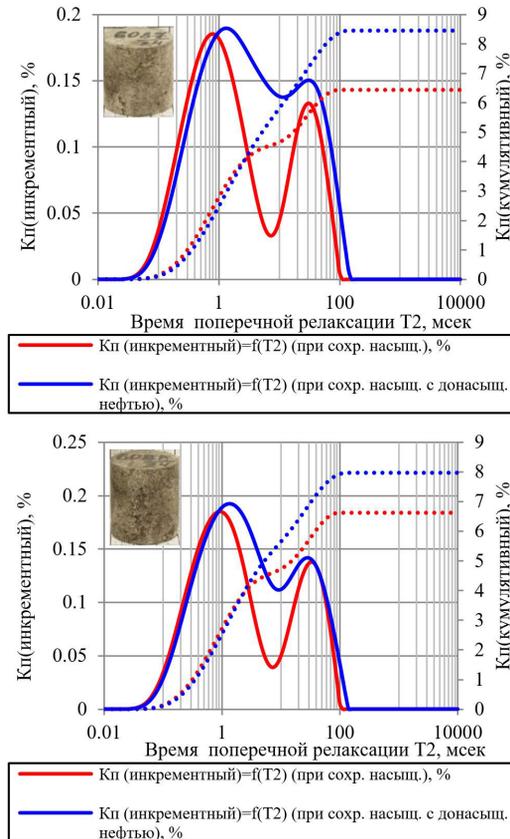


Рис. 7. T2 распределения образцов при сохраненной насыщенности и после донасыщения нефтью одного из месторождений (слева направо: 6087/24, 6088/24)

Fig. 7. T2 distributions of samples at preserved saturation and after oil saturation of one of the fields (left to right: 6087/24, 6088/24)

После экстракции в петролейном эфире/гексане в течение первого часа и выветривании в течение суток и дальнейшей сушки при 70 °С не менее 48 ч вторая мода в диапазоне T2 от 10...100 мс практически не видна из-за удаления нефти и части растворимых битумов, распределения T2 имеют одномодальный вид (рис. 8). Сигнал ЯМР в диапазоне значений T2 от 0,1...3 мс соответствует связанной микрокристаллической воде и битуму (той части, что видна при 2 МГц), в диапазоне 3...100 мс — оставшейся высоковязкой нефти и воде. С увеличением времени экстракции наблюдается уменьшение амплитуды моды в диапазоне T2 от 0,1...10 мс, что связано с потерей части растворимых битумов и воды.

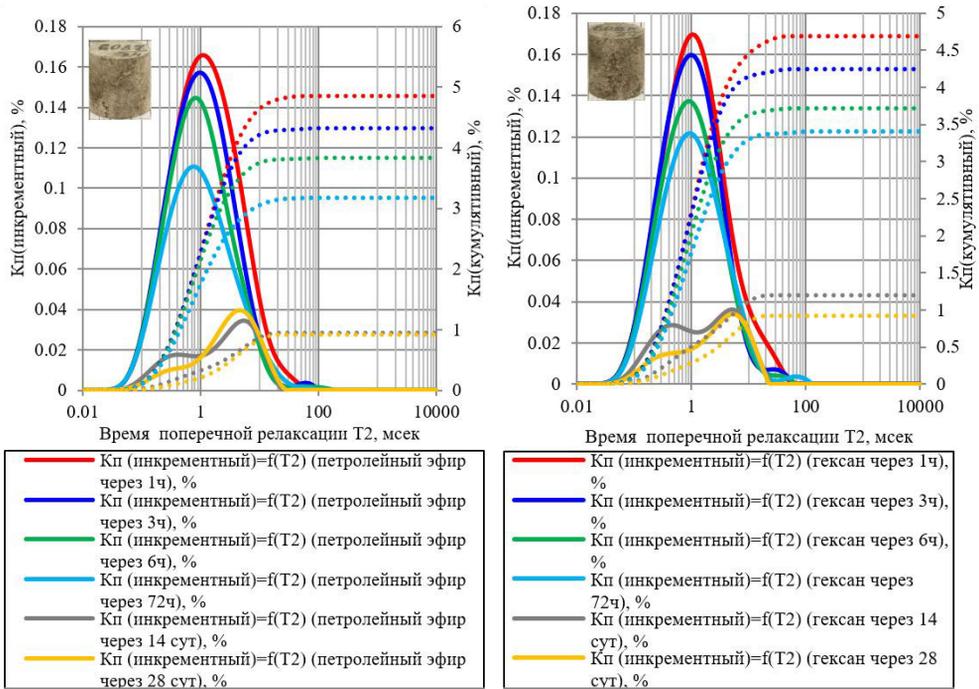


Рис. 8. T2 распределения образцов после щадящей экстракции в петролейном эфире (слева) и гексане (справа) через 1, 3, 6, 72 ч и 14, 28 сут одного из месторождений (слева направо: 6087/24, 6088/24)

Fig. 8. T2 distributions of samples after gentle extraction in petroleum ether (left) and hexane (right) after 1, 3, 6, 72 h and 14, 28 days of one of the deposits (left to right: 6087/24, 6088/24)

На рис. 9 изображены спектры времен поперечной релаксации T2 (спектры T2) флюидов, измеренных в свободном объеме и приуроченных к месторождениям Восточной Сибири. Для сравнения приведены спектры T2 керосина, дистиллированной воды.

Особенность пластовой воды заключается в ее аномальных свойствах в связи с содержанием в ней пара- и ферромагнетиков, которые способствуют значительному укорочению времен релаксации [Загидуллин и др., 2020].

Метод ЯМР позволяет определить часть порового пространства, занятую флюидами, а с помощью газоволюметрического метода можно определить другую часть порового пространства, которая не занята флюидами. Таким образом, общая пористость образцов будет равняться сумме пористости по ЯМР и пористости, определенной газоволюметрическим методом [Загидуллин и др., 2022]. Преимущество данного способа состоит в том, что общую пористость можно определить в любой момент проведения экстракции, даже в том случае, если экстракция еще не завершена или проведена только щадящая экстракция с сохранением битумов.

$$K_{п\text{общ}} = K_{п\text{ямр}} + K_{п\text{гаелий}} \quad (1)$$

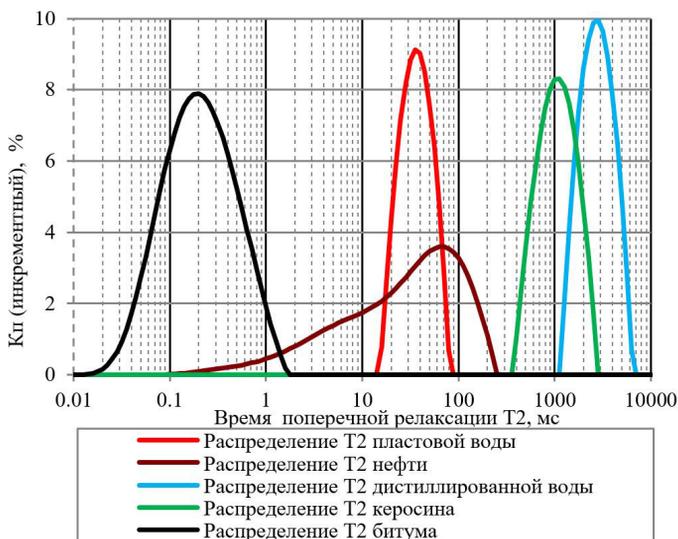


Рис. 9. Распределения времени поперечной релаксации T2 для различных флюидов в свободном объеме

Fig. 9. Distributions of transverse relaxation time T2 for different fluids in the free volume

Результаты определения общей пористости комплексным способом на исследованных образцах приведены в табл. 2.

Важно отметить, что пористость по ЯМР, определенная на образце с сохраненной насыщенностью, включает в себя объемное содержание битума в единицах пористости:

$$K_{п\ ямр} = K_{п\ бит\ ямр} + K_{п\ oil1\ ямр} + K_{п\ oil2\ ямр} + K_{п\ oil3\ ямр}, \quad (2)$$

где $K_{п\ бит\ ямр}$ — объемное содержание битума в матрице породы по методу ЯМР, д. е.;

$K_{п\ oil1\ ямр}$ — объемное содержание легкой нефти в матрице породы по методу ЯМР, д. е.;

$K_{п\ oil2\ ямр}$ — объемное содержание легкой нефти в матрице породы по методу ЯМР, д. е.;

$K_{п\ oil3\ ямр}$ — объемное содержание тяжелой нефти в матрице породы по методу ЯМР, д. е.

Чувствительность ЯМР к битуму различная. Оценить содержание битума в образцах керна карбонатных отложений Восточной Сибири возможно двумя независимыми способами: 1) путем комплексирования результатов пиролиза и экстракционно-дистилляционного метода (ЭДМ) [Фадеев, Гильманов, 2023] и 2) по результатам анализа метода ЯМР с использованием граничных отсечек. Таким образом, при определении пористости по ЯМР (2) необходимо оценить чувствительность ЯМР к битуму.

Заключение

Для проведения специальных исследований (смачиваемость методом USBM, потоковые эксперименты) должна применяться щадящая экстракция образцов керна с максимальным сохранением битумов.

На основании экспериментальных данных в качестве щадящего растворителя рекомендуется использовать гексан для максимального сохранения битума в поровом пространстве. Время проведения щадящей экстракции составляет 3 ч.

Для определения общей пористости битуминизированных образцов керн не необходимости в проведении полной экстракции. Пористость можно определить в любой момент проведения экстракции, даже в том случае, если экстракция еще не завершена или проведена только щадящая экстракция с сохранением битумов. С помощью метода ЯМР возможна оценка объемного содержания битума с учетом чувствительности метода.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Баженова Т. К. 2019. Твердые битумы Сибирской платформы // Геохимия нефти и газа, нефтематеринских пород, угля и горючих сланцев: материалы Всеросс. науч. конф. (14–16 октября 2019 г., Сыктывкар, Россия). С. 7–8.
- Дистанова Л. Р., Коваленко Е. В., Аржиловская Н. Н., Максимова Е. Н., Неделько О. В., Чертина К. Н. 2022. Особенности геологического строения и петрофизического моделирования продуктивных отложений усть-кутского горизонта (Непско-Ботуобинская область) // Экспозиция Нефть Газ. № 3 (88). С. 22–26. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2022-3-22-26>
- Загидуллин М. И., Гильманов Я. И., Кукарский М. С. 2022. Способ определения общей пористости естественно-насыщенных образцов горных пород с использованием метода ЯМР: пат. 2780988 РФ / патентообладатель Тюменский нефтяной научный центр. № 2021136997, заявл. 13.12.2021; опубл. 04.10.2022, Бюл. № 28.
- Загидуллин М. И., Кузнецов Е. Г., Потапов А. Г., Гильманов Я. И., Локшин Д. А. 2020. Оценка влияния проникновения фильтрата бурового раствора в кавернозных коллекторах пласта Б5 Даниловского месторождения на результаты ЯМК. Нефтяная провинция. № 4 (24). С. 175–196. <https://doi.org/10.25689/NP.2020.4.175-196>
- Колесникова Л. Г., Мокрова М. В., Иванова Т. А. 2022. Органические вяжущие вещества и материалы на основе битумов: учеб. пос. для вузов. Казань: Бук. 78 с.
- Марков В. В., Заночуев С. А., Рязанова Т. А. 2022. Способ выделения битумонасыщенных интервалов в карбонатных породах на основе результатов пиролитического исследования // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. № 5 (365). С. 32–35.
- Фадеев А. М., Гильманов Я. И. 2023. Изучение битуминозных интервалов карбонатных пластов Восточной Сибири по данным керн // Каротажник. № 5 (325). С. 84–95.
- Чертина К. Н., Ульянова А. В., Аржиловская Н. Н., Мусин Р. А., Савичев К. С. 2024. Особенности процессов доломитизации пласта Б1 (кембрий, Восточная Сибирь) и связь с емкостными свойствами пород // Гетерогенность в осадочных системах: материалы 14 Уральского литологического совещания (научной конференции). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. С. 219–222. http://www.igg.uran.ru/sites/default/files/Conferences/kniga_litolssoveshch_2024_sait_0.pdf (дата обращения: 14.12.2024).
- Эспиталье Дж., Дроует С., Маркуис Ф. 1994. Оценка нефтеносности с помощью прибора Rock-Eval с компьютером // Геология нефти и газа. № 1. С. 23–32.
- Coates G. R., Xiao L. Z., Prammer M. G. 1999. NMR Logging: Principles and Applications. Houston: Gulf Publishing Company. 235 pp.

References

- Bazhenova, T. K., (2019). Solid bitumens of the Siberian platform. In *Geochemistry of Oil and Gas, Petroleum Mother Rocks, Coal and Oil Shale: Proceedings of the All-Russian Scientific Conference (October 14–16, 2019, Syktyvkar, Russia)* (pp. 7–8). Institute of Geology Komi SC UB RAS. [In Russian]
- Distanova, L. R., Kovalenko, E. V., Arzhilovskaya, N. N., Maksimova, E. N., Nedelko, O. V., & Chertina, K. N. (2022). Geological setting and petrophysical modeling features of Ust-Kut Carbonate Reservoirs (Nepa-Botuoba Petroleum Province). *Exposition Oil Gas*, (3), 22–26. <https://doi.org/10.24412/2076-6785-2022-3-22-26> [In Russian]
- Zagidullin, M. I., Gilmanov, Ya. I., & Kukarskiy, M. S. (2022). *Method for Determining Total Porosity of Naturally Saturated Rock Samples Using NMR* (RF Patent No. 2780988). Tyumen Petroleum Research Center. [In Russian]
- Zagidullin, M. I., Kuznetsov, E. G., Potapov, A. G., Gilmanov, Ya. I., & Lokshin, D. A. (2020). Effect of mud filtrate invasion in cavernous reservoirs of B5 horizon in the Danilovsky field on NMR results. *Neftyanaya Provintsiya*, (4), 175–196. <https://doi.org/10.25689/NP.2020.4.175-196> [In Russian]
- Kolesnikova, L. G., Mokrova, M. V., & Ivanova, T. A. (2022). *Organic Binders and Materials Based on Bitumen*. Buk. [In Russian]
- Markov, V. V., Zanochev, S. A., & Ryazanova, T. A. (2022). A method for identifying bitumen-saturated intervals in carbonate rocks based on the results of a pyrolysis study. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, (5), 32–35. [In Russian]
- Fadeev, A. M., & Gilmanov, Ya. I. (2023). Studying bitumen intervals in carbonate formations of East Siberia from core data. *Karotazhnik*, (5), 84–95. [In Russian]
- Chertina, K. N., Ulyanova, A. V., Arzhilovskaya, N. N., Musin, R. A., & Savichev, K. S. (2024). Features of dolomitization processes of formation B1 (Cambrian, Eastern Siberia) and connection with the capacitive properties of rocks. *Heterogeneity in Sedimentary Systems: Materials of the 14th Ural Lithological Meeting (Scientific Conference)* (pp. 219–222). Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry. Retrieved Dec. 14, 2024, from http://www.igg.uran.ru/sites/default/files/Conferences/kniga_litolsoveshch_2024_sait_0.pdf [In Russian]
- Espitalie, J., Drouet, S., & Marquis, F. (1994). Petroleum evaluation by using the petroleum evaluation workstation (a Rock-Eval connected with computer). *Russian Oil and Gas Geology*, (1), 23–32. [In Russian]
- Coates, G. R., Xiao, L. Z., & Prammer, M. G. (1999). *NMR Logging: Principles and Applications*. Gulf Publishing Company.

Информация об авторах

Максим Ильварович Загидуллин, главный специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

mizagidullin2@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7854-9320>

Артём Геннадьевич Потапов, заведующий лабораторией, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

agpotapov@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3010-8070>

Павел Сергеевич Молоков, ведущий специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

psmolokov@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7570-758X>

Алина Николаевна Дудник, специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

andudnik@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7813-5560>

Ольга Владимировна Михайленко, главный специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

ovmikhailenko@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4834-4069>

Information about the authors

Maxim I. Zagidullin, Chief Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia

mizagidullin2@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7854-9320>

Artem G. Potapov, Head of the Laboratory, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia

agpotapov@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0007-3010-8070>

Pavel S. Molokov, Leading Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia

psmolokov@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0006-7570-758X>

Alina N. Dudnik, Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia

andudnik@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0000-7813-5560>

Olga V. Mikhailenko, Chief Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia

ovmikhailenko@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0009-0005-4834-4069>

Научное издание



ВЕСТНИК ТЮМЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика
2024. Том 10. № 4 (40)

Редакторы	<i>Т. П. Сербин, Е. В. Бучкина</i>
Перевод	<i>Т. А. Протасов</i>
Компьютерная верстка	<i>Т. П. Сербин</i>
Дизайн обложки	<i>Г. Ф. Бикмулина</i>
Печать	<i>А. В. Башкиров</i>

Дата выхода в свет 23.12.2024
Формат 70 × 108/16. Бумага Xerox Perfect Print
Обложка Stromcard LI. Гарнитура Arno Pro
Печать электрографическая. 13,13 усл. печ. л., 10,5 уч.-изд. л.
Цена свободная.
Тираж 500 экз. Заказ № 302