

ВЕСТНИК

ТЮМЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
УНИВЕРСИТЕТА

Физико-математическое моделирование.

Нефть, газ, энергетика

Журнал основан в 1998 г.

Выходит 4 раза в год

Том 10. № 2 (38)

2024

Vol. 10. No. 2 (38)

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. Варакин, Москва, 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. Филяровский, 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

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 Определение эффективных параметров термостабилизатора в зависимости от его расположения относительно сваи фундамента
Гильманов А. Я., Ким А. С., Шевелёв А. П.
- 25 Методика моделирования процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ
Сафтли А., Зайцев А. В.

Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ. Информационные технологии

- 45 К вопросу о сопоставимости относительных фазовых проницаемостей, полученных разными методами
Степанов С. В., Вокина В. Р.
- 56 Воспроизведение геомеханических эффектов при адаптации гидродинамической модели слабосцементированного коллектора
Зубарева И. А., Степанов А. В., Гавриш А. С.
- 69 Математическое моделирование продолжительности и частоты водопотребления водоразборными устройствами жилого здания
Поливанов Д. Е., Семенов А. А., Мовсесова Л. В.
- 88 Построение композиционных геолого-структурных моделей в рамках вариационно-сеточного метода геокартирования и объектно-иерархического подхода
Плавник А. Г., Сидоров А. А.
- 104 Сравнительный анализ методов фильтрации замеров данных скважин сложной конструкции
Шенгелия Д. Ю., Коваленко И. В., Захарова И. Г.

Обзоры, рецензии, научные события

- 121 Передовая научная школа профессора Александра Борисовича Шабарова
Дружинина О. М.

Contents

Thermal physics and thermology

- 6 Calculation of the heat stabilizer effective parameters depending on its location relative to the pile
Gilmanov, A. Ya., Kim, A. S., & Shevelev, A. P.
- 25 Methodology for modeling processes in multi-component two-phase LNG systems
Saftly, A., & Zaitsev, A. V.

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

- 45 On the question of comparability of relative phase permeabilities obtained by different methods
Stepanov, S. V., & Vokina, V. R.
- 56 Consideration of geomechanic effects during hydrodynamic model of weakly-cemented reservoir setting
Zubareva, I. A., Stepanov, A. V., & Gavris, A. S.
- 69 Mathematical modeling of the duration and frequency of water consumption by water collection devices of a residential building
Polivanov, D. E., Semenov, A. A., & Movsesova, L. V.
- 88 Construction of compositional geological models using the variational grid method of geomapping and the object-hierarchical approach
Plavnik, A. G., & Sidorov, A. A.
- 104 Comparative analysis of filtering methods for measurement data from complex well configurations
Shengeliya, D. Yu., Kovalenko, I. V., & Zakharova, I. G.

Reviews, Critique, Events

- 121 The cutting-edge research school of Prof. Alexander B. Shabarov
Druzhinina, O. M.

Определение эффективных параметров термостабилизатора в зависимости от его расположения относительно сваи фундамента

Александр Янович Гильманов¹, Андрей Сергеевич Ким²,
Александр Павлович Шевелёв¹✉

¹ Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

² Альянс, Тюмень, Россия

Контакт для переписки: a.p.shevelev@utmn.ru ✉

Аннотация. Поддержание грунта в мерзлом состоянии в условиях криолитозоны является необходимым условием для предотвращения обрушения конструкций. Наиболее эффективным техническим решением для этого является использование двухфазных сезонных термостабилизаторов. Мониторинг состояния вечномёрзлого грунта позволяет принимать своевременные технические решения, предотвращающие протаивание грунта. Определение эффективных параметров таких решений требует математического моделирования тепловых и гидродинамических процессов. Впервые предлагается подход, позволяющий эффективно компенсировать тепловую нагрузку от сваи на грунт, предполагающий расположение термостабилизатора в одной скважине со свайей или на незначительном удалении от нее. Целью работы является расчет эффективных параметров термостабилизатора в зависимости от его расположения относительно сваи. Разработанная математическая модель предполагает выделение пяти задач: 1) обдува надземной части термостабилизатора воздухом; 2) движения жидкого хладагента к нижней части термостабилизатора; 3) охлаждения корпуса термостабилизатора восходящим двухфазным потоком хладагента; 4) теплообмена в системе «хладагент — корпус термостабилизатора — мерзлый грунт»; 5) компенсации теплового потока от сваи в грунт тепловым потоком от грунта в термостабилизатор. Первая задача решается на основе эмпирического критериального уравнения. Вторая и третья задача решаются с использованием законов сохранения массы, импульса и энергии. Четвертая и пятая задача предполагают решение уравнения теплопроводности. В результате расчетов получены эффективные параметры

термостабилизатора, позволяющего компенсировать тепловую нагрузку от сваи на грунт при различном расположении установки. Установлены минимальные латеральные размеры корпуса термостабилизатора, обеспечивающие компенсацию теплового потока от сваи в грунт. Определено время достижения фронтом промерзания сваи от термостабилизатора, расположенного на удалении 0,5 м от одного из ее углов.

Ключевые слова: тепловой поток, математическое моделирование, термостабилизатор, термосифон, критериальное уравнение, мерзлый грунт, закон Фурье, фронт промерзания

Цитирование: Гильманов А. Я., Ким А. С., Шевелёв А. П. 2024. Определение эффективных параметров термостабилизатора в зависимости от его расположения относительно сваи фундамента // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 2 (38). С. 6–24. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-6-24>

Поступила 13.02.2024; одобрена 26.04.2024; принята 24.05.2024

Calculation of the heat stabilizer effective parameters depending on its location relative to the pile

Alexander Ya. Gilmanov¹, Andrey S. Kim², Alexander P. Shevelev¹✉

¹ University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Alyans, Tyumen, Russia

Corresponding author: a.p.shevelev@utmn.ru✉

Abstract. Maintaining the soil in a frozen state in a cryolithozone is necessary for preventing the collapse of structures. The most effective technical solution for this is the use of two-phase passive heat stabilizers. Monitoring the state of permafrost soil allows to accept technical decisions that prevent soil thawing. Calculation the effective parameters of such decisions requires mathematical modeling of thermal and hydrodynamic processes. An approach is proposed to effectively compensate the heat flux from the pile on the ground, assuming the location of the heat stabilizer in the same well with the pile or at a slight distance from it. The aim of the work is to calculate the effective parameters of the heat stabilizer depending on its location relative to the pile. The developed mathematical model assumes the five tasks: 1) blowing the above-ground part of the heat stabilizer with air; 2) movement of liquid refrigerant to the bottom of the heat stabilizer; 3) cooling of the casing of the heat stabilizer with

an two-phase flow of refrigerant; 4) heat exchange in the system refrigerant — the casing — frozen soil; 5) compensation of heat flow from the pile into the ground with heat flow from the ground into the heat stabilizer. The first problem is solved on the basis of an empirical criterion equation. The second and third tasks are solved using the laws of conservation of mass, momentum and energy. The fourth and fifth tasks involve solving the equation of thermal conductivity. As a result of calculations, the effective parameters of the heat stabilizer were obtained. The minimum lateral dimensions of the heat stabilizer casing have been established to compensate the heat flow from the pile into the ground. The time of freezing front reaching the pile from the heat stabilizer located at a distance of 0.5 m from one of its corners has been determined.

Keywords: heat flow, mathematical modeling, heat stabilizer, thermosyphon, criterion equation, frozen soil, Fourier's law, freezing front

Citation: Gilmanov, A. Ya., Kim, A. S., & Shevelev, A. P. (2024). Calculation of the heat stabilizer effective parameters depending on its location relative to the pile. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(2), 6–24. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-6-24>

Received Feb. 13, 2024; Reviewed Apr. 26, 2024; Accepted May 24, 2024

Введение

Наличие вечномёрзлого грунта в северных областях Российской Федерации ставит перед строителями ряд задач, связанных с прочностью фундаментов возводимых конструкций [Gao и др., 2018; Агеев, 2019; Gao и др., 2021]. Отмеченная проблема также актуальна при строительстве и эксплуатации протяженных трубопроводов. Поддержание грунта в мерзлом состоянии позволяет предотвратить деформационные процессы фундамента и здания в целом. Эффективным решением такой проблемы является использование термостабилизаторов [Pinate и др., 2018; Wang и др., 2018; Аникин, Мочалов, 2020; Аникин, Ишков, 2022]. Существующие технические решения используют заполняющий термостабилизатор хладагент в однофазном и двухфазном состоянии [Сао и др., 2019; Ding и др., 2020, 2021; Fisenko, 2022]. Кроме того, выделяют активные и сезонные устройства [Plotnikov, 2020; Qin и др., 2021; Аникин, Ишков, 2023]. В активных термосифонах используются специальные охлаждающие устройства, позволяющие установке функционировать в летний период времени [Juengjaroennirachon и др., 2017]. Преимуществом сезонных термостабилизаторов является высокая степень автономности, поскольку для их работы не требуются компрессоры охлаждения [Moustaid и др., 2022].

Наибольшую эффективность охлаждения грунта имеют двухфазные термосифоны за счет теплоты, поглощающейся при фазовом переходе первого рода [Fisenko, 2022]. Исходя из названных причин, далее в статье будет рассматриваться двухфазный пассивный термостабилизатор.

Учесть индивидуальные особенности грунта, конструкции здания и термосифона возможно только с использованием математического моделирования тепловых и гидродинамических процессов [Ишков, Аникин, 2021]. Подходы, использующие специальное программное обеспечение [Kukkaralli и др., 2021], не позволяют оперативно учитывать модификации конструкции термосифона при мониторинге состояния мерзлого грунта. Поэтому актуальным является создание моделей, позволяющих осуществлять оперативные прогнозы различных технологических решений для стабилизации грунта [Ишков, Аникин, 2020; Guo и др., 2024].

В статье впервые предлагается подход, позволяющий эффективно компенсировать тепловую нагрузку от сваи на грунт, предполагающий расположение термостабилизатора в одной скважине со сваем или на незначительном удалении от нее. Целью работы является расчет эффективных параметров термостабилизатора в зависимости от его расположения относительно сваи.

Методы

У двухфазного термостабилизатора можно выделить два принципиальных участка: надземную и подземную часть. В надземной части происходит конденсация паров хладагента и охлаждение конденсата, в подземной — испарение конденсата за счет тепла, отбираемого у охлаждаемого грунта, и нагрев образовавшегося пара. Для улучшения теплообмена с грунтом предлагается оребрение внешней поверхности термостабилизатора, выполненное в виде вертикально расположенных пластин, также облегчающее установку термосифона в грунт. Эффективность охлаждения грунта зависит от температуры на стыке надземной и подземной части термостабилизатора и условий окружающей среды. Чем выше скорость ветра, тем интенсивнее охлаждается надземная часть. В силу длительности активного периода работы термостабилизатора конвективный теплообмен его надземной части с окружающей средой считается постоянным, колебаниями скорости ветра пренебрегается, поэтому можно считать, что температура хладагента в этой части термостабилизатора постоянна (T_0).

Определяющим при охлаждении хладагента является конвективный теплообмен в системе «воздух — термостабилизатор», который в несколько раз превосходит кондуктивную передачу тепла вследствие низкого коэффициента теплопроводности воздуха.

Поскольку из-за уплотнения льда необходимо предварительное бурение скважины, возможно несколько вариантов расположения термосифона вблизи сваи, подразумевающих компенсацию нагревающих грунт тепловых потоков от сваи охлаждающими тепловыми потоками от термостабилизатора. На этапе проектирования здания можно расположить термосифон в одной скважине со сваем в зазоре между стенками скважины и сваем (рис. 1). Тогда для эффективного обдува надземной части охлаждающее устройство располагается под небольшим углом (φ) от вертикальной плоскости сваи. Поскольку этот угол мал, а скорость потока хладагента невысока, то гидродинамическим сопротивлением, обусловленным изгибом термостабилизатора в точке его входа в грунт, можно пренебречь. Кроме того, учитывая высокую скорость ветра, можно также пренебречь влиянием угла отклонения термосифона от вертикали на теплопередачу.

Для уже существующих зданий целесообразно располагать термостабилизатор на большом (около 0,5 м) удалении от сваи. Эффективность охлаждения сваи будет выше, если центр устройства расположить на продолжении одной из диагоналей квадратного поперечного сечения сваи (рис. 2), поскольку охлаждающий тепловой поток будет воздействовать сразу на две боковые поверхности сваи. При описанной конструкции для беспрепятственного обдува не требуется изгибать надземную часть термосифона. В обоих случаях (рис. 1 и 2) располагать термостабилизатор необходимо с учетом розы ветров для местности, где ведется строительство.

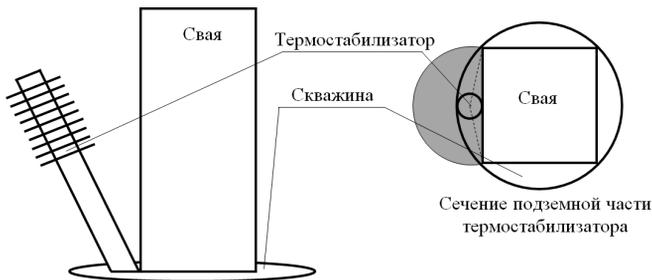


Рис. 1. Расположение термостабилизатора в одной скважине со сваем

Fig. 1. The heat stabilizer location in one well with the pile

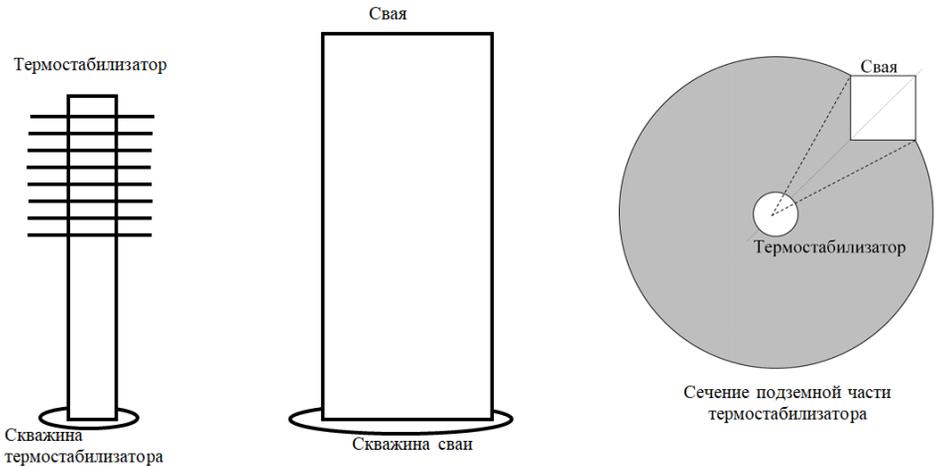


Рис. 2. Расположение термостабилизатора на небольшом удалении от сваи.

Серым цветом показана область, охваченная тепловым воздействием от устройства

Fig. 2. The heat stabilizer location at a small distance from the pile. The area covered by the thermal effect from the device is shown in gray

Подземная часть термостабилизатора состоит из цилиндрического корпуса и расположенного внутри него устройства, разделяющего восходящий и нисходящий поток хладагента. Для более равномерного охлаждения грунта по вертикали предлагается

изготавливать разделитель потоков из одинаковых отдельных сегментов, расположенных на небольшом одинаковом расстоянии друг от друга (рис. 3). Это позволяет подводить жидкий хладагент ко всей внутренней поверхности термостабилизатора. При такой конструкции можно считать, что притоки жидкого хладагента ко внутренней поверхности термостабилизатора из разных зазоров между сегментами равны. Толщины зазоров на два порядка меньше длины сегмента разделителя потоков, поэтому при моделировании восходящего двухфазного потока приток жидкого хладагента происходит в точке, соответствующей окончанию одного сегмента и началу соседнего. Движением вниз жидкого хладагента в этих зазорах можно пренебречь, поскольку он вовлекается газовой фазой в восходящий поток. Процесс охлаждения грунта для простоты описания можно представить в виде пяти связанных задач (рис. 3). Первая задача (1 на рис. 3) описывает обдув надземной части термосифона и позволяет определить температуру хладагента на входе в подземную часть устройства [Pinate и др., 2018]. Вторая задача (2 на рис. 3) рассматривает движение жидкого хладагента внутри устройства, разделяющего восходящий и нисходящий поток, в гидростатическом приближении. Третья задача (3 на рис. 3) описывает движение двухфазного хладагента в зазоре между разделителем потоков и корпусом термостабилизатора в гидравлическом приближении. Четвертая задача (4 на рис. 3) посвящена расчету теплообмена в системе «термостабилизатор — мерзлый грунт». Пятая задача (5 на рис. 3) описывает суперпозицию тепловых полей в грунте от термостабилизатора и сваи.

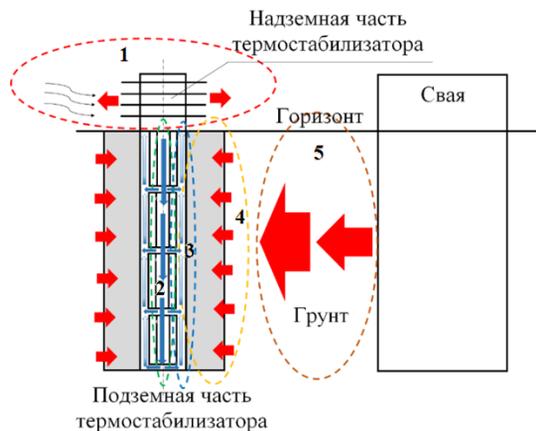


Рис. 3. Выделение характерных процессов в системе «воздух — термостабилизатор — грунт — свая». Красные стрелки — направления тепловых потоков, синие — направления гидродинамических потоков; интенсивность окрашивания соответствует доле жидкостей и пара в потоке (синий цвет соответствует жидкости); серым цветом показано оребрение подземной части термостабилизатора

Fig. 3. Identification of characteristic processes in the air — heat stabilizer — soil — pile system. The red arrows is the directions of heat flows, the blue arrows is the directions of hydrodynamic flows; the intensity of coloring corresponds to the proportion of liquids and steam in the flow (blue color corresponds to liquid); the gray color shows the finning of the underground part of the heat stabilizer

Двухфазные термостабилизаторы имеют два режима работы: активный и пассивный. В рамках второго периода происходит незначительное увеличение температуры грунта из-за отсутствия фазовых переходов и малых конвективных потоков однофазного газообразного хладагента. Далее рассматривается только активный период работы, в течение которого термостабилизатор охлаждает грунт. В общем случае температура окружающего воздуха (T_a) меняется, но в рамках упрощенного интегрального подхода она осредняется за весь активный период работы термосифона и принимается равной 233 К (что справедливо, например, для Якутии), а сами моделируемые процессы рассматриваются в стационарном приближении [Fisenko, 2022]. Гидродинамические и тепловые потоки во второй и третьей задаче описываются в квазиодномерном приближении с вертикальной осью z . При решении первой, четвертой и пятой тепловой задачи используется теория плоских сечений, а сами тепловые потоки считаются осесимметричными. Двухфазный поток хладагента в рамках третьей задачи описывается в односкоростном приближении. В рамках пятой задачи при расчетах тепловых потоков наличие воздуха между скважиной, термостабилизатором и сваяй учитывается в виде слоя воздуха с геометрией, соответствующей геометрии моделируемого объекта (свая и охлаждающее устройство), эффективная ширина которого определяется из условия равенства действительной и модельной площади воздушного зазора.

В рамках первой задачи обдув вертикальной трубы описывается критериальным уравнением [Pinate и др., 2018; Сахин и др., 2019]:

$$\text{Nu} = 0,763\text{Re}^{0,5}\text{Pr}^{0,4}\psi(\text{M}), \quad (1)$$

где числа Нуссельта (Nu), Рейнольдса (Re) и Прандтля (Pr):

$$\text{Nu} = \frac{\alpha d_{outf}}{\lambda_a}, \quad \text{Re} = \frac{\rho_a v_a d_{outf}}{\mu_a}, \quad \text{Pr} = \frac{\mu_a c_{pa}}{\lambda_a}; \quad (2)$$

α — коэффициент теплоотдачи, Вт/(м² · К); d_{outf} — внешний диаметр надземной части термостабилизатора с учетом обрешетки, м; λ_a — коэффициент теплопроводности воздуха, Вт/(м · К); ρ_a — плотность воздуха, кг/м³; v_a — скорость обдува, м/с; μ_a — коэффициент динамической вязкости воздуха, Па · с; c_{pa} — удельная теплоемкость воздуха при постоянном атмосферном давлении, Дж/(кг · К); поправочная функция от числа Маха (M) на сжимаемость воздуха в пограничном слое:

$$\psi(\text{M}) = \left(\frac{\rho_a(T_w)}{\rho_a(T_a)} \right)^{0,4}; \quad (3)$$

T_w — температура поверхности надземной части термостабилизатора, К; T_a — температура окружающего воздуха, К; соотношение T_w и T_a :

$$\frac{T_w}{T_a} = 1 + \frac{\gamma - 1}{2} \text{M}^2; \quad (4)$$

γ — показатель адиабаты воздуха, д. ед.; число Маха:

$$M = \frac{v_a}{v_{sa}}; \quad (5)$$

v_{sa} — скорость звука в воздухе, м/с. В связи с незначительным различием температуры поверхности надземной части термостабилизатора и температуры окружающего воздуха вклад поправочной функции (3) в теплообмен не превышает 1%.

Плотность воздуха связана с его температурой (T , К) в соответствии с уравнением состояния Менделеева — Клапейрона:

$$\rho_a(T) = \frac{P_a M_a}{RT}, \quad (6)$$

где M_a — молярная масса воздуха, кг/моль; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К); P_a — атмосферное давление, Па.

Из этих соотношений можно найти T_w и коэффициент теплоотдачи.

С учетом баланса количества теплоты, идущей от хладагента к поверхности надземной части термостабилизатора, и количества теплоты, необходимой для конденсации пара и охлаждения жидкого хладагента, можно записать соотношение вида

$$\alpha(T_0 - T_w) S_l t_r = \rho_{fin} S_c (h_u + h_g) (l + c_f (T_s - T_0)), \quad (7)$$

где S_l и S_c — площади боковой поверхности надземной части термостабилизатора и поперечного сечения внутренней части разделителя потоков хладагента в установке, м²; t_r — характерное время циркуляции хладагента внутри термостабилизатора, с; l — удельная теплота конденсации хладагента, Дж/кг; c_f — удельная теплоемкость жидкой фазы хладагента, Дж/(кг · К); T_0 — температура хладагента в надземной части термостабилизатора, К; T_s — температура насыщенных паров хладагента, К; h_u и h_g — длины подземной и надземной части термостабилизатора, м; ρ_{fin} — плотность жидкой фазы хладагента в разделяющем потоки хладагента устройстве, кг/м³.

Решение первой задачи (см. (1)–(7)) проводится аналитически и позволяет определить T_0 .

Во второй задаче распределение давления описывается гидростатическим законом:

$$P_{in} = \int_0^{h_u} \rho_{fin} g dz + P_r, \quad (8)$$

где g — ускорение свободного падения, м/с²; P_{in} — давление потока внутри сегментированного разделителя потоков, Па; P_r — давление в надземной части термостабилизатора, Па. Интеграл во второй задаче (см. (8)) берется аналитически.

Третья задача описывается системой уравнений механики многофазных сред [Нигматулин, 1987]:

$$\begin{aligned} \frac{d(\rho_f \alpha_f v)}{dz} &= -\frac{q}{l}, & \frac{d(\rho_g \alpha_g v)}{dz} &= \frac{q}{l}, \\ \frac{1}{\rho_m} \frac{dP}{dz} + \frac{v^2}{2h_u} &= g, & \frac{d(C_m v T)}{dz} &= q, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\rho_m = \rho_f \alpha_f + \rho_g \alpha_g, \quad C_m = \rho_f \alpha_f c_f + \rho_g \alpha_g c_g, \quad \alpha_f + \alpha_g = 1, \quad (10)$$

где ρ_f и ρ_g — плотности жидкой и паровой фазы теплоносителя, кг/м³; α_f и α_g — массовые доли жидкой и паровой фазы в восходящем потоке, д. ед.; P — давление, Па; T — температура, К; v — скорость восходящего потока, м/с; l — удельная теплота испарения хладагента, Дж/кг; q — тепловой поток в системе «грунт — термосифон», приходящийся на единицу объема, Вт/м³; c_f и c_g — удельные теплоемкости жидкой и паровой фазы теплоносителя, Дж/(кг · К); ρ_m — плотность теплоносителя, кг/м³; C_m — объемная теплоемкость теплоносителя, Дж/(м³ · К).

Плотности фаз хладагента связаны с давлением по уравнению состояния Редлиха — Квонга, выбор которого обусловлен сравнительно высокой точностью при вычислениях плотности для углекислоты, причем наибольшая плотность присваивается жидкой фазе (номер фазы $j = f$), а наименьшая — паровой (номер фазы $j = g$):

$$P = \frac{\rho_j R T P_c}{M P_c - 0,0866 \rho_j R T_c} - \frac{0,427 \rho_j^2 R^2 T_c^{2,5}}{\sqrt{T} M (M P_c + 0,0866 \rho_j R T_c)}, \quad (11)$$

где R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль · К); M — молярная масса хладагента, кг/моль; P_c — критическое давление теплоносителя, Па; T_c — критическая температура теплоносителя, К.

Граничное условие в нижней точке зазора между трубой термосифона и разделителем потоков соответствует сшивке решений второй и третьей задачи:

$$z = h_u: \quad P = \rho_{fin} g h_u + P_r, \quad T = T_s, \quad \alpha_f = 1, \quad v = \sqrt{2gh_u}. \quad (12)$$

Для вышележащих сегментов задаются граничные условия, учитывающие баланс массы и тепла, поступающих из нижележащего сегмента и зазора между соседними сегментами и утекающих вверх:

$$z = z_{ei}: \quad P = P(z = z_{s,i+1}), \quad v = \sqrt{2gz_{ei}}, \\ \alpha_f = \frac{v_b \rho_{fb} \alpha_{fb} S_g + S_{gs} \rho_{fin} v}{v_b \rho_{mb} S_g + S_{gs} \rho_{fin} v}, \quad T = \frac{v_b C_{mb} T_b S_g + S_{gs} \rho_{fin} v c_f T_s}{v_b C_{mb} S_g + S_{gs} \rho_{fin} v c_f}, \quad (13)$$

где z_{si} и z_{ei} — координаты верхней и нижней границы сегмента с номером i , м; S_g — площадь зазора между разделителем потоков и корпусом термостабилизатора, м²; S_{gs} — площадь боковой поверхности зазора, м²; индекс b означает значения параметров на верхней границе нижележащего сегмента относительно моделируемого.

Решение третьей задачи (см. (9)–(13)) осуществляется численно с использованием метода Эйлера, что требует известных тепловых потоков в системе «термосифон — мерзлый грунт» из решения четвертой задачи.

В рамках четвертой задачи описывается теплообмен в системе «двухфазный теплоноситель — корпус термостабилизатора — грунт» с помощью уравнения теплопроводности с кусочно-постоянным распределением теплофизических свойств сред. Используются граничные условия первого рода, при которых задается распределение температуры

теплоносителя по глубине термостабилизатора, полученное из решения третьей задачи, и постоянное значение температуры грунта (T_r) на эффективном расстоянии (r_{ef}). Тогда тепловой поток в осесимметричном случае описывается классическим решением [Кислицын, 2002]:

$$q(z) = \frac{2\pi(T_r - T(z))}{\left(\frac{1}{\lambda_s} \ln \frac{r_{out2} + \delta}{r_{out1}} + \frac{1}{\lambda_r} \ln \frac{r_{ef}}{r_{out2} + \delta} + \frac{1}{\alpha r_{out1}}\right) S_g}, \quad (14)$$

где λ_s и λ_r — коэффициенты теплопроводности стали и грунта, Вт/(м·К); r_{out1} и r_{out2} — внутренний и внешний радиус корпуса термостабилизатора, м; δ — эффективный размер оребрения, м. В рамках развития концепции скин-фактора δ равен половине латерального размера ребра, а коэффициент теплоотдачи (α) с внутренней поверхности трубы вычисляется по формуле

$$\alpha = \frac{C_m v S_g (T(z) - T_e)}{2 \left(T(z) + \frac{q(z) S_g}{2\pi\lambda_s} \ln \frac{r_{out2} + \delta}{r_{out1}} - T(z) \right) \pi r_{out1} h_u}. \quad (15)$$

Для отыскания значения теплового потока в четвертой задаче (см. (14), (15)) используется метод простой итерации с допустимой погрешностью 1%.

В рамках пятой задачи описывается взаимодействие тепловых потоков от сваи в грунт и из грунта в термостабилизатор. Принимается линейное распределение температуры внутри сваи из решения одномерного уравнения теплопроводности с граничными условиями первого рода: температура в начале сваи равна температуре в помещении (T_b), температура на заглубленном конце сваи равна температуре невозмущенного грунта (T_r). Тепловой поток от сваи в грунт (Q_b) описывается по закону Фурье в пренебрежении конвективными потоками в воздушном зазоре. Тепловой поток от грунта в термостабилизатор (Q_{hs}) равен произведению длины сегмента на удельный тепловой поток (14).

$$Q_b = \frac{4(T_b - T_r) a_b h_u}{\frac{r_{ef} - l_{ef}}{\lambda_r} + \frac{l_{ef}}{\lambda_a}}, \quad Q_{hs}(z) = q(z) \frac{h_u}{n_s}, \quad (16)$$

где a_b — длина грани квадратной сваи, м; n_s — количество сегментов разделителя потоков хладагента; l_{ef} — эффективный линейный размер воздушного зазора в системе «скважина — свая — термостабилизатор», м. Определяется l_{ef} из условия равенства площадей реального и модельного воздушного зазора, представляющего собой прямоугольный параллелепипед.

$$l_{ef} = \frac{a_b}{4} \left(\frac{\pi}{2} - 1 \right). \quad (17)$$

При отсутствии воздушного зазора $l_{ef} = 0$.

Решение пятой задачи (см. (16), (17)) ищется аналитически.

Результаты и обсуждение

Расчеты эффективности предложенного расположения термостабилизатора для компенсации тепловых потоков от сваи проводились при модельных параметрах, представленных в таблице 1. При таких параметрах температура хладагента в надземной части термостабилизатора (T_0) из аналитического решения первой задачи равна 240 К, что на 3 К ниже температуры насыщения углекислоты. Аналитическое решение второй задачи позволяет определить давление в нижней части термостабилизатора (P_{inb}), равное $1,08 \cdot 10^6$ Па.

Таблица 1. Модельные параметры, выбранные для расчетов
Table 1. Model parameters for calculations

Параметр	Обозначение	Значение величины
Температура окружающего воздуха	T_a	233 К
Температура в помещении	T_b	293 К
Температура невозмущенного грунта	T_r	270 К
Температура насыщения хладагента (углекислоты)	T_s	243 К
Критическая температура углекислоты	T_c	304 К
Длина грани квадратной сваи	a_b	30 см
Длина сваи	h_b	23 м
Глубина подземной части термостабилизатора	h_u	20 м
Высота надземной части термостабилизатора	h_g	3 м
Коэффициент теплопроводности бетона сваи	λ_b	0,7 Вт/(м · К)
Коэффициент теплопроводности стали	λ_s	70 Вт/(м · К)
Коэффициент теплопроводности грунта	λ_r	2 Вт/(м · К)
Коэффициент теплопроводности воздуха	λ_a	0,022 Вт/(м · К)
Динамическая вязкость воздуха	μ_a	$1,63 \cdot 10^{-5}$ Па · с
Молярная масса воздуха	M_a	0,029 кг/моль
Молярная масса хладагента	M	0,044 кг/моль
Показатель адиабаты воздуха	γ	1,4
Скорость ветра	v	7 м/с
Скорость звука в воздухе	v_{sa}	340 м/с
Атмосферное давление	P	10^5 Па
Критическое давление углекислоты	P_c	$7,38 \cdot 10^6$ Па
Давление хладагента в надземной части термостабилизатора	P_r	$9 \cdot 10^5$ Па
Плотность жидкой фазы хладагента внутри устройства, разделяющего потоки	ρ_{fin}	933 кг/м ³
Удельная теплоемкость воздуха	c_{pa}	1 005 Дж/(кг · К)
Удельная теплоемкость газовой фазы хладагента	c_g	791 Дж/(кг · К)
Удельная теплоемкость жидкой фазы хладагента	c_f	2 155 Дж/(кг · К)

Окончание таблицы 1

Table 1 (end)

Параметр	Обозначение	Значение величины
Удельная теплота фазового перехода углекислоты	l	$2,15 \cdot 10^5$ Дж/кг
Внешний радиус трубы термостабилизатора	r_{out2}	0,03 м
Толщина корпуса термосифона	δ_w	0,003 м
Толщина зазора между разделителем потоков и трубой термостабилизатора	δ_f	0,007 м
Характерный размер оребрения подземной части термостабилизатора	δ	0,015 м
Внешний диаметр надземной части термосифона с учетом оребрения	d_{outf}	0,05 м
Количество сегментов устройства, разделяющего потоки	n_s	4
Величина зазоров между сегментами	h_c	0,01 м
Характерное время циркуляции хладагента внутри термостабилизатора	t_r	$3 \cdot 10^4$ с
Характерное время конденсации	t_c	100 с
Универсальная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль · К)
Ускорение свободного падения	g	9,81 м/с ²
Шаг по вертикальной координате при численных расчетах	Δz	0,1 м

Численное решение третьей задачи с учетом тепловых потоков, полученных в ходе аналитического решения четвертой задачи, позволяет определить параметры теплоносителя в зазоре между разделяющим потоки устройством и корпусом термосифона. Рассматривалось два способа расположения термостабилизатора рядом со свайей: 1) в одной скважине со свайей и 2) на удалении 0,5 м от одного из углов сваи. Первый способ позволяет повысить эффективность работы термостабилизатора за счет обсыпания грунтом зазоров между свайей, термостабилизатором и скважиной, поскольку наличие воздушного зазора существенно снижает тепловые потоки от термостабилизатора и сваи вследствие низкого коэффициента теплопроводности воздуха. На рис. 4 приведена зависимость массовой концентрации жидкой фазы (α_{ju}) в восходящем потоке хладагента на стыке подземной и надземной части термостабилизатора от скорости ветра. Как видно из рис. 4, массовая доля конденсата при наличии воздушного зазора составляет 100% (оранжевая кривая) и не меняется при увеличении скорости ветра. Следовательно, в этом случае не происходит испарения хладагента на внутренней поверхности термостабилизатора, поскольку воздушный зазор между грунтом и установкой хорошо экранирует тепловые потоки в этой системе. При отсутствии воздушного зазора в скважине расположение термостабилизатора в непосредственной близости от сваи и на удалении 0,5 м от нее в рамках предложенной модели для третьей и четвертой задачи описываются одинаковым образом. В этом случае с ростом скорости ветра в широком диапазоне значений

наблюдается монотонное снижение массовой доли конденсата, что обусловлено снижением температуры хладагента в надземной части, обеспечивающей интенсификацию тепловых потоков в системе «грунт — термостабилизатор», вызывающих увеличение скорости конденсации хладагента (синяя кривая на рис. 4). Однако можно выделить две асимптоты для этой зависимости. В диапазоне скоростей ветра от 0 до 3 м/с массовая доля жидкой фазы практически не меняется и составляет 49,3%, поскольку в этом случае скорости ветра недостаточно для охлаждения хладагента в надземной части установки, а температура хладагента соответствует температуре насыщения. Вторая асимптота находится в диапазоне скоростей ветра свыше 40 м/с, когда массовая доля конденсата составляет 41,2%. Эта асимптота обусловлена снижением температуры хладагента в надземной части термосифона до температуры окружающего воздуха.

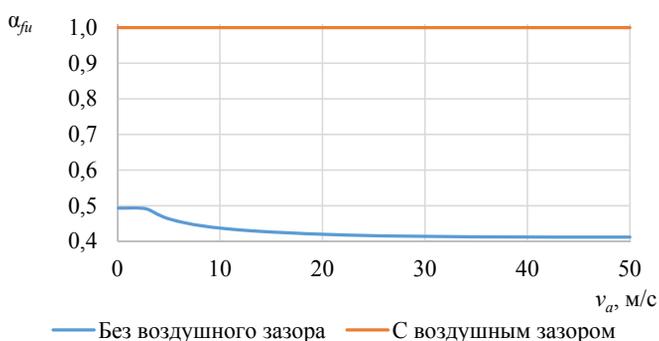


Рис. 4. Зависимость массовой доли жидкой фазы в восходящем потоке хладагента, достигшем надземной части термостабилизатора, от скорости ветра

Fig. 4. Dependence of the mass fraction of the liquid phase in the upward flow of the refrigerant approaching the above-ground part of the heat stabilizer on the wind speed

Решение четвертой и пятой задачи позволяет определить минимальные латеральные размеры термостабилизатора, обеспечивающие компенсацию тепловых потоков от сваи (Q_b) тепловым потоком от термостабилизатора (Q_{hs}). В этом случае термостабилизатор забирает у грунта тепло, превосходящее количество теплоты, поступающей в грунт от сваи. Зависимость отношения указанных тепловых потоков от внешнего радиуса корпуса термостабилизатора приведена на рис. 5 на характерной глубине (5 м) влияния сезонных колебаний температуры в случаях с воздушным зазором в скважине и без него. В первом случае минимальный эффективный размер корпуса термостабилизатора составляет 0,029 м (точка на синей кривой на рис. 5). Этому размеру соответствует равенство тепловых потоков Q_{hs} и Q_b . С увеличением размеров термостабилизатора отношение этих тепловых потоков монотонно возрастает в силу уменьшения воздушного зазора. Обрыв синей кривой соответствует достижению максимально допустимых конструктивных размеров термостабилизатора, когда он примыкает к стенкам скважины и сваи, что и является рекомендуемым размером при наличии воздушного зазора в скважине. При отсутствии воздушного зазора вокруг термостабилизатора зависимость отношения тепловых потоков Q_{hs} и Q_b от латеральных размеров корпуса

установки имеет немонотонный характер (оранжевая кривая на рис. 5). Перегиб кривой при $r_{out2} = 0,039$ м обусловлен конкуренцией двух факторов: 1) увеличением массы хладагента и 2) уменьшением термического сопротивления с увеличением размеров термостабилизатора. Баланс тепловых потоков от сваи в грунт и от грунта в термосифон достигается при радиусе корпуса установки, равном 0,08 м (точка на оранжевой кривой на рис. 5), — этот размер является минимальным для компенсации тепловых потоков от сваи в грунт.

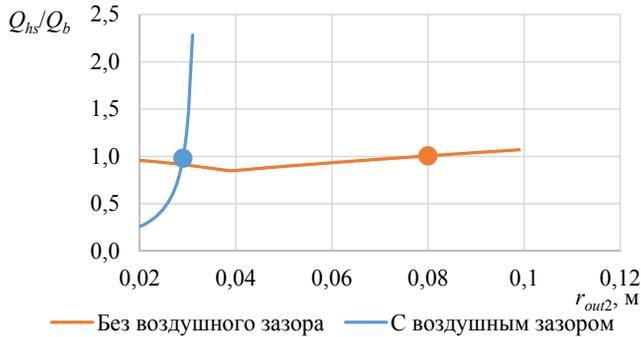


Рис. 5. Зависимость отношения тепловых потоков в системах «термостабилизатор — грунт» и «грунт — свая» от внешнего радиуса трубы охлаждающего устройства

Fig. 5. Dependence of the ratio of heat fluxes in the heat stabilizer — soil and soil — pile systems on the outer radius of the cooling device pipe

При расположении термостабилизатора на удалении 0,5 м от одного из углов сваи важным параметром является время достижения фронтом промерзания сваи. В качестве фронта температуры промерзания принимается средняя температура между температурами поверхности термостабилизатора и сваи. Зависимость координаты этого фронта от времени на глубине 5 м приведена на рис. 6. Анализ полученной зависимости показывает, что фронт промерзания достигает сваи спустя 17 сут.

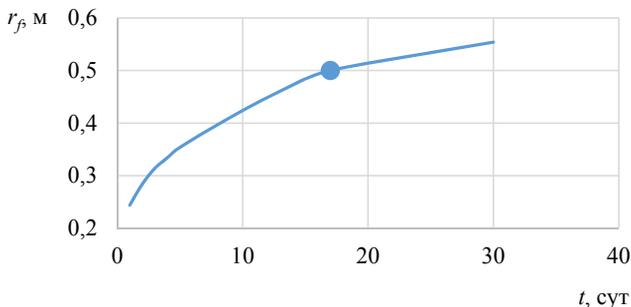


Рис. 6. Зависимость координаты фронта промерзания от времени при расположении термостабилизатора на удалении 0,5 м от сваи

Fig. 6. The dependence of the coordinate of the freezing front on time when the heat stabilizer is located at a distance of 0.5 m from the pile

Заключение

Показано, что использование критериальных уравнений и учет оребрения введением эффективного радиуса надземной части термостабилизатора позволило упрощенно описать процесс обтекания воздухом и охлаждения оребренной поверхности надземной части установки и определить температуру хладагента в этой части. Такие расчеты помогли установить, что при заданных параметрах термостабилизатора и воздуха температура хладагента снижается относительно температуры фазового перехода на 1%.

В результате расчетов задачи о движении жидкого хладагента в разделителе потоков установлено, что давление в нижней его части превышает давление в надземной части термостабилизатора на 20%.

Определен диапазон скоростей ветра, при которых обдув надземной части термостабилизатора влияет на конденсацию пара в восходящем потоке хладагента: от 3 до 40 м/с.

Установлены минимальные латеральные размеры корпуса термостабилизатора, обеспечивающие компенсацию теплового потока от сваи в грунт, которые с учетом воздушного зазора в системе «скважина — термостабилизатор — свая» составляют 0,029 м и без него — 0,08 м.

Определено время достижения фронтом промерзания сваи от термостабилизатора, расположенного на удалении 0,5 м от одного из ее углов: при модельных параметрах это время составило 17 сут.

Список источников

- Агеев С. Е. 2019. Применение двухфазных термосифонов в промышленных системах регенерации и передачи теплоты // *Инновационная наука*. № 5. С. 14–16.
- Аникин Г. В., Мочалов Д. В. 2020. Оценка эффективности системы типа «ГЕТ» с углекислотой и аммиаком в качестве хладагента // *Криосфера Земли*. Том 24. № 2. С. 48–51.
- Аникин Г. В., Ишков А. А. 2022. Использование аналитического решения функционирования системы «ГЕТ» для экспресс-оценки эффективности ее работы // *Криосфера Земли*. Том 26. № 4. С. 59–67. <https://doi.org/10.15372/KZ20220405>
- Аникин Г. В., Ишков А. А. 2023. Аналитическое решение задачи функционирования глубинных сезонных охлаждающих устройств для оценки их эффективности // *Криосфера Земли*. Том 27. № 4. С. 37–44.
- Ишков А. А., Аникин Г. В. 2020. Математическая модель функционирования систем температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем // *Прикладная физика и математика*. № 5. С. 12–16. <https://doi.org/10.25791/pfim.05.2020.1173>
- Ишков А. А., Аникин Г. В. 2021. Математическое моделирование функционирования систем температурной стабилизации грунтов с горизонтальным испарителем // *Нефтепромышленное дело*. № 2 (626). С. 53–59. [https://doi.org/10.33285/0207-2351-2021-2\(626\)-53-59](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2021-2(626)-53-59)
- Кислицын А. А. 2002. Основы теплофизики: лекции и семинары. Тюмень: Изд-во Тюмен. гос. ун-та. 152 с.
- Нигматулин Р. И. 1987. Динамика многофазных сред: в 2 ч. Часть 1. М.: Наука. 464 с.
- Сахин В. В., Герлиман Е. М., Брыков Н. А. 2019. Теплопередача в примерах и задачах. СПб.: Балт. гос. техн. ун-т. 165 с.

- Cao J., Chen C., Su Y., Leung M. K. H., Bottarelli M., Pei G. 2019. Experimental study on the temperature management behaviours of a controllable loop thermosyphon // *Energy Conversion and Management*. Vol. 195. Pp. 436–446. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.031>
- Ding T., Cao H. W., He Z. G., Wu J. D., Li Z. 2020. Experimental study on a loop thermosyphon cooling system in data centers using CO₂ as a working fluid, especially thermal environment and energy-saving effect // *Applied Thermal Engineering*. Vol. 175. Article 115359. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115359>
- Ding T., Chen X., Cao H., He Z., Wang J., Li Z. 2021. Principles of loop thermosyphon and its application in data center cooling systems: A review // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Vol. 150. Article 111389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111389>
- Fisenko S. P. 2022. Film flow of the heat-transfer agent in a closed thermosyphon // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. Vol. 95. No. 6. Pp. 1421–1425. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02610-y>
- Gao J., Lai Y., Zhang M., Chang D. 2018. The thermal effect of heating two-phase closed thermosyphons on the high-speed railway embankment in seasonally frozen regions // *Applied Thermal Engineering*. Vol. 141. Pp. 948–957. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.061>
- Gao J., Ma Q., Ren J. 2021. Evaluating the heating performance of a novel heating two-phase closed thermosyphon (HTPCT) in high-speed railway embankments of seasonally frozen regions // *Arabian Journal of Geosciences*. Vol. 14. No. 22. Article 2256. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08641-8>
- Guo L., Yu Q., Yin N., You Y., Wang J., Sun Y., Chen K. 2024. Two-phase closed thermosyphon-induced frost jacking of piles and foundation instability in a thawed permafrost area // *Natural Hazards*. Vol. 120. Pp. 619–637. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06169-6>
- Juengjaroennirachon S., Pratinthong N., Namprakai P., Suparos T. 2017. Performance enhancement of air conditioning using thermosyphon system's energy storage unit for cooling refrigerant before entering the condenser // *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 31. No. 1. Pp. 393–400. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1241-z>
- Kukkapalli V. K., Kim J.-H., Kim S. 2021. Optimum design of thermosyphon evaporators for roadway embankment stabilization in the arctic regions // *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 35. No. 10. Pp. 4757–4764. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0941-1>
- Moustaid M., Platel V., Guillet M., Reynes H., Buttay C. 2022. Modeling and test of a thermosyphon loop for the cooling of a megawatt-range power electronics converter // *International Journal of Thermofluids*. Vol. 13. Article 100129. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100129>
- Pinate W., Rittidech S., Meena P. 2018. Critical heat flux of a two-phase closed thermosyphon with fins // *Journal of Mechanical Science and Technology*. Vol. 32. No. 5. Pp. 2357–2364. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0447-7>
- Plotnikov A. A. 2020. Stabilizing the temperature regime of a frozen foundation bed using thermal insulation and cooling mechanisms // *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Vol. 57. No. 4. Pp. 329–335. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09674-z>
- Qin D., Yao T., Ding Y., Ren J. 2021. *Introduction to Cryospheric Science*. Singapore: Science Press. XIII, 422 pp. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-6425-0>

Wang F, Li G., Ma W., Mu Y., Mao Y., Wang B. 2018. Influence of warm oil pipeline on underlying permafrost and cooling effect of thermosyphon based on field observations // Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering / W. Wu, H. S. Yu (eds.). Cham: Springer. Pp. 1424–1428. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97115-5_115

References

- Ageev, S. E. (2019). Application of two-phase thermosyphons in industrial heat recovery and transfer systems. *Innovation Science*, (5), 14–16. [In Russian]
- Anikin, G. V., & Mochalov, D. V. (2020). Estimating the efficiency of HET systems using carbon dioxide and ammonia as refrigerants. *Earth's Cryosphere*, 24(2), 48–51. [In Russian]
- Anikin, G. V., & Ishkov, A. A. (2022). Use of analytical solution of functioning of the “HET” system for express estimation of the efficiency of its work. *Earth's Cryosphere*, 26(4), 59–67. <https://doi.org/10.15372/KZ20220405> [In Russian]
- Anikin, G. V., & Ishkov, A. A. (2023). Analytical solution of the problem of operation of deep seasonal cooling devices to assess their efficiency. *Earth's Cryosphere*, 27(4), 37–44. [In Russian]
- Ishkov, A. A., & Anikin, G. V. (2020). Mathematical model of functioning of systems of temperature stabilization of soils with a horizontal evaporator. *Applied Physics and Mathematics*, (5), 12–16. <https://doi.org/10.25791/pfim.05.2020.1173> [In Russian]
- Ishkov, A. A., & Anikin, G. V. (2021). Mathematical modeling of the functioning of soil temperature stabilization systems with a horizontal evaporator. *Oilfield Engineering*, (2), 53–59. [https://doi.org/10.33285/0207-2351-2021-2\(626\)-53-59](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2021-2(626)-53-59) [In Russian]
- Kislitsin, A. A. (2002). *Fundamentals of thermophysics*. University of Tyumen. [In Russian]
- Nigmatulin, R. I. (1987). *Dynamics of multiphase media: in 2 parts. Part 1*. Nauka. [In Russian]
- Sahin, V. V., Gerliman, E. M., & Brykov, N. A. (2019). *Heat transfer in examples and tasks*. Baltic State Technical University. [In Russian]
- Cao, J., Chen, C., Su, Y., Leung, M. K. H., Bottarelli, M., & Pei, G. (2019). Experimental study on the temperature management behaviours of a controllable loop thermosyphon. *Energy Conversion and Management*, 195, 436–446. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.05.031>
- Ding, T., Cao, H. W., He, Z. G., Wu, J. D., & Li, Z. (2020). Experimental study on a loop thermosyphon cooling system in data centers using CO₂ as a working fluid, especially thermal environment and energy-saving effect. *Applied Thermal Engineering*, 175, Article 115359. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115359>
- Ding, T., Chen, X., Cao, H., He, Z., Wang, J., & Li, Z. (2021). Principles of loop thermosyphon and its application in data center cooling systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 150, Article 111389. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111389>
- Fisenko, S. P. (2022). Film flow of the heat-transfer agent in a closed thermosyphon. *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*, 95(6), 1421–1425. <https://doi.org/10.1007/s10891-022-02610-y>
- Gao, J., Lai, Y., Zhang, M., & Chang, D. (2018). The thermal effect of heating two-phase closed thermosyphons on the high-speed railway embankment in seasonally frozen regions. *Applied Thermal Engineering*, 141, 948–957. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.061>

- Gao, J., Ma, Q., & Ren, J. (2021). Evaluating the heating performance of a novel heating two-phase closed thermosyphon (HTPCT) in high-speed railway embankments of seasonally frozen regions. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(22), Article 2256. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-08641-8>
- Guo, L., Yu, Q., Yin, N., You, Y., Wang, J., Sun, Y., & Chen, K. (2024). Two-phase closed thermosyphon-induced frost jacking of piles and foundation instability in a thawed permafrost area. *Natural Hazards*, 120, 619–637. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06169-6>
- Juengjaroennirachon, S., Pratinthong, N., Namprakai, P., & Suparos, T. (2017). Performance enhancement of air conditioning using thermosyphon system's energy storage unit for cooling refrigerant before entering the condenser. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 31(1), 393–400. <https://doi.org/10.1007/s12206-016-1241-z>
- Kukkapalli, V. K., Kim, J.-H., & Kim, S. (2021). Optimum design of thermosyphon evaporators for roadway embankment stabilization in the arctic regions. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 35(10), 4757–4764. <https://doi.org/10.1007/s12206-021-0941-1>
- Moustaid, M., Platel, V., Guillet, M., Reynes, H., & Buttay, C. (2022). Modeling and test of a thermosyphon loop for the cooling of a megawatt-range power electronics converter. *International Journal of Thermofluids*, 13, Article 100129. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100129>
- Pinate, W., Rittidech, S., & meena, P. (2018). Critical heat flux of a two-phase closed thermosyphon with fins. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 32(5), 2357–2364. <https://doi.org/10.1007/s12206-018-0447-7>
- Plotnikov, A. A. (2020). Stabilizing the temperature regime of a frozen foundation bed using thermal insulation and cooling mechanisms. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 57(4), 329–335. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09674-z>
- Qin, D., Yao, T., Ding, Y., & Ren, J. (2021). *Introduction to cryospheric science*. Science Press. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-6425-0>
- Wang, F., Li, G., Ma, W., Mu, Y., Mao, Y., & Wang, B. (2018). Influence of warm oil pipeline on underlying permafrost and cooling effect of thermosyphon based on field observations. In W. Wu, & H. S. Yu (Eds.), *Proceedings of China-Europe Conference on Geotechnical Engineering. Springer Series in Geomechanics and Geoengineering* (pp. 1424–1428). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97115-5_115

Информация об авторах

Александр Янович Гильманов, кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры 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>

Андрей Сергеевич Ким, заместитель директора, Альянс, Тюмень, Россия
3659696@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3224-5463>

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

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

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

Andrey S. Kim, Deputy Director, Alyans, Tyumen, Russia

3659696@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0008-3224-5463>

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

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

Методика моделирования процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ

Адхам Сафтли[✉], Андрей Викторович Зайцев

Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
Контакт для переписки: adhamsaftly1994@gmail.com[✉]

Аннотация. Сжиженный природный газ (СПГ) является наиболее экономичным средством транспортировки природного газа на большие расстояния. В максимальных объемах СПГ транспортируется судами к назначенным местам разгрузки на терминалах хранения. Во время разгрузки и хранения СПГ определенная часть его переходит в газообразную фазу. Основными факторами, влияющими на процесс испарения, является передача теплоты от окружающего воздуха. Испарение части многокомпонентной жидкости, в свою очередь, приводит к изменению состава хранимого СПГ и в результате влияет на его термодинамические свойства и стоимостные показатели. Интенсификация процессов испарения может потенциально поставить под угрозу стабильность и безопасность процедуры хранения СПГ и других технологических процессов. При этом в зависимости от мольной концентрации отдельных компонентов основные термодинамические параметры СПГ могут существенно изменяться.

Одним из наиболее важных вопросов при анализе технологического процесса хранения СПГ как многокомпонентной жидкости является реализация удобной расчетной системы, основанной на известных соотношениях и методиках с выполнением термодинамических расчетов свойств смесей, определением фазового равновесия, учета теплового баланса системы с окружающей средой и др. Такой подход позволяет повысить способность прогнозирования изменения отдельных параметров, обеспечения термодинамической стабильности системы с учетом внешнего воздействия. Появляется возможность комплексного изучения сложных внутренних динамических процессов изменения температуры, давления, мольной доли пара, компонентного состава фаз в емкости, которое обычно проводится без учета внешних технологических процессов эксплуатации оборудования.

В статье приводятся результаты разработки и применения методики для процесса бездренажного хранения бинарной смеси, состоящей из чистого метана и сравнительно небольшого количества азота (до 10%). В результате продемонстрировано влияние азота на динамику изменения параметров двухфазной системы — отпарных газов и сжиженного продукта (метана).

Ключевые слова: СПГ, парожидкостное равновесие, уравнения состояния, компонентный состав, моделирование, отпарные газы, бездренажное хранение

Цитирование: Сафтли А., Зайцев А. В. 2024. Методика моделирования процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 2 (38). С. 25–44. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-25-44>

Поступила 22.03.2024; одобрена 21.05.2024; принята 24.05.2024

Methodology for modeling processes in multi-component two-phase LNG systems

Adham Saftly[✉], Andrey V. Zaitsev

ITMO University, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: adhamsaftly1994@gmail.com[✉]

Abstract. Liquefied natural gas (LNG) is the most economical means of transporting natural gas over long distances. In maximum volumes, LNG is transported by ships to designated unloading points at storage terminals. During unloading and storage of LNG, a certain part of it passes into the gaseous phase. The main factors influencing the evaporation process are the transfer of heat from the surrounding air. Evaporation of a part of the multicomponent liquid, in turn, leads to a change in the composition of the stored LNG and, as a result, affects its thermodynamic properties and cost indicators. Intensification of evaporation processes can potentially jeopardize the stability and safety of LNG storage procedures and other technological processes. At the same time, depending on the mole concentration of individual components, the basic thermodynamic parameters of LNG can change significantly.

One of the most important issues when analyzing the technological process of storing liquefied natural gas as a multicomponent liquid is the implementation of a convenient calculation system based on known relationships and methodologies with performing thermodynamic calculations of the properties of mixtures, determining phase equilibrium, taking into account the thermal balance of the system with the environment, etc.

This approach makes it possible to increase the ability to predict changes in individual parameters, to ensure the thermodynamic stability of the system taking into account external influences. It becomes possible to comprehensively study complex internal dynamic processes of changes in temperature, pressure, mole fraction of vapor, component composition of phases in a tank, which is usually carried out without taking into account external technological processes of equipment operation. The article presents the results of the development and application of a methodology for the process of drainage-free storage of a binary mixture consisting of pure methane and a relatively small amount of nitrogen (up to 10%). As a result, the influence of nitrogen on the dynamics of changes in the parameters of a two-phase system — boil-off gases and liquefied product (methane) has been demonstrated.

Keywords: LNG, vapor-liquid equilibrium, equations of state, component composition, modeling, boil-off gases, drainage-free storage

Citation: Saftly, A., & Zaitsev, A. V. (2024). Methodology for modeling processes in multi-component two-phase LNG systems. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(2), 25–44. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-25-44>

Received Mar. 22, 2024; Reviewed May 21, 2024; Accepted May 24, 2024

Введение

В условиях экономической нестабильности в последние годы страны выбирают природный газ в качестве альтернативного источника топлива для обеспечения устойчивых поставок энергии, снижения зависимости от нефти и смягчения негативного воздействия на глобальный климат и окружающую среду [Mokhatab, Poo, 2012]. Доступность природного газа с учетом его энергосодержания по более низким ценам по сравнению с другими видами топлива в значительной степени способствует укреплению экономики как стран-производителей, так и стран-потребителей.

Традиционно углеводородный газ безопасно, надежно и экономично транспортируется по трубопроводам, особенно при легкой доступности значительных запасов обычного природного газа. Однако становится очевидно, что значительные объемы новых запасов газа географически расположены не так удобно [Mokhatab и др., 2013]. В результате этого на рынке утвердился новый подход — предварительное получение сжиженного природного газа (СПГ), которое теперь стало одной из наиболее эффективных и безопасных технологий транспортировки газа.

Тем не менее развитие технологий СПГ осложнено различными проблемами, которые в данном исследовании предлагается решать путем моделирования процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ. Цель состоит в том, чтобы улучшить прогнозирование изменений отдельных параметров СПГ при хранении и эксплуатации в результате колебаний температуры, давления и состава.

Методы

Проблема отпарного газа в емкостях СПГ

В цепочке поставок СПГ в процессе погрузки и разгрузки, во время транспортировки, а также при хранении возникает так называемый отпарной газ (boil-off gas, BOG) [Rahmania, Purwanto, 2020], поскольку в этих емкостях невозможно обеспечить идеальную изоляцию, из-за чего теплопритоки из окружающей среды постепенно воздействуют на емкость.

Величина теплопритоков определяется эффективностью теплопередачи по конструктивным элементам бака, а также состоянием окружающей среды. Общие оценки количества образующегося отпарного газа полезны для определения путей его дальнейшей утилизации и для контроля парникового эффекта и количества загрязнений, попадающих в окружающую среду [Zakaria и др., 2014].

Количество отпарного газа в емкости является ключевым вопросом по техническим и экономическим причинам. Испарение жидкости вызывает повышение давления в резервуаре для хранения СПГ. Это, в свою очередь, влияет на безопасность процесса хранения. Кроме того, в процессе испарения изменяется термодинамическое состояние парожидкостной смеси в резервуаре-хранилище, что влияет на составы сжиженного природного и отпарного газа [Włodek, 2019].

Соединения метана и азота испаряются первыми по сравнению с другими более тяжелыми углеводородами, такими как, например, этан и пропан, что вызвано более низкой температурой кипения метана и азота и приводит к изменениям состава и качества СПГ. Такое явление называется старением. Отпарной газ влияет на качество и количество СПГ, что вместе с тем влияет на экономическую ценность, поскольку цена реализации СПГ зависит от его энергосодержания [Rahmania, Purwanto, 2020].

В настоящее время ведутся интенсивные исследования воздействия выбросов парниковых газов на окружающую среду. Одним из источников, способствующих парниковому эффекту, является сжигание отходящих газов в атмосфере.

Наблюдается прямая зависимость объема отпарного газа с рабочим давлением и долей метана в СПГ. Исследование также показало, что в более крупных резервуарах СПГ относительное количество отпарного газа меньше [Adom и др., 2010].

Для снижения потерь ценного метана в составе СПГ, перевозимого танкерами, операторы длительных рейсов иногда добавляют в груз с СПГ азот, летучесть которого выше, чем у метана [Hasan и др., 2009]. Результаты исследований [Migliore и др., 2015] показали, что увеличение количества азота в смеси СПГ снижает скорость образования отпарного газа. Кроме того, изменение температуры окружающей среды на 1 °C изменяет скорость образования отпарного газа на 0,2%.

Численный метод исследования процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ

Прогнозирование фазового равновесия играет важную роль при хранении СПГ, поскольку оно определяет количество вероятного присутствия пара, жидкости и нежелательных твердых частиц. В реальных условиях полностью равновесное состояние трудно

реализуемо, однако при рассмотрении динамических процессов с достаточно малым временным шагом они могут быть описаны в терминах теории фазового равновесия.

Для программной реализации модели использовались два различных расчетных аппарата: электронные таблицы с применением макросов на языке VBA и программы на алгоритмическом языке Fortran.

Расчеты фазового равновесия обычно проводятся с использованием хорошо известных кубических уравнений состояния, которые достаточно точны при низких и средних давлениях, вдали от критической точки.

Для описания равновесных явлений системы «газ — жидкость» в криогенных условиях можно успешно использовать несколько уравнений состояния. Наиболее часто используемые уравнения для СПГ или природного газа в криогенных условиях представляют собой классическую модель Пенга — Робинсона.

К сожалению, прогнозы симуляторов часто существенно расходятся с фактическими наблюдениями. Например, было обнаружено, что уравнение состояния Пенга — Робинсона, реализованное по умолчанию в Aspen HYSYS, дает прогнозы содержания жидкой фазы, которые превышают экспериментальные неопределенности в 3, 42 и 81 раз в трех различных расчетах [Rollover in LNG Storage Tanks]. Частично это связано с неточностями, вызванными пакетом свойств, который встроен в моделирование и используется для расчета термодинамических свойств смесей природного газа при различных условиях процесса. Поэтому исследователи, в частности авторы данной статьи, зачастую вместо использования известных моделирующих пакетов вынуждены создавать собственные модели.

Условно математическую модель термодинамической системы можно разделить на описание процессов в соответствии с теоретическими основами и на закономерности протекания этих процессов в конкретных видах технологического оборудования. Это позволяет разрабатывать достаточно универсальные модели, применимые для различных устройств и установок.

Математическая модель многокомпонентной двухфазной системы

Рассмотрим многокомпонентную двухфазную систему безотносительно к конкретным единицам оборудования. Для определения удельных физических величин будем использовать молярные значения. Предлагаемый метод основывается на одновременном параллельном вычислении свойств для жидкой и паровой фазы и двухфазной смеси.

Уравнение мольного материального баланса:

$$N = \sum_{i=1}^n N_i = N' + N'' . \quad (1)$$

Исходная смесь содержит m компонентов с мольной долей i -й компоненты z_i , включая x_i в жидкой фазе и y_i в паровой. Количество вещества в смеси N молей, в том числе N_i молей i -й компоненты, причем в жидкой фазе всего N' молей, а в паровой — N'' молей.

Уравнение баланса объемов фаз:

$$V = V' + V'' . \quad (2)$$

Выражения для мольных объемов:

$$v' = V'/N'; \quad v'' = V''/N''; \quad (3)$$

$$v = V/N. \quad (4)$$

Уравнение состояния Пенга — Робинсона (PR) [Baker, 2018]:

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)+b(v-b)}, \quad (5)$$

где $a = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j (a_i a_j)^{0,5} (1 - k_{ij})$; $a_i = a_{ci} \alpha_i$; $a_{ci} = 0,457235 \frac{(RT_{ci})^2}{P_{ci}}$;

$$\alpha_i^{0,5} = 1 + m_i \left[1 - (T_i/T_{ci})^{0,5} \right]; \quad m_i = 0,37646 + 1,5422\omega_i - 0,26992\omega_i^2;$$

$$b = \sum_{i=1}^n x_i b_i; \quad b_i = 0,077796 \frac{(RT_{ci})^2}{P_{ci}}.$$

Кубическая форма уравнения состояния Пенга — Робинсона относительно коэффициента сжимаемости Z [Peng, Robinson, 1976]:

$$Z^3 + (1-B)Z^2 + (A-2B-3B^2)Z - (AB-B^2-B^3) = 0; \quad (6)$$

$$A = \frac{ap}{(RT)^2}; \quad B = \frac{bp}{RT}.$$

Для решения уравнения третьей степени (6) применяется широко известные формулы Кардано — Виета [Włodek, 2016]. При расчете жидкой фазы в качестве решения выбирается минимальный положительный корень, при расчете паровой — максимальный положительный корень.

Уравнения состояния, выраженные через коэффициент сжимаемости Z [Włodek, 2015]:

$$pv = ZRT; \quad pv' = Z'RT; \quad pv'' = Z''RT. \quad (7)$$

Энтальпия вычисляется с применением уравнения состояния Пенга — Робинсона. Мольная энтальпия идеального h^* газа вычисляется по известной аппроксимации данных полиномом [Брусилковский, 2002].

$$\frac{h-h^*}{RT} = Z - 1 - \frac{1}{2^{1,5} bRT} \left(a - T \frac{da}{dT} \right) \ln \left[\frac{v + (2^{0,5} + 1)b}{v + (2^{0,5} - 1)b} \right]. \quad (8)$$

При необходимости аналогичные выражения можно получить для мольной энтропии и теплоемкости.

Определение мольной доли при расчете фазового равновесия:

$$V_m = V''/V. \quad (9)$$

По величине мольной доли в расчетах определяется соответствующее фазовое состояние смеси: $V_m < 0$ — ненасыщенная (недогретая) жидкость; $V_m = 0$ — насыщенная жидкость, точка начала кипения, давление равно упругости паров; $0 < V_m < 1$ — двухфазная смесь; $V_m = 1$ — точка росы; $V_m > 1$ — перегретый пар [Федорова, 2019].

Из уравнений материального баланса компонент в паровой и жидкой фазе смеси:

$$z_i = (1 - V_m)x_i + V_my_i, \quad (10)$$

с учетом определения константы фазового равновесия

$$K_i = y_i/x_i \quad (11)$$

получаем уравнения фазовых концентраций

$$x_i = \frac{z_i}{V_m(K_i - 1) + 1}; \quad y_i = \frac{z_i K_i}{V_m(K_i - 1) + 1}. \quad (12)$$

Используя уравнения фазовых концентраций и уравнения баланса компонент в фазах

$$\sum_{i=1}^n z_i = 1; \quad \sum_{i=1}^n x_i = 1; \quad \sum_{i=1}^n y_i = 1, \quad (13)$$

можно получить формулу Рэчфорда — Райса

$$\sum_{i=1}^n \frac{z_i(K_i - 1)}{V_m(K_i - 1) + 1} = 0, \quad (14)$$

соответствующую условиям фазового равновесия [Nasri, Binous, 2009].

Поскольку при умеренных давлениях до 700 кПа можно считать константу фазового равновесия для смесей легких компонентов до C_6 по приближению идеального газа [Wilson, 1968], применяется формула

$$K_i = \frac{p_{ci}}{p} \exp \left[5,31(1 + \omega_i) \left(1 - \frac{T_{ci}}{T} \right) \right]. \quad (15)$$

Отметим, что в процессе дальнейших исследований уравнения (5) и (6) применялись не только ко всей смеси, но и для каждой из фаз в отдельности.

Результаты и обсуждение

Алгоритмизация расчетной модели

В соответствии с уравнениями (1)–(15) реализован алгоритм, включающий в себя несколько программных блоков.

Блок-схема подпрограммы «Фазовое равновесие» (ФР) приведена на рис. 1.

При заданном составе смеси по известным p и T определяется равновесная мольная доля пара V_m или по известной V_m и одному из параметров p или T определяется второй параметр при условии фазового равновесия.

Применение теории фазового равновесия к динамическим процессам допустимо при соответствующем выборе расчетного промежутка времени, стремящегося к нулю. Так, например, ниже при расчете времени бездренажного хранения выбран шаг 1 ч, при котором скорость роста давления при хранении СПГ в течение 37 сут составляла всего 60 Па/ч.

Блок-схема подпрограммы «Термодинамические свойства» (ТД), предназначенной для вычисления свойств жидкой и паровой фазы по уравнениям состояния PR независимо от протекающих процессов, приведена на рис. 2.

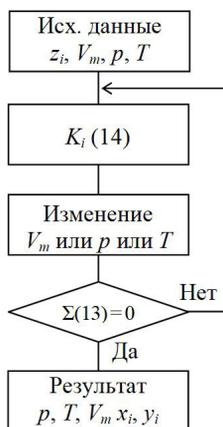


Рис. 1. Блок-схема расчета параметров фазового равновесия (ФР): V_m, p, T, x_i, y_i

Fig. 1. Flowchart for calculating phase equilibrium (PE) parameters: V_m, p, T, x_i, y_i



Рис. 2. Блок-схема расчета термодинамических параметров (ТД)

Fig. 2. Flowchart for calculating thermodynamic parameters (TD)

Рассчитанные на данном этапе параметры двухфазной системы не связаны с каким-либо физическим объектом и могут в дальнейшем использоваться для моделирования конкретных устройств. Для этого следует задать экстенсивные параметры, характеризующие размер системы, и описать закономерности взаимодействия рассматриваемой системы с внешней средой. Далее будем рассматривать емкость для хранения и транспортировки СПГ и других продуктов газопереработки.

Бездренажное хранение

При дальнейшем моделировании процесса бездренажного хранения дополнительно к перечисленным выше параметрам задаются: постоянный объем емкости V ; доля этого объема φ (коэффициент заполнения), занимаемая смесью, первоначально заливаемой в емкость в жидком виде; условия, необходимые для вычисления теплопритоков к смеси из внешней среды. На данном этапе исследования не рассматривается задача теплопередачи извне внутрь емкости, задается постоянная величина теплопритока $q = \Delta Q / \Delta t$ за промежутки времени Δt .

Кроме V и φ , к параметрам, зависящим от характеристик рассматриваемой емкости, относятся объемы жидкой и паровой фазы V' и V'' , количество молей смеси и отдельных фаз N , N' и N'' , мольный объем и коэффициент сжимаемости смеси v и Z , причем $N = \text{const}$, $v = \text{const}$.

Из первого закона термодинамики для изохорного процесса при отсутствии внешней работы следует, что теплота, подводимая к системе, полностью расходуется на изменение внутренней энергии, т. е.

$$\Delta Q = \Delta H = N \Delta h ; \quad (16)$$

$$h = (1 - V_m) h' + V_m h'' . \quad (17)$$

Дополнение уравнений (1)–(15) выражениями (16), (17) замыкает систему для расчета бездренажного хранения. Блок-схема подпрограммы «Бездренажное хранение» (БДХ) приведена на рис. 3.

Первым шагом является расчет V_m и определение состояния фазового равновесия в начальный момент времени $\tau = 0$. Если заданное начальное состояние системы неравновесное, т. е. жидкость переохлаждена ($V_m < 0$), то производится пересчет температуры на равновесную температуру начала кипения ($V_m = 0$). Далее рассчитывается динамика процесса хранения.

Из четырех уравнений (1)–(3) можно получить формулу для объема жидкой фазы

$$V' = (v'' N - V) \frac{v'}{(v'' - v')} , \quad (18)$$

после чего вычислить остальные величины — V'' , N' , N'' , затем окончательно — текущий коэффициент заполнения $\varphi = V' / V''$, применяемый для оценки допустимого расширения жидкой фазы при нагреве и испарении в замкнутом объеме.

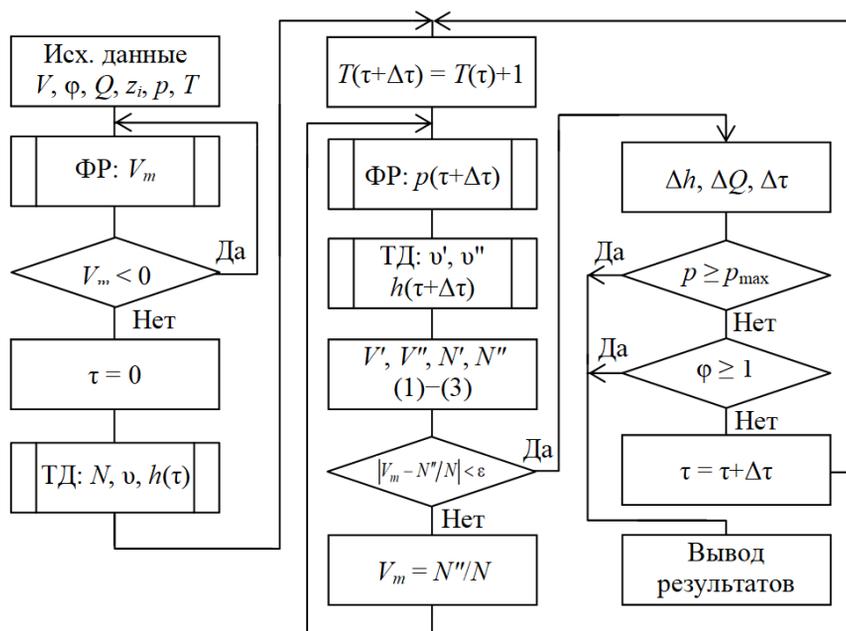


Рис. 3. Блок-схема расчета процесса бездренажного хранения (БДХ) при варьировании температуры

Fig. 3. Flowchart for calculating the drainage-free storage (DFS) process when temperature changes

По уравнениям (16), (17) рассчитывается изменение энтальпии смеси в емкости и полученное количество теплоты, а далее — промежуток времени, в течение которого температура смеси выросла на $\Delta T = 1$ К: $\Delta \tau = \Delta Q/q$.

В течение промежутка времени в соответствии с величиной шага Δt наблюдаются изменения параметров ΔT , Δp , Δh , ΔQ и др. Решение системы уравнений производится итерационным методом. Поэтому в качестве переменной, по которой делаются итерационные шаги, может быть не только время, но и любая другая переменная. Наиболее удобным оказалось наращивание температуры на 1 К: $T(\tau + \Delta \tau) = T(\tau) + 1$.

Результаты расчета

Для проверки адекватности полученной модели была решена тестовая задача — бездренажное хранение жидкого метана с примесью азота.

Исходные данные: объем емкости 45 м³; теплоприток 100 Вт; начальные параметры — степень заполнения жидкой смесью 0,8; давление $1,1 \cdot 10^5$ Па; температура 106 К; доля метана 0,95 моль/моль; доля азота 0,05 моль/моль.

В результате расчета получены графики (рис. 4–7), которые иллюстрируют следующий процесс. Поступление в емкость теплоты приводит к нарушению фазового равновесия. В результате часть молей переходит из жидкой фазы в паровую. При этом часть полученной теплоты уходит на повышение температуры смеси (рис. 4).

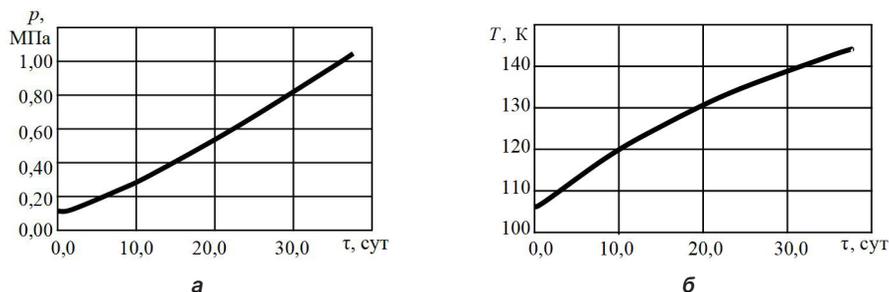


Рис. 4. Рост давления (а) и температуры (б) в емкости для бездренажного хранения
Fig. 4. Pressure increase (a) and temperature increase (б) in the tank for drainage-free storage

Молярный и реальный объемы жидкости увеличиваются (рис. 6), и это объемное расширение жидкости происходит быстрее, чем рост объема пара за счет испарившихся молей. В замкнутом объеме происходит уменьшение объемной доли пара, в том числе азота (рис. 5), и рост давления вплоть до выполнения условий фазового равновесия (рис. 4а).

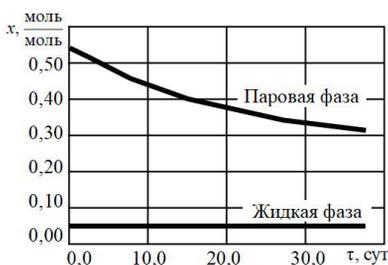


Рис. 5. Динамика изменения мольной доли азота в жидкой и паровой фазе
Fig. 5. Dynamics of changes in the nitrogen mole fraction in the liquid and vapor phases

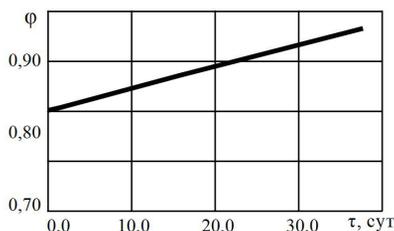


Рис. 6. Объемная степень заполнения жидкой фазой
Fig. 6. Volumetric degree of filling with liquid phase

На величину массы отпарного газа (рис. 7) одновременно влияют два процесса. С одной стороны, при поступлении в систему теплоты увеличивается количество испарившихся молей. С другой стороны, нагревание системы приводит к росту молярного и суммарного объема жидкой фазы, объем паровой фазы уменьшается (рис. 6), плотность пара растет. Повышение давления пара также влияет на смещение мольной

доли в направлении точки росы. В определенный момент второй процесс становится преобладающим, что приводит к суммарному уменьшению массы газа и появлению на графике (рис. 7) максимума.

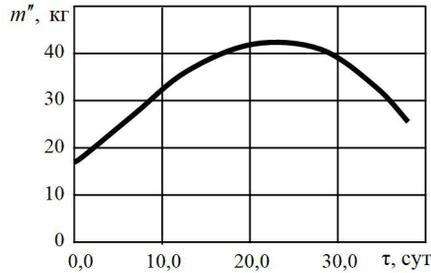


Рис. 7. Динамика изменения массы отпарного газа

Fig. 7. Dynamics of changes in the mass of boil-off gas

Среднее значение суточного роста массы пара при ограничении давления на принятом эксплуатационном уровне в проведенных численных экспериментах составляло от 0,09 до 0,14%, что хорошо согласуется с существующими данными фирм — производителей емкостного оборудования.

Произведена оценка влияния размера емкости на время хранения сжиженного газа. Известно, что время хранения увеличивается с ростом объема емкости, поэтому при сравнении параметров хранения в емкостях больших объемов была проанализирована корреляция времени бездренажного хранения с геометрическими параметрами емкости в диапазоне от 45 до 150 000 м³.

В первом приближении принималась цилиндрическая форма емкости. Также принималась одинаковая поверхностная плотность теплового потока, поступающего в емкость. Получено, что время хранения для цилиндрической формы хранилища с высокой точностью пропорционально объему и обратно пропорционально поверхности емкости, т. е. $\tau = k(V/F)$, где k для всего диапазона объемов изменяется в диапазоне от 67,91 до 68,05 сут/м.

С целью валидации методики проведено сравнение времени бездренажного хранения в резервуаре РЦВ-25/0,6 (рис. 8), полученного в «Криогенмаш» при расчете компактной системы хранения СПГ БСХП-25/0,6 с применением программы XTRAN [Домашенко, Агафонов, 1984], с данными авторов.

Корректность получаемых результатов также подтверждена сравнением с другими данными [Wordu, Peterside, 2013; Khan и др., 2020].

Для оценки влияния примеси азота на параметры процесса хранения была проведена серия расчетов с различными концентрациями азота в исходной смеси (рис. 9). Анализ полученных зависимостей позволяет сделать ряд заключений.

После заполнения емкости и установления в ней начального равновесного состояния начинается рост температуры (рис. 9б). При этом допускается рост давления до некоторого предельного значения, ограниченного конструктивными параметрами (рис. 9а).

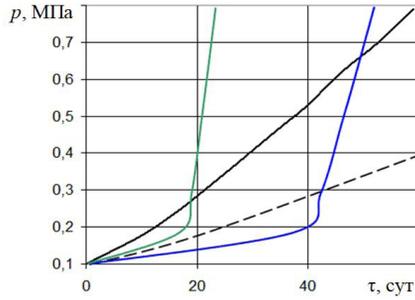
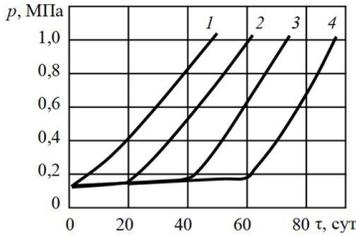


Рис. 8. Динамика изменения давления в емкости РЦВ-25/0,6

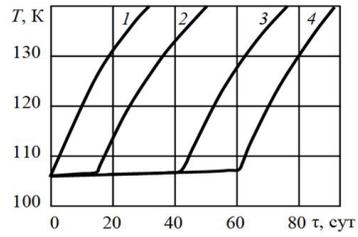
- Криогенмаш, неравновесный процесс
- - - Криогенмаш, равновесный процесс
- Расчет авторов, 1,0% азота
- Расчет авторов, 1,5% азота

Fig. 8. Dynamics of pressure changes in the tank RCV-25/0.6

- Cryogenmash, a non-equilibrium process
- - - Cryogenmash, an equilibrium process
- Authors' calculation, 1.0% of nitrogen
- Authors' calculation, 1.5% of nitrogen



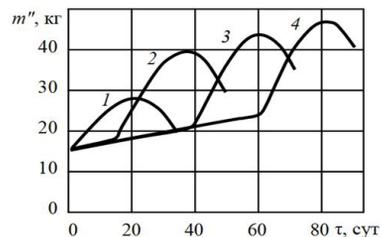
а



б



в



г

Рис. 9. Влияние концентрации азота на динамику процессов в емкости при бездренажном хранении: а — давление; б — температура; в — мольные доли фаз; г — масса отпарного газа; 1 — мол. 5% N_2 ; 2 — мол. 6% N_2 ; 3 — мол. 8% N_2 ; 4 — мол. 10% N_2

Fig. 9. The effect of nitrogen concentration on the dynamics of processes in the tank during drainage-free storage: а — pressure; б — temperature; в — mole fractions of phases; г — mass of boil-off gas; 1 — mol. 5% N_2 ; 2 — mol. 6% N_2 ; 3 — mol. 8% N_2 ; 4 — mol. 10% N_2

Качественно характер изменения параметров процесса хранения слабый, и соответствующие формы кривых на рис. 9 при увеличении концентрации примеси азота не изменяются, но смещаются в сторону роста времени.

Зависимости концентраций азота в жидкой и паровой фазе при хранении различаются существенно (рис. 9в). Сразу после заполнения и установления фазового равновесия в жидкой фазе наблюдается стабилизация концентрации азота на уровне, очень близком к исходному значению, и далее — практически фиксация на этом уровне. Автоматического удаления и установки товарной нормы содержания азота в жидкости не происходит. Очищать продукт от излишков азота следует на следующем этапе его подготовки к отгрузке.

На всех графиках рис. 9 наблюдается картина, когда процесс можно разделить на два этапа: плавное небольшое линейное нарастание на начальном этапе хранения и затем смена режима, когда наблюдаются более интенсивные, характерные для рассматриваемых параметров, процессы их изменения. Для примера можно сравнить кривые на графиках рис. 7 и 9г. При этом время хранения с ростом концентрации азота также растет фактически линейно.

Хранение с удалением отпарного газа

В случае изучения динамики процесса хранения с удалением отпарного газа в качестве варьируемой переменной при решении системы уравнений вместо ΔT удобнее использовать шаги по давлению Δp . Блок-схема подпрограммы «Удаление отпарного газа» (УОГ) для моделирования такого процесса приведена на рис. 10.

В качестве дополнительных данных для реализации этой задачи вводятся параметры интенсивности удаления пара в зависимости от способа откачки и применяемого оборудования. Величина давления p_{\max} соответствует предельно допустимому давлению, при котором следует начинать отведение отпарного газа. При снижении давления до p_{\min} прекращается отведение пара и возобновляется бездренажное хранение. В данной модели для определенности задается скорость удаления отпарного газа:

$$a = \Delta V'' / \Delta \tau, \quad (19)$$

где $\Delta V''$ — объем отводимого отпарного газа за время $\Delta \tau$.

Количество молей удаляемого пара за время $\Delta \tau$ равно

$$\Delta N = \Delta N'' = \Delta V'' / v'' = a \Delta \tau / v''. \quad (20)$$

После удаления этой порции пара в конце временного интервала в емкости остается $N_{\tau} = N - \Delta N$ молей газа, и при оценке изменения общей энтальпии смеси Δh следует учитывать долю от поступившей теплоты $\Delta Q = q \Delta \tau$, отводимую с паром:

$$\Delta Q_{\text{отп}} = \Delta N'' \Delta h'' = a \Delta \tau \Delta h'' / v''. \quad (21)$$

Окончательно из теплового баланса $\Delta Q - \Delta Q_{\text{отп}} = N_{\tau} \Delta h$ получаем

$$\Delta \tau = \frac{N_{\tau} \Delta h}{q - a \Delta h'' / v''}. \quad (22)$$

Величина $\Delta\tau$, соответствующая падению давления Δp при отведении отпарного газа, определяется итеративно.

Реализация модели (19)–(22) совместно с подпрограммой расчета бездренажного хранения позволила создать программу расчета процессов при хранении компонентов СПГ с периодическим отведением отпарного газа (рис. 11).

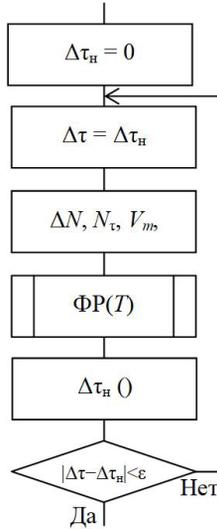


Рис. 10. Блок-схема подпрограммы расчета параметров процесса удаления отпарного газа (УОГ)

Fig. 10. Flowchart for calculating the parameters of the removal process of boil-off gas (BOG)

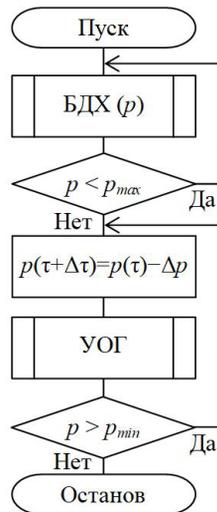


Рис. 11. Блок-схема расчета процессов в емкости для хранения компонентов СПГ

Fig. 11. Flowchart for calculating processes in the tank for storing LNG components

Представленная модель позволяет исследовать разнообразные процессы, протекающие в емкости в течение ее эксплуатации. На рис. 12 показано изменение давления в емкости в процессе хранения в ней метана с примесью азота при давлении от 0,104 до 1,04 МПа. Показаны три цикла нарастания давления с двумя сбросами пара. Каждый цикл бездренажного хранения идентичен зависимостям, приведенным ранее на рис. 4а и 9а.

Сбросы отпарного газа позволяют начать новый цикл хранения, что приводит к возможности кратного увеличения времени хранения.

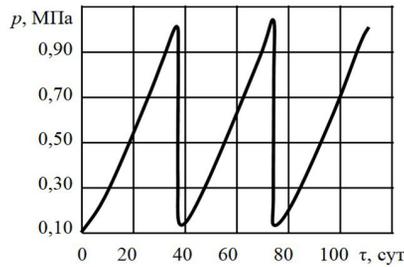


Рис. 12. Изменение давления при хранении с удалением пара

Fig. 12. Pressure change during storage with vapor removal

На рис. 13 приведена динамика изменения массы пара в емкости при регулярном сбросе пара. Первый этап в каждом цикле повторяет картину на рис. 7 при бездренажном хранении. Затем в процессе сброса пара наблюдается обратная ситуация относительно оси ординат: масса нарастает до максимума и затем падает до начального значения. Отличие заключается в длительности процесса: сброс пара происходит в десятки раз быстрее времени бездренажного хранения. Поэтому второй этап на графике (рис. 13) представлен почти вертикальной линией.

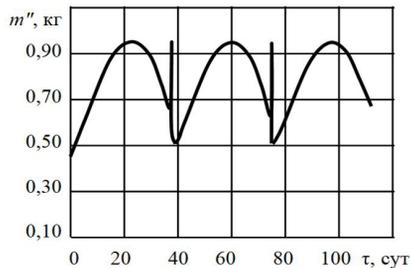


Рис. 13. Изменение массы пара в емкости при хранении с удалением пара

Fig. 13. Vapor mass change in the tank during storage with vapor removal

Заключение

При разработке методики моделирования процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ получена логическая схема (алгоритм) расчета параметров двухфазной смеси, основанная на совместном решении уравнений фазового равновесия, уравнения

состояния и уравнений материального и энергетического баланса в конкретном устройстве. При этом одновременно рассматриваются три термодинамические системы со своими специфическими свойствами: пар, жидкость, парожидкостная смесь.

В результате расчетов с применением макросов и Fortran-программ получены идентичные результаты. Оба варианта обладают достаточной простотой и наглядностью, легки в обучении и применении и представляются перспективными для дальнейшего использования при исследованиях технологических процессов СПГ.

Численные эксперименты позволили подробно изучить динамику хранения метана с примесью азота, положительные и отрицательные стороны такого подхода, конкретные численные результаты.

Приведенные примеры демонстрируют возможности представленного подхода к моделированию процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ. Показана небольшая часть из общего количества возможных численных экспериментов. Возможными задачами для исследования являются: расчет с предварительным переохлаждением смеси; заполнение емкости смесью (жидкостью, газом) или дополнительная загрузка смеси с отличными параметрами (повышенным давлением, температурой, составом), вакуумирование паровой подушки; отгрузка жидкости путем выдавливания паром и др. Применение данной методики возможно не только к емкостям для хранения и транспортирования, но и к сепараторам различных типов и другим системам и установкам.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Брусилковский А. И. 2002. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. М.: Грааль. 575 с.
- Домашенко А. М., Агафонов И. М. 1984. Экспериментальное исследование тепломассообмена при бездренажном хранении криогенных продуктов до критического давления // Химическое и нефтяное машиностроение. № 9. С. 27–29.
- Федорова Е. Б. 2019. Комплексное научно-технологическое обоснование производства сжиженного природного газа: дис. ... д-ра техн. наук. М.: РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина. 360 с.
- Adom E., Islam S. Z., Ji X. 2010. Modelling of boil-off gas in LNG tanks: A case study // International Journal of Engineering and Technology. Vol. 2. No. 4. Pp. 292–296.
- Baker C. J. 2018. Phase equilibrium measurements and advanced modelling for optimising liquefied natural gas production: Doctoral thesis. The University of Western Australia. <https://doi.org/10.26182/5bc411e7ccc0d>
- Hasan M. M. F., Zheng A. M., Karimi I. A. 2009. Minimizing boil-off losses in liquefied natural gas transportation // Industrial & Engineering Chemistry Research. Vol. 48. No. 21. Pp. 9571–9580. <https://doi.org/10.1021/ie801975q>
- Khan M. S., Qyuum M. A., Ali W., Wazwaz A., Ansari K. B., Lee M. 2020. Energy saving through efficient bog prediction and impact of static boil-off-rate in full containment-type LNG storage tank // Energies. Vol. 13. No. 21. Article 5578. <https://doi.org/10.3390/en13215578>
- Migliore C., Tubilleja C., Vesovic V. 2015. Weathering prediction model for stored liquefied natural gas (LNG) // Journal of Natural Gas Science and Engineering. Vol. 26. Pp. 570–580. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.06.056>

- Mokhatab S., Poe W. A. 2012. Handbook of Natural Gas Transmission and Processing. 2nd ed. Gulf Professional Publishing. 828 pp.
- Mokhatab S., Mak J. Y., Valappil J. V., Wood D. 2013. Handbook of Liquefied Natural Gas. Gulf Professional Publishing. 624 pp.
- Nasri Z., Binous H. 2009. Applications of the Peng-Robinson equation of state using MATLAB // Chemical Engineering Education. Vol. 43. No. 2. Pp. 115–124.
- Peng D.-Y., Robinson D. B. 1976. A new two-constant equation of state // Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals. Vol. 15. No. 1. Pp. 59–64. <https://doi.org/10.1021/i160057a011>
- Rahmania A., Purwanto W. W. 2020. Simulation of boil-off gas effect along LNG supply chain on quantity and quality of natural gas // AIP Conference Proceedings. Vol. 2223. No. 1. Article 040004. <https://doi.org/10.1063/5.0000853>
- Rollover in LNG Storage Tanks. 2nd Edition: 2012–2015. Public Version // GIIGNL. <https://giignl.org/document/rollover-in-lng-storage-tanks/>
- Wilson G. 1968. A modified Redlich-Kwong EOS, application to general physical data calculations // American Institute of Chemical Engineers 65th National Meeting. Article 15C.
- Włodek T. 2015. Phase equilibria for liquefied natural gas (LNG) as a multicomponent mixture // AGH Drilling, Oil, Gas. Vol. 32. No. 3. Pp. 539–550.
- Włodek T. 2016. Analysis of liquefied natural gas thermodynamic properties involving phase equilibria calculations // 16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2016). Vol. 3. Pp. 729–736.
- Włodek T. 2019. Analysis of boil-off rate problem in Liquefied Natural Gas (LNG) receiving terminals // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Vol. 214. Article 012105. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012105>
- Wordu A. A., Peterside B. 2013. Estimation of boil-off-gas BOG from refrigerated vessels in liquefied natural gas plant // International Journal of Engineering and Technology. Vol. 3. No. 1. Pp. 44–49.
- Zakaria M. S., Osman K., Yusof A. A., Hanafi M. H. M., Saadun M. N. A., Manaf M. Z. A. 2014. Parametric analysis on boil-off gas rate inside liquefied natural gas storage tank // Journal of Mechanical Engineering and Sciences. Vol. 6. Pp. 845–853. <https://doi.org/10.15282/jmes.6.2014.10.0080>

References

- Brusilovsky, A. I. (2002). *Phase transformations in the development of oil and gas fields*. Graal. [In Russian]
- Domashenko, A. M., & Agafonov, I. M. (1984). Experimental investigation of heat and mass transfer in storage without drainage of cryogenic products to supercritical pressure. *Chemical and Petroleum Engineering*, 20, 451–453. <https://doi.org/10.1007/BF01166114>
- Fyodorova, E. B. (2019). *Comprehensive scientific and technological justification for the production of liquefied natural gas* [Doctoral dissertation, Gubkin University]. [In Russian]
- Adom, E., Islam, S. Z., & Ji, X. (2010). Modelling of boil-off gas in LNG tanks: A case study. *International Journal of Engineering and Technology*, 2(4), 292–296.
- Baker, C. J. (2018). *Phase equilibrium measurements and advanced modelling for optimising liquefied natural gas production* [Doctoral thesis, The University of Western Australia]. <https://doi.org/10.26182/5bc411e7ccc0d>

- Hasan, M. M. F., Zheng, A. M., & Karimi, I. A. (2009). Minimizing boil-off losses in liquefied natural gas transportation. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 48(21), 9571–9580. <https://doi.org/10.1021/ie801975q>
- Khan, M. S., Qyyum, M. A., Ali, W., Wazwaz, A., Ansari, K. B., & Lee, M. (2020). Energy saving through efficient bog prediction and impact of static boil-off-rate in full containment-type LNG storage tank. *Energies*, 13(21), Article 5578. <https://doi.org/10.3390/en13215578>
- Migliore, C., Tubilleja, C., & Vesovic, V. (2015). Weathering prediction model for stored liquefied natural gas (LNG). *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 26, 570–580. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.06.056>
- Mokhatab, S., & Poe, W. A. (2012). *Handbook of natural gas transmission and processing* (2nd ed.). Gulf Professional Publishing.
- Mokhatab, S., Mak, J. Y., Valappil, J. V., & Wood, D. (2013). *Handbook of liquefied natural gas*. Gulf Professional Publishing. 624 pp.
- Nasri, Z., & Binous, H. (2009). Applications of the Peng-Robinson equation of state using MATLAB. *Chemical Engineering Education*, 43(2), 115–124.
- Peng, D.-Y., & Robinson, D. B. (1976). A new two-constant equation of state. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, 15(1), 59–64. <https://doi.org/10.1021/i160057a011>
- Rahmania, A., & Purwanto, W. W. (2020). Simulation of boil-off gas effect along LNG supply chain on quantity and quality of natural gas. *AIP Conference Proceedings*, 2223(1), Article 040004. <https://doi.org/10.1063/5.0000853>
- GIIGNL. (n.d.). *Rollover in LNG storage tanks. 2nd Edition: 2012–2015. Public version.* <https://giignl.org/document/rollover-in-lng-storage-tanks/>
- Wilson, G. (1968). A modified Redlich-Kwong EOS, application to general physical data calculations. *American Institute of Chemical Engineers 65th National Meeting*, Article 15C.
- Włodek, T. (2015). Phase equilibria for liquefied natural gas (LNG) as a multicomponent mixture. *AGH Drilling, Oil, Gas*, 32(3), 539–550.
- Włodek, T. (2016). Analysis of liquefied natural gas thermodynamic properties involving phase equilibria calculations. *16th International Multidisciplinary Scientific GeoConference (SGEM 2016)*, 3, 729–736.
- Włodek, T. (2019). Analysis of boil-off rate problem in Liquefied Natural Gas (LNG) receiving terminals. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 214, Article 012105. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/214/1/012105>
- Wordu, A. A., & Peterside, B. (2013). Estimation of boil-off-gas BOG from refrigerated vessels in liquefied natural gas plant. *International Journal of Engineering and Technology*, 3(1), 44–49.
- Zakaria, M. S., Osman, K., Yusof, A. A., Hanafi, M. H. M., Saadun, M. N. A., & Manaf, M. Z. A. (2014). Parametric analysis on boil-off gas rate inside liquefied natural gas storage tank. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*, 6, 845–853. <https://doi.org/10.15282/jmes.6.2014.10.0080>

Информация об авторах

Адхам Сафтли, аспирант, образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы», Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
adhamsaftly1994@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4501-7010>

Андрей Викторович Зайцев, кандидат технических наук, доцент, образовательный центр «Энергоэффективные инженерные системы», Национальный исследовательский университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия
zai_@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0677-6320>

Information about the authors

Adham Saftly, Postgraduate Student, Educational Center “Energy-Efficient Engineering Systems”, ITMO University, Saint Petersburg, Russia
adhamsaftly1994@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0009-4501-7010>

Andrey V. Zaitsev, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Educational Center “Energy-Efficient Engineering Systems”, ITMO University, Saint Petersburg, Russia
zai_@inbox.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0677-6320>

К вопросу о сопоставимости относительных фазовых проницаемостей, полученных разными методами

Сергей Викторович Степанов^{1, 2}✉, Виктория Руслановна Вокина^{1, 2}

¹ Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

² Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Контакт для переписки: svstepanov@tnnc.rosneft.ru✉

Аннотация. В статье обсуждаются четыре метода получения функций относительной фазовой проницаемости (ОФП): 1) аппроксимация точечных лабораторных данных по известным корреляциям Кори и ЛЕТ; 2) расчет ОФП по кривым капиллярного давления с использованием моделей Бурдайна, Кори и Кори — Брукса; 3) расчет ОФП по промысловым данным; 4) модификация ОФП при настройке гидродинамической модели.

Для получения ОФП по промысловым данным предложен новый метод. В данном методе принято, что значения функции Бакли — Леверетта эквивалентны величинам обводненности скважины, а водонасыщенность можно определить по формуле, связывающей накопленную добычу нефти и начальные геологические запасы нефти.

Методы получения ОФП апробированы на примере двух реальных объектов. Результаты апробации показали, что все пары ОФП заметно отличаются между собой, при этом для рассмотренных объектов имеют место различные тенденции. В статье приводится пояснение возможных причин, обуславливающих различие ОФП. При этом установлено, что масштабный фактор не является самым значимым.

Целесообразность проведенных исследований связана с необходимостью изучения уровня соответствия между собой функций ОФП, полученных разными методами. Это позволит более аргументированно проводить обоснование функций ОФП при создании и адаптации гидродинамической модели нефтяной залежи.

Ключевые слова: относительная фазовая проницаемость, кривая капиллярного давления, гидродинамическое моделирование, модель Кори, модель Кори — Брукса, модель Бурдайна, модель ЛЕТ

Цитирование: Степанов С. В., Вокина В. Р. 2024. К вопросу о сопоставимости относительных фазовых проницаемостей, полученных разными методами // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 2 (38). С. 45–55. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-45-55>

Поступила 14.11.2023; одобрена 04.04.2024; принята 24.05.2024

On the question of comparability of relative phase permeabilities obtained by different methods

Sergei V. Stepanov^{1, 2}✉, Victoria R. Vokina^{1, 2}

¹ Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia

² University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: svstepanov@tnnc.rosneft.ru✉

Abstract. The article discusses four methods for obtaining functions of relative phase permeability (RPP): 1) approximation of point laboratory data by known correlations of Corey and LET; 2) calculation of RPP by capillary pressure curves using Burdine, Cory and Cory–Brooks models; 3) calculation of RPP by field data; 4) modification of RPP when setting up a hydrodynamic model.

A new method is proposed for obtaining RPP based on field data. In this method, it is assumed that the values of the Buckley–Leverett function are equivalent to the values of the well water-cut, and the water saturation can be determined by the formula linking the accumulated oil production and the initial geological oil reserves.

The methods of obtaining RPP have been tested on the example of two real objects. The results of the approbation showed that all pairs of RPPs differ markedly from each other, while different trends take place for the objects considered. The article provides an explanation of the possible reasons for the difference in the RPP. At the same time, it was found that the scale factor is not the most significant.

The expediency of the conducted research is due to the need to study the level of correspondence between the functions of the RPP obtained by different methods. This will allow for a more reasoned justification of the functions of the RPP when creating and adapting a hydrodynamic model of an oil deposit.

Keywords: relative phase permeability, capillary pressure curve, reservoir simulation, Corey model, Corey–Brooks model, Burdine model, LET model

Citation: Stepanov, S. V., & Vokina, V. R. (2024). On the question of comparability of relative phase permeabilities obtained by different methods. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(2), 45–55. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-45-55>

Received Nov. 14, 2023; Reviewed Apr. 4, 2024; Accepted May 24, 2024

Введение

Относительная фазовая проницаемость (ОФП) является важнейшей функцией подземной гидромеханики, которая, помимо научной значимости, имеет принципиальное практическое значение. Это связано с тем, что от корректности ОФП, заложенных в гидродинамическую модель (ГДМ), во многом зависит состоятельность результатов моделирования разработки месторождений углеводородов. Причем это касается как оценки распределения флюидов в пластах, так и прогнозирования динамик технологических показателей разработки, в частности динамики обводненности скважин.

Опыт проектирования и сопровождения разработки месторождений с использованием гидродинамического моделирования показывает, что лабораторных данных для обоснования ОФП всегда недостаточно. Обычной является ситуация, когда для залежи, к примеру, с 50 скважинами и десятилетиями истории разработки количество прямых данных по ОФП, т. е. полученных по лабораторному изучению (потокосные эксперименты) ядра скважин, пробуренных на этой залежи, составляет единицы. Более того, и в случае, когда количество таких керновых ОФП (КОФП) исчисляется десятками, это нередко приводит к ситуации, когда кривые ОФП, относящиеся к горной породе одного литологического типа и имеющие близкие значения других свойств (пористость, абсолютная проницаемость, кривая капиллярного давления (ККД)), имеют совершенно разный вид, отражающийся как в диапазонах значений насыщенности и самих функциях ОФП, так и в форме кривых ОФП. Причины этому могут быть самые разные, и, как правило, в таком случае применяют подходы, позволяющие получить обобщенные функции ОФП.

В ситуации, когда отсутствуют данные по потокосным экспериментам на ОФП, эти функции можно получить аналитически, т. е. на основе относительно простых формул, используя различные модели, например модель Бурдайна или модель Кори — Брукса, для которых в качестве исходной информации выступают лабораторно полученные ККД [Нонароунг и др., 1986]. Такие ОФП называются аналитическими (АОФП). Заметим, что наш опыт по сопоставлению различных АОФП и КОФП, полученных применительно к одним и тем же образцам ядра, показывает их существенное различие между собой. Так, по нашим исследованиям на выборке из 12 терригенных и 12 карбонатных образцов среднее относительное отклонение составляет соответственно 48 и 54%.

В любом случае ОФП, обоснованные по лабораторным исследованиям ядра, при настройке ГДМ корректируются, и получают модифицированные ОФП (МОФП). Факторы, обуславливающие такую корректировку ОФП, могут иметь самую разную природу, в том числе различие в масштабах объектов, на которых получены ОФП (керна

с характерным размером 10^{-2} м и расчетная ячейка ГДМ с характерным размером 10 м), и нивелирование численных эффектов. Кроме того, модификация ОФП может быть вызвана и другими факторами, не имеющими физическое или математическое обоснование, такими как, например, неправильное задание начальных запасов нефти или некорректные данные по добыче/закачке на пласт многопластовой залежи.

Вышеуказанные проблемы могут быть преодолены путем получения ОФП на основе обработки промысловых данных. Такие ОФП можно назвать промысловыми (ПОФП). Существуют различные подходы, которые используют либо имеющиеся технологические данные по работе скважин, либо данные специальным образом организованных гидродинамических и промысловых геофизических исследований скважин. Примеры таких подходов описаны С. В. Степановым [2006], И. М. Индрупским и др. [2008]. Заметим, что к настоящему времени широкая практика использования промысловых данных для получения ОФП не сложилась.

Таким образом, можно выделить четыре метода нахождения ОФП: 1) обработку лабораторных данных по потоковым исследованиям керна; 2) аналитические расчеты на основе лабораторных данных по ККД; 3) модификацию ОФП при адаптации ГДМ на фактические данные; 4) обработку промысловых данных. В этой связи представляет интерес сопоставимость ОФП, полученных разными методами.

Методы и модели

КОФП, АОФП, МОФП и ПОФП могут быть получены разными методами и с использованием разных моделей. Разумеется, в рамках одной статьи охватить все из них не представляется возможным. Поэтому далее опишем основные аспекты рассматриваемых методов и моделей.

Исходя из сложившейся практики, основной метод получения КОФП — это метод стационарной фильтрации, дающий лишь несколько значений ОФП (обычно 5–6). Поэтому в данной статье под КОФП будем понимать ОФП, рассчитанные по аппроксимационным зависимостям, в качестве которых, как правило, выступают формулы (корреляции) Кори (1), (2) [Honarpour и др., 1986] и LET (3), (4) [Lomeland и др., 2005]. В более общем случае под КОФП следует понимать и ОФП, полученные путем обработки данных по другим методам лабораторных исследований ОФП, а именно методом нестационарной фильтрации и методом центрифугирования.

$$f_o(S_{wn}) = f_o^* \cdot (1 - S_{wn})^\alpha, \quad (1)$$

$$f_w(S_{wn}) = f_w^* \cdot (S_{wn})^\beta, \quad (2)$$

$$f_o(S_{wn}) = f_o^* \frac{(1 - S_{wn})^{L_o}}{(1 - S_{wn})^{L_o} + E_o \cdot (S_{wn})^{T_o}}, \quad (3)$$

$$f_w(S_{wn}) = f_w^* \frac{(S_{wn})^{L_w}}{(S_{wn})^{L_w} + E_w \cdot (1 - S_{wn})^{T_w}}. \quad (4)$$

В формулах (1)–(4) f_o^* — ОФП по нефти при остаточной водонасыщенности; f_w^* — ОФП по воде при остаточной нефтенасыщенности; α и β — параметры (степени) корреляции Кори; L_o, E_o, T_o и L_w, E_w, T_w — параметры корреляции LET для нефти и воды соответственно; S_{wn} — нормированная водонасыщенность, определяемая по формуле

$$S_{wn} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{or} - S_{wr}}, \quad (5)$$

где S_{wr} — остаточная водонасыщенность, S_{or} — остаточная нефтенасыщенность.

Существует масса моделей, позволяющих рассчитать АОФП. В данной статье будем рассматривать только три из них, а именно модели Бурдайна (6), (7), Кори (8), (9) и Кори — Брукса (10), (11) [Honoroug и др., 1986]. Эти модели смотрятся как наиболее распространенные на фоне других моделей. В частности, опыт использования этих моделей демонстрируют К. Ли и Р. Н. Хорн [Li, Horne, 2002].

$$f_w(S_w) = \left(\frac{S_w - S_m}{1 - S_m} \right)^2 \frac{\int_0^{S_w} \frac{dS_w}{(p_c(S_w))^2}}{\int_0^1 \frac{dS_w}{(p_c(S_w))^2}}, \quad S_w = S_m \div 1; \quad (6)$$

$$f_o(S_w) = \left(\frac{1 - S_w - S_e}{1 - S_m - S_e} \right)^2 \frac{\int_{S_w}^1 \frac{dS_w}{(p_c(S_w))^2}}{\int_0^1 \frac{dS_w}{(p_c(S_w))^2}}, \quad S_w = S_m \div 1 - S_e; \quad (7)$$

$$f_w(S_w^*) = (S_w^*)^4; \quad (8)$$

$$f_o(S_w^*) = (1 - S_w^*)^2 (1 - (S_w^*)^2); \quad (9)$$

$$f_w(S_w^*) = (S_w^*)^{\frac{2+3\lambda}{\lambda}}; \quad (10)$$

$$f_o(S_w^*) = (1 - S_w^*)^2 \left(1 - (S_w^*)^{\frac{2+\lambda}{\lambda}} \right). \quad (11)$$

В формулах (8)–(11) S_w^* — нормированная водонасыщенность, определяемая по формуле

$$S_w^* = \frac{S_w - S_m}{1 - S_m - S_e}, \quad (12)$$

где S_e — равновесная насыщенность несмачивающей фазы (нефти), которая обычно равна нулю; S_m — минимальная насыщенность смачивающей фазы (воды) в эксперименте на ККД. В формулах (10), (11) параметр λ определяется из предварительной аппроксимации ККД по формуле

$$p_c(S_w^*) = p_e \cdot (S_w^*)^{-\frac{1}{\lambda}}. \quad (13)$$

Рассматривая МОФП, следует иметь в виду, что эти функции могут отличаться в различных реализациях ГДМ одного и того же объекта. Это связано с тем, что ГДМ по мере получения новой информации об объекте моделирования, как правило, изменяется, иногда значительно. При этом заложенные в модель ОФП также подвергаются существенным корректировкам. Поэтому в данной статье в качестве МОФП будем использовать функции из актуальной ГДМ.

Применительно к ПОФП воспользуемся новым методом. Данный метод, так же как и другой, предложенный С. В. Степановым [2006], исходит из допущения, что значения функции Бакли — Леверетта эквивалентны величинам обводненности скважины, а водонасыщенность можно определить по формуле. Это допущение позволяет рассчитать ПОФП по следующему алгоритму:

1. Определить моменты времени, для которых известны дебит жидкости, дебит воды и депрессия. На каждый такой момент времени определить накопленную добычу нефти.
2. Определить фактические значения коэффициента продуктивности (J) на данные моменты времени:

$$J = \frac{q}{\Delta p}, \quad (14)$$

где q — дебит жидкости, Δp — депрессия.

3. Определить значения обводненности на данные моменты времени.
4. Выбрать среди всех значений коэффициентов продуктивности значение коэффициента продуктивности по нефти (J_o), соответствующее нулевому значению обводненности. Если имеется несколько значений нулевой обводненности, то используется среднее арифметическое среди этих значений коэффициентов продуктивности.
5. Определить фактические значения подвижности жидкости (ξ^Φ) на данные моменты времени:

$$\xi^\Phi = \frac{J}{J_o \mu_o}, \quad (15)$$

где μ_o — динамическая вязкость нефти.

6. Составить таблицу данных по обводненности и подвижности, определенных по промысловым данным на рассматриваемые моменты времени.
7. Определить тип корреляций для ОФП (Кори или LET). Вне зависимости от типа корреляций принять значение ОФП по нефти при остаточной водонасыщенности (f_o^*), равной 1. Эти корреляции необходимы для получения значений расчетной подвижности жидкости (ξ^P) по формуле

$$\xi^P(S_w) = \frac{f_w(S_w)}{\mu_w} + \frac{f_o(S_w)}{\mu_o}, \quad (16)$$

где μ_w — динамическая вязкость воды.

8. Минимизировать целевую функцию

$$\Phi = \sum_{t=1}^T (\xi_t^\phi - \xi_t^p)^2 \quad (17)$$

и тем самым определить параметры ОФП для выбранной корреляции. В формуле (17) T — количество моментов времени, t — момент времени. Значения водонасыщенности в формулах для ОФП определяются для каждого момента времени по формуле

$$S_w = S_{wi} + (1 - S_{wi}) \frac{N_p}{N}, \quad (18)$$

где S_{wi} — начальная водонасыщенность; N_p — накопленная на момент времени добыча нефти, m^3 ; N — начальные геологические запасы нефти, m^3 .

9. Сформировать таблицу для ПОФП, например, применительно к 25 точкам насыщенности при параметрах ОФП, минимизирующих целевую функцию.
10. При необходимости пересчитать ПОФП по нефти путем перемножения имеющихся значений на значение ОФП по нефти при остаточной нефтенасыщенности и пересчитать ПОФП по воде путем перемножения имеющихся значений на значение ОФП по воде при остаточной нефтенасыщенности.

Результаты

Рассмотрим АОФП, КОФП, МОФП и ПОФП на примере двух объектов — условных фрагментов пластов, ассоциируемых с нефтяными скважинами, из которых был отобран и исследован керн для получения данных по фильтрационно-емкостным свойствам (ФЕС), ОФП и ККД. Скважины имеют представительные данные по нефти и воде, использованные для настройки ГДМ соответствующих пластов, в том числе посредством модификации ОФП. Основные характеристики объектов даны в таблице 1.

На рис. 1, 2 для объекта 1 и 2 приведены лабораторные значения ОФП, графики МОФП и графики осредненных функций АОФП, КОФП и ПОФП, нормированные на фазовую проницаемость по нефти при начальной нефтенасыщенности. Для АОФП осреднение проведено по трем использованным моделям. ОФП по нефти, рассчитанные по моделям Кори — Брукса и Бурдайна, близки между собой, а ОФП по воде по всем трем моделям заметно отличаются между собой. Такая картина свойственна обоим рассмотренным объектам, хотя и в разной степени. Для КОФП и ПОФП осреднение проведено по корреляциям Кори и ЛЕТ. При этом КОФП, полученные по корреляциям Кори и ЛЕТ, достаточно схожи между собой, приемлемо аппроксимируют лабораторные значения, но несколько отличаются в области вблизи остаточной водонасыщенности. Это связано с тем, что в этой области отсутствует лабораторно полученное значение ОФП по нефти. Такая картина свойственна для обоих рассматриваемых объектов и в целом для аппроксимации лабораторно полученных значений ОФП по методу стационарной фильтрации.

Таблица 1. Характеристики рассматриваемых объектов

Table 1. Characteristics of the objects under consideration

Свойство	Объект 1	Объект 2
Тип породы	Песчаник	Песчаник
Абсолютная проницаемость, мД	8,6	51,2
Пористость, д. ед.	0,15	0,21
Плотность нефти, кг/м ³	870	882
Плотность воды, кг/м ³	1 008	1 008
Вязкость нефти, сП	1,68	2,36

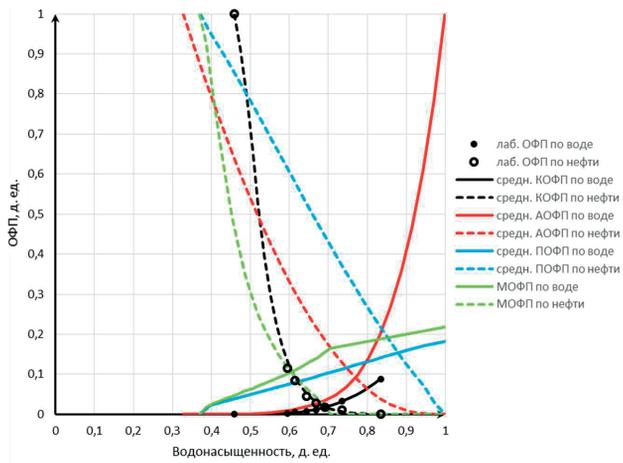


Рис. 1. ОФП для объекта 1

Fig. 1. RPP for object 1

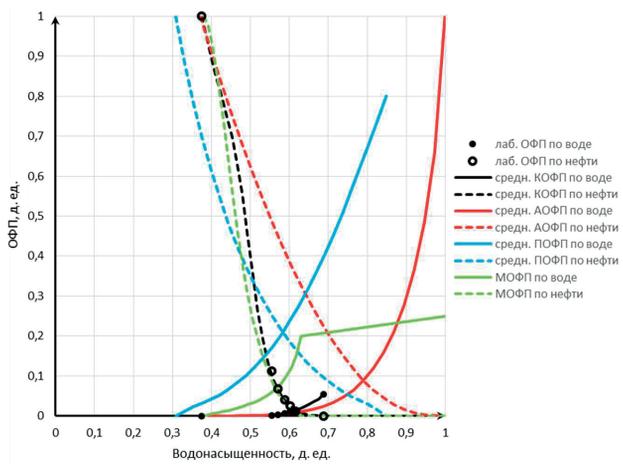


Рис. 2. ОФП для объекта 2

Fig. 2. RPP for object 2

Из рис. 1 и 2 видно, что кривые КОФП, АОФП, ПОФП и МОФП отличаются друг от друга. При этом ни одна из пар кривых не схожа между собой. Более того, если отдельно рассматривать КОФП и АОФП, т. е. только кривые, полученные по данным лабораторного исследования керна соответственно на ОФП и ККД, то нельзя сказать, что различие между этими парами кривых меньше, чем в случае с парами кривых, полученных с использованием скважинных данных соответственно при адаптации ГДМ (МОФП) и непосредственно по ним (ПОФП). Помимо этого, если отдельно сопоставить пары кривых МОФП и ПОФП, то также видно заметное различие между ними.

Полученные результаты сопоставления ОФП не являются уникальными, они отражают известные факты. Действительно, КОФП практически всегда претерпевают существенную модификацию при настройке ГДМ на фактические промысловые данные, и это связано с описанными выше факторами, в том числе с различием в масштабах керна и расчетной ячейки ГДМ. Заметим, что это различие проявляет себя, с одной стороны, с позиции масштабного эффекта, поскольку одни и те же свойства осадочных отложений имеют разные значения применительно к объектам разного масштаба, а с другой — с позиции разнообразных численных эффектов, обусловленных влиянием размера расчетной ячейки на моделирование многофазных процессов, особенно вблизи скважины. В конечном итоге различие между КОФП и МОФП является предсказуемым и понятным.

Различие между КОФП и АОФП также ожидаемо и согласуется с известными литературными данными (см., например, [Li, Horne, 2002]). Более того, полученные отклонения между этими парами кривых ОФП согласуются с нашим собственным опытом по сопоставлению АОФП и КОФП.

Особенный интерес представляет сопоставление МОФП и ПОФП. Как видно из рис. 1 и 2, эти пары кривых заметно отличаются между собой. По всей видимости, это различие обусловлено несколькими причинами, однако основной из них следует считать то, что МОФП — это следствие численного решения уравнений многофазной фильтрации, а также возможное следствие недостаточной адекватности ГДМ реальному объекту. ПОФП, в отличие от МОФП, не связаны с численными эффектами и адекватностью модели. Поскольку ПОФП рассчитываются по скважинным данным, они, очевидно, характеризуют пласт не только с позиции его свойств, но и пластовых процессов, обусловленных спецификой скважины и особенностями ее эксплуатации. Другими словами, ПОФП для двух скважин, расположенных, к примеру, в однородном пласте, но имеющих разную степень совершенства, будут отличаться между собой. Таким образом, имеющийся факт отличия МОФП и ПОФП также можно считать вполне объяснимым.

Заключение

На примере двух объектов рассмотрены функции ОФП, полученных в результате аппроксимации данных потоковых лабораторных экспериментов на ОФП и расчета ОФП по кривым капиллярного давления (в обоих случаях включая исследования керна),

расчета ОФП по промысловым данным и гидродинамического моделирования. Сопоставление ОФП показало, что все пары кривых ОФП заметно отличаются друг от друга, что может быть объяснено разными причинами. При этом фактор масштаба не является самым значимым, поскольку между собой отличаются не только ОФП, найденные после керновых исследований, но и ОФП, определенные непосредственно по скважинным данным и с использованием этих данных при адаптации гидродинамической модели.

Сопоставление ОФП для двух рассмотренных объектов показывает, что отсутствуют одинаковые тенденции в расположении кривых ОФП, найденных разными методами. Так, например, для объекта 2 модифицированная в гидродинамической модели ОФП по воде ниже, чем ОФП по воде, полученная по промысловым данным, а для объекта 1 имеет место обратная картина. Аналогичная ситуация происходит и для ОФП, полученных другими методами.

Таким образом, вопрос сопоставимости ОФП, полученных с использованием разных методов, остается открытым. Дальнейшего изучения требует возможность применения тех или иных методов для получения ОФП с целью их дальнейшего использования для решения практических задач. Предполагается, что понимание особенностей ОФП, полученных разными методами, позволит более обоснованно подходить к модификации ОФП при гидродинамическом моделировании, а значит, позволит увеличить качество сопровождения разработки нефтяных залежей.

Список источников

- Индрупский И. М., Закиров Э. С., Анিকেев Д. П., Ипатов А. И., Фахретдинов Р. Н., Гуляев Д. Н., Клочан И. П. 2008. Определение относительных фазовых проницаемостей в скважинных условиях // Нефтяное хозяйство. № 5. С. 38–42.
- Степанов С. В. 2006. Использование данных разработки месторождения нефти для получения кривых фазовых проницаемостей // Нефтяное хозяйство. № 4. С. 67–69.
- Honarpour M., Koederitz L., Harvey A. H. 1986. Relative Permeability of Petroleum Reservoirs. Boca Raton: CRC Press. 152 pp. <https://doi.org/10.1201/9781351076326>
- Li K., Horne R. N. 2002. Experimental verification of methods to calculate relative permeability using capillary pressure data // SPE Western Regional/AAPG Pacific Section Joint Meeting (20–22 May 2002, Anchorage, Alaska). Paper SPE-76757-MS. <https://doi.org/10.2118/76757-MS>
- Lomeland F., Ebeltoft E., Thomas W. H. 2005. A new versatile relative permeability correlation // International Symposium of the Society of Core Analysts (21–25 August 2005, Toronto, Canada). Paper SCA2005-32.

References

- Indrupsky, I. M., Zakirov, E. S., Anikeev, D. P., Ipatov, A. I., Fakhretdinov, R. N., Gulyaev, D. N., & Klochan, L. P. (2008). In-situ relative permeability evaluation. *Oil Industry*, (5), 38–42. [In Russian]
- Stepanov, S. V. (2006). Using data oilfield development curves for permeability. *Oil Industry*, (4), 67–69. [In Russian]

- Honarpour, M., Koederitz, L. & Harvey, A. H. (1986). *Relative permeability of petroleum reservoirs*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351076326>
- Li, K., & Horne, R. N. (2002, May 20–22). *Experimental verification of methods to calculate relative permeability using capillary pressure data* [Conference paper SPE-76757-MS]. SPE Western Regional/AAPG Pacific Section Joint Meeting, Anchorage, Alaska. <https://doi.org/10.2118/76757-MS>
- Lomeland, F., Ebeltoft, E., & Thomas, W. H. (2005, August 21–25). *A new versatile relative permeability correlation* [Conference paper SCA2005-32]. International Symposium of the Society of Core Analysts, Toronto, Canada.

Информация об авторах

Сергей Викторович Степанов, старший эксперт, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия; доктор технических наук, профессор базовой кафедры ООО «ТННЦ», Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия svstepanov@tnnc.rosneft.ru

Виктория Руслановна Вокина, ведущий специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия; студент магистратуры, кафедра прикладной и технической физики, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия rvvokina@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9651-1758>

Information about the authors

Sergei V. Stepanov, Senior Expert, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia; Dr. Sci. (Tech.), Professor, Tyumen Petroleum Research Center Specialized Department, School of Natural Science, University of Tyumen, Tyumen, Russia svstepanov@tnnc.rosneft.ru

Victoria R. Vokina, Leading Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia; Master Student, Department of Applied and Technical Physics, School of Natural Science, University of Tyumen, Tyumen, Russia rvvokina@tnnc.rosneft.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9651-1758>

Воспроизведение геомеханических эффектов при адаптации гидродинамической модели слабосцементированного коллектора

Ирина Александровна Зубарева¹✉, Анатолий Викторович Степанов^{1,2},
Александр Сергеевич Гаврись¹

¹ Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия

² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: iazubareva-tnk@tnnc.rosneft.ru✉

Аннотация. В работе показан подход к адаптации модели вытеснения высоковязкой нефти полимерным раствором из слабосцементированного коллектора с учетом воспроизведения геомеханических эффектов. Данные эффекты проявляются изменением проницаемости в призабойной зоне нагнетательных и добывающих скважин. Исследование предполагает, что природа возникновения зон разуплотнения в большой степени связана с ростом фактора сопротивления вследствие роста скоростей фильтрации, вызванного увеличением объемов закачки агента вытеснения — полимерного раствора. Работа выполнена на базе секторной гидродинамической модели участка опытно-промышленных работ по вытеснению высоковязкой нефти полимерным раствором. Помимо настройки на фактические данные работы скважин в процессе моделирования оценивалась прогностическая способность модели. Учет геомеханических процессов позволил добиться корректного воспроизведения динамики фактического забойного давления при моделировании закачки полимерного раствора в качестве агента вытеснения. Применение описанного подхода ведет к снижению числа неопределенностей моделирования и повышает точность прогноза.

Ключевые слова: моделирование, полимерное вытеснение, дилатация, слабосцементированный коллектор, высоковязкая нефть, фазовая проницаемость

Цитирование: Зубарева И. А., Степанов А. В., Гаврись А. С. 2024. Воспроизведение геомеханических эффектов при адаптации гидродинамической модели слабосцементированного коллектора // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 2 (38). С. 56–68. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-56-68>

Поступила 18.12.2023; одобрена 17.05.2024; принята 24.05.2024

Consideration of geomechanic effects during hydrodynamic model of weakly-cemented reservoir setting

Irina A. Zubareva¹✉, Anatoliy V. Stepanov^{1,2}, Alexander S. Gavris¹

¹ Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia

² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

Corresponding author: iazubareva-tnk@tnnc.rosneft.ru✉

Abstract. The article offers an approach to tuning of heavy oil deposition model from weakly-cemented reservoir with geomechanic effects. This effects appear as changing permeability at the downhole zone near the injection well. Researchers think that the nature of low-density zones occurrence related to increasing of the resistance factor which is influenced with increasing of filtration velocity. High filtration velocity is caused by polymer flooding increasing. This work was made with basis on hydrodynamic model of the pilot area where are the experiments of displacement of heavy oil during polymer flooding. There are not only well history-matching but assessment of hydrodynamic model prediction ability. Keeping of geomechanic effects allows to achieve the adequate reproduction dynamic of fact bottom-hole pressure during polymer solution injection. Application of the given approach leads to uncertainty reduction and improved prediction reliability.

Keywords: modeling, polymer displacement, dilation, weakly-cemented collector, high-viscosity oil, phase permeability

Citation: Zubareva, I. A., Stepanov, A. V., & Gavris, A. S. (2024). Consideration of geomechanic effects during hydrodynamic model of weakly-cemented reservoir setting. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(2), 56–68. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-56-68>

Received Dec. 18, 2023; Reviewed May 17, 2024; Accepted May 24, 2024

Введение

Характеризующаяся сложной природой, фильтрация высоковязкой нефти в области двухфазного течения зачастую сопровождается проявлением вязкостной неустойчивости, что может приводить к формированию областей преимущественной фильтрации более подвижной фазы [Баренблатт и др., 1984]. Математическое моделирование разработки месторождений высоковязкой нефти (ВВН) сопряжено с необходимостью учитывать возможные геомеханические эффекты. Это связано с тем, что такие залежи, как правило, расположены в пластах, сложенных слабосцементированной породой,

а технология разработки может включать в себя вытеснение ВВН водными растворами полимеров [Земцов, Мазаев, 2021], что требует повышенных репрессий, в результате чего увеличивается риск необратимой деформации и/или разрушения породы. Заметим, что геомеханические процессы в слабосцементированной породе могут быть обусловлены и изменением насыщенности при невысоких изменениях пластового давления, поскольку ВВН в такой породе играет роль своеобразного цемента. Особенности разработки залежи в коллекторе, сложенном слабосцементированной породой, могут провоцировать изменение проницаемости в ходе эксплуатации скважин, повышенный вынос песка, изменение скин-фактора [Иванцов, 2018]. Наиболее заметными такие эффекты будут на этапе стремительного увеличения обводненности: в этом случае появляется риск формирования в пласте каналов фильтрации за счет изменения структуры коллектора [Иванцов, Павлов, 2019, с. 92]. Оценить влияние подобных эффектов на добычу нефти возможно с помощью математического моделирования, при котором существенную роль должен играть корректный учет геомеханических процессов.

Моделирование геомеханических процессов при многофазной фильтрации в общем делает целесообразным применение совмещенного моделирования [Каневская, 2002; Боженюк, Стрекалов, 2016], т. е. совместного использования геомеханической и гидродинамической модели (ГДМ), что требует высоких вычислительных мощностей и, следовательно, не позволяет оперативно решать задачи сопровождения разработки, в частности проводить мониторинг опытно-промышленных работ (ОПР) по подбору агентов вытеснения ВВН. В этой связи целесообразно создание альтернативных вычислительно эффективных способов для имитации процессов деформации и разрушения породы в ГДМ без привлечения геомеханического моделирования, т. е. расчета полей напряжения и деформаций.

Особенностью геомеханических процессов в слабосцементированной породе является эффект дилатации, т. е. изменение плотности породы (разуплотнение) вследствие увеличения ее объема [Гончаров, 1988; Огаджанов, 1997]. На рис. 1 показана характерная зависимость изменения давления при образовании трещины в пласте. При работе нагнетательной скважины также наблюдаются подобные закономерности при повышении объема закачки, что можно интерпретировать как возможное проявление изменения проницаемости пласта в призабойной зоне нагнетательной скважины [Желтов, 1966]. Изменение проницаемости в работе рассматривается как следствие изменения пористости в процессе разуплотнения при локальном росте пластового давления, который происходит в результате увеличения объемов закачки (скорости фильтрации) [Литвин и др., 2010; Берлин, 2011; Полищук и др., 2016]. Некоторые современные гидродинамические симуляторы, например STARS™ (программное обеспечение Computer Modelling Group), позволяют упрощенно моделировать геомеханические процессы. При этом, естественно, возникает вопрос качества такого моделирования, причем как с позиции точности воспроизведения фактических данных, так и с позиции точности прогнозирования. В этой связи цель работы состояла в поиске комбинации таких параметров модели, которые, с одной стороны, позволили бы адаптировать ГДМ, а с другой — обеспечить приемлемую точность прогнозирования.

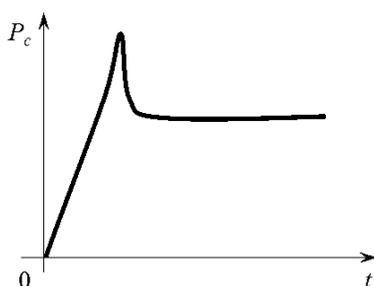


Рис. 1. Скачок давления при образовании трещины в пласте

Fig. 1. Pressure leap during fracture formation in stratum

Методы

Объект моделирования — участок проведения ОПР на одном из месторождений ВВН Западной Сибири. На участке расположено три добывающие и четыре нагнетательные горизонтальные скважины, сгруппированные в два элемента. На первом элементе производится закачка воды, на втором — полимерного раствора. В нагнетательных скважинах второго элемента применялось повышенное забойное давление для обеспечения соизмеримых с первым элементом объемов закачки. Заметим, что степень неоднородности проницаемости для двух элементов сопоставима, что позволяет анализировать влияние на разработку именно агента вытеснения. Назначение ОПР — обоснование технологии разработки залежи ВВН, оптимальных агентов вытеснения; одним из важных условий разработки рассматриваемого объекта является необходимость поддержания высоких значений забойного давления на нагнетательных скважинах для обеспечения требуемых уровней закачки.

Согласно промысловым данным, в период работы скважин с закачкой полимерного раствора наблюдается ступенчатый характер изменения забойного давления при ступенчатом изменении приемистости. Предполагается, что наличие таких ступеней обусловлено геомеханическими эффектами, сопровождающимися изменением фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) — пористости и проницаемости. При этом имеет место циклический упругопластический характер, причем формирование ступени давления происходит при смене обратимой деформации на необратимую. По всей видимости, на стадии пластической деформации реализуется процесс дилатации.

На рис. 2 показана схематичная зависимость пористости при последовательном увеличении и снижении порового давления. Вначале увеличение порового давления приводит к упругому разуплотнению породы, которое выражается в относительно незначительном увеличении пористости. Дальнейшее увеличение давления приводит к росту пористости — это стадия дилатации, характеризующаяся переупаковкой горных пород; увеличение пустотного пространства происходит за счет интенсивного насыщения агентом вытеснения. Зависимость проницаемости с изменением пористости принята по формуле

$$k = k_0 \cdot e^{k_{mul} \left(\frac{m - m_0}{1 - m_0} \right)}, \quad (1)$$

где k — измененная проницаемость, мД; k_0 — начальная проницаемость, мД; k_{mul} — множитель проницаемости; m — текущая пористость, д. ед.; m_0 — начальная пористость, д. ед.

При снижении порового давления сначала происходит уплотнение породы, имеющее упругий характер, а затем — процесс, аналогичный дилатации, но выражающийся в необратимом уменьшении пористости, т. е. процесс переуплотнения породы. Показанная на рис. 2 схема демонстрирует реализованную в гидродинамическом симуляторе модель изменения пористой среды с учетом обратимых (упругая деформация и упругое разуплотнение) и необратимых процессов (дилатация, переуплотнение), происходящих с изменением пластового давления.

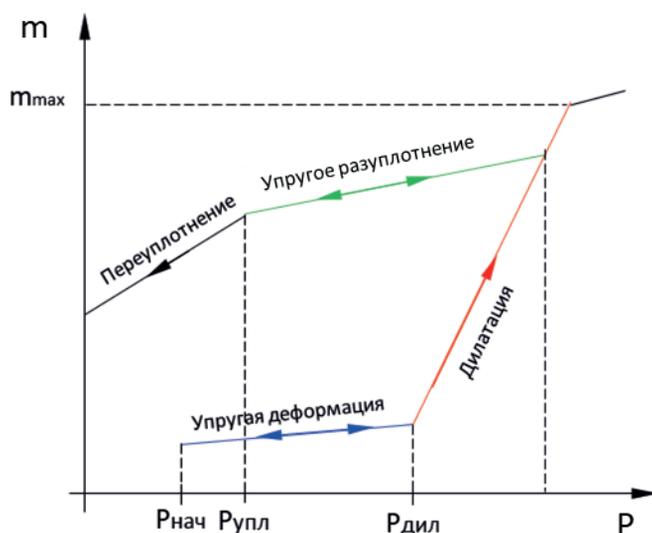


Рис. 2. Схема изменения пористости слабосцементированной горной породы от пластового давления

Fig. 2. Porosity of rock dependence of reservoir pressure

Результаты и обсуждение

Моделирование разработки участка ОНР проведено на коммерческом гидродинамическом симуляторе STARS™. Известно, что гидродинамическое моделирование разработки залежей углеводородов характеризуется существенной неопределенностью. Моделирование разработки пластовой залежи ВВН, сложенной слабосцементированной породой, очевидно, имеет большую неопределенность, чем моделирование разработки традиционных запасов нефти. Это связано, в частности, с более сложными пластовыми процессами, обусловленными технологиями разработки — вытеснением ВВН водой и водными полимерными растворами. Массив фактической информации имеет высокую степень детализации и характеризуется достоверностью, что дает возможность оптимизировать работу скважин в процессе разработки [Прокопенко, Прокопенко, 2019].

Таким образом, гидродинамическое моделирование необходимо проводить в рамках анализа неопределенности. Авторами использован подход, схожий с технологией TDRM [Litvak и др., 2005; Степанов и др., 2013]. Суть технологии заключается в концепции «от простого к сложному» и достижении двух целей: 1) адаптации модели и 2) снижении неопределенностей в прогнозных расчетах. Это позволяет эффективно учитывать имеющиеся неопределенности. В подходе TDRM создаются простые модели, позволяющие учесть неопределенности на этапе геологического моделирования. Каждая модель адаптируется в рамках заданных диапазонов изменения управляющих параметров и их функций распределения вероятностей. Результатом является набор моделей, которые имеют близкую степень адаптации, но различаются в геологическом представлении. Например, адаптация модели может быть получена при малых запасах и высокой подвижности нефти или при больших запасах и низкой подвижности нефти. Реализованный авторами подход заключается в многовариантной многопараметрической адаптации, где неопределенность геологического представления заменяется на учет влияния геомеханических процессов в упрощенном варианте: в работе рассматривается процесс дилатации как часть возможных геомеханических изменений. На первом этапе выполняется настройка на фактические данные с применением выбранных гипотез адаптации, на втором — рассматривается влияние принятой гипотезы на прогнозный расчет.

Способ оценки неопределенности — многовариантная многопараметрическая адаптация, которая была осуществлена с использованием пакета CMOST™ (программное обеспечение Computer Modelling Group). Как известно, процесс адаптации гидродинамической модели является решением обратной задачи с минимизацией функционала невязки расчетных и фактических значений параметров. Управляющие параметры задаются в виде обоснованных или предполагаемых диапазонов значений (min, max) и их начальных приближений. Таким образом, оптимизационный алгоритм решения обратной задачи находит значения параметров, удовлетворяющих глобальному или чаще всего одному из локальных минимумов. Окончательная адаптация выполнялась при помощи корректировки множителей продуктивности скважин в моменты остановок и изменения приемистости. Параметры неопределенности (таблица 1) охватывают процессы, связанные с наличием полимера, в частности его влиянием на относительную фазовую проницаемость (ОФП), а также процесс дилатации. Дополнительную сложность в процесс моделирования вносит необходимость учитывать изменения зависимостей ОФП от концентрации, выражающиеся в снижении остаточной нефтенасыщенности (S_o) и увеличении фазовых проницаемостей по нефти [Басниев и др., 1998]. Обратим внимание, что изменение концевых точек ОФП при остаточной нефтенасыщенности влечет за собой и изменение формы кривой ОФП при различной концентрации полимерного раствора. Это достигается за счет интерполяции гидродинамическим симулятором заданных кривых ОФП при разных концентрациях полимера. Диапазоны изменения параметров и их начальные значения заданы на основе анализа лабораторных экспериментов и предполагаемых значений адаптационных параметров [Степанов и др., 2022]. Принятые значения в секторной ГДМ являются результатом многовариантной

многопараметрической адаптации. Заданный набор варьируемых управляющих параметров, сформулированный в рамках анализа неопределенностей, одновременно учитывает лабораторные данные, влияние фильтрации полимерного раствора на процесс вытеснения и гипотетическое влияние изменения пластового давления в процессе вытеснения на слабосцементированный коллектор.

Было проведено несколько итераций многовариантной адаптации. Оказалось, что полученные при адаптации значения параметров в большинстве случаев близки к начальным значениям. Это показывает хорошее качество исходных данных и корректность их задания в ГДМ. Набор варьируемых управляющих параметров и диапазоны их изменения позволили воспроизвести на ГДМ специфическую динамику забойного давления, а именно ее ступенчатое изменение, в отличие от модели, в которой дилатация не учитывалась (рис. 3). Дилатация приводит к увеличению проницаемости в зоне дренирования нагнетательных скважин и, как следствие, снижению интенсивности роста забойного давления, т. е. появлению ступени на кривых динамики забойного давления. Таким образом, имитируется процесс формирования локальных зон повышенной проницаемости.

Таблица 1. Варьируемые управляющие параметры

Table 1. Variable parameters

Параметр	Единица измерения	Минимум	Начальное значение	Максимум	Принято
Максимальное значение адсорбции	моль/м ³	0,04	0,08407	0,08407	0,08407
ОФП воды при $S_o = 0,42$ и концентрации полимера 0,0	д. ед.	0,00063	0,0084	0,4	0,015
ОФП полимерного раствора при $S_o = 0,38$ и целевой вязкости 10 сП	д. ед.	0,00063	0,0085	0,5	0,035
ОФП полимерного раствора при $S_o = 0,34$ и целевой вязкости 30 сП	д. ед.	0,00063	0,0085	0,6	0,034
Фактор остаточного сопротивления	—	1	2	15	2
Доступный поровый объем для полимерного раствора	д. ед.	0,5	0,8	1,0	0,9
Множитель проницаемости при дилатации (k_{mul})	—	0	100	125	50
Множитель пористости при дилатации	—	1	1,151	1,43875	1,151
Сжимаемость после дилатации	1/атм	3,77e-6	3,77e-6	4,625e-3	4e-6
Давление начала дилатации	атм	80,25	107,00	133,75	107
Фактор остаточной дилатации	—	0,1	0,25	0,5	0,25

В процессе адаптации сформировался минимальный набор параметров, позволяющий настраивать модель по мере актуализации фактических данных. Такими параметрами стали ОФП воды и нефти при соответствующих остаточных насыщенностях и множитель проницаемости при дилатации. С ростом обводненности добывающих скважин адаптация происходит в основном путем изменения ОФП воды при остаточной нефтенасыщенности с точечной корректировкой коэффициента продуктивности скважин в моменты технологических мероприятий. В терминах решения обратных задач ГДМ устойчиво находится в пределах локального минимума и адаптируется минимальным числом параметров (относительно исходного набора). Таким образом, гипотеза о геомеханической природе процессов, обуславливающих наблюдаемое поведение забойного давления, является вполне состоятельной.

На рис. 3 можем увидеть сближение прогнозной и фактической кривой. Расчетное забойное давление в модели с учетом процесса дилатации имеет меньшую погрешность с фактической ступенчатой динамикой в нагнетательной скважине. Достигнутый результат не только количественно улучшает степень адаптации ГДМ, но и позволяет более корректно воспроизводить работу скважин в прогнозном расчете при изменении забойного давления, например, при переводе скважин с закачки воды на закачку полимерного раствора или изменении концентрации полимерного раствора при сохранении приемистости. Это повышает надежность прогнозных показателей модели.

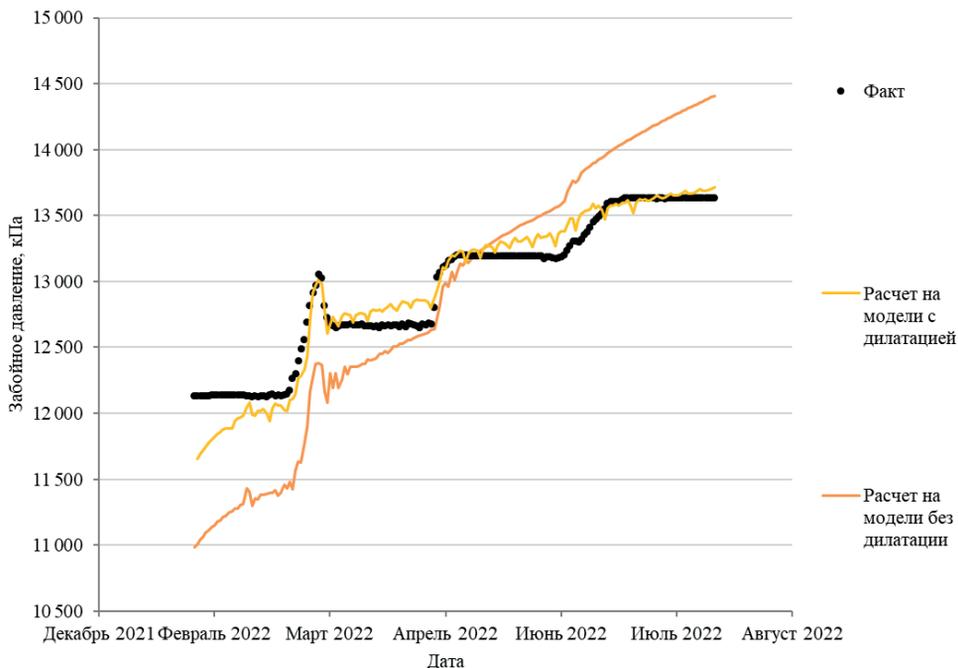


Рис. 3. Сопоставление расчетных и фактических данных по динамике забойного давления

Fig. 3. Variation of bottom-hole pressure

В качестве иллюстрации влияния дилатации приведен поперечный разрез элемента, на котором ведется закачка полимерного раствора (рис. 4). В ГДМ используется неравномерная расчетная сетка: имеется локальное сгущение в районе нагнетательных скважин (поэтому изменение давления на рис. 3 такое же неравномерное). Видно, что по мере роста пластового давления (выбраны соответствующие моменты времени) проницаемость пласта увеличивается в области нагнетательных скважин (L_inj и R_inj) и снижается в окрестности добывающей скважины (Prod).

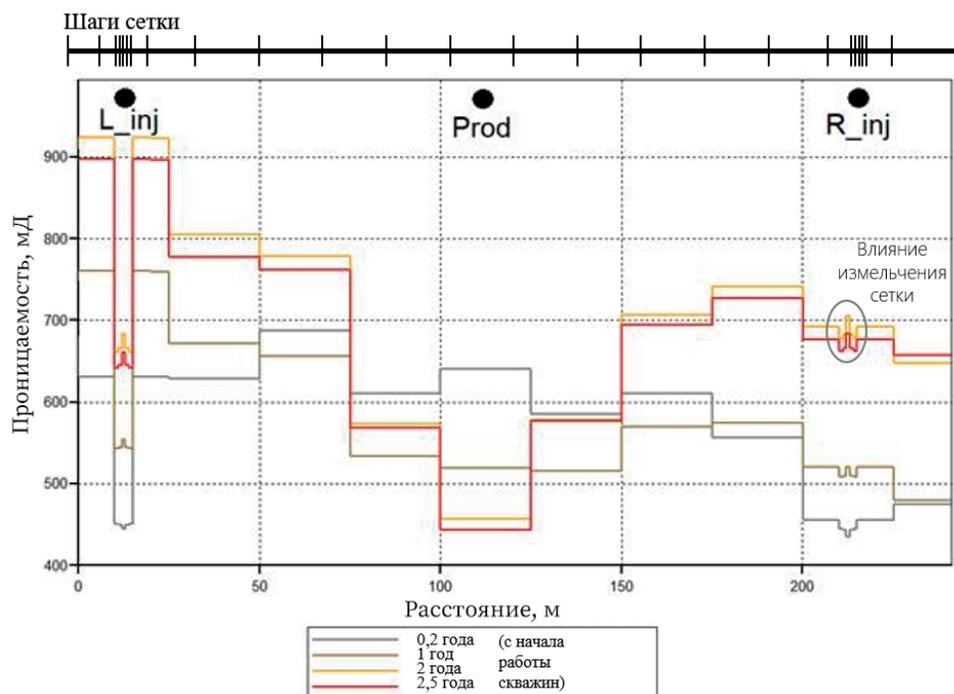


Рис. 4. Изменение абсолютной проницаемости в результате дилатации

Fig. 4. Variation of absolute permeability as a result of dilation

Для оценки корректности прогнозирования на модели с принятыми параметрами адаптации проведен ретро-тест (рис. 5). Результат ретро-теста демонстрирует корректное воспроизведение динамики забойного давления при увеличении приемистости полимерного раствора и, соответственно, роста забойного давления. На выбранном интервале проведения теста расчетная динамика забойного давления нагнетательной скважины в адаптированной модели с посуточным заданием приемистости (черная линия на рис. 5) и расчетная динамика этой же скважины в режиме прогнозного расчета с заданием приемистости в моменты времени, соответствующие только изменению приемистости, имеют близкие качественные и количественные показатели.

Для демонстрации прогностической способности модели была рассчитана средняя абсолютная ошибка прогноза забойного давления в процентах (MAPE):

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|Y_i(t) - \hat{Y}_i(t)|}{Y_i(t)} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где $Y_i(t)$ — фактическое значение; $\hat{Y}_i(t)$ — прогнозное значение; N — количество значений.
Расчет на модели без дилатации показал MAPE = 3,6%, с дилатацией MAPE = 0,9%.

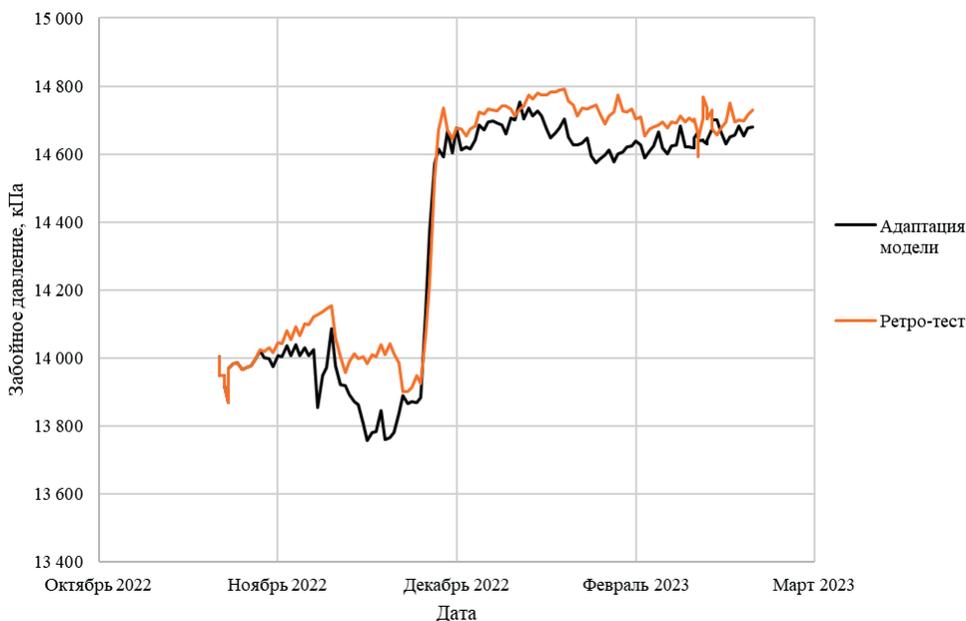


Рис. 5. Сопоставление фактических и расчетных данных по забойному давлению на прогнозном интервале ретро-теста

Fig. 5. Comparison of factual and calculated data of bottom-hole pressure at the retro test stage

Заклучение

Реализованный подход многопараметрической многовариантной адаптации гидродинамической модели позволил воспроизвести влияние геомеханических эффектов на динамику забойного давления нагнетательных скважин и повысить прогнозирующее качество модели. Упрощенный подход моделирования сложных геомеханических процессов заключается в имитации изменения фильтрационно-емкостных свойств коллектора путем моделирования более простого процесса дилатации. Изменение проницаемости коллектора в области дренирования скважины приводит к ступенчатому характеру изменения забойного давления. Способность гидродинамической модели воспроизводить особенности фильтрации высоковязкой нефти в слабokonсолидированном коллекторе имеет более надежную прогнозирующую способность, подтвержденную на тестовых расчетах и статистикой сопровождения мониторинга участка опытно-промышленных работ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Баренблатт Г. И., Ентов В. М., Рьжик В. М. 1984. Движение жидкостей и газов в природных пластах. М.: Недра. 208 с.
- Басниев К. С., Кадет В. В., Каневская Р. Д., Фомин А. В. 1998. Анализ эффективности новых методов и агентов полимерного заводнения для повышения коэффициента нефтеизвлечения. М.: ГАНГ им. И. М. Губкина.
- Берлин А. В. 2011. Физико-химические методы повышения нефтеотдачи. Полимерное воздействие (обзор). Часть I. Физические предпосылки применения полимерных растворов при заводнении пластов // Научно-технический вестник ОАО «НК «Роснефть». № 1. С. 16–25.
- Боженюк Н. Н., Стрекалов А. В. 2016. Некоторые приемы адаптации гидродинамической модели к истории разработки // Нефтегазовое дело. Том 14. № 2. С. 42–49.
- Гончаров М. А. 1988. Механизм геосинклинального складкообразования. М.: Недра. 264 с.
- Желтов Ю. П. 1966. Деформация горных пород. М.: Недра. 198 с.
- Земцов Ю. В., Мазаев В. В. 2021. Современное состояние физико-химических методов увеличения нефтеотдачи (литературно-патентный обзор). Екатеринбург: Издательские решения. 239 с.
- Иванцов Н. Н. 2018. Исследование фильтрации полимерных растворов в слабосцементированном коллекторе // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 4. № 2. С. 136–150. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2018-4-2-136-150>
- Иванцов Н. Н., Павлов В. А. 2019. Обоснование оптимальных режимов эксплуатации горизонтальных скважин в слабосцементированных коллекторах // Нефтепромысловое дело. № 11 (161). С. 92–95. [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-11\(611\)-92-95](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-11(611)-92-95)
- Каневская Р. Д. 2002. Математическое моделирование гидродинамических процессов разработки месторождений углеводородов. Институт компьютерных исследований. М.; Ижевск. 140 с.
- Литвин В. В., Самойлов М. В., Власов С. А., Каган Я. М., Кудряшов Б. М. 2010. Развитие работ по полимерному заводнению на опытном участке пласта АВ13 Самотлорского месторождения // Бурение и нефть. № 2. С. 38–43.
- Огаджанов В. А. 1997. Геофизические исследования на основе явления дилатации горных пород: автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Саратов: Саратов. ун-т. 35 с.
- Полищук С. Е., Дягилев В. Ф., Леонтьев С. А. 2016. Обоснование применения полимерного заводнения на Новомолодежном месторождении // Геология и нефтегазоносность Западно-Сибирского мегабассейна (опыт, инновации): материалы 10-й Междунар. науч.-техн. конф. (посвящ. 60-летию Тюмен. индустр. ун-та). Тюмень: ТИУ. Том 2. С. 119–123.
- Прокопенко И. А., Прокопенко М. Н. 2019. Адаптация моделей в разработке месторождений углеводородов. Основные параметры для настройки и адаптации модели // Вестник науки. Том 3. № 6 (15). С. 406–419.
- Степанов А. В., Сурков А. Ю., Басыров М. А., Кундин А. С. 2013. Анализ неопределенностей на примере адаптации модели реального месторождения // Нефтепромысловое дело. № 2. С. 8–12.

- Степанов А. В., Зубарева И. А., Волгин Е. Р. 2022. Гидродинамическое моделирование лабораторных экспериментов по вытеснению нефти термополимерным раствором // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 8. № 2 (30). С. 77–100. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-2-77-100>
- Litvak M., Christie M., Johnson D., Colbert J., Sambridge M. 2005. Uncertainty estimation in production predictions constrained by production history and time-lapse seismic in a GOM oil field // SPE Reservoir Simulation Symposium (31 January — 2 February 2005, The Woodlands, Texas). Paper SPE-93146-MS. <https://doi.org/10.2118/93146-MS>

References

- Barenblatt, G. I., Entov, V. M., & Rizhik, V. M. (1984). *Liquid and gas movement in the natural strata*. Nedra. [In Russian]
- Basniev, K. S., Kadet, V. V., Kanevskaya, R. D., & Fomin, A. V. (1998). *Analysis of new methods and flooding agents for increasing oil recovery coefficient effectiveness*. Gubkin University. [In Russian]
- Berlin, A. V. (2011). Physical and chemical methods of enhanced oil recovery. Polymer flooding (review). Part I. *Scientific and Technical Bulletin of OJSC "NK "Rosneft"*, (1), 16–25. [In Russian]
- Bozhenyuk, N. N., & Strekalov, A. V. (2016). Some methods of simulation model history-matching. *Oil and Gas Business*, 14(2), 42–49. [In Russian]
- Goncharov, M. A. (1998). *The mechanism of geosynclinal folding*. Nedra. [In Russian]
- Zhelto, Yu. P. (1966). *Rocks deformation*. Nedra. [In Russian]
- Zemtsov, Yu. V., & Mazaev, V. V. (2021). *Physical-chemical methods of increasing oil recovery today*. Izdatelskie resheniya. [In Russian]
- Ivantsov, N. N. (2018). A study of polymer solutions filtration in unconsolidated reservoir. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 4(2), 136–150. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2018-4-2-136-150> [In Russian]
- Ivantsov, N. N., & Pavlov, V. A. (2019). Substantiation of optimal modes of horizontal wells operation in weakly-cemented reservoirs. *Oilfield Engineering*, (11), 92–95. [https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-11\(611\)-92-95](https://doi.org/10.30713/0207-2351-2019-11(611)-92-95) [In Russian]
- Kanevskaya, R. D. (2002). *Mathematical modeling of hydrodynamic processes of hydrocarbons' fields development*. Institute of Computer Science. [In Russian]
- Litvin, V. V., Samoylov, M. V., Vlasov, S. A., Kagan, Ya. M., & Kudryashov, B. M. (2010). Works developing on polymer flooding at experimental area of Samotlor field stratum AB₁³. *Drilling and Oil*, (2), 38–43. [In Russian]
- Ogadjanov, V. A. (1997). *Geophysics researches based on rock's dilation* [Dr. Sci. (Geol.-Mineral.) abstract of the dissertation, Saratov State University]. [In Russian]
- Polischyk, S. E., Dyagilev, V. F., & Leontiev, S. A. (2016). Reasons for polymer flooding on the Novomodezhnoe field. *Geology and oil & gas potential of West Siberian megapoll: Proceedings of the 10th International scientific and technical conference: Vol. 2* (pp. 119–123). Industrial University of Tyumen. [In Russian]
- Prokopenko, I. A., & Prokopenko, M. N. (2019). Tuning of the model during field development. Main settings for model tuning. *Vestnik nauki*, 3(6), 406–419. [In Russian]

- Stepanov, A. V., Surkov, A. Yu., Basyrov, M. A., & Kundin, A. S. (2013). Uncertainties analysis with the example of adaptation of real field model. *Oilfield Engineering*, (2), 8–12. [In Russian]
- Stepanov, A. V., Zubareva, I. A., & Volgin, E. R. (2022). Hydrodynamic modeling of laboratory experiments related to oil displacement with thermopolymer solution. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 8(2), 77–100. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-2-77-100> [In Russian]
- Litvak, M., Christie, M., Johnson, D., Colbert, J., & Sambridge, M. (2005, Jan. 31–Feb. 2). *Uncertainty estimation in production predictions constrained by production history and time-lapse seismic in a GOM oil field* [Conference paper SPE-93146-MS]. SPE Reservoir Simulation Symposium, The Woodlands, Texas. <https://doi.org/10.2118/93146-MS>

Информация об авторах

Ирина Александровна Зубарева, специалист, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия
iazubareva-tnk@tnnc.rosneft.ru

Анатолий Викторович Степанов, эксперт, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия; кандидат физико-математических наук, доцент базовой кафедры ООО «ТННЦ» ПАО «НК «Роснефть», Высшая инженерная школа ЕГ, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
avstepanov5@tnnc.rosneft.ru

Александр Сергеевич Гаврис, старший менеджер, Тюменский нефтяной научный центр, Тюмень, Россия
asgavris@tnnc.rosneft.ru

Information about the authors

Irina A. Zubareva, Specialist, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia
iazubareva-tnk@tnnc.rosneft.ru

Anatoliy V. Stepanov, Expert, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia; Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Specialized Department of Tyumen Petroleum Research Center, Higher School of Engineering EG, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
avstepanov5@tnnc.rosneft.ru

Alexander S. Gavris, Senior Manager, Tyumen Petroleum Research Center, Tyumen, Russia
asgavris@tnnc.rosneft.ru

Математическое моделирование продолжительности и частоты водопотребления водоразборными устройствами жилого здания

Дмитрий Евгеньевич Поливанов✉, Алексей Александрович Семенов,
Лия Витальевна Мовсесова

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
Санкт-Петербург, Россия
Контакт для переписки: dmitry_polivanov@mail.ru✉

Аннотация. Фактические режимы работы систем водоснабжения не могут быть достаточно подробно и точно охарактеризованы несколькими значениями, полученными в ходе выполнения расчетов по традиционным детерминированным методикам и моделям. Тем не менее задача получения исчерпывающих сведений о режимах функционирования систем водоснабжения может решаться с помощью имитационного моделирования, позволяющего детально анализировать изменчивость водопотребления во времени. При этом наиболее важными составляющими данного процесса, которые должны учитываться при моделировании, являются интенсивность, продолжительность и частота водопотребления.

В настоящей статье рассматриваются вопросы математического описания изменчивости продолжительности и частоты водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств (смесителями кухонной мойки и ванны / душевой кабины, унитазом со смывным бачком, стиральной и посудомоечной машинами), использующими воду из системы водоснабжения жилого здания.

Целью работы является оценка и обоснование теоретических законов распределения продолжительности водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение наиболее характерного периода водопотребления (сутки).

В работе представлены результаты исследования продолжительности и частоты водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств. Приведен анализ построенных по полученным статистическим данным гистограмм и графиков, а также оценок основных числовых характеристик. Выполнена

оценка и обоснование теоретических законов распределения продолжительности и частоты (вероятности) водопотребления.

В результате выполненного исследования предложен вариант математического описания характера изменчивости продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение суток.

Ключевые слова: моделирование, водопотребление, закон распределения, логнормальный закон распределения, смеси распределений, вероятностная модель

Цитирование: Поливанов Д. Е., Семенов А. А., Мовсесова Л. В. 2024. Математическое моделирование продолжительности и частоты водопотребления водоразборными устройствами жилого здания // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 2 (38). С. 69–87. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-69-87>

Поступила 15.02.2024; одобрена 20.05.2024; принята 24.05.2024

Mathematical modeling of the duration and frequency of water consumption by water collection devices of a residential building

Dmitrii E. Polivanov✉, Alexey A. Semenov, Liya V. Movsesova

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia

Corresponding author: dmitry_polivanov@mail.ru✉

Abstract. The actual operating modes of water supply systems cannot be characterized in sufficient detail and accurately by several values obtained during calculations using traditional deterministic methods and models. Nevertheless, the task of obtaining comprehensive information about the modes of operation of water supply systems can be solved using simulation modeling, which allows detailed analysis of the variability of water consumption over time. At the same time, the most important components of this process, which should be taken into account when modeling, are the intensity, duration and frequency of water consumption.

This article discusses the mathematical description of the variability of the duration and frequency of water consumption by the most common types of water collection

devices (kitchen sink and bathtub faucets / shower cubicle, toilet bowl with flush tank, washing machine and dishwasher) using water from the water supply system of a residential building.

The aim of the work is to evaluate and substantiate the theoretical laws of the distribution of the duration of water consumption by the most common types of water collection devices, as well as the frequency (probability) of their use during the most characteristic period of water consumption (day).

The paper presents the results of a study of the duration and frequency of water consumption by the most common types of water collection devices. The analysis of histograms and graphs based on the obtained statistical data, as well as estimates of the main numerical characteristics, is presented. The evaluation and substantiation of the theoretical laws of the distribution of duration and frequency (probability) of water consumption has been carried out.

As a result of the performed research, a variant of the mathematical description of the nature of variability in the duration of periods of continuous water consumption by the most common types of water collection devices, as well as the frequency (probability) of their use during the day, is proposed.

Keywords: modeling, water consumption, distribution law, lognormal law, mixtures of distributions, probabilistic model

Citation: Polivanov, D. E., Semenov, A. A., & Movsesova, L. V. (2024). Mathematical modeling of the duration and frequency of water consumption by water collection devices of a residential building. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(2), 69–87. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-69-87>

Received Feb. 15, 2024; Reviewed May 20, 2024; Accepted May 24, 2024

Введение

Прогнозирование водопотребления — одна из базовых задач, решаемых при выполнении инженерных расчетов для систем водоснабжения. От степени соответствия результатов, полученных в ходе ее решения, фактическим значениям расхода воды в трубопроводах при их эксплуатации будет зависеть качество выполнения системой водоснабжения возложенных на нее функций, экономическая эффективность капитальных и эксплуатационных затрат, а также надежность самой системы [Карамбиров, Бекишева, 2012; Moughton и др., 2012; Сайриллинов, 2020].

Работу системы водоснабжения и качество ее функционирования невозможно детально рассмотреть и оценить на основании всего нескольких значений расчетного расхода, полученных по имеющимся аналитическим методикам, изложенным в действующих нормативных документах [СП 30.13330.2020]. Традиционные детерминированные модели потокораспределения в системах водоснабжения также

не позволяют достаточно подробно и точно охарактеризовать фактические режимы их работы, которые формируются под влиянием случайных воздействий внешней среды [Новицкий, Вантеева, 2008].

В связи с этим для обеспечения возможности принятия наиболее обоснованных технических решений важным и актуальным вопросом является разработка математических моделей, способных описывать процесс водопотребления и его изменчивость во времени.

Помимо усовершенствования расчетных методик, подробная математическая модель, отражающая природу процесса потребления воды, позволит более детально рассматривать и анализировать данный процесс.

Водопотребление по своей природе является стохастическим процессом, зависящим от огромного количества факторов [Чупин, Душин, 2009; Карамбилов и др., 2012; Николенко, Рыжаков, 2019; Салугин, Балкушкин, 2021]. На изменчивость водопотребления влияет практически всё, что так или иначе сказывается на поведении потребителей или устройстве системы водоснабжения: от режима работы (жизни) потребителей до экономических и социально-демографических факторов [Исаев, Мхитарян, 2003; Mazzoni и др., 2023]. Неопределенность и стохастический характер данного процесса подчеркивались многими авторами, занимающимися вопросами разработки математических моделей водопотребления и определения расходов воды в системах водоснабжения [Buchberger, Wu, 1995; Alvisi и др., 2003; Новицкий, Вантеева, 2011; Карамбилов и др., 2013; Vertommen и др., 2015]. В период с 1995 по 2023 г. выделяются также работы зарубежных авторов, занимающихся исследованиями в области вероятностного моделирования процесса водопотребления [Buchberger, Wu, 1995; Buchberger, Wells, 1996; Alvisi и др., 2003; Blokker, Vreeburg, 2012; Vertommen и др., 2012; Mazzoni и др., 2023].

Исходной величиной, влияющей на формирование расхода воды в трубопроводах, является элементарный расход (т. е. расход воды одним водоразборным устройством). Однако в наиболее распространенном случае, когда вода по трубопроводу подается к нескольким водоразборным устройствам, наличие сведений о величине каждого из обеспечиваемых по трубопроводу элементарных расходов еще не дает представления о расходе воды непосредственно в самом трубопроводе. Причиной является возможное полное совпадение, несовпадение или частичное совпадение во времени элементарных расходов воды.

Выявить наличие таких совпадений можно путем построения графиков в виде прямоугольных импульсов, отражающих время начала и окончания работы прибора, а также ее продолжительность.

Рассмотрению вопросов интенсивности водопотребления для различных типов водоразборных устройств посвящены другие работы авторов настоящей статьи (см., например, [Поливанов, Семенов, 2023а, 2024]).

Целью данного исследования является оценка и обоснование теоретических законов распределения продолжительности водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, а также частоты (вероятности) их использования в течение наиболее характерного периода водопотребления (сутки).

Методы

Для получения необходимых статистических данных было проведено наблюдение за наиболее распространенными типами водоразборных устройств в системе внутреннего водоснабжения здания, такими как смеситель кухонной мойки, смеситель ванны / душевой кабины, унитаз со смывным бачком, стиральная машина, посудомоечная машина.

Наблюдение выполнялось круглосуточно, без перерывов. Непрерывность наблюдения была обеспечена путем применения разработанной авторами системы, позволяющей в автоматизированном режиме фиксировать, обрабатывать, записывать, хранить и передавать данные, в том числе при помощи Интернета. Подробное описание данной системы представлено авторами ранее [Поливанов, Семенов, 2023б].

Анализ и обработка полученных данных были выполнены при помощи методов теории вероятностей и математической статистики. Первичная обработка статистической информации о временных показателях работы водоразборных устройств была выполнена в разработанной авторами программе на языке C#, а визуализация результатов (построение гистограмм, диаграмм размаха, графиков и т. д.) и статистический анализ данных (расчет основных числовых характеристик случайных величин, оценка параметров распределений по эмпирическим данным, расчет критериев согласия и т. д.) — в разработанной авторами программе на языке R.

Полученный в ходе исследования набор статистических данных был сгруппирован по типам рассматриваемых водоразборных устройств и типу системы водоснабжения. Затем для каждого водоразборного устройства и типа системы водоснабжения данные были обработаны и сгруппированы по интервалам. Количество интервалов для первичной группировки данных определялось по правилу Стёрджеса [Sturges, 1926]:

$$k = 1 + 3,322 \cdot \lg n,$$

где k — оптимальное количество интервалов, n — объем выборки. Полученное значение было округлено до ближайшего меньшего целого числа.

Первичная оценка теоретических законов распределения временных показателей работы водоразборных устройств была выполнена в результате комбинирования следующих двух способов [Волгин, Масленникова, 2010]: 1) анализа оценок основных числовых характеристик, рассчитанных по эмпирическим данным (оценки моды, медианы, математического ожидания, дисперсии и среднеквадратичного отклонения, коэффициента вариации, коэффициента асимметрии и эксцесса); 2) сравнительной оценки гистограмм и кривых плотности вероятности, построенных по эмпирическим данным, с известными теоретическими законами распределения.

В дополнение к указанным способам при первичном выдвижении гипотезы о теоретических законах распределения авторы руководствовались в том числе соображениями о природе исследуемых процессов и способах их дальнейшего представления в имитационной модели системы водоснабжения с учетом ранее опубликованных работ других авторов [Buchberger, Wu, 1995; Alvisi и др., 2003; García и др., 2004; Blokker, Vreeburg, 2012; Mazzoni и др., 2023].

Оценка параметров рассматриваемых видов распределений была выполнена методом максимального правдоподобия. Выбор данного метода обусловлен его наилучшими асимптотическими свойствами [Лемешко и др., 2018].

Для декомпозиции смесей вероятностных распределений применялся EM-алгоритм [Dempster и др., 1977]. Расщепление смесей нормальных распределений было выполнено в разработанной авторами программе на языке R с помощью функции `normalmixEM` из пакета `mixtools`.

Представление любого набора эмпирических данных в виде теоретического закона распределения всегда является некоторым приближением, и фактические отклонения эмпирических значений от теоретических неизбежны. Данный факт объясняется относительно малым количеством теоретических законов распределения (немного превышает 100), в том числе применяемых при статистическом анализе в научных исследованиях (порядка 30), которые не могут в точности описать все случайные величины, встречающиеся на практике [Лемешко, 1998].

Однако имеющиеся методы математической статистики позволяют оценить однородность эмпирических данных и теоретических законов распределения при заданном уровне значимости, который в данном исследовании был принят $\alpha = 0,05$. Оценка однородности эмпирических данных и теоретических законов распределения была выполнена по репрезентативным выборкам меньшего объема.

Оценка принадлежности рассматриваемых выборок нормальному закону распределения выполнялась на основании рассчитанного критерия Шапиро — Уилка. Критерий был рассчитан в разработанной авторами программе на языке R с помощью функции `shapiro.test` из пакета `stats`.

Оценка однородности эмпирических данных и теоретических законов распределения (за исключением нормального) была выполнена с применением критерия Колмогорова [1986]. Статистика критерия определялась по формуле

$$D_n = \sup_x |F_n(x) - F(x)|,$$

где $F_n(x)$ и $F(x)$ — эмпирическая и теоретическая функции распределения соответственно, D_n — статистика критерия.

Уровень значимости и статистика критерия были рассчитаны в разработанной авторами программе на языке R с помощью функции `ks.test` из пакета `stats`.

Результаты и обсуждение

При выполнении данного исследования было получено 12 746 результатов измерений продолжительности периодов непрерывного водопотребления для всех рассматриваемых водоразборных устройств. Количество периодов непрерывной работы с распределением по типам водоразборных устройств и типам системы водоснабжения представлено в таблице 1. Дальнейший анализ полученных значений выполнялся отдельно для каждого типа водоразборного устройства и системы водоснабжения.

Сведения об основных числовых характеристиках и значениях их оценок, рассчитанных по эмпирическим выборкам, приведены в таблице 2.

Таблица 1. Количество выполненных измерений для каждого из водоразборных устройств

Table 1. The number of measurements performed for each of the water sampling devices

Место установки датчика расхода воды	Условное обозначение	Количество измерений
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к смесителю кухонной мойки	СМКх	4 053
Трубопровод горячего водоснабжения, подающий воду к смесителю кухонной мойки	СМКг	2 715
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к смесителю ванны	СМВх	837
Трубопровод горячего водоснабжения, подающий воду к смесителю ванны	СМВг	1 628
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к смывному бачку унитаза	Ух	2 321
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к посудомоечной машине	Пмх	469
Трубопровод холодного водоснабжения, подающий воду к стиральной машине	Стх	723

Таблица 2. Оценки основных числовых характеристик продолжительности непрерывной работы водоразборных устройств

Table 2. Estimates of the main numerical characteristics of the duration of continuous operation of water sampling devices

Показатель	Место установки датчика расхода воды						
	СМКх	СМКг	СМВх	СМВг	Ух	Пмх	Стх
Характеристики положения							
Оценка моды (\hat{M}_{q_0}, c)	5	5	5	60	65	9	10
Оценка медианы ($\hat{M}e_{q_0}, c$)	11	12	41	25	68	52	13
Оценка математического ожидания (\hat{m}_{q_0}, c)	15,15	15,96	88,88	67,29	67,28	48,72	30,68
Характеристики рассеяния							
Оценка дисперсии (\hat{D}_{q_0}, c^2)	209	250	17 666	12 973	705	1 190	1 344
Оценка среднеквадратичного отклонения ($\hat{\sigma}_{q_0}, c$)	14,45	15,81	132,91	113,90	26,55	34,49	36,66
Оценка коэффициента вариации (\hat{C}_v)	0,95	0,99	1,50	1,69	0,39	0,71	1,20
Характеристики формы							
Оценка коэффициента асимметрии (\hat{C}_s)	4,18	7,57	3,10	3,32	5,52	-0,05	2,01
Оценка эксцесса (\hat{E}_{q_0})	28,96	138,05	12,25	11,96	127,11	-1,81	3,00

Диаграмма размаха, представленная на рис. 1, позволяет визуальнo оценить степень разброса продолжительности периодов непрерывного водопотребления для рассматриваемых выборок.

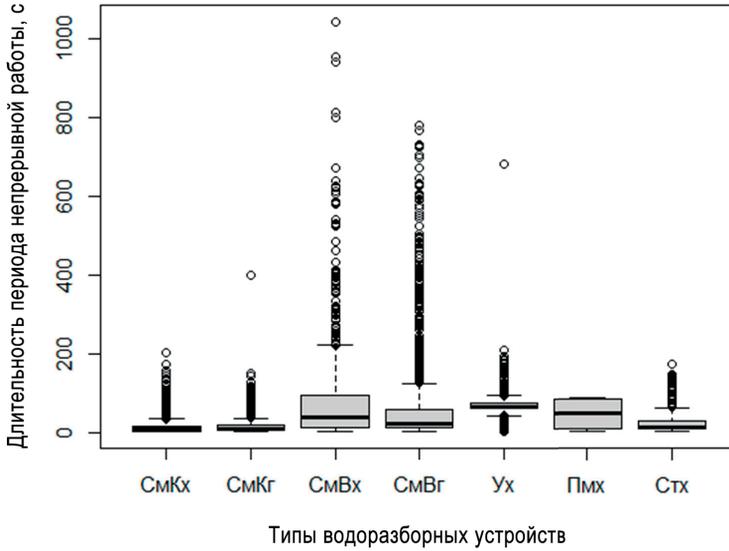


Рис. 1. Диаграмма размаха эмпирических выборок продолжительности непрерывной работы водоразборных устройств

Fig. 1. A diagram of the scope of empirical samples of the duration of continuous operation of water sampling devices

Поскольку выборка продолжительности периодов непрерывного водопотребления посудомоечной машиной имеет явные признаки того, что ее математическое описание потребует применения смеси теоретических законов распределения, статистические гипотезы о ее соответствии известным теоретическим законам распределения не выдвигались.

Гипотеза о принадлежности рассматриваемых эмпирических выборок закону нормального распределения была отвергнута на основании рассчитанного критерия Шапиро — Уилка. Сведения о рассчитанном уровне значимости критерия p_{value} приведены в таблице 3.

Таблица 3. Значения p_{value} , полученные в результате расчета критерия Шапиро — Уилка

Table 3. Values p_{value} obtained as a result of calculating the Shapiro–Wilk criterion

Выборка	p_{value}
СМКх	$8,90 \cdot 10^{-17}$
СМКг	$7,85 \cdot 10^{-17}$
СМВх	$1,47 \cdot 10^{-17}$
СМВг	$4,90 \cdot 10^{-20}$
Ух	$4,06 \cdot 10^{-9}$
Стх	$4,45 \cdot 10^{-17}$

На основании проанализированных оценок основных числовых характеристик, рассчитанных по эмпирическим выборкам (таблица 2), диаграмм размаха (рис. 1) и сравнительной оценки графиков плотности вероятности известных теоретических законов распределения случайных величин с кривой плотности вероятности, построенной по эмпирическим данным, авторами был выдвинут ряд гипотез о возможных законах распределения, которыми могут быть описаны рассматриваемые случайные величины. В качестве нулевых выдвигались гипотезы о соответствии рассматриваемых выборок следующим теоретическим законам распределения: 1) логнормальному распределению $X \sim \text{LogN}(\mu, \sigma^2)$; 2) распределению Вейбулла $X \sim W(k, \lambda)$; 3) гамма-распределению $X \sim \Gamma(k, \theta)$; 4) показательному (экспоненциальному) распределению $X \sim \exp(\lambda)$.

Рассчитанные оценки параметров рассматриваемых законов распределения для каждой из выборок приведены в таблице 4.

Таблица 4. Значения оценок параметров теоретических законов распределения

Table 4. Values of parameter estimates of theoretical distribution laws

Теоретический закон распределения	Обозначение параметра	СМКх	СМКг	СМВх	СМВг	Ух	Стх
Логнормальное распределение	μ	2,45	2,51	3,66	3,44	4,11	2,95
	σ	0,676	0,675	1,31	1,13	0,529	0,887
Распределение Вейбулла	k	1,30	1,30	0,782	0,798	2,31	1,01
	λ	16,63	17,51	75,39	57,05	74,37	30,78
Гамма-распределение	k	2,05	2,08	0,726	0,778	5,19	1,19
	θ	7,35	7,69	125	83,33	12,99	25,64
Экспоненциальное распределение	λ	0,066	0,063	0,011	0,015	0,015	0,033

Решение об отклонении или принятии нулевой гипотезы о виде теоретического закона распределения принималось на основании рассчитанного критерия Колмогорова для каждой из выборок. Сведения о рассчитанном уровне значимости критерия p_{value} приведены в таблице 5.

Таблица 5. Тип теоретического закона распределения и рассчитанный уровень значимости критерия Колмогорова

Table 5. Type of theoretical distribution law and calculated significance level of Kolmogorov criterion

Теоретический закон распределения	СМКх	СМКг	СМВх	СМВг	Ух	Стх
Логнормальное распределение	0,072	0,057	0,062	0,209	$1 \cdot 10^{-7}$	0,002
Распределение Вейбулла	$4 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	0,044	0,004	$9 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-5}$
Гамма-распределение	0,006	0,019	0,028	$8 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-6}$
Экспоненциальное распределение	$1 \cdot 10^{-10}$	$7 \cdot 10^{-10}$	$6 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-16}$	$7 \cdot 10^{-5}$

Результаты выполненных расчетов, приведенные в таблице 5, позволяют утверждать, что для эмпирических выборок продолжительности периодов непрерывного водопотребления смесителями кухни и ванной / душевой кабины нет оснований отвергать нулевую гипотезу о логнормальном теоретическом законе распределения. Для нулевых гипотез об однородности данных выборок и теоретических законов распределения Вейбулла, гамма-распределения и экспоненциального распределения были выявлены статистически значимые различия, а соответственно, есть достаточные основания для их отклонения.

Для выборок продолжительности периодов непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза и стиральной машиной все рассматриваемые нулевые гипотезы о виде теоретического закона распределения были отклонены ввиду выявления статистически значимых различий.

Авторами была рассмотрена возможность применения смеси теоретических законов распределения как один из возможных вариантов описания изменчивости продолжительности периодов непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза, стиральной и посудомоечной машинами.

Общий вид плотности вероятности смеси теоретических законов распределения случайной величины может быть представлен в виде

$$f(x) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot p_i(x),$$

где n — количество компонентов смеси, w_i — удельный вес i -го компонента смеси, $p_i(x)$ — i -й компонент смеси (плотность вероятности).

При выполнении декомпозиции смесей распределений предполагалось, что компоненты смесей однотипны, т. е. все $p_i(x)$ принадлежат одному и тому же семейству распределений — нормальному распределению.

В результате выполнения декомпозиции смесей распределений для выборок продолжительности периодов непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза, посудомоечной и стиральной машинами были определены: количество компонентов смесей, оценки весов компонентов смесей, оценки параметров компонентов смесей, а также рассчитан уровень значимости критерия Колмогорова. Результаты выполненных расчетов сведены в таблицу 6.

Поскольку рассчитанный уровень значимости критерия Колмогорова превышает заданное значение $\alpha = 0,05$, отвергать нулевую гипотезу о том, что выборки продолжительности непрерывного водопотребления смывным бачком унитаза, посудомоечной и стиральной машинами распределены в соответствии с рассмотренными законами, оснований нет.

Полученные в результате выполнения исследования закономерности, отражающие характер изменчивости продолжительности непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств, приведены в таблице 7.

Таблица 6. Результаты декомпозиции смесей распределений для выборок Ух, Пмх, Стх и значение p_{value}

Table 6. Results of decomposition of mixtures of distributions for samples of Ух, Пмх, Стх and the value of p_{value}

Порядковый номер (i) компонента смеси	Удельный вес i-го компонента смеси	Значение параметров i-го компонента смеси		Уровень значимости критерия Колмогорова p_{value}
		μ	σ	
Ух				
1	$w_1 = 0,47$	67,15	3,76	0,26
2	$w_2 = 0,53$	67,39	36,45	
Пмх				
1	$w_1 = 0,26$	7,63	1,79	0,17
2	$w_2 = 0,17$	19,04	3,98	
3	$w_3 = 0,15$	51,85	15,57	
4	$w_4 = 0,12$	80,36	1,77	
5	$w_5 = 0,30$	86,98	1,64	
Стх				
1	$w_1 = 0,53$	9,95	1,82	0,16
2	$w_2 = 0,21$	19,56	3,02	
3	$w_3 = 0,07$	37,13	5,46	
4	$w_4 = 0,12$	70,36	15,96	
5	$w_5 = 0,07$	136,50	8,17	

Усечение смесей распределений снизу значением 0 и сверху значением 90 (для посудомоечной машины) обусловлено физическими ограничениями рассматриваемой величины (значение времени не может быть отрицательным) и полученными данными по результатам исследования.

Охарактеризовать временную составляющую режимов функционирования водоразборных устройств невозможно только длительностью интервалов их непрерывной работы. Необходимо распределить данные интервалы по наиболее характерному периоду водопотребления (в данном случае — сутки).

При оценке распределения вероятностей использования водоразборных устройств в течение суток за основу, по мнению авторов, можно взять кривую фактического распределения суточного объема водопотребления для конкретного типа зданий, представленную, например, для зданий жилого назначения В. С. Игнатчиком и др. [2017]. Рассматриваемый период водопотребления (сутки) при этом был разбит на равные временные интервалы продолжительностью 1 с. Особенности распределения суточного объема водопотребления для рабочих и выходных дней, отраженные В. С. Игнатчиком и др. [2017], также были учтены при определении частоты (вероятности) использования водоразборных устройств в течение суток.

При выполнении декомпозиции смесей распределений предполагалось, что компоненты смесей однотипны и принадлежат закону нормального распределения.

Таблица 7. Сводные результаты исследования продолжительности периодов непрерывного водопотребления водоразборными устройствами

Table 7. Summary results of the study of the duration of periods of continuous water consumption by water collecting devices

Водоразборное устройство	Тип системы водоснабжения	Теоретический закон распределения	Математическое описание характера изменчивости (плотность вероятности) продолжительности интервалов непрерывного водопотребления (длины импульсов)
Смеситель кухонной мойки	холодная	логнормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{x \cdot 0,676\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 2,45)^2}{2 \cdot 0,676^2}}, x \in (0, +\infty)$
Смеситель кухонной мойки	горячая	логнормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{x \cdot 0,675\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 2,51)^2}{2 \cdot 0,675^2}}, x \in (0, +\infty)$
Смеситель ванны / душевой кабины	холодная	логнормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{x \cdot 1,31\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 3,66)^2}{2 \cdot 1,31^2}}, x \in (0, +\infty)$
Смеситель ванны / душевой кабины	горячая	логнормальное распределение	$f(x) = \frac{1}{x \cdot 1,13\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - 3,44)^2}{2 \cdot 1,13^2}}, x \in (0, +\infty)$
Смывной бачок унитаза	холодная	усеченная смесь нормальных распределений	$f(x 0 \leq X) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{f_1(x)}{\int_0^{+\infty} f_1(x) dx}, & x \in [0, +\infty) \end{cases}$
Посудомоечная машина	холодная	усеченная смесь нормальных распределений	$f(x 0 \leq X \leq 90) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{f_2(x)}{\int_0^{90} f_2(x) dx}, & x \in [0, 90] \\ 0, & x > 90 \end{cases}$
Стиральная машина	холодная	усеченная смесь нормальных распределений	$f(x 0 \leq X) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{f_3(x)}{\int_0^{+\infty} f_3(x) dx}, & x \in [0, +\infty) \end{cases}$

В таблице 7:

$$f_1(x) = 0,47 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-67,15)^2}{2 \cdot 3,76^2}}}{3,76\sqrt{2\pi}} + 0,53 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-67,39)^2}{2 \cdot 36,45^2}}}{36,45\sqrt{2\pi}};$$

$$f_2(x) = 0,26 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-7,63)^2}{2 \cdot 1,79^2}}}{1,79\sqrt{2\pi}} + 0,17 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-19,04)^2}{2 \cdot 3,98^2}}}{3,98\sqrt{2\pi}} + 0,15 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-51,85)^2}{2 \cdot 15,57^2}}}{15,57\sqrt{2\pi}} +$$

$$+ 0,12 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-80,36)^2}{2 \cdot 1,77^2}}}{1,77\sqrt{2\pi}} + 0,30 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-86,98)^2}{2 \cdot 1,64^2}}}{1,64\sqrt{2\pi}};$$

$$f_3(x) = 0,53 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-9,95)^2}{2 \cdot 1,82^2}}}{1,82\sqrt{2\pi}} + 0,21 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-19,56)^2}{2 \cdot 3,02^2}}}{3,02\sqrt{2\pi}} + 0,07 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-37,13)^2}{2 \cdot 5,46^2}}}{5,46\sqrt{2\pi}} +$$

$$+ 0,12 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-70,36)^2}{2 \cdot 15,96^2}}}{15,96\sqrt{2\pi}} + 0,07 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-136,50)^2}{2 \cdot 8,17^2}}}{8,17\sqrt{2\pi}}.$$

В таблице 8 представлены результаты расчетов, выполненных при расщеплении смесей распределений, характеризующих вероятность использования водоразборных устройств в течение суток отдельно для выходных и рабочих дней, а именно: оценки количества компонентов каждой смеси, оценки весов компонентов смесей, оценки параметров компонентов смесей и уровень значимости критерия Колмогорова p_{value} .

Учитывая, что рассчитанный уровень значимости критерия Колмогорова превышает заданное значение $\alpha = 0,05$, отвергать нулевую гипотезу о том, что вероятность водопотребления водоразборными устройствами в течение суток для рабочих и выходных дней может быть описана рассматриваемыми смесями распределений, оснований нет.

Математическое описание вероятности использования водоразборных устройств в течение суток для рабочих и выходных дней представлено в таблице 9.

Таблица 8. Результаты декомпозиции смесей распределений, характеризующих вероятность использования водоразборных устройств в течение суток

Table 8. Results of decomposition of mixtures of distributions characterizing the probability of using water sampling devices during the day

Порядковый номер (i) компонента смеси	Удельный вес i-го компонента смеси	Значение параметров i-го компонента смеси		Уровень значимости критерия Колмогорова p_{value}
		μ	σ	
Рабочие дни				
1	$w_1 = 0,05$	2 529	2 308	0,86
2	$w_2 = 0,05$	27 889	698	
3	$w_3 = 0,51$	39 772	14 579	
4	$w_4 = 0,15$	66 167	6 726	
5	$w_5 = 0,24$	77 376	4 305	
Выходные дни				
1	$w_1 = 0,06$	3 237	2 842	0,50
2	$w_2 = 0,68$	45 539	16 349	
3	$w_3 = 0,22$	74 686	667	
4	$w_4 = 0,04$	76 337	5 337	

Таблица 9. Сводные результаты исследования вероятности использования водоразборных устройств

Table 9. Summary results of the study of the probability of using water sampling devices

Период водопотребления	Теоретический закон распределения	Математическое описание вероятности использования водоразборных устройств в течение суток
Сутки (рабочий день)	усеченная смесь нормальных распределений	$f(x 0 \leq X \leq 86399) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{f_1(x)}{\int_0^{86399} f_1(x) dx}, & x \in [0, 86399] \\ 0, & x > 86399 \end{cases}$
Сутки (выходной день)	усеченная смесь нормальных распределений	$f(x 0 \leq X \leq 86399) = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \frac{f_2(x)}{\int_0^{86399} f_2(x) dx}, & x \in [0, 86399] \\ 0, & x > 86399 \end{cases}$

В таблице 9:

$$f_1(x) = 0,05 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-2529)^2}{2 \cdot 2308^2}}}{2308\sqrt{2\pi}} + 0,05 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-27889)^2}{2 \cdot 698^2}}}{698\sqrt{2\pi}} + 0,51 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-39772)^2}{2 \cdot 14579^2}}}{14579\sqrt{2\pi}} +$$

$$+ 0,15 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-66167)^2}{2 \cdot 6726^2}}}{6726\sqrt{2\pi}} + 0,24 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-77376)^2}{2 \cdot 4305^2}}}{4305\sqrt{2\pi}};$$

$$f_2(x) = 0,06 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-3237)^2}{2 \cdot 2842^2}}}{2842\sqrt{2\pi}} + 0,68 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-45539)^2}{2 \cdot 16349^2}}}{16349\sqrt{2\pi}} + 0,22 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-74686)^2}{2 \cdot 667^2}}}{667\sqrt{2\pi}} + 0,04 \cdot \frac{e^{-\frac{(x-76337)^2}{2 \cdot 5337^2}}}{5337\sqrt{2\pi}}.$$

Усечение смесей распределений снизу и сверху значениями 0 и 83 999 обусловлено физическими ограничениями рассматриваемой величины: значение времени не может быть отрицательным и не может превышать продолжительность рассматриваемого периода (сутки), выраженную в секундах.

Заключение

В ходе выполненного исследования были получены подробные статистические данные о продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств из систем холодного и горячего водоснабжения. Для полученных эмпирических выборок были определены оценки основных числовых характеристик, построены диаграммы размаха, выдвинуты статистические гипотезы о виде теоретического закона распределения, рассчитаны оценки параметров теоретических законов распределения.

Результаты выполненных расчетов уровня значимости критерия Колмогорова для каждой из выборок позволили обосновать выбор теоретического закона распределения продолжительности периодов непрерывного водопотребления наиболее распространенными типами водоразборных устройств.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Волгин П. Н., Масленникова Т. Н. 2010. Определение теоретического закона распределения случайных величин, используемых в имитационной модели // Морская радиоэлектроника. № 3–4 (33–34). С. 74–78.
- Игнатчик В. С., Саркисов С. В., Обвинцев В. А. 2017. Исследование коэффициентов часовой неравномерности водопотребления // Вода и экология: проблемы и решения. № 2 (70). С. 27–39.
- Исаев В. Н., Мхитарян М. Г. 2003. Анализ методик определения расходов во внутреннем водопроводе // Сантехника. № 5. С. 6–11.
- Карамбиров С. Н., Бекишева Л. Б. 2012. О некоторых статистических закономерностях водопотребления в системах водоснабжения // Природообустройство. № 4. С. 45–48.
- Карамбиров С. Н., Уманский П. М., Бекишева Л. Б. 2012. Распределение гидравлических параметров в системе подачи и распределения воды при штатных и послеаварийных режимах работы // Природообустройство. № 4. С. 48–51.

- Карамбиров С. Н., Манукьян Д. А., Бекишева Л. Б. 2013. Оценка надежности подачи воды системами водоснабжения // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. № 6. С. 63–65.
- Колмогоров А. Н. 1986. Теория вероятностей и математическая статистика: сб. ст. / отв. ред. Ю. В. Прохоров. М.: Наука. 534 с.
- Лемешко Б. Ю. 1998. Асимптотически оптимальное группирование наблюдений в критериях согласия // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. Том 64. № 1. С. 56–64.
- Лемешко Б. Ю., Лемешко С. Б., Семенова М. А. 2018. К вопросу статистического анализа больших данных // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. № 44. С. 40–49. <https://doi.org/10.17223/19988605/44/5>
- Николенко И. В., Рыжаков А. Н. 2019. Нелинейная модель оптимизации параметров силовых агрегатов насосной станции подкачки системы водоснабжения // Известия высших учебных заведений. Строительство. № 4 (724). С. 47–63.
- Новицкий Н. Н., Вантеева О. В. 2008. Задачи и методы вероятностного моделирования гидравлических режимов трубопроводных систем // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. № 1 (53). С. 68–75.
- Новицкий Н. Н., Вантеева О. В. 2011. Моделирование стохастики потокораспределения в гидравлических цепях // Известия Российской академии наук. Энергетика. № 2. С. 122–131.
- Поливанов Д. Е., Семенов А. А. 2023а. Исследование режима отбора воды смесителем из системы водоснабжения // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. № 2 (64). С. 60–69.
- Поливанов Д. Е., Семенов А. А. 2023б. BIM технологии с элементами программирования при анализе режимов работы внутренних сетей водоснабжения зданий // BIM-моделирование в задачах строительства и архитектуры: материалы VI Международного науч.-практ. конф. / под общ. ред. А. А. Семенова. СПб.: СПбГАСУ. С. 81–91.
- Поливанов Д. Е., Семенов А. А. 2024. Интенсивность водопотребления в отдельных водоразборных точках системы внутреннего водоснабжения // Вестник МГСУ. Том 19. № 1. С. 94–104. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.94-104>
- Сайриллинов С. Ш. 2020. Об особенностях расчета водопотребления при проектировании систем водоснабжения высотных зданий // Градостроительство и архитектура. Том 10. № 2 (39). С. 29–35. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.02.5>
- Салугин А. Н., Балкушкин Р. Н. 2021. О применении искусственных нейронных сетей для моделирования водопотребления // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. № 1. С. 70–85. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-1-5>
- СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий: свод правил от 30 декабря 2020 г. № 30.13330.2020. Минстрой России.
- Чупин В. Р., Душин А. С. 2009. Оценка надежности водообеспечения эксплуатируемых систем подачи и распределения воды // Вестник Иркутского государственного технического университета. № 3 (39). С. 186–191.
- Alvisi S., Franchini M., Marinelli A. 2003. A stochastic model for representing drinking water demand at residential level // Water Resources Management. Vol. 17. No. 3. Pp. 197–222. <https://doi.org/10.1023/A:1024100518186>

- Blokker E. J. M., Vreeburg J. H. G. 2012. Monte Carlo simulation of residential water demand: A stochastic end-use model // *Impacts of Global Climate Change*. Pp. 1–12. [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)34](https://doi.org/10.1061/40792(173)34)
- Buchberger S. G., Wu L. 1995. Model for instantaneous residential water demands // *Journal of Hydraulic Engineering*. Vol. 121. No. 3. Pp. 232–246.
- Buchberger S. G., Wells G. J. 1996. Intensity, duration, and frequency of residential water demands // *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 122. No. 1. Pp. 11–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:1(11))
- Dempster A. P., Laird N. M., Rubin D. B. 1977. Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm // *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*. Vol. 39. No. 1. Pp. 1–38.
- García V.J., García-Bartual R., Cabrera E., Arregui F., García-Serra J. 2004. Stochastic model to evaluate residential water demands // *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 130. No. 5. Pp. 386–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:5\(386\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:5(386))
- Mazzoni F., Alvisi S., Franchini M., Blokker M. 2023. Exploiting high-resolution data to investigate the characteristics of water consumption at the end-use level: A Dutch case study // *Water Resources and Industry*. Vol. 29. Article 100198. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100198>
- Moughton L. J., Buchberger S. G., Boccelli D. L., Filion Y. R., Karney B. W. 2012. Effect of time step and data aggregation on cross correlation of residential demands // *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006*. Pp. 1–11. [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)42](https://doi.org/10.1061/40941(247)42)
- Sturges H. A. 1926. The choice of a class interval // *Journal of the American Statistical Association*. Vol. 21. No. 153. Pp. 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Vertommen I., Magini R., da Conceição Cunha M., Guercio R. 2012. Water demand uncertainty: The scaling laws approach // *Water Supply System Analysis / A. Ostfeld (ed.)*. Rijeka: IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/51542>
- Vertommen I., Magini R., da Conceição Cunha M. 2015. Scaling water consumption statistics // *Journal of Water Resources Planning and Management*. Vol. 141. No. 5. Article 04014072. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000467](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000467)

References

- Volgin, P. N., & Maslennikova, T. N. (2010). Determination of theoretical law for random distribution in simulation model. *Morskaya radioelektronika*, (3–4), 74–78. [In Russian]
- Ignatchik, V. S., Sarkisov, S. V., & Obvintsev, V. A. (2017). Research of water consumption hour inequality coefficients. *Water and Ecology: Problems and Solutions*, (2), 27–39. [In Russian]
- Isaev, V. N., & Mkhitarian, M. G. (2003). Analysis of methods for determining costs in the internal water supply. *Santekhnika*, (5), 6–11. [In Russian]
- Karambirov, S. N., & Bekisheva, L. B. (2012). About some statistical regularities of water consumption in water supply systems. *Prirodoobustrojstvo*, (4), 45–48. [In Russian]
- Karambirov, S. N., Umansky, P. M., & Bekisheva, L. B. (2012). Distribution of hydraulic parameters in the water supply and distribution system under design mode and postfault conditions. *Prirodoobustrojstvo*, (4), 48–51. [In Russian]
- Karambirov, S. N., Manukyan, D. A., & Bekisheva, L. B. (2013). Evaluating the reliability of water delivery by water supply systems. *Doklady Rossijskoj akademii sel'skohozyajstvennyh nauk*, (6), 63–65. [In Russian]

- Kolmogorov, A. N. (1986). *Probability theory and mathematical statistics*. Nauka. [In Russian]
- Lemeshko, B. Yu. (1998). Asymptotically optimum grouping of observations in goodness-of-fit tests. *Industrial Laboratory*, 64(1), 59–67.
- Lemeshko, B. Yu., Lemeshko, S. B., & Semenova, M. A. (2018). To question of the statistical analysis of big data. *Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, (44), 40–49. <https://doi.org/10.17223/19988605/44/5> [In Russian]
- Nikolenko, I. V., & Ryzhakov, A. N. (2019). Nonlinear model optimization parameters of power units a pump station pumping a water supply system. *News of Higher Educational Institutions. Construction*, (4), 47–63. [In Russian]
- Novitsky, N. N., & Vanteeva, O. V. (2008). Some problems and probabilistic techniques for simulating hydraulic regimes in pipeline systems. *Saint Petersburg Polytechnical University Journal*, (1), 68–75. [In Russian]
- Novitsky, N. N., & Vanteeva, O. V. (2011). Stochastic modeling of flow distribution in hydraulic circuit. *Izvestiâ akademii nauk SSSR. Énergetika*, (2), 122–131. [In Russian]
- Polivanov, D. E., & Semenov, A. A. (2023a). Investigation of the mode of water extraction by a mixer from the water supply system. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*, (2), 60–69. [In Russian]
- Polivanov, D. E., & Semenov, A. A. (2023b). BIM technologies with programming elements in the analysis of operating modes of internal water supply networks of buildings. In *BIM in Construction & Architecture: Proceedings of 6th International Conference (BIMAC 2023)* (pp. 81–91). Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. [In Russian]
- Polivanov, D. E., & Semenov, A. A. (2024). Intensity of water consumption in separate water collection points of internal water supply system. *Vestnik MGSU*, 19(1), 94–104. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2024.1.94-104> [In Russian]
- Sayriddinov, S. Sh. (2020). About features of water consumption calculation when designing water supply systems of high-rise buildings. *Urban Construction and Architecture*, 10(2), 29–35. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2020.02.5> [In Russian]
- Salugin, A. N., & Balkushkin, R. N. (2021). On application of artificial neural networks for modeling of water consumption. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, (1), 70–85. <https://doi.org/10.35567/1999-4508-2021-1-5> [In Russian]
- Ministry of Construction, Housing and Utilities. (2020). *Internal water supply and sewerage of buildings* (Code of rules No. 30.13330.2020). [In Russian]
- Chupin, V. R., & Dushin, A. S. (2009). The assessment of reliability of water provision of water supply and distribution systems under operation. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*, (3), 186–191. [In Russian]
- Alvisi, S., Franchini, M., & Marinelli, A. (2003). A stochastic model for representing drinking water demand at residential level. *Water Resources Management*, 17(3), 197–222. <https://doi.org/10.1023/A:1024100518186>
- Blokker, E. J. M., & Vreeburg, J. H. G. (2012). Monte Carlo simulation of residential water demand: A stochastic end-use model. In *Impacts of Global Climate Change* (pp. 1–12). [https://doi.org/10.1061/40792\(173\)34](https://doi.org/10.1061/40792(173)34)
- Buchberger, S. G., & Wu, L. (1995). Model for instantaneous residential water demands. *Journal of Hydraulic Engineering*, 121(3), 232–246.

- Buchberger, S. G., & Wells, G. J. (1996). Intensity, duration, and frequency of residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 122(1), 11–19. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(1996\)122:1\(11\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(1996)122:1(11))
- Dempster, A. P., Laird, N. M., & Rubin, D. B. (1977). Maximum likelihood from incomplete data via the EM algorithm. *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, 39(1), 1–38.
- García, V. J., García-Bartual, R., Cabrera, E., Arregui, F., & García-Serra, J. (2004). Stochastic model to evaluate residential water demands. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 130(5), 386–394. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2004\)130:5\(386\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2004)130:5(386))
- Mazzoni, F., Alvisi, S., Franchini, M., & Blokker, M. (2023). Exploiting high-resolution data to investigate the characteristics of water consumption at the end-use level: A Dutch case study // *Water Resources and Industry*. Vol. 29. Article 100198. <https://doi.org/10.1016/j.wri.2022.100198>
- Moughton, L. J., Buchberger, S. G., Boccelli, D. L., Filion, Y. R., & Karney, B. W. (2012). Effect of time step and data aggregation on cross correlation of residential demands. *Water Distribution Systems Analysis Symposium 2006* (pp. 1–11). [https://doi.org/10.1061/40941\(247\)42](https://doi.org/10.1061/40941(247)42)
- Sturges, H. A. (1926). The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65–66. <https://doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>
- Vertommen, I., Magini, R., da Conceição Cunha, M., & Guercio, R. (2012). Water demand uncertainty: The scaling laws approach. In A. Ostfeld (Ed.), *Water Supply System Analysis*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/51542>
- Vertommen, I., Magini, R., & da Conceição Cunha, M. (2015). Scaling water consumption statistics. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 141(5), Article 04014072. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000467](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000467)

Информация об авторах

Дмитрий Евгеньевич Поливанов, аспирант кафедры информационных систем и технологий, Факультет инженерной экологии и городского хозяйства, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия dmitry_polivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4215-1208>

Алексей Александрович Семенов, кандидат технических наук, доцент кафедры информационных систем и технологий, Факультет инженерной экологии и городского хозяйства, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия sw.semenov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9490-7364>

Лия Витальевна Мовсесова, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры информатики, Факультет инженерной экологии и городского хозяйства, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Россия movse@lan.spbgasu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0776-0374>

Information about the authors

Dmitrii E. Polivanov, Postgraduate Student, Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Environmental Engineering and Municipal Services, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia dmitry_polivanov@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4215-1208>

Alexey A. Semenov, Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Environmental Engineering and Municipal Services, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
sw.semenov@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0001-9490-7364>

Liya V. Movsesova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Informatics, Faculty of Environmental Engineering and Municipal Services, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russia
movse@lan.spbgasu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0776-0374>

Построение композиционных геолого-структурных моделей в рамках вариационно-сеточного метода геокартирования и объектно-иерархического подхода

Андрей Гарьевич Плавник^{1,2}, Андрей Андреевич Сидоров³✉

- ¹ Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия
- ² Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
- ³ Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В. И. Шпилемана, Тюмень, Россия
Контакт для переписки: darth@cggu.ru ✉

Аннотация. Вариационно-сеточный метод геокартирования базируется на аппроксимации бикубическими сплайнами, допустимый размер сетки которых ограничен объемом оперативной памяти компьютеров. В работе описывается подход к решению задач построения карт геологических параметров, применяемый в рамках этого метода при недостаточности ресурсов вычислительной техники и основанный на последовательном построении карт по отдельным частям области картирования.

Реализация подхода рассмотрена для двух вариантов. Первый — при достаточно высокой плотности расположения данных на значительных территориях, состоит в последовательном расчете по частично перекрывающимся полосам. При существенно неравномерном распределении данных реализуется второй вариант, заключающийся в расчете детализированной сетки по локальным участкам и ее гладкой вклейке в общую карту. Гладкость на границах полос и вклеек обеспечивается через условие равенства коэффициентов сплайна для совпадающих узлов, которое задается за счет корректировки системы линейных алгебраических уравнений при решении задачи картирования.

На основе этих подходов реализована многомасштабная структурно-геологическая модель осадочного чехла по территории Западной Сибири. Формирование

композиционной модели осуществляется на основе объектно-иерархического подхода, который обеспечивает согласованность расчетов всех ее элементов, а также автоматизацию построений.

Ключевые слова: геокартирование, вариационно-сеточный метод, бикубический сплайн, объектно-иерархический подход, цифровой структурный каркас, композиционные карты

Цитирование: Плавник А. Г., Сидоров А. А. 2024. Построение композиционных геолого-структурных моделей в рамках вариационно-сеточного метода геокартирования и объектно-иерархического подхода // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 2 (38). С. 88–103. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-88-103>

Поступила 19.02.2024; одобрена 26.04.2024; принята 24.05.2024

Construction of compositional geological models using the variational grid method of geomapping and the object-hierarchical approach

Andrey G. Plavnik^{1,2}, Andrei A. Sidorov³✉

¹ West Siberian Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia

² Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia

³ V. I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil, Tyumen, Russia

Corresponding author: darth@crru.ru ✉

Abstract. The variational grid method of geomapping is based on approximation by bicubic splines, the permissible grid size of which is limited by the amount of computer RAM. The paper describes an approach to solving problems of constructing maps of geological parameters, using this method, when computer resources are insufficient. The approach is based on the sequential mapping for a set of fragments of the entire mapping area.

The implementation of the approach is considered for two options. The first, if the data density is sufficiently high, consists of sequential calculations over partially overlapping “bands”. If the data distribution is significantly uneven, the second option is implemented, which consists in calculating a detailed grid for local areas and smoothly pasting it into the general map. Smoothness at the boundaries of bands and insets is ensured through the condition of equality of spline coefficients for

coinciding nodes, which is set by adjusting the system of linear algebraic equations when solving the mapping problem.

Based on these approaches, a multiscale structural-geological model of the sedimentary cover over the territory of Western Siberia was implemented. The formation of a compositional model is carried out on the basis of an object-hierarchical approach, which ensures consistency in the calculations of all its elements, as well as automation of constructions.

Keywords: geomapping, variational grid method, bicubic spline, object-hierarchical approach, digital structural framework, compositional maps

Citation: Plavnik, A. G., & Sidorov, A. A. (2024). Construction of compositional geological models using the variational grid method of geomapping and the object-hierarchical approach. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(2), 88–103. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-88-103>

Received Feb. 19, 2024; Reviewed Apr. 26, 2024; Accepted May 24, 2024

Введение

Термин «геокартирование» имеет множество вариантов интерпретации, однако здесь мы его будем рассматривать как восстановление поля геологического или физического параметра G в виде функции двух координат по данным измерений этого параметра в отдельных точках с учетом модельных представлений о его пространственном распределении. Вариационно-сеточный метод геокартирования (ВСМГ) является одним из направлений приложения методов сплайн-интерполяции и аппроксимации [Holladay, 1957; de Boor, 1962; Смоляк, 1971; Harder, Desmarais, 1972; Briggs, 1974; Arcangéli и др., 2004; Роженко, 2005]. ВСМГ во многом наследует идеи вариационного подхода, обеспечивает реализацию широкого класса модельных условий и имеет длительную историю развития [Сидоров, 1979; Волков, 1988; Сидоров, Плавник, 2009; Плавник, 2010; Sidorov и др., 2014]. На его основе решается широкий круг практических геологических задач [Плавник, Сидоров, 2012, 2018; Kurchikov и др., 2019; Плавник и др., 2021; Сидоров, 2022a], в том числе таких, которые другими методами решаются или частично, или с большими трудозатратами.

Важная особенность метода заключается в возможности комплексирования исходной геолого-геофизической информации [Плавник, 2010; Плавник и др., 2021; Сидоров, 2022b]. В рамках единого подхода в построении используются как прямые замеры моделируемого параметра, так и различные его трансформанты, косвенно связанные с картируемым полем. Другая особенность ВСМГ — использование полиномиальных сплайнов на регулярной сетке, не приуроченной к точкам расположения фактических данных. Это упрощает процесс расчетов и обеспечивает их вычислительную эффективность, однако не избавляет от всех трудностей, связанных с большой размерностью сетки. Вариационно-сеточный метод реализован в программном продукте GST¹; он показал

¹ GST — отечественное программное обеспечение. <http://www.geo-spline.ru/>

эффективность в решении сложных, нестандартных задач математической геологии [Сидоров, 1979, 2022а; Плавник, Сидоров, 2018], в частности в построении детальных региональных геологических моделей по обширным территориям, таким как Западная Сибирь.

Региональное геолого-математическое моделирование приобретает всё большую актуальность как в собственно научном, так и практическом аспекте. Цифровая геологическая модель в масштабе нефтегазоносного бассейна позволяет выявить закономерности формирования осадочного чехла, которые являются основой научных знаний о территории. С практической точки зрения региональные модели используются в планировании геологоразведочных работ для выявления перспективных в плане наличия полезных ископаемых областей. Ввиду высокой степени освоенности крупных Западно-Сибирских нефтегазовых месторождений начинают представлять интерес залежи меньшего порядка, находящиеся как на периферии провинции, так и на малоизученных территориях, на границах зон с выявленной нефтегазоносностью. Поэтому для решения практических задач, связанных с прогнозом наличия залежей углеводородов, региональность модели должна сочетаться с должной степенью детальности, которая обеспечивается наиболее полным учетом исходной геолого-геофизической информации.

Большая часть Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции покрыта плотной сетью сейсмических профилей и большим количеством данных бурения. При этом на этапе поиска проводится 2D-сейсморазведка, а в перспективных зонах и границах лицензионных участков недропользователей осуществляется покрытие высокодетальной 3D-сейсморазведкой. Плотность 2D-сейсморазведки исчисляется общей длиной профилей на квадратный километр; обычно она находится в диапазоне 1,6–2,2 км/км², но может быть и ниже. Этот параметр определяет минимальный размер структурного элемента, который с должной степенью надежности может быть закартирован на основе данной информации. Это следует из правила, согласно которому структура считается надежно определенной, если она подтверждена данными более чем одного профиля. Таким образом, для сетки профилей плотностью 2 минимальный размер надежно фиксируемых структур будет составлять ориентировочно 1 км, что, в свою очередь, определяет оптимальные размеры ячейки картирования, которые в зависимости от изменчивости структурного плана будут равны 0,5–1,0 км. Следовательно, для Западной Сибири размеры сетки картирования могут достигать 3 000 × 4 000 узлов или более.

Объем памяти, требуемый для решения задач картирования с помощью ВСМГ, в главной мере зависит от числа узлов расчетной сетки. Так, например, для расчета сетки 600 × 450 узлов только на решение системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) требуется около 950 Мбайт оперативной памяти, а при сгущении сетки в два раза объем требуемой памяти возрастает до 4,5 Гбайт. Итак, построение региональной карты высокой степени детальности посредством стандартного расчета выходит за рамки возможностей доступной современной вычислительной техники. Эта проблема сохраняется при построении карт на меньшую территорию с высокой плотностью исходной информации: для корректного учета данных 3D-сейсморазведки часто оптимальны сетки с размерами ячеек порядка нескольких десятков метров.

Очевидным решением для сеток большой размерности является построение серии согласованных на смежных границах зональных карт с последующим формированием итоговой композиционной карты. Проблематичность такого подхода заключается в сложности согласования зональных карт, в особенности при неравномерном пространственном распределении исходных данных. Эти проблемы характерны практически для всех методов картирования, однако аппроксимация бикубическими сплайнами, являющаяся основой ВСМГ, обеспечивает дополнительные возможности по обеспечению гладкого согласования зональных карт.

Методы

Значения картируемой поверхности в вариационно-сеточном подходе аппроксимируются функцией

$$G(x, y) = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n s_{ij} g_{ij}(x, y),$$

$$g_{ij}(x, y) = B\left(\frac{x - x_i}{h_x}\right) B\left(\frac{y - y_j}{h_y}\right),$$

$$x_i = x_0 + ih_x,$$

$$y_j = y_0 + jh_y,$$

где s_{ij} — коэффициенты сплайна; g_{ij} — значения базисных функций в точке (x, y) ; h_x и h_y — шаги сетки по координатам x и y соответственно; B — кубический B -сплайн. Решение задачи картирования ищется в прямоугольной области Ω с угловыми точками (x_1, y_1) и (x_{m-1}, y_{n-1}) из условия минимизации некоторого квадратичного функционала. Здесь m и n определяют размерность сетки коэффициентов сплайна. Задача сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений относительно вектора неизвестных коэффициентов сплайна s_{ij} . Детально постановка задачи геокартирования в рамках вариационно-сеточного метода представлена в других работах авторов [Плавник, 2010; Плавник и др., 2021]. Для рассматриваемых далее вопросов эти подробности имеют второстепенное значение.

Выделим внутри области Ω подобласти Ω_k , такие, что выполняется условие полноты их объединения:

$$\Omega = \bigcup \Omega_k.$$

Для каждой подобласти Ω_k рассчитываются сплайны $G_k(x, y)$, участвующие в определении композиционного сплайна $G(x, y)$ в виде некоторой зависимости, которую здесь формально запишем в виде

$$G(x, y) = f(G_1, G_2, \dots, G_K),$$

где K — общее число подобластей.

Вариантов деления исходной прямоугольной области картирования может быть много — наиболее простым является «разрезание» ее на отдельные полосы. Независимый расчет карт по полосам с последующей сборкой единого сплайна позволяет существенно снизить требования к объему оперативной памяти и сократить время вычислений. Действительно, необходимые ресурсы и временные затраты для расчета карты при условии $m < n$ пропорциональны соотношению mn^2 . При разделении области картирования вдоль более длинной стороны на K полос затраты для расчета снижаются приблизительно в K раз по сравнению с решением задачи в рамках единого сплайна. Благодаря кратному снижению объема используемой памяти и времени вычислений возможно построение больших детальных карт, однако качество этих карт непосредственным образом зависит от технологии сопряжения фрагментов.

Анализ и многочисленные эксперименты, проведенные на этапе отработки технологии, показали, что ни один из очевидных способов сопряжения фрагментов после их построения, таких как варьирование ширины полосы перекрытия зональных карт, применение разных методов усреднения решений, не дают однозначно приемлемого результата. Не приводит к улучшению ситуации и прямое использование значений в узлах сетки одной зональной карты при построении соседней: часто имеет место нарушение гладкости карты, которое проявляется в виде изломов изолиний на границе состыковки полос. Применение аппарата аппроксимации на основе B -сплайнов позволяет снять ряд перечисленных выше вопросов. Общая идея заключается в сопряжении решений по отдельным полосам на уровне коэффициентов сплайна.

Рассмотрим следующую постановку задачи для двух соседних полос (рис. 1). Решение ищется для прямоугольной области определения сплайна $x \in [x_{\min}, x_{\max}]$, $y \in [y_{\min}, y_{\max}]$. Необходимо определить коэффициенты аппроксимирующего сплайна s_{ij} по сетке узлов $\{x_i, y_j\}$, $i = (0, \dots, m + 1)$, $j = (0, \dots, n + 1)$.

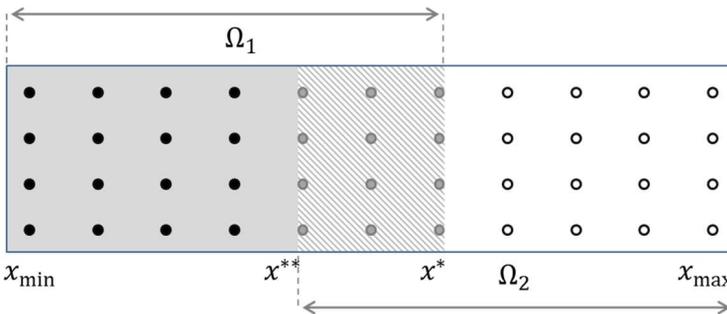


Рис. 1. Пример композиционной сетки с сопряжением двух полос

Fig. 1. An example of a composition mesh with two overlapping bands

Пусть $G_1(x, y)$ и $G_2(x, y)$ — два сплайна, первый из которых определяется в интервале $[x_{\min}, x^*]$, а второй — $[x^{**}, x_{\max}]$. По оси y интервал общий: $[y_{\min}, y_{\max}]$. Значения x^* и x^{**} удобно связывать с координатами узлов сплайна. Обозначим через m_1 и m_2 соответствующие номера: $x^* = x_{m_1}$, $x^{**} = x_{m_2}$. Для выполнения условия перекрытия полос необходимо

потребовать, чтобы соблюдалось неравенство $x^* > x^{**}$ или $m_1 > m_2$. Набор коэффициентов сплайна по первой полосе обозначим как s_{ij}^1 , где i изменяется от 0 до $m_1 + 1$. Аналогично для коэффициентов второй полосы введем обозначения s_{ij}^2 , с нумерацией от $m_2 - 1$ до $m + 1$.

Важным свойством кубических B -сплайнов является компактность носителя, т. е. ограниченность области определения: $g_{ij}(x, y) = 0$ при $x \geq x_{i+2}$ или $x \leq x_{i-2}$. Это означает, что изменение коэффициента сплайна для узла x_i не влияет на вычисляемые значения функции для ячеек с координатами $x \geq x_{i+2}$ и $x \leq x_{i-2}$. Таким образом, для второй полосы можно сформулировать условие согласованности коэффициентов сплайна в области перекрытия (штрихованная область на рис. 1):

$$s_{ij}^2 = s_{ij}^1, \\ i = m_2 - 1, m_2, m_2 + 1. \quad (1)$$

Исходя из свойства компактности носителя, данное условие ограничивает влияние значения коэффициентов сплайна первой полосы на значения картируемой функции во второй полосе двумя граничными узлами. В остальной части второй полосы, для которой $x \geq x_{m_1+2}$, значения искомой функции будут в точности равны результатам решения $G_2(x, y)$. При этом на стыке полос в силу свойств сплайнов обеспечивается условие неразрывности значений искомой функции, а также ее первых и вторых производных.

Стоит отметить, что условие сопряжения ($s_{ij}^2 = s_{ij}^1$) в зоне перекрытия полос, обеспечивающее неразрывность значений и производных картируемой поверхности, автоматически не гарантирует отсутствие видимых артефактов на линии стыка. Если условие сопряжения будет обеспечено искусственно, путем приравнивания коэффициентов сплайна после решения задачи картирования для второй полосы, то велика вероятность появления в окрестности линии стыка высокоградиентных зон и локальных экстремумов, не подтвержденных исходными данными. Важно, чтобы решение задачи картирования для сетки сплайнов $G_2(x, y)$ было произведено с учетом условия сопряжения коэффициентов.

Поскольку вектор коэффициентов сплайна есть результат решения системы линейных алгебраических уравнений, к которой сводится задача картирования, условие сопряжения ($s_{ij}^2 = s_{ij}^1$) вводится непосредственно в СЛАУ путем замены некоторых элементов вектора правой части на значения известных коэффициентов сплайна первой полосы и соответствующей корректировки коэффициентов матрицы. При таком подходе сопряжение полос будет происходить непосредственно на этапе решения задачи картирования для второй полосы с выполнением требования минимума отклонений как от исходных данных, так и от модельных условий.

Условие «сшивки» накладывается на значения коэффициентов сплайна, расположенных вдоль одной из сторон картируемой подобласти. Однако сам по себе подход не ограничивает конфигурацию зоны сопряжения решений — он может быть применен к произвольному набору узлов. Значит, для искомых коэффициентов сплайна s_{ij} в области картирования Ω возможно выполнить условие сопряжения: $s_{ij} = s_{ij}^*$, если $(x_j, y_i) \in \Omega^*$, где s_{ij}^* — набор известных коэффициентов сплайна узлов сетки внутри области $\Omega^* \in \Omega$.

Таким образом, данный подход может использоваться для привлечения в виде данных особого типа фрагментов других сеток по областям произвольной формы, что имеет важное практическое значение. Стоит отметить, что добавление в задачу картирования значений искомой функции в узлах в виде точечных данных, пусть даже с высоким весом, не будет эквивалентным решением, потому что эти данные будут аппроксимироваться в среднеквадратичном приближении. Обсуждаемый же подход не только обеспечивает абсолютно точное совпадение сеток в пределах заданной области, но и позволяет уменьшить размерность СЛАУ.

Алгоритм сопряжения решений реализован в программе GST, на его основе происходят расчеты детальных региональных структурных моделей. Например, при построении карт по территории Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции рабочая сетка имеет ячейки 500×500 м. Для ее построения область картирования разбивается на 25 полос, каждая из которых имеет размеры $2\,000 \times 100$ км или $4\,000 \times 200$ узлов. Территории месторождений, как правило, охарактеризованы плотной сетью данных 3D-сейсморазведки и эксплуатационного бурения, поэтому в пределах этих областей необходимо использовать в разы более детальную сетку. При этом, если оставаться в рамках картирования по полосам, дальнейшая детализация возможна только за счет сужения полос и уменьшения объема информации, используемой в расчете каждой из них. Это обстоятельство порождает объективные ограничения возможности детализации сетки, которые главным образом зависят от степени неоднородности расположения исходных данных в плане.

При существенной неравномерности плотности пространственного распределения исходных данных более целесообразным представляется подход, когда сперва строится карта по сетке базовой детальности, а далее в пределах зон требуемой детализации рассчитываются карты по более густой сетке с условием сопряжения решений на внешней границе. Во многом эта задача аналогична расчету по полосам с тем лишь исключением, что область $\Omega_2 \in \Omega_1$, а сплайн $G_2(x, y)$ в общем случае построен на более детальной сетке, чем сплайн $G_1(x, y)$. Для выполнения процедуры сопряжения необходимо задать коэффициенты сплайна s_{ij}^2 для всех узлов, расположенных на границе области Ω_2 .

В этой ситуации оказывается очень важным известное свойство полиномиальных сплайнов — возможность аналитического пересчета значений коэффициентов сплайна на более мелкую сетку: $s_{ij}^g = F(s_{ij}^1)$. Для всей области определения сплайна выполняется условие $G_1(x, y) = G_g(x, y)$, а шаг h сетки сплайна G_g связан с шагом H сплайна G_1 соотношением

$$h = H/2^n, \quad (2)$$

где $n = (0, 1, 2, \dots, N)$. Это свойство сплайнов легло в основу мультисеточного подхода, который реализован в GST в виде технологии гладких вклеек. По сути, вклейка представляет собой самостоятельную задачу картирования по некоторой прямоугольной области, входящей в область базовой карты. Шаг сетки вклейки связан с шагом базовой карты правилом (2), а на ее границах выполняется условие сопряжения коэффициентов сплайна.

С помощью аппарата вклеек решается несколько видов практических задач. В первую очередь это детализация карт по отдельным областям. Также этот подход может быть применен для локального перестроения карты при добавлении или изменении исходных данных. Кроме прочего, это инструмент, позволяющий выделить локальные построения в отдельные задачи и сформировать технологическую цепочку расчета модели с распределением зон ответственности между несколькими специалистами. Логическое разделение региональной и локальных моделей оправдано как с научной точки зрения, потому что на разных пространственных масштабах могут использоваться разные модельные условия, так и с практической позиции, поскольку это позволяет оптимизировать процесс расчетов. Действительно, требующие уточнения локальные модели строятся на основе плотной сети исходных данных, как правило, избыточно детальной для регионального масштаба. По этой причине нет необходимости загружать в региональную модель базовой детальности полный объем 3D-сейсмике или эксплуатационного бурения. В свою очередь, при построении вклейки используются только данные, находящиеся внутри области детализации, а увязка с региональным планом происходит на основе коэффициентов сплайна по ограниченному набору узлов базовой сетки.

На рис. 2 представлена общая схема построения композиционной карты с одной уточняющей вклейкой. Она характеризует два рабочих потока: построение большой региональной карты и детальное картирование хорошо изученного участка. Эти работы могут быть разделены между разными специалистами, если обеспечена синхронизация обмена информацией между процессами. Следует также учесть, что реальные геологические модели осадочного чехла могут содержать большое количество (несколько десятков) структурных поверхностей, карт толщин и других параметров; областей, требующих детализации, также может быть множество. Масштабирование представленной схемы будет означать кратное усложнение внутренней логики композиционной модели, и для качественного выполнения всех расчетов потребуется максимальный уровень алгоритмизации и автоматизации технологической цепочки.

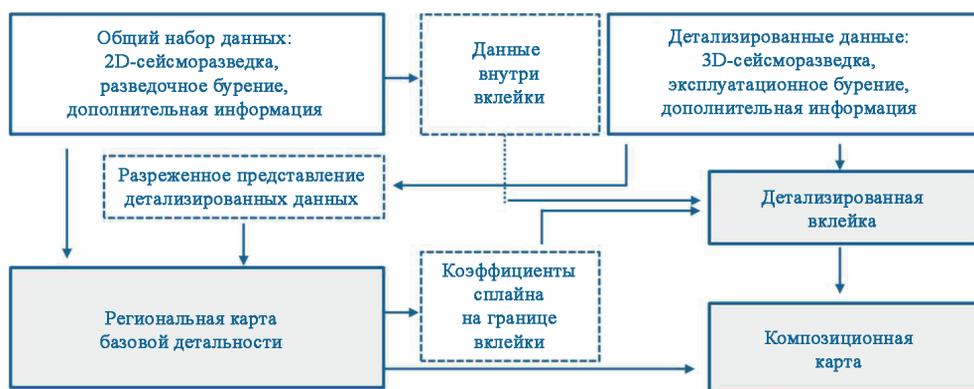


Рис. 2. Схема построения композиционной карты

Fig. 2. Scheme for constructing a compositional map

Методические подходы к формальному описанию некоторого технологического процесса, в частности геолого-математического моделирования, с целью его автоматизации обобщены в понятие workflow-методы. Не вдаваясь подробно в их обзор, отметим, что наиболее популярными способами представления некоторого процесса являются скриптовые языки, ориентированные ациклические графы, в том числе сети Петри, а также смешанные подходы. В настоящее время большая часть специализированного геологического программного обеспечения в той или иной мере использует workflow-технологии. Они позволяют структурировать элементы геологической модели, представлять процесс ее расчета в виде последовательности действий и выполнять их в автоматическом режиме, минимизировав таким образом фактор случайной ошибки.

В GST структуризация и автоматизация рабочего процесса реализована в виде объектно-иерархического подхода [Сидоров, 2022б]. Как следует из названия, в основе подхода лежит иерархия объектов, представляющих собой различные элементы геологической модели: от исходных данных до конечных результатов. Схематично иерархию можно выразить в виде совокупности двух наборов элементов: $H = (O, R)$, где $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$ — множество объектов-данных, а $R = \{R_1, R_2, \dots, R_m\}$ — множество объектов-ссылок. Каждый объект O_i представляет отдельный элемент модели: фрагмент исходных данных, структурную карту, геологическую границу и т. п. Каждый элемент из множества ссылок R_j определяет отношение зависимости двух элементов из O . Эту иерархию легко можно представить в виде ориентированного двудольного графа, пример которого приведен на рис. 3. Результирующий элемент модели (узел O_5) строится на основе исходных данных, представленных узлами O_1, O_2 . Узлы O_3, O_4 хранят промежуточные результаты вычислений. Каждый узел R_{ij} , представляющий объект-ссылку, фактически устанавливает правила передачи данных от объекта O_i объекту O_j в процессе исполнения расчетов.



Рис. 3. Представление геолого-математической модели в виде ориентированного двудольного графа

Fig. 3. Representation of a geological model in the form of a directed graph

Объектно-иерархический подход позволяет алгоритмизировать процесс построения геолого-математической модели и автоматизировать расчет, т. к. иерархия объектов однозначно устанавливает последовательность действий. Его практическая ценность явно проявляется при построении региональных структурных каркасов, где число объектов данных исчисляется сотнями, а структура графа существенно более громоздка, чем изображенная на рис. 3. В этой связи стоит упомянуть еще одно достоинство подхода — это возможность конструирования модели из макроэлементов

путем копирования и модифицирования фрагментов графа. Под макроэлементом $M = (O^R, O^{En}, O^{Int}, R^{En}, R^{Int})$ подразумевается фрагмент иерархии, описывающий логически очерченную часть модели или задачи, где O^R — множество результирующих объектов, O^{En}, R^{En} — объекты и ссылочные связи, обозначающие точки входа, а O^{Int}, R^{Int} — внутренние объекты и ссылки, не имеющие связей вне макроэлемента M . Набор результирующих объектов определяется исходя из логического смысла макроэлемента; входные объекты определяются по формальным признакам: они не имеют входящих ссылочных связей с объектами внутри макроэлемента.

Результаты

Возвращаясь к проблеме построения композиционных карт, еще раз отметим, что вклейка, по сути, есть локализованный аналог большой карты, который, как правило, строится по схожему сценарию с некоторыми вариациями в исходных данных. Иначе говоря, для создания детализированного структурного каркаса по заданной области внутри региональной модели конструируется граф решения со структурой, которая аналогична структуре графа для каркаса базовой детальности.

На рис. 4 представлена общая схема построения композиционной структурной модели в терминах объектно-иерархического подхода, где индексом 0 обозначены элементы, относящиеся к модели базовой детальности, а индекс 1 относится к локальной детализированной модели. Макроэлементы M_{Data}^0 представляют собой совокупность объектов, содержащих исходные данные для моделирования, макроэлементы M_{Mod}^0 — фрагменты иерархии, отвечающие за расчет элементов структурного каркаса: структурных поверхностей, толщин, границ распространения пластов. Результирующая композиционная модель создается на основе базовой и детализированной модели, определенных внутри прямоугольников картирования, представленных отдельными объектами дерева иерархии R_i .

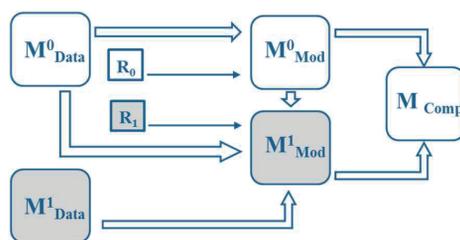


Рис. 4. Схема композитной структурной модели в терминах объектно-иерархического подхода

Fig. 4. Scheme of a composite structural model in terms of the object-hierarchical approach

Дополнение композиционной модели новым детализирующим фрагментом в рамках данного подхода решается довольно просто и технологично. Копирование всех элементов схемы с индексом 1 создает дубликат детализирующей модели с сохранением всех

связей между объектами (входными, результирующими и внутренними) и параметров моделирования. В большинстве случаев достаточно ввести нужные координаты для нового прямоугольника картирования R_i , чтобы все процедуры построения локальной детализированной модели были применены в заданных границах.

Алгоритмы и подходы, описанные в данной статье, на практике воплощены в постоянно действующей цифровой модели «Структурный каркас Западной Сибири», разработанной в Научно-аналитическом центре рационального недропользования (НАЦРН) им. В. И. Шпилемана. Модель описывает основные стратиграфические границы осадочного чехла и учитывает широкий спектр исходной информации, как сейсмической, так и данных бурения. В расчетах применяются все способы сопряжения решений: деление на полосы, вклейки, вставка фрагментов других сеток. На рис. 5 показана общая схема разбиения области моделирования. Исходя из специфики задач НАЦРН, а также частоты поступления и изменения исходной информации, выделяются два основных блока: южный, включающий территорию ХМАО, и северный. Для областей с наибольшей плотностью исходных данных созданы детализирующие подмодели, вклейки. Каждый блок или вклейка представляют собой отдельную цифровую структурную модель осадочного чехла, сопряженную на границах с базовой моделью, а при картировании в пределах блоков или вклеек также применяется процедура построения карт по полосам. Размер ячейки сетки базовой детальности (для северного и южного блока) составляет 500 м; по отдельным территориям, характеризующимся резкими структурными формами и обеспеченным данными 3D-сейсморазведки, использовалась сетка с шагом 125 м.

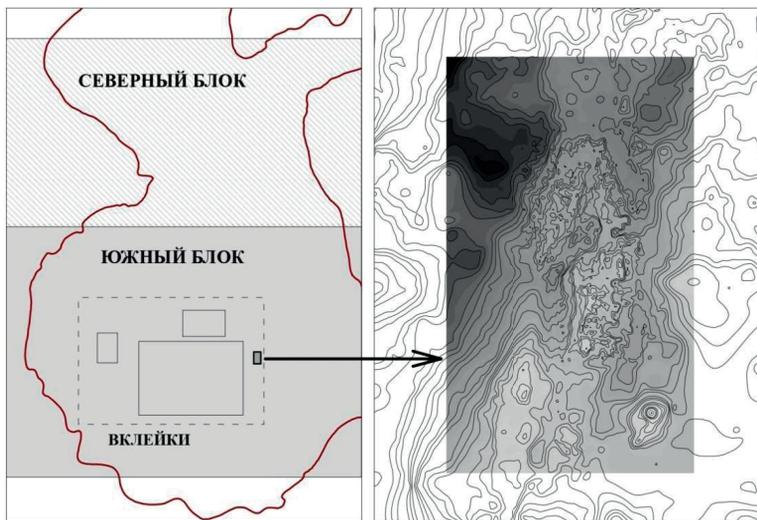


Рис. 5. Схема региональной композиционной структурно-геологической модели по территории Западной Сибири (слева); детализирующая вклейка для региональной структурной карты по доюрскому основанию (справа)

Fig. 5. Scheme of the regional compositional structural-geological model for the territory of Western Siberia (left); detailing insert for the regional structural map of the pre-Jurassic surface (right)

В правой части рис. 5 показано сопряжение базовой карты по доюрскому основанию (изолинии без заливки) и детализирующей вклейки по Аригольско-Максимкинскому участку. Можно увидеть, что изолинии композитной карты на границе вклейки не прерываются ни скачков, ни изломов, что свидетельствует о гладкости сопряжения карт. Это условие соблюдается для всех структурных элементов модели.

Заключение

Возможности методов компьютерного картирования ограничиваются объемом оперативной памяти и быстродействием вычислительной техники. Особую актуальность эта проблема приобретает при расчетах сеток большой размерности, характерных для сверхдетальных либо региональных задач картопостроения. В рамках рассматриваемых в данной работе методов решение этой проблемы осуществляется через разбиение области моделирования на ряд подобластей (полос) и последовательный расчет каждой из них с помощью вариационно-сеточного метода с условием гладкой склейки решений на границах подобластей. Принцип гладкого согласования сеток основан на условии равенства коэффициентов сплайна для совпадающих узлов в области перекрытия соседних полос, что достигается подстановкой известных значений коэффициентов сплайна в СЛАУ. Склейка двух решений по произвольному набору узлов дает возможность установить строгое равенство двух сеток внутри некоторого полигона, что имеет важное практическое значение при необходимости учета в задаче картирования других карт по заданной области. Аналитическая зависимость между значениями коэффициентов сплайнов, определенных на сетках, шаги которых связаны соотношением (2), обеспечивает реализацию мультисеточных технологий для гладкого согласования карт разной детальности.

Описанные выше алгоритмы реализованы в программном комплексе GST. В сочетании с объектно-иерархическим подходом мультисеточные технологии, базирующиеся на вариационно-сеточном подходе, позволяют создавать сложные многомасштабные автоматизированные геолого-структурные модели, состоящие из десятков или сотен элементов. Примером практического применения технологии вклеек и последовательного расчета по полосам является созданный в НАЦРН им. В. И. Шпильмана цифровой структурный каркас по территории Западной Сибири с детализирующими подмоделями в наиболее изученных областях.

Список источников

- Волков А. М. 1988. Геологическое картирование нефтегазоносных территорий с помощью ЭВМ. М.: Недра. 222 с.
- Плавник А. Г. 2010. Обобщенная сплайн-аппроксимационная постановка задачи картирования свойств геологических объектов // Геология и геофизика. Том 51. № 7. С. 1027–1037.
- Плавник А. Г., Сидоров А. Н. 2012. К оценке достоверности картирования свойств геологических объектов в рамках сплайн-аппроксимационного подхода // Сибирский журнал промышленной математики. Том 15. № 1 (49). С. 66–76.

- Плавник А. Г., Сидоров А. Н. 2018. Картирование свойств геологических объектов с учетом анизотропии на основе моделирования деформационного преобразования // Математическое моделирование. Том 30. № 3. С. 19–36.
- Плавник А. Г., Сидоров А. Н., Сидоров А. А., Торопов Э. С. 2021. Геокартирование на основе сплайн-аппроксимационного подхода. Тюмень: ТИУ. 188 с.
- Роженко А. И. 2005. Теория и алгоритмы вариационной сплайн-аппроксимации. Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН. 243 с.
- Сидоров А. Н. 1979. Метод оптимального построения карт геологических параметров с точки зрения интерполирующих и сглаживающих сплайнов // Проблемы нефти и газа Тюмени. № 44. С. 12–24.
- Сидоров А. А. 2022а. Вариационно-сеточный подход к построению литологических моделей клиноформных отложений // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 8. № 1 (29). С. 109–125. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-1-109-125>
- Сидоров А. А. 2022б. Объектно-иерархический подход к созданию Workflow для задач геологического моделирования // Информационные технологии и вычислительные системы. № 4. С. 103–114. <https://doi.org/10.14357/20718632210410>
- Сидоров А. А. 2022в. О формировании цифровой постоянно действующей структурной модели осадочного чехла Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции // Геология и геофизика. Том 63. № 8. С. 1153–1166. <https://doi.org/10.15372/GiG2021140>
- Сидоров А. Н., Плавник А. Г. 2009. Определение и учет интегральных показателей в задачах геокартирования // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. № 5. С. 16–20.
- Смоляк С. А. 1971. Сплайны и их применение // Экономика и математические методы. Том 7. № 3. С. 419–431.
- Arcangéli R., Silanes M. C. L., Torrens J. J. 2004. Multidimensional Minimizing Splines: Theory and Applications. New York: Springer New York. XV, 263 pp. <https://doi.org/10.1007/b130045>
- Briggs I. C. 1974. Machine contouring using minimum curvature // Geophysics. Vol. 39. No. 1. Pp. 39–48. <https://doi.org/10.1190/1.1440410>
- de Boor C. 1962. Bicubic spline interpolation // Journal of Mathematics and Physics. Vol. 41. No. 3. Pp. 212–218.
- Harder R. L., Desmarais R. N. 1972. Interpolation using surface splines // Journal of Aircraft. Vol. 9. No. 2. Pp. 189–191. <https://doi.org/10.2514/3.44330>
- Holladay J. C. 1957. A smoothest curve approximation // Mathematical Tables and Other Aids to Computation. Vol. 11. No. 60. Pp. 233–243. <https://doi.org/10.2307/2001941>
- Kurchikov A. R., Plavnik A. G., Itskovich M. V. 2019. Quasi-three-dimensional modelling of the Jurassic-Cretaceous sediments hydrogeochemical conditions in the central part of the West Siberian megabasin // Applied Geochemistry. Vol. 110. Article 104433. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104433>
- Sidorov A. N., Plavnik A. G., Sidorov A. A., Shutov M. S. 2014. Use of variational methods in geological mapping // Mathematics of Planet Earth. Lecture Notes in Earth System Sciences / E. Pardo-Igúzquiza, C. Guardiola-Albert, J. Heredia, L. Moreno-Merino, J. Durán, J. Vargas-Guzmán (eds.). Berlin; Heidelberg: Springer. Pp. 325–328. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32408-6_72

References

- Volkov, A. M. (1988). *Geological mapping of oil and gas bearing areas using a computer*. Nedra. [In Russian]
- Plavnik, A. G. (2010). Generalized spline-approximation problem formulation for spatial data modeling in geosciences. *Russian Geology and Geophysics*, 51(7), 801–807. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.06.008>
- Plavnik, A. G., & Sidorov, A. N. (2012). About estimation of the certainty of plotting the properties of geological objects in the framework of the spline approximation approach. *Sibirskii zhurnal industrial'noi matematiki*, 15(1), 66–76. [In Russian]
- Plavnik, A. G., & Sidorov, A. N. (2018). Mapping the properties of geological objects with allowance for anisotropy based on the simulation of the deformation transformation. *Mathematical Models and Computer Simulations*, 10(5), 629–638. <https://doi.org/10.1134/S2070048218050095>
- Plavnik, A. G., Sidorov, A. N., Sidorov, A. A., & Toropov, E. S. (2021). *Geo-mapping based on spline approximation approach*. Industrial University of Tyumen. [In Russian]
- Rozhenko, A. I. (2005). *Theory and algorithms of variational spline approximation*. The Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. [In Russian]
- Sidorov, A. N. (1979). Method of optimal mapping of geological parameters in terms of interpolating and smoothing splines. *Problemy nefti i gaza Tyumeni*, (44), 12–24. [In Russian]
- Sidorov, A. A. (2022a). Variational gridding approach to the lithological modeling of clinof orm-type deposits. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 8(1), 109–125. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2022-8-1-109-125> [In Russian]
- Sidorov, A. A. (2022b). Object-hierarchical approach for creating workflows in geo-modeling. *Informacionnye tekhnologii i vychislitel'nye sistemy*, (4), 103–114. <https://doi.org/10.14357/20718632210410> [In Russian]
- Sidorov, A. A. (2022c). On the creation of a digital permanently operating structural model for the sedimentary cover of the West Siberian petroleum province. *Russian Geology and Geophysics*, 63(8), 1153–1166. <https://doi.org/10.15372/GiG2021140> [In Russian]
- Sidorov, A. N., & Plavnik, A. G. (2009). Use and calculation of integral values in geological gridding. *Automation and Informatization of the Fuel and Energy Complex*, (5), 16–20. [In Russian]
- Smolyak, S. A. (1971). Splines and their applications. *Economics and Mathematical Methods*, 7(3), 419–431. [In Russian]
- Arcangéli, R., Silanes, M. C. L., & Torrens, J. J. (2004). *Multidimensional minimizing splines: Theory and applications*. Springer New York. <https://doi.org/10.1007/b130045>
- Briggs, I. C. (1974). Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1), 39–48. <https://doi.org/10.1190/1.1440410>
- de Boor, C. (1962). Bicubic spline interpolation. *Journal of Mathematics and Physics*, 41(3), 212–218.
- Harder, R. L., & Desmarais, R. N. (1972). Interpolation using surface splines. *Journal of Aircraft*, 9(2), 189–191. <https://doi.org/10.2514/3.44330>
- Holladay, J. C. (1957). A smoothest curve approximation. *Mathematical Tables and Other Aids to Computation*, 11(60), 233–243. <https://doi.org/10.2307/2001941>

- Kurchikov, A. R., Plavnik, A. G., & Itskovich, M. V. (2019). Quasi-three-dimensional modeling of the Jurassic-Cretaceous sediments hydrogeochemical conditions in the central part of the West Siberian megabasin. *Applied Geochemistry*, 110, Article 104433. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104433>
- Sidorov, A. N., Plavnik, A. G., Sidorov, A. A., & Shutov, M. S. (2014). Use of variational methods in geological mapping. In E. Pardo-Igúzquiza, C. Guardiola-Albert, J. Heredia, L. Moreno-Merino, J. Durán, & J. Vargas-Guzmán (Eds.), *Mathematics of Planet Earth. Lecture Notes in Earth System Sciences* (pp. 325–328). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-32408-6_72

Информация об авторах

Андрей Гарьевич Плавник, доктор технических наук, главный научный сотрудник, Западно-Сибирский филиал Института нефтегазовой геологии и геофизики им. А. А. Трофимука СО РАН, Тюмень, Россия; профессор кафедры геологии месторождений нефти и газа, Институт геологии и нефтегазодобычи, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Россия
plavnikag@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8099-4874>

Андрей Андреевич Сидоров, кандидат физико-математических наук, заведующий отделением математического моделирования геологических объектов, Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В. И. Шпилмана, Тюмень, Россия
darth@cr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8639-2644>

Information about the authors

Andrey G. Plavnik, Dr. Sci. (Tech.), Chief Researcher, West Siberian Branch of Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics of Siberian Branch Russian Academy of Sciences, Tyumen, Russia; Professor, Department of Oil and Gas Geology, Institute of Geology and Oil and Gas Production, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russia
plavnikag@ipgg.sbras.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8099-4874>

Andrei A. Sidorov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Head of Department of the Mathematical Modeling of Geological Objects, V. I. Shpilman Research and Analytical Centre for the Rational Use of the Subsoil, Tyumen, Russia
darth@cr.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8639-2644>

Сравнительный анализ методов фильтрации замеров данных скважин сложной конструкции

Давид Юзаевич Шенгелия^{1✉}, Игорь Викторович Коваленко²,
Ирина Гелиевна Захарова¹

¹ Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

² Газпромнефть НТЦ, Тюмень, Россия

Контакт для переписки: d.y.shengeliya@utmn.ru✉

Аннотация. Статья посвящена сравнительному анализу различных методов фильтрации синтетических замеров, имитирующих данные гидродинамических исследований скважин (ГДИС).

Основной целью работы является выявление наиболее эффективных методов фильтрации зашумленных данных ГДИС с позиции сохранения полезной информации и облегчения задачи последующей интерпретации результатов.

В качестве исходных данных использовался набор из 200 синтетических кривых снижения давления (КСД) и кривых восстановления давления (КВД) с различным уровнем искусственно внесенного шума. Для фильтрации данных рассматривались как классические методы (фильтр Каалмана, фильтр Савицкого — Голея, одномерная фильтрация Гаусса), так и численные методы на основе нейронных сетей (автокодировщики) и методов машинного обучения (метод опорных векторов).

В результате сравнительного анализа было продемонстрировано, что результаты применения различных методов фильтрации зависят от типа обрабатываемой кривой (КСД или КВД) и характеристик скважины. Наилучшие показатели по критериям отношения «сигнал — шум» (signal-noise ratio, SNR) и корня среднеквадратической ошибки (RMSE) продемонстрировали современные методы на основе автокодировщиков.

Сделан вывод, что выбор оптимального метода фильтрации требует детального анализа специфики задачи и характеристик исходных данных. Предложено комбинирование различных методов фильтрации для повышения качества обработки и интерпретации данных скважин сложной конструкции.

Полученные результаты имеют практическую значимость, позволяя упростить решение задачи сегментации КСД и КВД, что необходимо для корректной идентификации различных периодов работы скважины в процессе ее исследования.

Ключевые слова: гидродинамические исследования скважин, скважины сложной конструкции, фильтр Калмана, фильтр Савицкого — Голея, одномерная фильтрация Гаусса, метод опорных векторов, автокодировщики

Цитирование: Шенгелия Д. Ю., Коваленко И. В., Захарова И. Г. 2024. Сравнительный анализ методов фильтрации замеров данных скважин сложной конструкции // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 10. № 2 (38). С. 104–120. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-104-120>

Поступила 08.05.2024; одобрена 17.05.2024; принята 24.05.2024

Comparative analysis of filtering methods for measurement data from complex well configurations

David Yu. Shengeliya¹✉, Igor V. Kovalenko², Irina G. Zakharova¹

¹ University of Tyumen, Tyumen, Russia

² Gazpromneft Science & Technology Center, Tyumen, Russia

Corresponding author: d.y.shengeliya@utmn.ru✉

Abstract. This article presents a comparative analysis of various filtering methods for synthetic measurements that simulate data from well test analysis (WTA).

The main objective of this work is to identify the most effective filtering methods for noisy WTA data, with the aim of preserving useful information and facilitating the subsequent interpretation of the results.

The initial dataset consisted of 200 synthetic pressure drawdown (PDD) and pressure buildup (PBU) curves with varying levels of artificially introduced noise. Both classical filtering methods (Kalman filter, Savitzky–Golay filter, one-dimensional Gaussian filtering) and numerical methods based on neural networks (autoencoders) and machine learning (support vector machines) were considered for data filtering.

The comparative analysis demonstrated that the performance of different filtering methods depends on the type of curve (PDD or PBU) and the well characteristics. The best results in terms of signal-to-noise ratio (SNR) and root mean square error (RMSE) were achieved using modern autoencoder-based methods.

The conclusion is that the choice of an optimal filtering method requires a detailed analysis of the specific problem and the characteristics of the input data. A combination of different filtering methods is proposed to improve the quality of processing and interpretation of WTA data for complex well designs.

The obtained results have practical significance, as they can simplify the segmentation of PDD and PBU curves, which is necessary for the correct identification of various operating periods of the well during the investigation process.

Keywords: well testing, complex well configurations, Kalman filter, Savitzky–Golay filter, one-dimensional Gaussian filtering, support vector machines, autoencoders

Citation: Shengeliya, D. Yu., Kovalenko, I. V., & Zakharova, I. G. (2024). Comparative analysis of filtering methods for measurement data from complex well configurations. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 10(2), 104–120. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2024-10-2-104-120>

Received May 8, 2024; Reviewed May 17, 2024; Accepted May 24, 2024

Введение

Данные замеров с манометра во время проведения гидродинамических исследований скважин (ГДИС) представляют собой последовательность кривых снижения давления (КСД) и кривых восстановления давления (КВД). Эти данные несут в себе важную информацию о свойствах пласта и скважины, необходимую для последующей интерпретации результатов ГДИС [Есипов и др., 2014; Асалузина и др., 2020; Коваленко, 2023].

Однако на практике такие данные часто оказываются зашумленными по ряду причин, в числе которых влияние ствола скважины (ВСС), погрешности измерений на ранних этапах исследования, а также другие факторы (например, скин-фактор) [Unneland и др., 1998]. Шумы существенно затрудняют корректную интерпретацию результатов ГДИС и определение искоемых показателей пласта и скважины.

В связи с этим была определена цель разработки эффективных (с точки зрения устранения шумов при сохранении полезного сигнала) методов фильтрации зашумленных данных замеров с манометра во время проведения ГДИС.

Данное исследование может быть полезным для задачи автоматической сегментации КСД и КВД по следующим причинам:

- эффективная фильтрация позволит устранить шумы и выделить полезный сигнал КСД и КВД;
- сохранение достоверной информации о свойствах пласта в отфильтрованных КСД и КВД обеспечит возможность корректной последующей интерпретации [Бухмастова и др., 2020];
- устранение шумов и аномалий облегчит задачу автоматического распознавания и сегментации КСД и КВД с помощью методов машинного обучения и использования нейронных сетей [Vaferi и др., 2011; Бриллиант и др., 2022].

В данной работе рассматриваются методы фильтрации синтетических данных КСД и КВД, позволяющие устранять шумы с минимальными потерями полезной информации, сохраняя при этом достоверность результатов ГДИС и корректность определения искоемых параметров пласта и скважины.

Материалы и методы

В качестве исходных данных использовался набор из 200 эталонных кривых — 100 КСД и 100 КВД (1 062 точки для каждой кривой) с различным количеством трещин (от 2 до 21). Данный диапазон основан на фактических данных, полученных при исследовании ряда добывающих скважин на нефтегазовом месторождении X. Нижняя граница установлена для охвата минимального сценария, в то время как верхний предел в 21 трещину позволяет рассмотреть случаи с высокой плотностью трещинообразования. Зашумленные синтетические данные $P_{noisy}(t)$ формировались путем добавления к эталонным данным $P_{ideal}(t)$ случайного гауссовского шума $n(t)$ со средним 0 и заданной дисперсией σ^2 , определяемой уровнем шума nf :

$$P_{noisy}(t) = P_{ideal}(t) + n(t),$$

где $n(t) \sim N(0, (nf \cdot P_{ideal}(t))^2)$. Величина nf варьировалась от 0,02 до 0,2 с шагом 0,02. Такой подход имитирует ситуацию, когда шум измерений имеет большую дисперсию для больших значений измеряемого давления, что полностью соответствует реальным условиям эксплуатации скважин на месторождении X, когда погрешность измерений с манометра пропорциональна самим измеряемым величинам. Кроме того, каждый набор синтетических данных инициализировался со 100 различными случайными числами (random seed) для формирования множества различных шумовых профилей. На рис. 1 и 2 представлены примеры максимально зашумленных данных КСД и КВД соответственно.

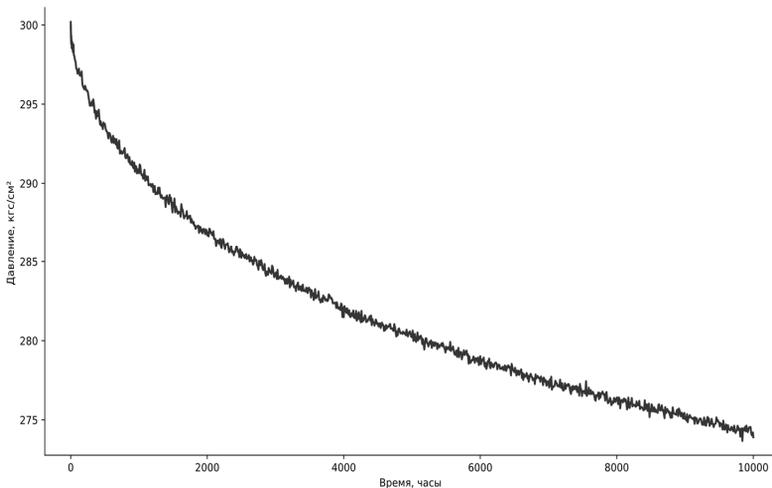


Рис. 1. Пример графика КСД (степень зашумления — 0,2)

Fig. 1. Example of the PDC plot (noise level — 0.2)

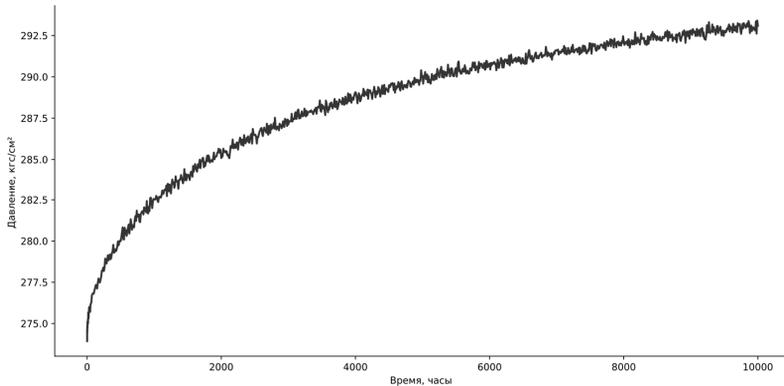


Рис. 2. Пример графика КВД (степень зашумления — 0,2)

Fig. 2. Example of the PRC plot (noise level — 0.2)

В работе были рассмотрены классические и численные методы для фильтрации шумов в данных ГДИС.

Классические методы

Фильтр Калмана. Рекурсивный алгоритм оценивания состояния динамической системы, позволяющий учитывать статистические характеристики шумов и погрешностей [Nikoofard и др., 2015; Заикин, Кареев, 2020].

Он опирается на следующие уравнения:

— состояния:

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k, \quad (1)$$

где x_{k+1} — вектор состояния системы в следующий момент времени; x_k — вектор состояния системы в текущий момент времени; A_k — матрица перехода состояния; B_k — матрица управления; u_k — вектор управляющих воздействий; w_k — вектор шума процесса;

— наблюдения:

$$z_k = H_k x_k + v_k, \quad (2)$$

где z_k — вектор измерений; H_k — матрица наблюдения; v_k — вектор шума измерения;

— предсказания состояния:

$$\hat{x}_{k+1|k} = A_k \hat{x}_{k|k} + B_k u_k, \quad (3)$$

где $\hat{x}_{k+1|k}$ — предсказанное состояние в следующий момент времени; $\hat{x}_{k|k}$ — оцененное состояние в текущий момент времени;

— предсказания ошибки ковариации:

$$P_{k+1|k} = A_k P_{k|k} A_k^T + Q_k, \quad (4)$$

где $P_{k+1|k}$ — предсказанная ковариация ошибки; $P_{k|k}$ — оцененная ковариация ошибки в текущий момент времени; Q_k — ковариация шума процесса;

— обновления состояния:

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k(z_k - H_k \hat{x}_{k|k-1}), \quad (5)$$

где $\hat{x}_{k|k}$ — обновленное состояние в текущий момент времени; K_k — коэффициент усиления Калмана;

— обновления ковариации ошибки:

$$P_{k|k} = (I - K_k H_k) P_{k|k-1}, \quad (6)$$

где $P_{k|k}$ — обновленная ковариация ошибки в текущий момент времени; I — единичная матрица;

— коэффициента усиления Калмана:

$$K_k = P_{k|k-1} H_k^T (H_k P_{k|k-1} H_k^T + R_k)^{-1}, \quad (7)$$

где R_k — ковариация шума измерения.

В одномерной реализации R и Q представляют собой скалярные значения [Арио и др., 2019]. Процесс работы фильтра Калмана, описанного в (1)–(7), состоит из трех этапов:

1. Инициализация параметров: $P_0 = 0$.
2. Предсказание состояния: $Y_{pred} = y_i$; $P_{pred} = P_i + Q$.
3. Обновление состояния: $K_i = P_{pred} / (P_{pred} + R)$; $P_i = (1 - K_i) \cdot P_{pred}$; $Y_i = Y_{pred} + K_i \cdot (y_i - Y_{pred})$.

К преимуществам можно отнести высокую точность и адаптивность, возможность прогнозирования состояния. Недостатки — вычислительная сложность для многомерных систем.

Фильтр Савицкого — Голея. Гладкая аппроксимация сглаживающим многочленом для шумоподавления [Сулейманов и др., 2014; Lei и др., 2020]. В общем виде описывается следующим образом:

$$Y_j = \sum_{i=\frac{1-m}{2}}^{\frac{m-1}{2}} C_i y_{j+i}, \quad \frac{m+1}{2} \leq j \leq n - \frac{m-1}{2},$$

где Y_j — сглаженная точка данных с индексом j ; m — ширина окна сглаживания; C_i — коэффициенты свертки, зависящие от m и степени полинома.

Из преимуществ — простота реализации и вычисления. Недостаток — возможная потеря высокочастотных составляющих сигнала.

Одномерная фильтрация Гаусса. Линейная свертка с весовой функцией, по форме напоминающей гауссовское распределение [Osman, Stewart, 1997].

В основе данного фильтра лежит следующая формула:

$$g(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}, \quad (8)$$

где x — точка, к которой применяется фильтр; σ — стандартное отклонение, определяющее степень сглаживания фильтра.

Для применения фильтра (8) к массиву данных $f(x)$ используется свертка:

$$g_{\sigma}(x) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)g(x - t). \quad (9)$$

В дискретном случае, когда данные представлены массивом, (9) аппроксимируется как

$$g_{\sigma}(x) = \sum_{t=-\infty}^{\infty} f(t)g(x - t).$$

Основным преимуществом является эффективное подавление выбросов и шумов. К недостаткам относится необходимость подбора параметров ядра.

Численные методы

Метод опорных векторов (support vector machine, SVM). Данный метод является одним из популярных подходов для решения регрессионных задач в рамках машинного обучения (support vector regression, SVR). В его основе лежит построение гиперплоскости в многомерном пространстве признаков, которая максимально близко аппроксимирует исходные данные [Khoukhi и др., 2011; Ansari, Gholami, 2015].

Математически это можно представить следующим образом. Дано обучающее множество $\{(x_i, y_i), i = 1 \dots n\}$, где x_i — вектор входных признаков, а y_i — соответствующее значение целевой переменной.

Целевая функция метода SVR имеет вид

$$\min \left(\frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^N (\xi_i + \xi_i^*) \right) \quad (10)$$

при ограничениях:

$$y_i - wx_i - b \leq \varepsilon + \xi_i, \quad (11)$$

$$wx_i + b - y_i \leq \varepsilon + \xi_i^*, \quad (12)$$

$$\xi_i, \xi_i^* \geq 0, \quad (13)$$

где w — вектор весов гиперплоскости; b — смещение гиперплоскости; ε — величина допустимой ошибки; ξ_i, ξ_i^* — величины отклонений от целевой функции (слабые и сильные ошибки соответственно); C — параметр регуляризации, определяющий компромисс между сложностью модели и точностью аппроксимации. Важной особенностью SVR является использование ядерных функций (kernel functions), которые позволяют работать с нелинейными зависимостями между признаками и целевой переменной. Наиболее популярные ядерные функции — линейная, полиномиальная, радиальная базисная (RBF) и сигмоидная [Awad, Khanna, 2015].

Из основных преимуществ — эффективность в высокоразмерных пространствах без перегрузки модели, устойчивость к выбросам, а также возможность использования нелинейных ядер [Aung и др., 2020]. Из недостатков — высокая чувствительность к выбору гиперпараметров для целевой функции (10) с учетом ограничений (11)–(13) и высокая вычислительная сложность при большом объеме данных.

Автокодировщики. Общий принцип работы автокодировщиков (специализированных искусственных нейронных сетей [Kuester и др., 2021; Jiang и др., 2022]) заключается в следующем:

1. На нейронную сеть подается пара входных сигналов — в чистом виде и с шумом.
2. Автокодировщик пытается реконструировать исходный чистый сигнал на выходе.
3. В процессе автокодировщик обучается более устойчивому внутреннему представлению данных, игнорируя шум.

Для объективного сравнения методы тестировались на синтетических данных с известными свойствами шума и полезного сигнала ГДИС. Качество фильтрации оценивалось метриками RMSE и SNR. Первая метрика показывает среднее отклонение отфильтрованных значений давления от истинных значений давления в системе, вторая метрика характеризует степень подавления случайных шумов и помех при замерах синтетических данных давления.

Результаты и обсуждение

Фильтр Калмана

На рис. 3 приведен график, показывающий зависимость значений RMSE и SNR от параметров R и Q . В результате вычислительных экспериментов для используемой выборки было определено, что наилучшие результаты для характеристик качества фильтрации достигаются при значениях $Q \in [0,1; 1]$ и $R \in [0,5; 4,9]$.

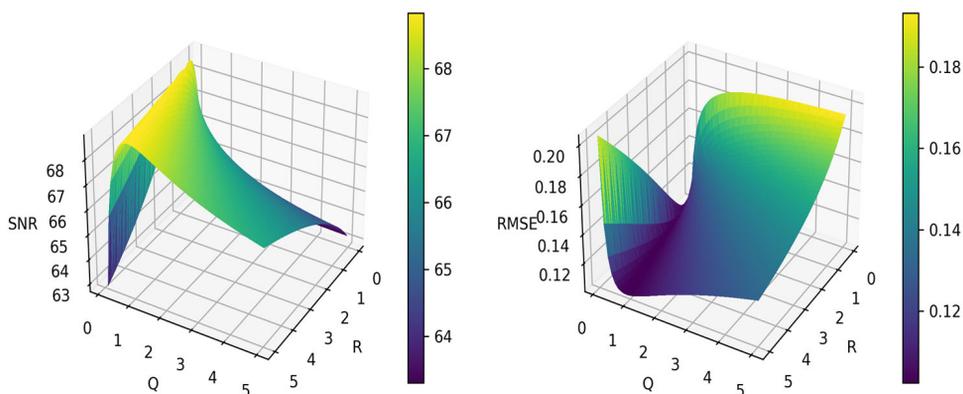


Рис. 3. Значения SNR и RMSE в зависимости от параметров R и Q

Fig. 3. SNR and RMSE values as a function of R and Q parameters

Фильтр Савицкого — Голея

На рис. 4 представлен график, который демонстрирует влияние двух параметров на результаты применения сглаживающего фильтра к данным: размер окна, к которому применяется фильтр, и степень полинома, используемого для аппроксимации данных внутри окна. Из графика (рис. 4) видно, что для исследуемого набора данных наилучшие результаты фильтрации (наименьшее значение RMSE и наибольшее значение SNR) были достигнуты при ширине окна $W_{size} \in [67; 119]$. Это составляет от 5 до 9% от общего размера выборки данных.

Необходимо отметить, что степень полинома, которым аппроксимируются данные внутри окна, оказывает влияние на результат. Зависимости, представленные на рис. 4, показывают, что оптимальными являются полиномы третьей, четвертой и пятой степеней. В некоторых случаях сопоставимые результаты показывают и полиномы второй степени.

Одномерный фильтр Гаусса

На рис. 5 приведен график, показывающий зависимость значений RMSE и SNR от значения σ . В результате вычислительных экспериментов для используемой выборки было определено, что наилучшие результаты фильтр демонстрирует при значениях $\sigma \in [7,5; 9]$.

При меньших значениях σ фильтр недостаточно хорошо удаляет шумовую составляющую, что приводит к высокому RMSE. При больших σ происходит чрезмерное сглаживание и теряется полезный сигнал, что отражается в низком SNR.

Метод опорных векторов

На рис. 6 приведен график, показывающий зависимость значений RMSE и SNR от значений C (параметр регуляризации L2) и ϵ (порог допустимой ошибки). В результате вычислительных экспериментов для используемой выборки было определено, что наилучшим ядром для фильтрации является *rbf* (ядро, основанное на радиально-базисной функции) и что наилучшие результаты метод опорных векторов демонстрирует при значениях $C \in [60\ 000; 80\ 000]$ и $\epsilon \in [0,01; 0,1]$.

Автокодировщики

Denoising Autoencoder (DAE) — это специализированная архитектура искусственной нейронной сети, разновидность автокодировщика, основанная на полносвязных слоях.

Convolutional Autoencoder (CAE) — разновидность автокодировщика, использующая свертки вместо полносвязных слоев. Из ключевых аспектов CAE можно отметить свойственную структурированным данным локальную корреляцию для более эффективного кодирования, сохранение пространственной и топологической структуры входных данных, а также меньшее число параметров по сравнению с полносвязными автокодировщиками.

В таблицах 1 и 2 приведены архитектуры CAE и DAE, применяемые для фильтрации данных КСД и КВД.

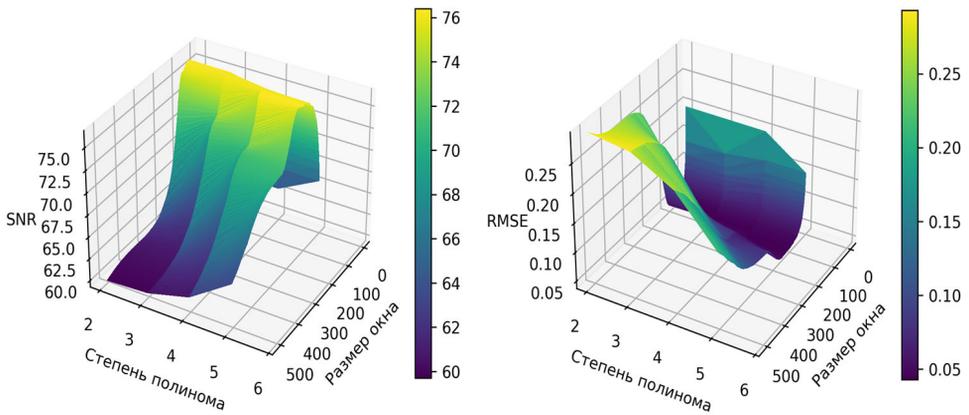


Рис. 4. Значения SNR и RMSE в зависимости от размера окна и степени полинома

Fig. 4. SNR and RMSE values as a function of window size and polynomial degree

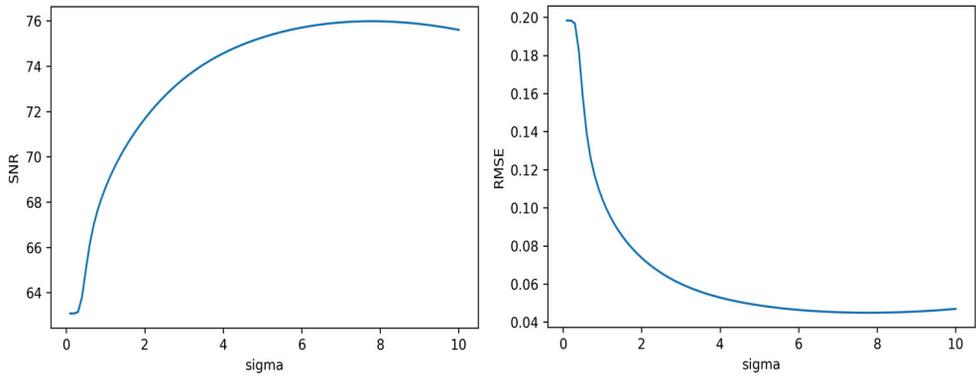


Рис. 5. Значения SNR и RMSE в зависимости от значения σ

Fig. 5. SNR and RMSE values as a function of σ value

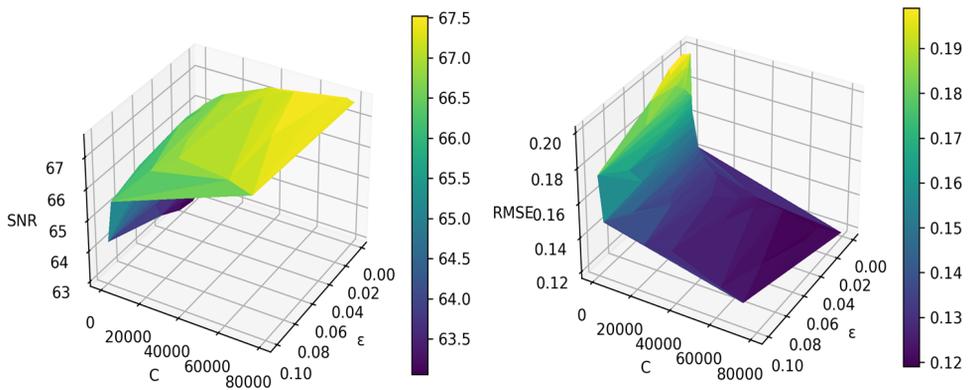


Рис. 6. Значения SNR и RMSE в зависимости от значений C и ϵ

Fig. 6. SNR and RMSE values as a function of the values of C and ϵ

Таблица 1. Архитектура CAE для фильтрации КСД и КВД**Table 1.** CAE architecture for filtering PDCs and PRCs

Тип слоя	Входные данные	Выходные данные	Параметры
Кодировщик			
Conv1D	(1, 2, 1 062)	(16, 1, 532)	Размер ядра — 3×3 , шаг — 2, pad — 1
ReLU → Dropout ($p = 0,2$)			
Conv1D	(16, 1, 532)	(32, 1, 266)	Размер ядра — 3×3 , шаг — 2, pad — 1
ReLU → Dropout ($p = 0,2$)			
Декодировщик			
ConvTranspose1D	(32, 1, 266)	(16, 1, 532)	Размер ядра — 3×3 , шаг — 2, pad — 1, output_pad — 1
ReLU			
ConvTranspose1D	(16, 1, 532)	(1, 2, 1062)	Размер ядра — 3×3 , шаг — 2, pad — 1, output_pad — 1
Sigmoid			

Таблица 2. Архитектура DAE для фильтрации КСД и КВД**Table 2.** DAE architecture for filtering PDCs and PRCs

Тип слоя	Входные данные	Выходные данные
Кодировщик		
Dense	(2, 1 062)	(2, 532)
ReLU		
Dense	(2, 532)	(2, 266)
ReLU		
Dense	(2, 266)	(2, 133)
ReLU		
Декодировщик		
Dense	(2, 133)	(2, 266)
ReLU		
Dense	(2, 266)	(2, 532)
ReLU		
Dense	(2, 532)	(2, 1 062)

Сравнительный анализ методов фильтрации

В таблице 3 приведены сравнительные показатели SNR и RMSE для типового случая КСД (7 трещин, полудлина трещины — 100 м, скин-фактор = 0,13, ВСС = 0,2). Лучшие результаты SNR и RMSE достигнуты при размере окна 145 и полиноме пятой степени для фильтра Савицкого — Голея, при $\sigma = 7,8$ для фильтра Гаусса и при архитектурах DAE и CAE.

Таблица 3. Сравнительная характеристика различных методов фильтрации замеров КСД

Table 3. Comparative characterization of different filtering methods for PDC measurements

Метод фильтрации	Параметры	SNR, дБ	RMSE, кгс/см ²
Фильтр Калмана	$Q = 0,8; R = 4$	68,3693	0,1079
	$Q = 0,7; R = 3,7$	68,3749	0,1078
	$Q = 0,8; R = 4,3$	68,3753	0,1078
Фильтр Савицкого — Голея	окно = 73 отсчета; степень = 3	76,4635	0,04249
	окно = 117 отсчета; степень = 4	76,4687	0,04246
	окно = 145 отсчета; степень = 5	76,4687	0,04246
Фильтр Гаусса	$\sigma = 8,5$	75,942	0,0451
	$\sigma = 8$	75,98	0,0449
	$\sigma = 7,8$	75,984	0,0445
Метод опорных векторов, ядро — rbf	$C = 76\ 000; \varepsilon = 0,001$	67,6105	0,11774
	$C = 74\ 000; \varepsilon = 0,001$	67,5889	0,11804
	$C = 68\ 000; \varepsilon = 0,01$	67,5878	0,11805
DAE	—	77,2319	0,04031
CAE	—	77,5634	0,03985

В таблице 4 приведены значения показателей SNR и RMSE для типового случая КВД (9 трещин, полудлина трещины — 150 м, скин-фактор = 0,1, ВСС = 0,2). На данном примере видно, что по сравнению со случаем КСД фильтр Гаусса и фильтр Савицкого — Голея выдают примерно одинаковые значения RMSE и SNR как между собой, так и в рамках различных параметров для каждого из них. Фильтр Калмана и метод опорных векторов показывают себя более стабильно, сохраняя сопоставимый уровень RMSE и SNR, однако автокодировщики DAE и CAE показывают наилучшие результаты.

Таблица 4. Сравнительная характеристика различных методов фильтрации замеров КВД**Table 4.** Comparative characterization of different filtering methods for PRC measurements

Метод фильтрации	Параметры	SNR, дБ	RMSE, кгс/см ²
Фильтр Калмана	$Q = 0,8; R = 4$	65,7198	0,149
	$Q = 0,7; R = 3,7$	65,612	0,1509
	$Q = 0,8; R = 4,3$	65,5797	0,1514
Фильтр Савицкого — Голея	окно = 73 отсчета; степень = 3	63,2204	0,1987
	окно = 117 отсчета; степень = 4	63,1856	0,1995
	окно = 145 отсчета; степень = 5	63,1743	0,1997
Фильтр Гаусса	$\sigma = 8,5$	63,3549	0,1955
	$\sigma = 8$	63,3693	0,1953
	$\sigma = 7,8$	63,3812	0,195
Метод опорных векторов, ядро — rbf	$C = 76\ 000; \varepsilon = 0,001$	64,8324	0,1622
	$C = 74\ 000; \varepsilon = 0,001$	64,8216	0,1625
	$C = 68\ 000; \varepsilon = 0,01$	64,8138	0,1627
DAE	—	68,0144	0,1342
CAE	—	68,1621	0,1325

Заключение

Применение различных методов фильтрации синтетических данных для скважин сложной конструкции показало, что эффективность того или иного метода зависит от типа обрабатываемых данных, а также от характеристик скважины.

Классические методы фильтрации продемонстрировали приемлемую результативность для определенных случаев и конфигураций скважин, однако современные методы, основанные на применении нейронных сетей, показали лучшие результаты при сопоставимой производительности по сравнению с классическими методами.

Таким образом, выбор оптимального метода фильтрации требует тщательного анализа специфики задачи и характеристик исходных данных, а комбинирование традиционных и современных методов фильтрации (пример для КВД: сверточный автокодировщик — для первичной фильтрации, фильтр Калмана — опционально для более точной фильтрации с учетом различных параметров) позволяет повысить качество обработки и интерпретации данных скважин сложной конструкции. Данное исследование является одним из основных шагов к улучшению качества сегментации кривых давления на периоде работы скважины сложной конструкции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Асалхузина Г. Ф., Давлетбаев А. Я., Хабибуллин И. Л., Ахметова Р. Р. 2020. К вопросу выбора длительности режимов при гидродинамических исследованиях скважин на установившихся режимах закачки в низкопроницаемых коллекторах // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. Том 6. № 1 (21). С. 135–149. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-135-149>
- Бриллиант Л. С., Дулкарнаев М. Р., Данько М. Ю., Елишева А. О., Набиев Д. Х., Хуторная А. И., Мальков И. Н. 2022. Управление добычей нефти на основе нейросетевой оптимизации режимов работы скважин на участке опытно-промышленных работ пласта ЮВ1 Ватгеганского месторождения ТПП «Повхнефтегаз» // Георесурсы. Том 24. № 1. С. 3–15. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.1.1>
- Бухмастова С. В., Фахреева Р. Р., Питюк Ю. А., Давлетбаев А. Я., Азарова Т. П., Фаргер Д. В., Якупов Р. Ф. 2020. Апробация методов MLR и CRMIP при исследовании взаимодействия скважин // Нефтяное хозяйство. № 8. С. 58–62. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-8-58-62>
- Есипов Д. В., Куранаков Д. С., Лапин В. Н., Чёрный С. Г. 2014. Математические модели гидроразрыва пласта // Вычислительные технологии. Том 19. № 2. С. 33–61.
- Заикин А. А., Кареев И. А. 2020. Моделирование потоков жидкости в нефтеносных пластах с помощью фильтра Калмана // Итоги науки и техники. Серия «Современная математика и ее приложения. Тематические обзоры». Том 175. С. 27–35. <https://doi.org/10.36535/0233-6723-2020-175-27-35>
- Коваленко И. В. 2023. Гидродинамическое моделирование горизонтальных скважин с многостадийным гидроразрывом пласта с учетом потерь давлений на конвергенцию линий тока // Нефтепромысловое дело. № 2 (650). С. 26–28. [https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-2\(650\)-26-28](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-2(650)-26-28)
- Судейманов Б. А., Дышин О. А., Исаев Р. Ж. 2014. Интерпретация кривых восстановления давления на основе анализа детерминированных моментов забойного давления // Нефтепромысловое дело. № 1. С. 12–23.
- Ansari H. R., Gholami A. 2015. An improved support vector regression model for estimation of saturation pressure of crude oils // Fluid Phase Equilibria. Vol. 402. Pp. 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2015.05.037>
- Apio A., Dambros J. W., Farenzena M., Trierweiler J. O. 2019. Comparison of Kalman filter-based approaches for permanent downhole gauge pressure estimation in offshore oil production // Journal of Petroleum Science and Engineering. Vol. 182. Article 106254. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106254>
- Aung Z., Mikhaylov I. S., Thu Aung Y. 2020. Application of support vector system for solving problems of classification and forecasting of oil wells // 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Pp. 568–572. <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039343>
- Awad M., Khanna R. 2015. Support vector regression // Efficient Learning Machines. Berkeley: Apress. Pp. 67–80. https://doi.org/10.1007/978-1-4302-5990-9_4
- Jiang J., Ren H., Zhang M. 2022. A convolutional autoencoder method for simultaneous seismic data reconstruction and denoising // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Vol. 19. Article 7503405. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3073560>

- Khoukhi A., Oloso M., Elshafei M., Abdurraheem A., Al-Majed A. 2011. Support vector regression and functional networks for viscosity and gas/oil ratio curves estimation // *International Journal of Computational Intelligence and Applications*. Vol. 10. No. 03. Pp. 269–293. <https://doi.org/10.1142/S1469026811003100>
- Kuester J., Gross W., Middelman W. 2021. 1D-convolutional autoencoder based hyperspectral data compression // *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. Vol. XLIII-B1-2021. Pp. 15–21. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-15-2021>
- Lei J., Fan Y., Li Y., Xu T. 2020. Data analysis of hydraulic fracturing pressure in unconventional oil and gas fields // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol. 558. No. 2. Article 022057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/558/2/022057>
- Nikooifard A., Aarsnes U. J. F., Johansen T. A., Kaasa G.-O. 2015. Estimation of states and parameters of a drift-flux model with unscented Kalman filter // *IFAC-PapersOnLine*. Vol. 48. No. 6. Pp. 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.026>
- Osman M. S., Stewart G. 1997. Pressure data filtering and horizontal well test analysis case study // *Middle East Oil Show and Conference (15–18 March 1997, Bahrain)*. Paper SPE-37802-MS. <https://doi.org/10.2118/37802-MS>
- Unneland T., Manin Y., Kuchuk F. 1998. Permanent gauge pressure and rate measurements for reservoir description and well monitoring: Field cases // *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*. Vol. 1. No. 3. Pp. 168–176. <https://doi.org/10.2118/38658-PA>
- Vaferi B., Eslamloueyan R., Ayatollahi Sh. 2011. Automatic recognition of oil reservoir models from well testing data by using multi-layer perceptron networks // *Journal of Petroleum Science and Engineering*. Vol. 77. No. 3–4. Pp. 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.03.002>

References

- Asalkhuzina, G. F., Davletbaev, A. Ya., Khabibullin, I. L., & Akhmetova, R. R. (2020). On the selection of suitable operate durations for injection tests in low permeability reservoirs. *Tyumen State University Herald. Physical and Mathematical Modeling. Oil, Gas, Energy*, 6(1), 135–149. <https://doi.org/10.21684/2411-7978-2020-6-1-135-149> [In Russian]
- Brilliant, L. S., Dulkarnaev, M. R., Danko, M. Yu., Elisheva, A. O., Nabiev, D. Kh., Khutornaya, A. I., & Malkov, I. N. (2022). Oil production management based on neural network optimization of well operation at the pilot project site of the Vatyeganskoe field (Territorial Production Enterprise Povkhneftegaz). *Georesources*, 24(1), 3–15. <https://doi.org/10.18599/grs.2022.1.1> [In Russian]
- Bukhmastova, S. V., Fakhreeva, R. R., Pityuk, Yu. A., Davletbaev, A. Ya., Azarova, T. P., Farger, D. V., & Yakupov, R. F. (2020). Approbation of MLR and CRMIP methods in research of well interference. *Oil Industry Journal*, (8), 58–62. <https://doi.org/10.24887/0028-2448-2020-8-58-62> [In Russian]
- Esipov, D. V., Kuranakov, D. S., Lapin, V. N., & Cherny, S. G. (2014). Mathematical models of hydraulic fracturing. *Computational Technologies*, 19(2), 33–61. [In Russian]
- Zaikin, A. A., & Kareev, I. A. (2020). Modeling fluid flows in oil fields using the Kalman filter. *Itogi nauki i tekhniki. Seriya "Sovremennaya matematika i ee prilozheniya. Tematicheskie obzory"*, 175, 27–35. <https://doi.org/10.36535/0233-6723-2020-175-27-35> [In Russian]

- Kovalenko, I. V. (2023). Hydrodynamic simulation of horizontal wells by multi-stage hydraulic fracturing of a formation taking into account pressure losses due to streamline convergence. *Oilfield Engineering*, (2), 26–28. [https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-2\(650\)-26-28](https://doi.org/10.33285/0207-2351-2023-2(650)-26-28) [In Russian]
- Suleimanov, B. A., Dyshin, O. A., & Isaev, R. Zh. (2014). Interpretation of pressure built-up curves on the basis of analysis of bottomhole pressure deterministic moments. *Oilfield Engineering*, (1), 12–23. [In Russian]
- Ansari, H. R., & Gholami, A. (2015). An improved support vector regression model for estimation of saturation pressure of crude oils. *Fluid Phase Equilibria*, 402, 124–132. <https://doi.org/10.1016/j.fluid.2015.05.037>
- Apio, A., Dambros, J. W., Farenzena, M., & Trierweiler, J. O. (2019). Comparison of Kalman filter-based approaches for permanent downhole gauge pressure estimation in offshore oil production. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 182, Article 106254. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106254>
- Aung, Z., Mikhaylov, I. S., & Thu Aung, Y. (2020). Application of support vector system for solving problems of classification and forecasting of oil wells. In *2020 IEEE Conference of Russian young researchers in electrical and electronic engineering (EIConRus)* (pp. 568–572). <https://doi.org/10.1109/EIConRus49466.2020.9039343>
- Awad, M., & Khanna, R. (2015). Support vector regression. In *Efficient learning machines* (pp. 67–80). Apress. https://doi.org/10.1007/978-1-4302-5990-9_4
- Jiang, J., Ren, H., & Zhang, M. (2022). A convolutional autoencoder method for simultaneous seismic data reconstruction and denoising. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19, Article 7503405. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2021.3073560>
- Khokhi, A., Oloso, M., Elshafei, M., Abdulraheem, A., & Al-Majed, A. (2011). Support vector regression and functional networks for viscosity and gas/oil ratio curves estimation. *International Journal of Computational Intelligence and Applications*, 10(03), 269–293. <https://doi.org/10.1142/S1469026811003100>
- Kuester, J., Gross, W., & Middelman, W. (2021). 1D-convolutional autoencoder based hyperspectral data compression. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B1-2021, 15–21. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B1-2021-15-2021>
- Lei, J., Fan, Y., Li, Y., & Xu, T. (2020). Data analysis of hydraulic fracturing pressure in unconventional oil and gas fields. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 558(2), Article 022057. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/558/2/022057>
- Nikoofard, A., Aarsnes, U. J. F., Johansen, T. A., & Kaasa, G.-O. (2015). Estimation of states and parameters of a drift-flux model with unscented Kalman filter. *IFAC-PapersOnLine*, 48(6), 165–170. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.08.026>
- Osman, M. S., & Stewart, G. (1997, March 15–18). *Pressure data filtering and horizontal well test analysis case study* [Conference paper SPE-37802-MS]. Middle East Oil Show and Conference, Bahrain. <https://doi.org/10.2118/37802-MS>
- Unneland, T., Manin, Y., & Kuchuk, F. (1998). Permanent gauge pressure and rate measurements for reservoir description and well monitoring: Field cases. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 1(3), 168–176. <https://doi.org/10.2118/38658-PA>
- Vaferi, B., Eslamloueyan, R., & Ayatollahi, Sh. (2011). Automatic recognition of oil reservoir models from well testing data by using multi-layer perceptron networks. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 77(3–4), 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2011.03.002>

Информация об авторах

Давид Юзаевич Шенгелия, аспирант кафедры программного обеспечения, Школа компьютерных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
d.y.shengeliya@utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5222-9672>

Игорь Викторович Коваленко, кандидат технических наук, руководитель программы развития продуктов, Газпромнефть НТЦ, Тюмень, Россия
kovalenko.iv@gazpromneft-ntc.ru

Ирина Гелиевна Захарова, кандидат физико-математических наук, профессор кафедры программного обеспечения, Школа компьютерных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
i.g.zakharova@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4211-7675>

Information about the authors

David Yu. Shengeliya, Postgraduate Student, Department of Software, School of Computer Science, University of Tyumen, Tyumen, Russia
d.y.shengeliya@utmn.ru, <https://orcid.org/0009-0004-5222-9672>

Igor V. Kovalenko, Cand. Sci. (Tech.), Product Development Manager, Gazpromneft Science & Technology Center, Tyumen, Russia
kovalenko.iv@gazpromneft-ntc.ru

Irina G. Zakharova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Professor, Department of Software, School of Computer Science, University of Tyumen, Tyumen, Russia
i.g.zakharova@utmn.ru, <https://orcid.org/0000-0002-4211-7675>

Передовая научная школа профессора Александра Борисовича Шабарова

Ольга Михайловна Дружинина 

Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия

Контакт для переписки: o.m.druzhinina@utmn.ru 

Создание научных школ на базе вузов и научно-производственных объединений, способных совместно продуктивно решать важные региональные задачи, — идея, сформулированная профессором А. Б. Шабаровым давно.

Как человек государственный, он смело реализует коммуникацию научных направлений тюменских научных школ, встает во главе этого движения, локомотивом которого становится его научная школа.



Александр Борисович Шабаров родился 14 мая 1944 г. в поселке Голицыно Звенигородского района Московской области.

Окончил Московское высшее техническое училище им. Н. Э. Баумана (1967), Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (1969), аспирантуру Московского высшего технического училища им. Н. Э. Баумана (1971).

С 1988 по 1993 г. — проректор по науке Тюменского государственного университета (ТюмГУ).

С 1993 по 1998 г. — организатор и руководитель Тюменского Технопарка. Руководитель научной школы теплофизики и механики многофазных систем ТюмГУ. Председатель диссертационного совета по специальности «Теплофизика и теоретическая теплотехника, физико-математические науки, технические науки».

Основными направлениями научной деятельности А. Б. Шабарова являются расчетно-теоретические и экспериментальные методы механики многофазных сред, математическое моделирование термодинамических процессов в проточных частях энергоустановок, автоматизированное проектирование деталей турбомашин на основе моделей пространственных турбулентных течений и вариационного метода, комплексная оптимизация энергоустановок на различных видах топлива.

В области механики сплошных сред и физико-математического моделирования процессов в энергоустановках А. Б. Шабаровым была предложена, разработана и экспериментально обоснована теория трех моделей, обобщающая теорию пограничного слоя и сводящая турбулентные течения в турбомашинах к совокупности трех явлений: 1) невязкому течению в ядре потока, 2) вязкому пристенному течению и 3) деформации характеристик турбулентности вне пристенной зоны в поле скорости невязкого потока.

В области автоматизированного проектирования проточных частей газотурбинных и комбинированных установок А. Б. Шабаровым предложен, разработан и доведен до внедрения вариационный метод проектирования элементов проточной части радиально-осевых турбомашин, осевых турбин, осевых компрессоров, патрубков турбомашин и теплообменных аппаратов. В области комплексного технико-экономического и экологического анализа стационарных и транспортных энергоустановок А. Б. Шабаровым выполнены поисковые расчетно-теоретические и проектные разработки газотурбинных и комбинированных установок на газообразном, жидком и твердом топливе, а также предложены эффективные методы использования энергии биомассы в автономных энергоустановках мощностью 50, 300 и 1 000 кВт на вторичных энергоресурсах.

За время работы в ТюмГУ Александр Борисович способствовал развитию направлений, изучающих механику многофазных систем, в том числе физику жидкостей и теплофизику в нефтегазовых и строительных технологиях. При его участии были разработаны физико-математические модели движения многофазных сред в природных и технических системах, включая модели формирования углеводородных залежей, модели движения нефтегазовых потоков в трубопроводных системах и скважинах.

Под руководством профессора А. Б. Шабарова в ТюмГУ в течение ряда лет проводится школа-семинар молодых ученых по теплофизике и механике многофазных систем, итоги работы которой публикуются в сборнике тезисов.

Современная сфера научных интересов профессора А. Б. Шабарова: энергетика на традиционных и возобновляемых видах топлива; механика многофазных систем; теплофизика в нефтегазовых и строительных технологиях; нанотехнологии; газотурбинные и комбинированные двигатели; инновационный менеджмент. Александр Борисович автор более 400 научных и учебно-методических работ, 12 монографий, 20 патентов на изобретения и полезные модели.

Под научным руководством Александра Борисовича защищено более 30 докторских и кандидатских диссертаций.

Говоря о своей научной школе, Александр Борисович отмечает, что главное, к чему он стремится, — это органичное сочетание качественного учебного процесса и науки. Им разработана инновационная модель подготовки специалистов, включающая талантливых преподавателей, современную экспериментальную базу, общую теоретическую подготовку в научной школе в сочетании с индивидуальной подготовкой специалистов.

Александр Борисович подчеркивает:

«Научная школа не возникает внезапно. В нашей школе три взаимодополняющих направления. Первое — механика многофазных систем, основу которой положил Р. И. Нигматулин. Второе — университетская физика, физика жидкостей, поверхностных явлений и другие направления, у истоков которых стояли преподаватели, работавшие еще в „домногофазную эру“. И третье — теплофизика, тепловые двигатели и установки. Истоки этого направления — в исследованиях МВТУ им. Баумана во второй половине XX в. Наша задача — развивать новые перспективные направления. Таким примером являются нанотехнологии. Мы постараемся, чтобы это была новая интегрированная научная школа».

За выдающиеся заслуги перед Отечеством Александр Борисович Шабаров награжден почетными грамотами Министерства оборонной промышленности и Центрального комитета профсоюза (1980), Тюменской областной Думы (2009); благодарственным письмом Администрации города Тюмени (2014); медалями им. М. В. Ломоносова (1998), им. С. П. Королёва (2002), золотой медалью ТюмГУ «За выдающиеся успехи» (1999).

Александр Борисович заслуженный деятель науки РФ (1998), заслуженный профессор ТюмГУ (2010), действительный член Российской академии естественных наук (1997), действительный член Международной академии наук высшей школы (1996).

Талантливый человек талантлив во всём!

Александр Борисович первоклассный отец и дедушка (три замечательных внука), лектор и собеседник, охотник и рыбак, спортсмен и ценитель высокой литературы. Но главное — он наставник молодежи в профессии и жизни.

Юбилей Александра Борисовича — это обобщение основных результатов деятельности и планирование работы его передовой научной школы на следующем этапе пути.

Информация об авторе

Ольга Михайловна Дружинина, доцент кафедры моделирования физических процессов и систем, Школа естественных наук, Тюменский государственный университет, Тюмень, Россия
o.m.druzhinina@utmn.ru

Научное издание



ВЕСТНИК ТЮМЕНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА
Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика
2024. Том 10. № 2 (38)

Редактор	<i>Т. П. Сербин</i>
Перевод	<i>М. О. Сафонова</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 03.07.2024
Формат 70 × 108/16. Бумага Xerox Perfect Print
Обложка Stromcard LI. Гарнитура Arno Pro
Печать электрографическая. 10,85 усл. печ. л., 8,68 уч.-изд. л.
Цена свободная.
Тираж 500 экз. Заказ № 148