

ISSN 2712-9942

# УСПЕХИ КИБЕРНЕТИКИ

RUSSIAN JOURNAL OF CYBERNETICS

2022  
T. 3 № 1

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ФЕДЕРАЛЬНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР  
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ СИСТЕМНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»**

---

## **Успехи кибернетики**

---

## **Russian Journal of Cybernetics**

**Том 3  
№ 1**

**Vol. 3  
No. 1**

Москва  
2022

## Учредитель и издатель

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр  
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»  
(ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН)

«Успехи кибернетики» — это рецензируемый научный журнал, в котором публикуются научные статьи по следующим специальностям (физико-математические, технические науки):

- 1.2.2. Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ;
- 2.2.2. Электронная компонентная база микро- и нанoeлектроники, квантовых устройств;
- 2.3.1. Системный анализ, управление и обработка информации.

Миссия журнала — развитие научных направлений по заявленной тематике в России и за рубежом, соответствующих приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники в Российской Федерации, а также перечню критических технологий РФ.

Журнал ориентирован на пропаганду передовых идей в области физики, математики, технических наук, участие в реализации задач, сформулированных Президентом РФ в Указе от 01.12.2016 № 642, по научно-технологическому развитию РФ, а также импортозамещению по приоритетным направлениям стратегического развития страны, соответствующим тематике журнала, обеспечение печатными площадями высококвалифицированных кадров, повышение качества диссертационных исследований в данных отраслях путем развития механизма профессионального и общественного обсуждения их научных результатов, воспитание молодого поколения ученых.

Журнал принимает к публикации оригинальные статьи; переводы статей, опубликованных в зарубежных журналах (при согласии правообладателя на перевод и публикацию); обзоры; эссе; комментарии; другие информационные материалы.

Издание будет полезно ученым, работающим в соответствующих областях наук, а также аспирантам и студентам.

### Главный редактор

*Бетелин Владимир Борисович*, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

### Заместитель главного редактора

*Галкин Валерий Алексеевич*, д. ф.-м. н., профессор, директор, Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Сургут

### Члены редакционной коллегии

*Власов Сергей Евгеньевич*, д. т. н., директор, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

*Панченко Владислав Яковлевич*, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, председатель Совета, Российский фонд фундаментальных исследований; заведующий кафедрой медицинской физики, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

*Савин Геннадий Иванович*, академик РАН, д. ф.-м. н., профессор, научный руководитель, Межведомственный суперкомпьютерный центр РАН — филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

*Сойфер Виктор Александрович*, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, главный научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории автоматизированных систем научных исследований, Самарский национальный исследовательский университет им. ак. С. П. Королева, Институт систем обработки изображений РАН, Самара

*Чубариков Владимир Николаевич*, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой математических и компьютерных методов анализа,

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

*Чаплыгин Юрий Александрович*, академик РАН, д. т. н., профессор, президент, Московский институт электронной техники, Москва

*Петров Игорь Борисович*, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой информатики, Московский физико-технический институт, Москва

*Смирнов Николай Николаевич*, д. ф.-м. н., профессор, заместитель декана механико-математического факультета, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,

заместитель директора по стратегическим информационным технологиям, ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

*Тишкин Владимир Федорович*, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры вычислительных методов,

Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, Москва

*Губайдуллин Амир Анварович*, д. ф.-м. н., профессор, директор, Тюменский филиал Института теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича Сибирского отделения

РАН, Тюмень

*Яковлевский Михаил Владимирович*, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт прикладной математики им. М. В. Келдыша

РАН, Москва

*Шагалиев Рашид Мирзагалиевич*, д. ф.-м. н.

*Старков Сергей Олегович*, д. ф.-м. н., профессор, начальник отделения интеллектуальных кибернетических систем, Обнинский институт атомной энергетики, Обнинск

*Еськов Валерий Матвеевич*, д. ф.-м. н., д. б. н., профессор, заведующий отделом, Сургутский филиал ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Сургут

*Лаврентьев Михаил Михайлович*, д. ф.-м. н., профессор, заместитель директора по научной работе, Институт автоматизации и электротехники Сибирского отделения РАН, Новосибирск

*Пятков Сергей Григорьевич*, д. ф.-м. н., профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Югорский государственный университет, Ханты-Мансийск

*Ильин Валерий Павлович*, д. ф.-м. н., профессор, профессор кафедры прикладной математики, Новосибирский государственный технический университет, Новосибирск

*Крыжановский Борис Владимирович*, член-корреспондент РАН, д. ф.-м. н., руководитель, Центр оптико-нейронных технологий ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, Москва

*Нагорнов Олег Викторович*, д. ф.-м. н., профессор, первый проректор, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва

*Савченко Владимир Васильевич*, PhD (Theoretical Mechanics), Университет Хосэй, Токио, Япония

*Земло Ясунари*, PhD (Physics), Университет Хосэй, Токио, Япония

*Пападопулос Атанас*, Doctorat d'Etat (Habilitation), mathematics, Университет Страсбурга, Национальный центр научных исследований Франции, Страсбург, Франция

### Ответственный секретарь

Гавриленко Тарас Владимирович, к. т. н.

### Ответственный редактор

Чалова Анна Петровна, к. филол. н.

### Технический редактор

Моргун Дмитрий Алексеевич, к. ф.-м. н., доцент

### Редактор

Камилов Эркин Махмуджанович

### Переводчик

Троицкий Дмитрий Игоревич, к. т. н., доцент

### Художественное оформление обложки

© Горбунов Александр Сергеевич

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС 77-78857 от 04.08.2020.

Издается с 2020 года. Выпускается 4 раза в год.

Адрес редакции:

ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН, 117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1.

Телефон: +7 9226-54-57-88, факс: +7 (495) 719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Сайт: jcyb.ru.

**Founder and Publisher**

Federal State Institution

Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences (SRISA)

Russian Journal of Cybernetics is peer-reviewed.

The journal publishes papers on physics, mathematics, and engineering. The key areas of interest are:

- simulation, numerical methods, and simulation software
- electronic components for micro- and nanoelectronics, and quantum devices
- system analysis, control, and information processing.

Our mission is advancing these research areas in Russia and globally, supporting the national priority fields of research and development, and the critical technologies.

The Journal promotes advanced concepts in physics, mathematics, engineering, and facilitates the national research and technology development under the Russian President Decree No. 642 dated 01.12.2016, and phasing out strategic imports. We offer an opportunity for professional researchers to publish. We improve the doctorate research quality through public peer review and educate the new generation of researchers.

The Journal accepts original papers; translations of papers from international journals (consent of the right holders for the translation and publication is required); reviews; essays; remarks, and event reports.

The Journal is intended for researchers, university, and doctorate students.

**Chief Editor**

Prof. *Vladimir B. Betelin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS),  
Doctor of Science (Phys&Math), Academic Director, SRISA, Moscow

**Vice Chief Editor**

Prof. *Valery A. Galkin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, SRISA, Surgut Branch, Surgut

**Editorial Board**

- Prof. *Sergey E. Vlasov*, Doctor of Science (Engineering), Director, SRISA, Moscow
- Prof. *Vladislav Ya. Panchenko*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairman of the Council, Russian Foundation for Basic Research, Chairperson of the Department of Medical Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- Prof. *Gennady I. Savin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math),  
Academic Director, Joint Supercomputer Center of the Russian Academy of Sciences, SRISA subdivision, Moscow
- Prof. *Viktor A. Soifer*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, Chief Researcher Lab for Automated Research Systems, Korolev Samara National Research University, Academic Director, Institute of Image Processing Systems, RAS, Samara
- Prof. *Vladimir N. Chubarikov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Mathematical and Computer Analysis Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- Prof. *Yuri A. Chaplygin*, member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Engineering), President, National Research University of Electronic Technology, Moscow
- Prof. *Igor B. Petrov*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Informatics,  
Moscow Institute of Physics and Technology, Moscow
- Prof. *Nikolay N. Smirnov*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Dean, Faculty of Mechanics and Mathematics, Lomonosov Moscow State University, Deputy Director for Strategic Information Technology, SRISA, Moscow
- Prof. *Vladimir F. Tishkin*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Computational Methods, Lomonosov Moscow State University, Moscow
- Prof. *Amir A. Gubaidullin*, Doctor of Science (Phys&Math), Director, Tyumen Division, Khristianovich Institute of Theoretical and Applied Mechanics, RAS Siberian Branch, Tyumen
- Prof. *Mikhail V. Jakobovskii*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Keldysh Institute of Applied Mathematics, RAS, Moscow
- Prof. *Rashit M. Shagaliyev*, Doctor of Science (Phys&Math)
- Prof. *Sergey O. Starkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Head, Division of Intelligent Cybernetic Systems, Obninsk Institute of Atomic Energy, Obninsk
- Prof. *Valery M. Eskov*, Doctor of Science (Phys&Math), Doctor of Science (Biology), Head of Division, SRISA, Surgut Branch, Surgut
- Prof. *Mikhail M. Lavrentiev*, Doctor of Science (Phys&Math), Deputy Director for Research, Institute of Automation and Electrometry, RAS Siberian Branch, Novosibirsk
- Prof. *Sergey G. Pyatkov*, Doctor of Science (Phys&Math), Chairperson, Department of Further Mathematics, Yugra State University, Khanty-Mansiysk
- Prof. *Valerii P. Ilyin*, Doctor of Science (Phys&Math), Professor, Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk
- Prof. *Boris V. Kryzhanovskii*, corresponding member of the Russian Academy of Sciences (RAS), Doctor of Science (Phys&Math), Director, Opto-neural Technologies Center, Scientific Research Institute for System Analysis, Russian Academy of Sciences (SRISA), Moscow
- Prof. *Oleg V. Nagornov*, Doctor of Science (Phys&Math), First Vice-Rector, National Research Nuclear University MEPhI, Moscow
- Prof. *Vladimir V. Savchenko*, PhD (Theoretical Mechanics), Hosei University, Tokyo, Japan
- Prof. *Yasunari Zempo*, PhD (Physics), Hosei University, Tokyo, Japan
- Prof. *Athanase Papadopoulos*, Doctorat d'Etat (Habilitation), Mathematics, University of Strasbourg, French National Centre for Scientific Research, Strasbourg, France

**Executive Editor**

Taras V. Gavrilenko, Ph.D. (Engineering)

**Managing Editor**

Anna P. Chalova, Ph.D. (Linguistics)

**Technical Editor**

Dmitry A. Morgun, Ph.D. (Phys&Math), Assoc. Prof.

**Editor**

Erkin M. Kamilov

**Translator**

Dmitry I. Troitsky, Ph.D. (Engineering), Assoc. Prof.

**Cover Design**

© Alexander S. Gorbunov

The journal is registered with the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media.

Mass media registration certificate EL No. FS 77-78857 dated on 04.08.2020.

Published since 2020. 4 issues per year.

Editorial Board Address:

SRISA, Russia 117218, Moscow, Nakhimovskiy pr., 36/1.

Tel.: +7(922)654-5788, fax: +7(495)719-76-81, e-mail: taras.gavrilenko@gmail.com. Web: jcyb.ru.

## СОДЕРЖАНИЕ

Памяти профессора В. Ф. Бутузова . . . . .	6
<b>М. В. Муратов, Д. И. Петров, В. В. Рязанов, В. А. Бирюков</b>	
Решение обратных задач сейсморазведки трещиноватых пластов методами машинного обучения . . . . .	8
<b>Д. С. Конов, М. В. Муратов, В. А. Бирюков</b>	
Численное решение задачи Стефана для искусственного ледового острова . . . . .	14
<b>В. Р. Душин, В. Ф. Никитин, Е. И. Скрылева, М. Н. Макеева, А. Н. Манахова</b>	
Моделирование вытеснения жидкостей из пористых сред с учетом химических взаимодействий между фазами . . . . .	20
<b>Е. В. Колесников, В. М. Шаймарданов</b>	
Создание автоматизированной информационной технологии сканирования бумажных документов Росгидромета . . . . .	28
<b>А. И. Перегуда</b>	
Математическая модель надежности информационных систем с системами безопасности . . . . .	39
<b>С. В. Зимина, М. Н. Петров</b>	
Уточнение поля течения с помощью сверточных нейронных сетей в задачах внешней аэродинамики . . . . .	44
<b>М. А. Коновалов, В. В. Ульянов, М. М. Кошелев, С. Е. Харчук</b>	
Моделирование охлаждения кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок водяным и жидкометаллическим теплоносителями . . . . .	49
<b>В. Н. Литвинов, Н. Н. Грачева, Е. А. Шабает</b>	
Применение попеременно-треугольного итерационного метода для решения задач гидродинамики мелководного водоема на графическом ускорителе . . . . .	53
<b>И. А. Митьковец, Н. И. Хохлов</b>	
Моделирование неоднородных сред с явным выделением неоднородностей сеточно-характеристическим методом . . . . .	58

## CONTENTS

Commemorating Prof. V. F. Butuzov . . . . .	6
<b>M. V. Muratov, D. I. Petrov, V. V. Ryazanov, V. A. Biryukov</b>	
Machine Learning Applications to Solving Inverse Problems in Fractured Layer Seismic Surveys . . . . .	8
<b>D. S. Konov, M. V. Muratov, V. A. Biryukov</b>	
Numerical Solution of the Stefan Problem for an Artificial Ice Island . . . . .	14
<b>V. R. Dushin, V. F. Nikitin, E. I. Skryleva, M. N. Makeeva, A. N. Manahova</b>	
Simulation of Liquid Displacement in Porous Media and Interphase Chemical Interactions . . . . .	20
<b>E. V. Kolesnikov, V. M. Shaimardanov</b>	
Development of an Automated Paper Documents Scanning Technology for the Russian Meteorological Service . . . . .	28
<b>A. I. Pereguda</b>	
A Simulation Model of IT Systems with Security Features . . . . .	39
<b>S. V. Zimina, M. N. Petrov</b>	
Application of Convolutional Neural Networks to Flow Fields Refining in External Aerodynamics Problems . . . . .	44
<b>M. A. Konovalov, V. V. Ulyanov, M. M. Koshelev, S. E. Kharchuk</b>	
Simulation of Water and Liquid-Metal Coolant Heat Transfer in Continuous Casting Machine . . . . .	49
<b>V. N. Litvinov, N. N. Gracheva, E. A. Shabaev</b>	
Application of the Alternating Triangular Iterative Method to Solving Shallow Water Hydrodynamics Problems with Graphics Accelerators . . . . .	53
<b>I. A. Mitskovets, N. I. Khokhlov</b>	
Simulation of Inhomogeneous Media with Explicit Identification of Inhomogeneities by the Grid-Characteristic Method . . . . .	58

# Памяти профессора В. Ф. Бутузова



1 июня 2021 г. ушёл из жизни наш замечательный коллега и друг профессор МГУ Валентин Фёдорович Бутузов (23.11.1939, Москва — 1.06. 2021, Москва) — советский и российский математик, доктор физико-математических наук (1979), профессор (1982). Заслуженный профессор Московского университета (2005). Отличник народного просвещения РСФСР (1985). Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации (1999).

В 1957 году Валентин Фёдорович окончил с золотой медалью Сухаревскую среднюю школу Краснополянского района Московской области, поступил на физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, который окончил в 1963 году, и поступил в аспирантуру. Бутузов В. Ф. окончил аспирантуру в 1966 году, защитил кандидатскую диссертацию по теме «Асимптотика решений некоторых задач для интегро-дифференциальных уравнений с малым параметром при производных», работал на кафедре математики физического факультета МГУ.

Научные интересы В.Ф. Бутузова, сформировавшиеся ещё в студенческие годы, связаны с теорией сингулярных возмущений, основы которой заложены в известных трудах академика А.Н. Тихонова. В 1963 г. В.Ф. Бутузов защитил дипломную работу, а в 1966 г. — кандидатскую диссертацию под руководством профессора А.Б. Васильевой. В кандидатской диссертации были исследова-

ны обнаруженные им особые асимптотические свойства решений сингулярно возмущённых интегродифференциальных уравнений, качественно отличные от свойств решений дифференциальных уравнений.

В 70-е годы В.Ф. Бутузовым был сделан важный шаг в развитии методов построения асимптотических разложений погранслоевых решений. Он разработал метод угловых пограничных функций, позволяющий строить асимптотические разложения решений сингулярно возмущённых краевых задач для основных типов уравнений математической физики в тех случаях, когда граница области содержит угловые точки. Этот метод и его применения составили основное содержание докторской диссертации В.Ф. Бутузова, защищённой им в 1979 г.

В.Ф. Бутузовым были получены важные результаты в теории сингулярных возмущений и её приложениях. Совместно с коллегами и учениками было разработано новое направление — асимптотическая теория контрастных структур, т.е. решений нелинейных сингулярно возмущённых уравнений с внутренними переходными слоями. За работы по созданию и развитию этого направления В.Ф. Бутузов совместно с проф. А.Б. Васильевой и Н.Н. Нефёдовым удостоены в 2003 году высшей научной награды Московского университета — Ломоносовской премии 1-й степени.

В.Ф. Бутузов вместе с А.Б. Васильевой являются создателями всемирно признанной научной школы по теории сингулярных возмущений. Под их руководством многие годы работал семинар по асимптотическим методам на кафедре математики физического факультета МГУ. В.Ф. Бутузов является автором более 250 научных статей и пяти монографий по асимптотическим методам в сингулярно возмущённых задачах. Три монографии написаны совместно с профессором А.Б. Васильевой, две из них переведены в США и Китае. Последняя монография В.Ф. Бутузова, изданная в 2014 году, содержит результаты последнего десятилетия.

Под руководством В.Ф. Бутузова защищены 15 кандидатских диссертаций, а четверо его учеников стали докторами наук.

Валентин Фёдорович был замечательным педагогом и лектором. На протяжении 20 лет (с 1993 г. по 2014 г.) В.Ф. Бутузов заведовал кафедрой математики физического факультета, являясь прямым преемником А.Н. Тихонова и А.Г. Свешникова. Учебные пособия «Математический анализ в вопросах и задачах» и «Линейная алгебра в вопросах и задачах», написанные В.Ф. Бутузовым вместе с коллегами по кафедре и выдержавшие под редакцией В.Ф. Бутузова несколько изданий, активно используются и на физическом факультете, и на других факультетах Московского университета, и в других вузах. На основе 50-летнего опыта чтения лекций по математическому анализу В.Ф. Бутузов подготовил эти лекции к изданию. Первая, вторая и третья части лекций по математическому анализу вышли в 2012, 2014. и 2015 гг.

Начиная с 1979 г. В.Ф. Бутузов принимал активное участие в работе над школьными учебниками по геометрии. Созданные при его участии и под руководством А.Н. Тихонова, эти учебники были признаны лучшими на всесоюзном конкурсе в 1988 г. В настоящее время они являются основными учебниками геометрии в большинстве школ Российской Федерации. По ним учились и учатся десятки миллионов школьников России и бывших союзных республик.

В молодые годы Валентин Фёдорович в течение 25 лет выступал в составе сборной МГУ по футболу, был неоднократным чемпионом и призером первенства Москвы среди вузов. Друзей всегда восхищал его поэтический дар, импровизации, он всегда был душой компании.

С 1996 г. по 2021 г. профессор В.Ф. Бутузов являлся неизменным участником оргкомитета международных конференций в Обнинске и Сургуте, посвящённых памяти великого русского математика академика П.Л. Чебышёва. Огромен его вклад в формирование образовательной среды в г. Сургуте и Ханты-Мансийском автономном округе – Югре. На протяжении многих лет Валентин Фёдорович активно сотрудничал с редколлегией журнала «Успехи кибернетики».

Память о профессоре Валентине Фёдоровиче Бутузове, замечательном математике, коллеге и друге, навсегда останется в наших сердцах.

*Редколлегия, друзья, ученики*

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-1

## РЕШЕНИЕ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ СЕЙСМОРАЗВЕДКИ ТРЕЩИНОВАТЫХ ПЛАСТОВ МЕТОДАМИ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ

М. В. Муратов<sup>a</sup>, Д. И. Петров<sup>b</sup>, В. В. Рязанов<sup>c</sup>, В. А. Бирюков<sup>d</sup>

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Российская Федерация

<sup>a</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4958-8856>, [max.muratov@gmail.com](mailto:max.muratov@gmail.com)

<sup>b</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6110-4485>, [diapetr@gmail.com](mailto:diapetr@gmail.com)

<sup>c</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4706-598X>, [vasyarv@mail.ru](mailto:vasyarv@mail.ru)

<sup>d</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0109-8567>, [biryukov.vova@gmail.com](mailto:biryukov.vova@gmail.com)

*Аннотация:* в данной работе решаются обратные задачи сейсморазведки в средах с однородно ориентированными трещиноватыми включениями с применением сверточных нейронных сетей. Выбор данного вида нейронных сетей определен большой размерностью массива данных. Построение обучающей выборки из прямых задач для обучения нейронной сети осуществляется с помощью математического моделирования. Для численного решения прямых задач был взят сеточно-характеристический метод на неструктурированных сетках. Выбор численного метода обусловлен волновой природой изучаемых динамических процессов, которая хорошо учитывается сеточно-характеристическим методом. Данный подход хорошо зарекомендовал себя при построении корректных вычислительных алгоритмов для граничных и контактных условий, в частности, для задания дискретного массива трещин. Целью работы является определение характеристик одиночной трещины и пластов таких трещин. Была успешно решена обратная задача сейсморазведки для пласта трещин с шестью неизвестными параметрами: высота и угол наклона трещин, плотность расположения трещин, горизонтальная протяженность пласта и его пространственное положение в 2D. В процессе обучения нейронной сети и распознавания элементов валидационной выборки, помимо данных о скоростях колебаний в массиве сейсмических данных, на вход сети также подавался их частотный спектр.

*Ключевые слова:* машинное обучение, сверточные нейронные сети, математическое моделирование, сеточно-характеристический метод, сейсморазведка, обратные задачи, трещиноватые среды.

*Благодарности:* работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 20-01-00572.

*Для цитирования:* Муратов М. В., Петров Д. И., Рязанов В. В., Бирюков В. А. Решение обратных задач сейсморазведки трещиноватых пластов методами машинного обучения. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):8–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-1.

## MACHINE LEARNING APPLICATIONS TO SOLVING INVERSE PROBLEMS IN FRACTURED LAYER SEISMIC SURVEYS

M. V. Muratov<sup>a</sup>, D. I. Petrov<sup>b</sup>, V. V. Ryazanov<sup>c</sup>, V. A. Biryukov<sup>d</sup>

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyi, Russian Federation

<sup>a</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4958-8856>, [max.muratov@gmail.com](mailto:max.muratov@gmail.com)

<sup>b</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6110-4485>, [diapetr@gmail.com](mailto:diapetr@gmail.com)

<sup>c</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4706-598X>, [vasyarv@mail.ru](mailto:vasyarv@mail.ru)

<sup>d</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0109-8567>, [biryukov.vova@gmail.com](mailto:biryukov.vova@gmail.com)

*Abstract:* in this paper, we solve inverse problems of exploration seismology in rocks with uniformly oriented fractured inclusions using convolutional neural networks. This type of neural network was chosen due to the large dataset. We used simulation to build a neural network training sample from the direct problem results. For the numerical solution of direct problems, a grid-characteristic method was applied to unstructured meshes. This numerical method was used since the studied dynamic processes are of wave nature, which is very suitable for the grid-characteristic method. This approach is proven in building correct computational algorithms for boundary and interface conditions, in particular, for defining discrete fracture arrays. The problem statement is to determine the characteristics of a single fracture and layers of such fractures. The inverse exploration seismology problem for a fractured layer with six unknown parameters was successfully solved. These parameters are the height and angle of inclination of the fractures, the

density of the fractures, the horizontal extent of the formation, and its 2D position. The vibration velocities in the seismic data array and the frequency spectra were inputs for the neural network training and validation sample recognition.

*Keywords:* machine learning, convolutional neural networks, simulation, grid-characteristic method, seismic survey, inverse problems, fractured media.

*Acknowledgements:* this work is supported by RFBR, grant No. 20-01-00572.

*Cite this article:* Muratov M. V., Petrov D. I., Ryazanov V. V., Biryukov V. A. Machine Learning Applications to Solving Inverse Problems in Fractured Layer Seismic Surveys. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):8–13. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-1.

## Введение

Сейсморазведка является одним из наиболее распространенных подходов к изучению геологической структуры грунта без его непосредственного бурения. На поверхности возбуждаются сейсмические волны, которые, взаимодействуя с неоднородностями в геологической среде, образуют отклики, фиксируемые сейсмоприемниками, расположенными на поверхности или в вертикальной скважине. Правильная интерпретация получаемых на сейсмоприемниках сейсмограмм, то есть определение структуры геологического разреза по характеру волнового отклика, является основной задачей сейсморазведки.

Значительный вклад в развитие методик интерпретации сейсмических данных был сделан Дж. Ф. Клаербо [1]. Развитие высокопроизводительных вычислительных систем позволило применить теорию алгоритмов и вычислительных методов для решения практических задач сейсмической разведки [2, 3]. Особый интерес представляет эффективное решение обратных задач. Изначально для вмещающих сред применялась акустическая модель. Существенным недостатком такого подхода было игнорирование значительного объема информации, который несут с собой поперечные волны. В этой связи развитие численного моделирования геологических сред пошло в сторону упругих двухкомпонентных моделей [4].

Новым этапом в решении обратных задач сейсморазведки стало применение методов машинного обучения. К таким методам относятся, в частности, глубокие нейронные сети. В последнее десятилетие они хорошо зарекомендовали себя в таких прикладных областях, как машинный перевод, компьютерное распознавание и генерация речи, анализ текстов, машинное зрение. Во всех перечисленных задачах приходится обрабатывать значительные объемы данных и выявлять связи внутри них. Это также является отличительной особенностью задач сейсморазведки, поэтому сверточные нейронные сети стали использовать и в этой области. Например, при помощи глубокой сверточной нейронной сети решалась двумерная задача поиска разлома [5]. Решению аналогичной задачи в трех измерениях посвящена работа [6]. Примечательно, что при таком подходе практически отсутствует этап специальной обработки входных сейсмических данных, что упрощает его применение по сравнению со стандартными методами.

Одним из основных объектов изучения современной сейсморазведки являются трещиноватые коллекторы. Так как они потенциально могут содержать запасы углеводородов, их поиск является достаточно важной задачей. Данная работа посвящена разработке методики их интерпретации с использованием сверточных нейронных сетей.

## Методика решения обратной задачи

Обратная задача сейсморазведки трещиноватого пласта решалась с использованием сверточных нейронных сетей. Обучение нейронной сети проводилось на выборках, сформированных с применением математического моделирования для прямых задач сейсморазведки [7].

## Решение прямой задачи

Использовалась модель линейно-упругой среды, система определяющих уравнений которой может быть представлена в виде [8]:

$$\rho \frac{\partial V_i}{\partial t} = \frac{\partial T_{ji}}{\partial x_j}, \quad \frac{\partial T_{ij}}{\partial t} = \lambda \left( \sum_k \frac{\partial V_k}{\partial x_k} \right) I_{ij} + \mu \left( \frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right), \quad (1)$$

где  $V_i$  — компонента скорости,  $T_{ji}$  — тензора напряжений,  $\rho$  — плотность среды,  $\lambda$  и  $\mu$  — коэффициенты Ламе,  $I_{ij}$  — компонента единичного тензора. Введя вектор переменных  $\vec{u} = \{V_x, V_y, T_{xx}, T_{yy}, T_{xy}\}$ , систему (1) приводим к виду:

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \sum_{i=1,2} A_i \frac{\partial \vec{u}}{\partial \xi_i} = 0. \quad (2)$$

Численное решение (2) находилось с помощью сеточно-характеристического метода [9].

Трещины задавались в области интегрирования дискретно, что позволяло наблюдать более детальную картину волнового отклика, в формировании которого играют роль волновые отражения на каждой трещине пласта, по сравнению с широко применяемыми эффективными моделями трещиноватости [10]. Использовалась концепция бесконечно тонкой трещины, сетка внутри трещины не задавалась, что позволило существенно сократить потребность в вычислительных мощностях для проведения моделирования. Створки трещин представляли собой контактные поверхности со специально разработанными контактными условиями.

### Решение обратной задачи

Так как решаемые обратные задачи обладают значительным числом параметров, для распознавания использовалась сверточная нейронная сеть. В результате решения прямых задач были созданы выборки, которые подавались на вход сети в ходе ее обучения. Входной объект представлял собой упорядоченную пару из горизонтальной и вертикальной компоненты скорости сейсмических колебаний. Таким образом, каждый образец мог быть представлен в виде трехмерного объекта, состоящего из компоненты скорости, количества датчиков и количества временных измерений размера (2, 100, 300), то есть — двухкомпонентный образец (2 компоненты скорости).

Данная модель была усовершенствована дополнением объекта обучающей выборки частотным спектром, полученным путем применения преобразования Фурье для временных рядов сейсмограммы. Такой образец стал четырехкомпонентным (две компоненты скорости, две соответствующие частоты), размерности три (4, 100, 300).

Для каждой задачи обучающая выборка была представлена набором из 6000 решений прямых задач. После обучения нейронной сети проводилась ее проверка с использованием валидационной выборки, полученной таким же образом. Проверка проводилась измерением функции потерь (loss-функция), в качестве которой использовалась величина Mean Squared Error (MSE, средняя квадратичная ошибка). В ходе обучения отслеживалась также метрика Mean Absolute Error (MAE, средняя ошибка по модулю). Данные метрики можно использовать как для одномерной величины, так и для многомерных векторов.

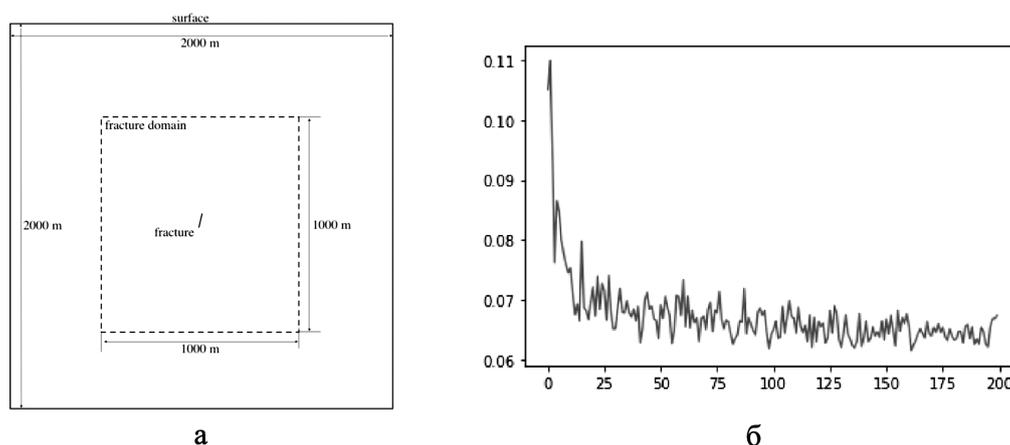
$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}|, \quad MSE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y})^2.$$

Цель — получить схождение к нулю последовательности значений этих метрик при возрастании эпохи обучения.

### Постановка задачи и результаты моделирования

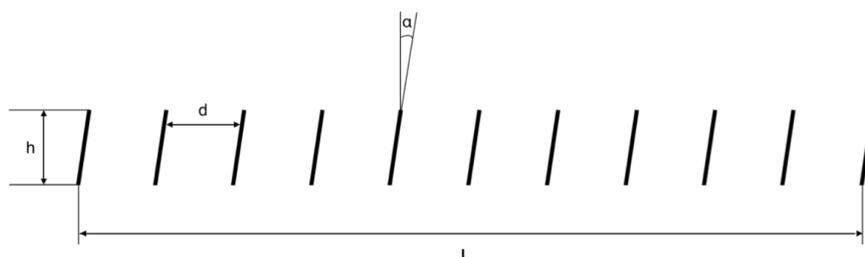
Сначала была рассмотрена модель геологической среды, содержащей одиночную трещину. Рассматривалась однородная упругая среда с размером расчетной области 2 км x 2 км, где скорость продольных волн 4500 м/с, скорость поперечных 2500 м/с, плотность вмещающей среды 2500 кг/м<sup>3</sup> (рисунок 1а). Трещина полагалась субвертикальной с углом наклона  $\pm 15$  градусов. Положение варьировалось по обеим координатам в пределах 1 км. Размер трещины изменялся от 50 до 200 м. Сейсмические приемники общим числом 65 единиц располагались равномерно на поверхности, где производилось возбуждение зондирующего импульса. Приемники фиксировали вертикальную и горизонтальную компоненты скорости волн, отразившихся в среде.

Результат изменения функции потерь по метрике MSE для задачи обнаружения одиночной трещины представлен на рисунке 1б. Наблюдается уменьшение значения функционала при увеличении номера эпохи. Таким образом, можно с уверенностью говорить о применимости данного подхода для исследуемых задач.



**Рис. 1.** Схема расположения одиночной трещины в геологической среде (а), зависимость значения метрики MSE от эпохи обучения (б)

Далее рассматривалась система (кластер) трещин, залегающая на глубине от 1 до 2 км (рисунок 2). Параметры геологической модели взяты следующие: скорость продольных волн 2250 м/с, скорость поперечных 1250 м/с, плотность 1180 кг/м<sup>3</sup>. Сейсмическое возмущение моделировалось волной с плоским фронтом. Расположенные на поверхности 100 сейсмических датчиков с интервалом расстановки 50 метров регистрировали показатели отраженных и рассеянных волн, возникшие после прохождения через кластер трещин.



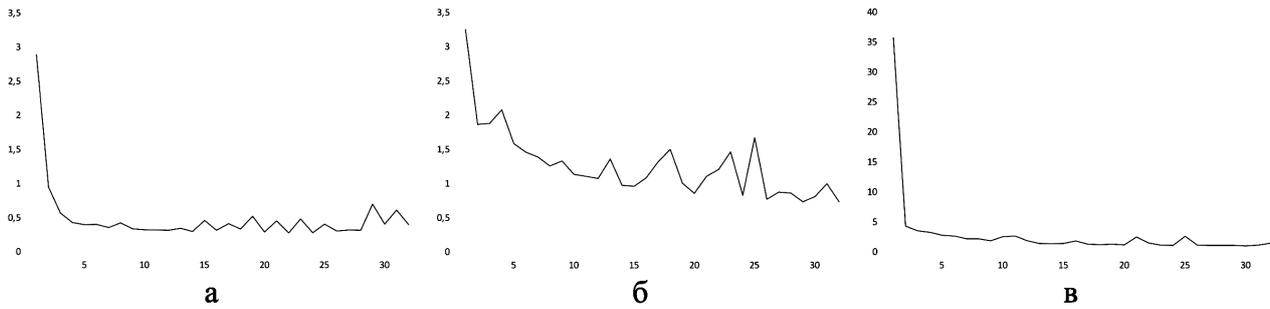
**Рис. 2.** Схема кластера однородно ориентированных субвертикальных трещин

Изменяемыми параметрами являлись: угол наклона ( $\alpha$ ), высота ( $h$ ), расстояние между соседними трещинами ( $d$ , параметр характеризует плотность расположения трещин), пространственное положение кластера трещин и его горизонтальная протяженность ( $L$ ). Также рассматривались комбинации параметров: одновременно угол и высота; одновременно угол, высота и расстояние между трещинами; одновременно горизонтальная протяженность, высота и пространственное положение; а также все параметры одновременно.

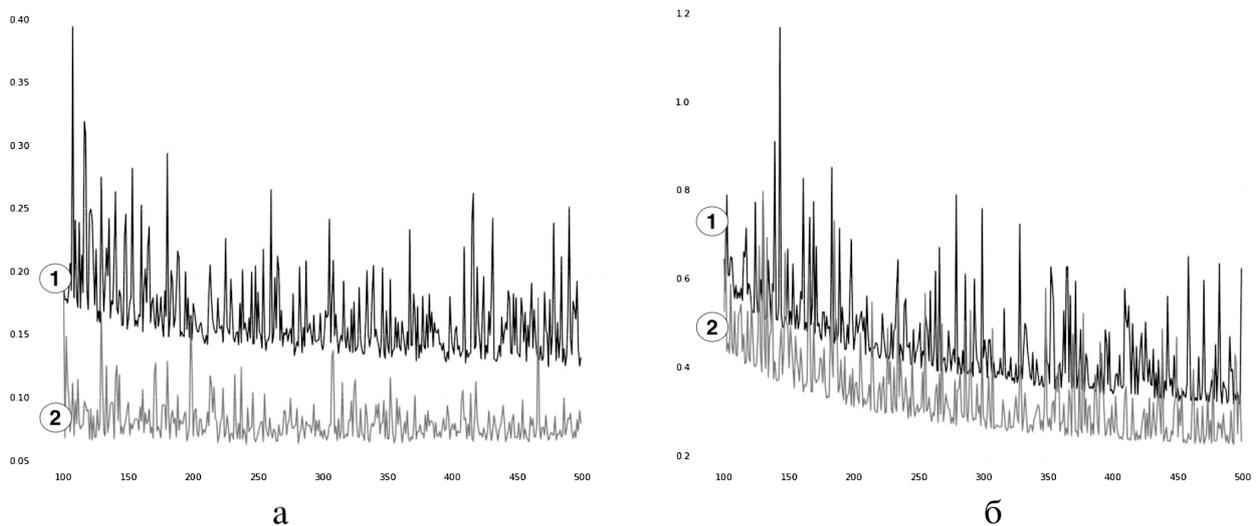
Сначала данная задача решалась с использованием двухкомпонентного образца выборки (временные ряды горизонтальной и вертикальной компонент отклика). С помощью такого подхода удалось достаточно точно решить задачу с числом варьируемых параметров, не превышающим три. На рисунке 3 представлены графики изменения среднеквадратичных потерь в зависимости от номера эпохи при вариации: угла наклона (а), высоты (б), расстояния между трещинами (в). В данных задачах ошибка распознавания не превышала 10 %.

Для решения обратных задач с большим числом неизвестных параметров рассматривался подход с четырехкомпонентным объектом выборки (временные и частотные ряды горизонтальной и вертикальной компонент отклика). Такой подход дал значительно меньшую ошибку. На рисунке 4 приведено сравнение графиков для MSE в двух представленных походах для вариации угла (а) и высоты (б) трещин.

При вариации сразу шести параметров (высота, угол наклона трещин, их плотность расположения, горизонтальная протяженность и две компоненты пространственного положения) была получена хорошая сходимость значений функционала при росте эпохи обучения. Ошибка не превышала 20 %.



**Рис. 3.** Графики зависимости метрики MSE от эпохи обучения при неизвестном угле наклона (а), высоте трещин (б), расстоянии между трещинами (в)



**Рис. 4.** Сравнение зависимости метрики MSE от эпохи обучения для двухкомпонентного (1) и четырехкомпонентного (2) объектов выборки для неизвестного угла наклона (а) и высоты трещин (б)

### Заключение

Результаты проведенного исследования свидетельствуют о хорошей применимости методов машинного обучения в задачах обнаружения как одиночных трещин, так и пластов макротрещин. Было рассмотрено использование сверточных нейронных сетей, которые обучались на решениях прямых задач с использованием математического моделирования с применением сеточно-характеристического метода на неструктурированных расчетных сетках.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Claerbout J. F. Coarse Grid Calculations of Waves in Inhomogeneous Media with Application to Delineation of Complicated Seismic Structure. *Geophysics*. 1970;36(3):407–418.
2. Etgen J., Gray S., Zhang Y. An Overview of Depth Imaging in Exploration Geophysics. *Geophysics*. 2009;74:WCA5–WCA17.
3. Jiao K., Huang W., Vigh D., Kapoor J., Coates R., Starr E. W., Cheng X. Elastic Migration for Improving Salt and Subsalt Imaging and Inversion. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 2012;1–5.
4. Luo Y., Tromp J., Denel B., Calandra H. 3D Coupled Acoustic-Elastic Migration with Topography and Bathymetry Based on Spectral-Element and Adjoint Methods. *Geophysics*. 2013;78(4):S193–S202.
5. Zhang C., Frogner C., Araya-Polo M., Hohl D. Machine-learning Based Automated Fault Detection in Seismic Traces. *EAGE Conference and Exhibition*. 2014.
6. Araya-Polo M., Dahlke T., Frogner C., Zhang C., Poggio T., Hohl D. Automated Fault Detection without Seismic Processing. *The Leading Edge*. 2017;36(3):194–280.

7. Nikitin I. S., Golubev V. I., Golubeva Y. A., Miryakha V. A. Numerical Comparison of Different Approaches for the Fractured Medium Simulation. *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2021;214:87–99.
8. Новацкий В. К. *Теория упругости*. М.: Мир; 1975. 872 с.
9. Golubev V. I., Shevchenko A. V., Khokhlov N. I., Nikitin I. S. Numerical Investigation of Compact Grid-Characteristic Schemes for Acoustic Problems. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021;1902(1):012110.
10. Coates R. T., Shoenberg M. Finite-Difference Modeling of Faults and Fractures. *Geophysics*. 1995;60:1514–1523.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-2

## ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СТЕФАНА ДЛЯ ИСКУССТВЕННОГО ЛЕДОВОГО ОСТРОВА

Д. С. Конов<sup>а</sup>, М. В. Муратов<sup>б</sup>, В. А. Бирюков<sup>в</sup>

Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Российская Федерация

<sup>а</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4309-4660>, [konov1999@gmail.com](mailto:konov1999@gmail.com)

<sup>б</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4958-8856>, [max.muratov@gmail.com](mailto:max.muratov@gmail.com)

<sup>в</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0109-8567>, [biryukov.vova@gmail.com](mailto:biryukov.vova@gmail.com)

*Аннотация:* в работе изучается двумерный ледовый остров в Арктике. Сформулирована задача Стефана для изменения фазового состояния вещества. Разработан численный метод ее решения. Этот метод модифицирован для учета эффектов внешней среды, которые не учитывает физическая модель. Кратко обсуждены идеи для учета солености воды и льда, скорости ветра, а также течения воды, эти подходы реализованы в программе. Для разработанной модели проведен ряд численных экспериментов на ледовом острове. Для этого ледового острова найдено распределение температур в разных постановках, в том числе с учетом массива донного грунта глубиной 10 метров после намораживания и через 150 дней в экстремальных условиях.

*Ключевые слова:* искусственные ледовые острова, задача Стефана, параболические уравнения, квазилинейное уравнение теплопроводности.

*Благодарности:* работа выполнена в рамках проекта Российского научного фонда № 19-11-00023.

*Для цитирования:* Конов Д. С., Муратов М. В., Бирюков В. А. Численное решение задачи Стефана для искусственного ледового острова. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):14–19. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-2.

## NUMERICAL SOLUTION OF THE STEFAN PROBLEM FOR AN ARTIFICIAL ICE ISLAND

D. S. Konov<sup>a</sup>, M. V. Muratov<sup>b</sup>, V. A. Biryukov<sup>c</sup>

Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudnyi, Russian Federation

<sup>a</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4309-4660>, [konov1999@gmail.com](mailto:konov1999@gmail.com)

<sup>b</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-4958-8856>, [max.muratov@gmail.com](mailto:max.muratov@gmail.com)

<sup>c</sup> ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0109-8567>, [biryukov.vova@gmail.com](mailto:biryukov.vova@gmail.com)

*Abstract:* we studied a two-dimensional ice island in Arctic. A phase transition problem also called the Stefan problem is stated. A numerical method for solving it is developed. This method is modified to consider the environment effects which are not present in the physical model. We also briefly discuss approaches to including ice and water salinity, wind speed, and water currents as they are software-implemented. A series of numerical experiments for the ice island are conducted using the simulation model. The temperature fields inside the ice island after are found also taking into account the presence of a 10 m thick seabed soil after freezing and for various extreme environmental conditions.

*Keywords:* artificial ice islands, Stefan problem, parabolic equations, quasilinear heat conductivity equation.

*Acknowledgements:* this work is supported by the Russian Science Foundation, project No. 19-11-00023.

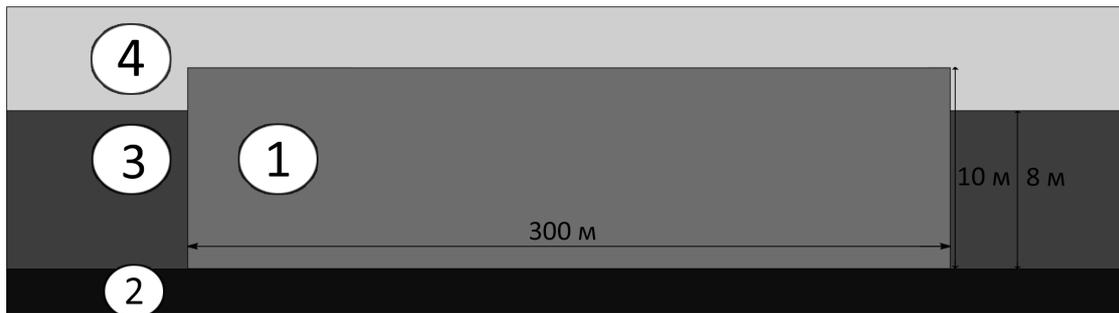
*Cite this article:* Konov D. S., Muratov M. V., Biryukov V. A. Numerical Solution of the Stefan Problem for an Artificial Ice Island. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):14–19. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-2.

### Введение

Сегодня особенно актуальны задачи освоения месторождений полезных ископаемых в Арктике. Тяжелые климатические условия и низкий уровень развития инфраструктуры региона делают классические методы менее привлекательными экономически, нежели метод искусственных островов [1].

Один из типов искусственных островов – грунтовые, но для их сооружения требуется перемещение материалов для отсыпки, ледовые же острова лишены этого недостатка. Кроме того, искусственные ледовые острова позволяют избежать проблем, которые свойственны конвенциональным методам освоения Арктики, например деформации подводной поверхности земли и ущерба водным биоресурсам [2]. Искусственные ледовые острова можно разделить на несколько типов: плавающие и опирающиеся на дно (гравитационные) [3]. Возведение и эксплуатация таких островов – это сложнейшая задача. В данной работе рассматриваются подходы для численного моделирования тепловых процессов в толще гравитационных ледовых островов и применение численной модели для прогнозирования их устойчивости.

В работе обсуждается двумерная модель ледового острова. Изображение острова представлено на рисунке 1. Теплофизические характеристики, которые использовались в численном моделировании, представлены в таблице (в системе СИ). Также считаем, что температура плавления льда  $T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ , а его удельная теплота плавления  $\lambda = 334\text{ кДж/кг}$ .



**Рис. 1.** Модель ледового острова. Расшифровка индексов веществ представлена в таблице

Таблица

Теплофизические свойства веществ (СИ)

№	Вещество	Плотность	Теплопроводность	Удельная теплоёмкость
1	Лед	917	0,591	2100
2	Донный грунт	2500	0,8	750
3	Вода	1000	2,22	4180
4	Воздух	1,60	0,022	–

**Математическая модель тепловых процессов**

Тепловые процессы в области, содержащей вещества в разных фазовых состояниях, могут приводить к превращению одних фаз в другие. Математически их взаимодействие описывается с помощью уравнений теплопроводности для каждой фазы и некоторого граничного условия на поверхности раздела фаз (условие Стефана). При этом форма и размер фаз изменяются со временем. Такая постановка задачи Стефана называется классической. Для таких задач доказано существование и единственность решения, а также непрерывная зависимость от начальных данных [4]. Аналитическое решение удастся получить для узкого класса простых задач, которые не представляют серьезного интереса. А численное решение может быть затруднено, так как в многомерном случае могут возникнуть сложности с явным отслеживанием границы. Поэтому переформулируем задачу Стефана в терминах теплосодержания (энтальпии). Тогда условие на границе выполнится автоматически и у нас останется квазилинейное уравнение теплопроводности, которое допускает решение методами сквозного счета.

Введем сначала энтальпию (теплосодержание):

$$Q = \begin{cases} \rho_S C_S T, & T < T_p \\ \rho_L C_L (T - T_p) + \rho_S C_S T_p + \rho_S \lambda, & T > T_p \end{cases}$$

В этой формуле  $T_p$  — температура фазового перехода,  $\rho_S, C_S, \rho_L, C_L$  — плотность и удельная теплоемкость. Укажем, что, в отличие от обратного преобразования, переход от температуры к энтальпии не является непрерывным. Всем промежуточным значениям теплосодержания соответствуют промежуточные состояния вещества, когда одна его часть находится в одном фазовом состоянии, а другая — в другом. Уравнения задачи Стефана в классической формулировке для двумерного случая тогда переписуются в виде:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k(Q) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(Q) \frac{\partial T}{\partial y} \right), \quad T = T(Q) \quad (1)$$

$$Q(x, y, t) |_{t=0} = Q(T_0(x, y, t) |_{t=0}) \quad (2)$$

$$\left( \alpha T + \beta \frac{\partial T}{\partial \vec{n}} \vec{n} \right) |_{\Gamma} = \gamma. \quad (3)$$

Этот вид будем называть энтальпийной формулировкой. Уравнение (1) — квазилинейное уравнение теплопроводности, (2) — переформулированное в терминах теплосодержания начальное условие. Уравнение (3) — смешанные граничные условия. Аналогичное уравнение можно записать и в трехмерном случае. Коэффициент теплопроводности для вещества с промежуточными значениями теплопроводности определим так, чтобы он был непрерывен:

$$k(Q) = \begin{cases} k_S, & Q < Q_- \\ k_S + (k_L - k_S) \cdot \frac{Q - Q_-}{Q_+ - Q_-}, & Q_- < Q < Q_+ \\ k_L, & Q > Q_+ \end{cases}$$

### Численная модель

Для решения задачи Стефана в энтальпийной формулировке в двумерном случае выбираем продольно-поперечную схему, также известную как схема Писмена–Рекфорда. Для аналогичной задачи она оказалась оптимальной по производительности [5], так как является безусловно спектрально устойчивой [6], что позволяет свободно выбирать шаг по времени, но при этом с помощью прогонки ее уравнения решаются за линейное по числу узлов время. Порядок аппроксимации по пространству и времени  $\tau^2, h^2$ . Тогда уравнение (1) в численном представлении переписывается:

$$\frac{\bar{Q}_{ml} - Q_{ml}^n}{\tau/2} = \Lambda_{xx} Q_{ml}^{n+1/2} + \Lambda_{yy} Q_{ml}^n$$

$$\frac{Q_{ml}^{n+1} - \bar{Q}_{ml}}{\tau/2} = \Lambda_{xx} Q_{ml}^{n+1/2} + \Lambda_{yy} Q_{ml}^{n+1}.$$

Где операторы численного дифференцирования:

$$\Lambda_{xx} Q = k_{m+\frac{1}{2}l} \frac{t_{m+1l} - t_{ml}}{h_x^2} + k_{m-\frac{1}{2}l} \frac{t_{m-1l} - t_{ml}}{h_x^2}$$

$$\Lambda_{yy} Q = k_{ml+\frac{1}{2}} \frac{t_{ml+1} - t_{ml}}{h_y^2} + k_{ml-\frac{1}{2}} \frac{t_{ml-1} - t_{ml}}{h_y^2}.$$

Значение сеточной функции температуры ( $t_{m+1l}$ ) получаем из сеточной функции теплопроводности.

В квазилинейном случае, так как коэффициент теплопроводности и теплоемкость зависят от фазового состояния вещества, перейти сразу на следующий временной слой, не проиграв в скорости (используя прогонку), можно только с помощью спуска к точному решению методом Ньютона и неявной аппроксимации градиентов искомой функции.

Трехмерная схема Писмена–Рекфорда уже не будет обладать безусловной устойчивостью. В этом случае можно ограничить шаг по времени, чтобы добиться устойчивости, или использовать устойчивую схему, например, Дугласа–Гана.

### Дополнения численного метода и программная реализация

При моделировании возникает ряд сложностей. Во-первых, надо учесть возможную сложную и переменную форму расчетной области. Отметим, что данный метод позволяет решать задачи для областей не только прямоугольной формы, но и произвольных ступенчатых областей [6, с. 367]. Поэтому можно аппроксимировать некоторую сложную форму расчетной области некоторой ступенчатой областью. Необходимо учитывать, что лед, тая в верхней части острова, может стекать вниз, таким образом изменяя вещество в конкретном узле сетки. Для этого после каждого шага можно проверять узел на условие таяния и в случае, если теплосодержание выше порогового, заменять вещество воздухом.

Во-вторых, необходимо учитывать течение воды, для этого можно всей растаявшей воде выше определенной температуры присвоить температуру, равную заданной.

Реализация всех этих эффектов подразумевает модификацию значений теплосодержания и вещества в узлах сетки после решения численных уравнений при достижении определенных условий.

Ветер и тепловой поток от атмосферы можно учесть, если обобщить коэффициент теплопроводности и использовать коэффициент теплоотдачи. Солнечную радиацию можно учесть либо с помощью неоднородности, либо с помощью увеличения температуры атмосферы, чтобы дополнительный тепловой поток совпадал с тепловым потоком от Солнца.

Соленость воды можно считать однородной, так как взаимодействие острова происходит только с малой поверхностью. Также необходимо учитывать, что сам лед может иметь переменную соленость. Так как полости с соленой водой внутри острова много меньше его характерных размеров, то их учет можно провести, изменив теплофизические характеристики льда.

Толщина льда в зависимости от скорости ветра и влияние солености на таяние льда более подробно рассмотрены в работах [7, 8].

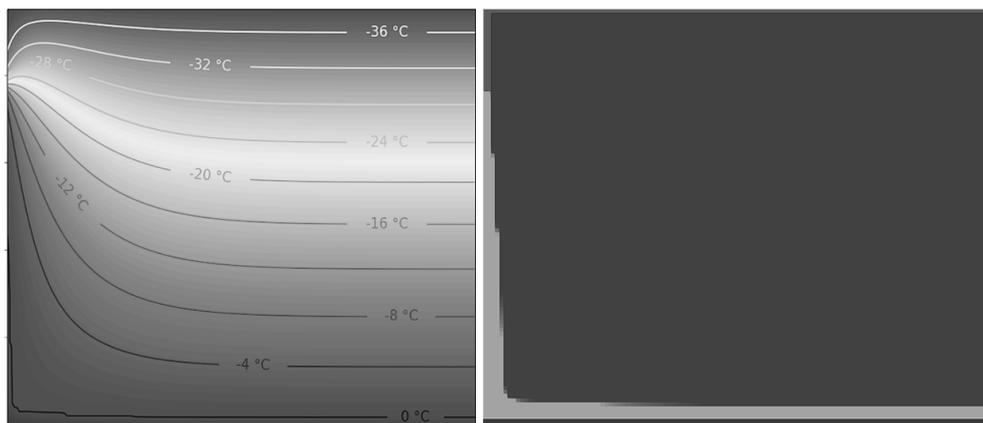
Задача решается в несколько этапов. Вначале происходит проверка корректности входных данных и строится равномерная сетка по переданным данным. После этого вычисляется начальное поле теплосодержаний. Далее происходит последовательный переход на следующие шаги по времени, при этом каждый шаг несколько раз решает уравнения методом прогонки, пока не будет достигнута требуемая точность. Каждый переход на промежуточный слой допускает параллельное выполнение. Для этого каждый шаг разбивается на ряд отдельных итераций, которые можно решить параллельно:  $i_x = 1, 2, \dots, N_x$  для первого полушага и  $i_y = 1, 2, \dots, N_y$  — для второго. Для распараллеливания используется OpenMP.

### Численные эксперименты

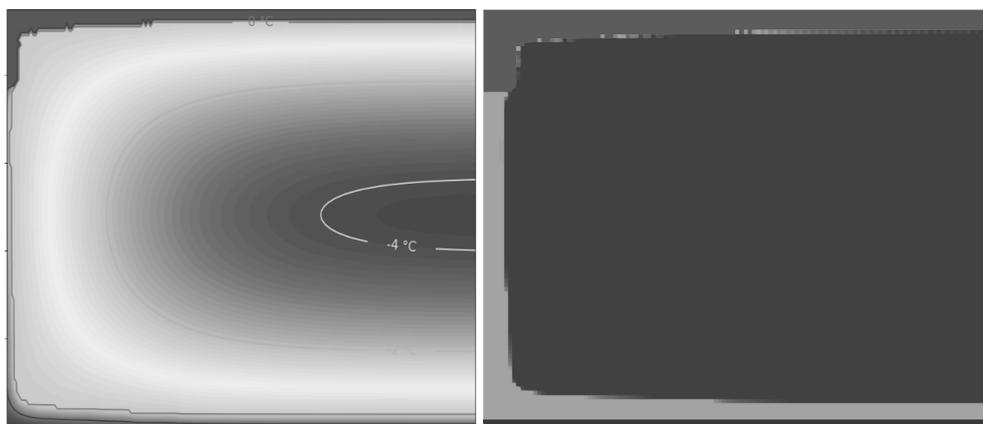
Далее перейдем к численным экспериментам на основе разработанной модели. Исследование состоит из двух расчетов. Сначала для определенной конфигурации ледового острова определяется распределение температуры в его толще после намораживания. После этого на полученном распределении ставятся эксперименты с целью протестировать устойчивость ледового острова. Теплофизические характеристики веществ в расчетах указаны в таблице. Были протестированы две конфигурации ледового острова. Расчетная область для задачи без промерзания грунта представляет собой массив из льда с геометрическими размерами острова, на границе которого расположены вода, донный грунт и воздух. Расчетная область для задачи с промерзанием донного грунта увеличена в два раза. Во всех экспериментах шаг по координате  $h_x = h_y = 0,05$  м и шаг по времени  $\tau = 50$  с. Расчетный период во всех случаях — 150 дней.

В первом эксперименте используется расчетная область без донного грунта. Начальная температура льда равна  $-10$  °С. Граничные условия — постоянная температура в точке контакта с воздухом, водой и донным грунтом, соответственно равная  $-40$  °С,  $+3$  °С,  $+5$  °С. После 150 дней установления провели два численных эксперимента, где начальные условия соответствуют финальному распределению температуры после начального расчета, а температура воздуха поменялась на  $+3$  °С. В первом расчете область уменьшается только сверху при таянии льда, а во втором — еще и с обеих сторон (учитывается перемешивание воды). Результаты представлены на рис. 2, 3, 4. Слева на этих рисунках можно видеть распределение температуры на краю острова, а справа — их форму.

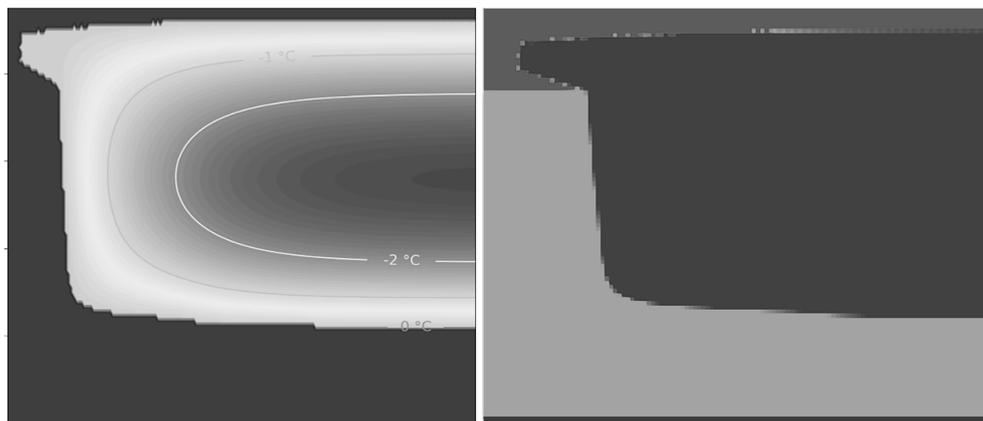
Из рисунка 6 видно, что смешивание воды ведет к быстрому таянию острова снизу. Дело в том, что граничное условие на постоянство температуры ведет к таянию тонкой прослойки воды на границе с дном. Далее постоянная температура воды гарантировала крупную разницу температур со льдом и как следствие — аномально большой тепловой поток через нижнюю грань. Для решения



**Рис. 2.** Ледовый остров после намораживания



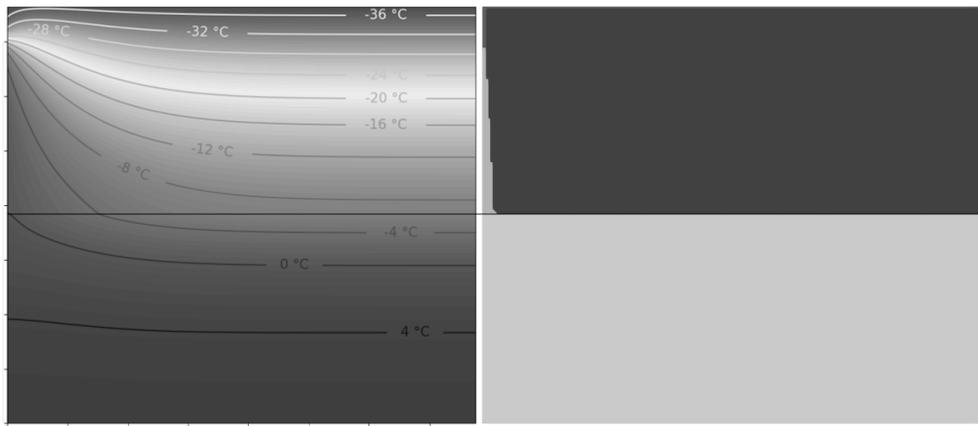
**Рис. 3.** Ледовый остров после 150 дней при температуре воздуха  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$  без учета смешивания воды



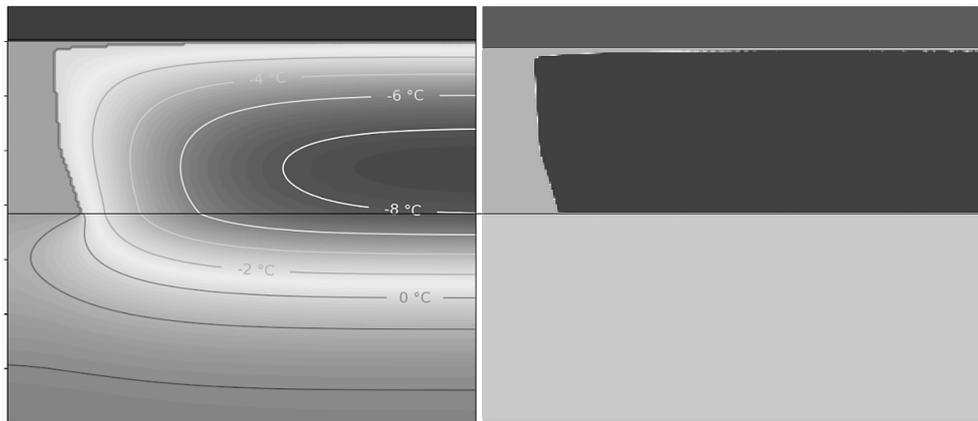
**Рис. 4.** Второй расчет. Ледовый остров после 150 дней при температуре воздуха  $+3\text{ }^{\circ}\text{C}$  с учетом смешивания воды

этой проблемы был проведен второй численный эксперимент. В нем используется область с грунтом. Условия на границе с воздухом и водой не изменяются, но тепловой поток установлен равным нулю по нижней и боковым граням массива донного грунта. Результаты представлены на рис. 5, 6.

Таким образом, в работе представлен метод моделирования эволюции ледовых островов, позволяющий изучить все основные факторы, влияющие на его таяние. С его использованием произведены численные эксперименты в разных постановках. На их основании подтверждена сезонность ледовых островов.



**Рис. 5.** Ледовый остров и массив донного грунта после намораживания



**Рис. 6.** Ледовый остров после 150 дней при температуре воздуха +10 °C с учетом смешивания воды и промерзания донного грунта

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Горгуца Е. Ю., Курило Е. Ю. Строительство искусственных ледовых островов в условиях Арктики. *Гидротехника. XXI век.* 2017;4:54–57.
2. Курило Е. Ю. Посадка искусственного ледового острова на дно в Карском море. *Alfabuild.* 2017;2(2):66-69.
3. C-CORE (2005). Ice Island Study. Final Report. Prepared for Minerals Management Service, US Department of the Interior. Prepared by C-CORE. Report No. R-05-014-241 v1.0, August 2005.
4. Мейрманов А. М. *Задача Стефана.* Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние; 1986. 240 с.
5. Албу А. Ф. *Применение методологии быстрого автоматического дифференцирования к решению задач управления тепловыми процессами с фазовыми переходами:* автореф. дис. д-ра физ.-мат. наук. 2016.
6. Самарский А. А. *Введение в численные методы.* Москва: Главная редакция физико-математической литературы издательства «Наука»; 1987. С. 359–367.
7. Comfort G., Abdelnour R. Ice Thickness Prediction: A Comparison of Various Practical Approaches. *CGU HS Committee on River Ice Processes and the Environment, 17th Workshop on River Ice 2013,* Edmonton, Alberta.
8. Nkoko Nossa A. Method for Prediction of Sea Ice Thickness Based on the Blowing Air Temperature and Speed. *Master Thesis at University of Liege,* 2015.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЫТЕСНЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ ПОРИСТЫХ СРЕД С УЧЕТОМ ХИМИЧЕСКИХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ МЕЖДУ ФАЗАМИ****В. Р. Душин<sup>1</sup>, В. Ф. Никитин<sup>1,2</sup>, Е. И. Скрылева<sup>1,2,a</sup>, М. Н. Макеева<sup>1,2</sup>, А. Н. Манахова<sup>1</sup>**<sup>1</sup> *Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, г. Москва, Российская Федерация*<sup>2</sup> *Федеральный научный центр «Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук», г. Москва, Российская Федерация*<sup>a</sup> *jennyne@yandex.ru*

*Аннотация:* в работе рассматриваются особенности математического моделирования процесса вытеснения нефти из пористого пласта с применением термохимических методов увеличения нефтеотдачи. Особенностью данных методов является то, что в результате экзотермической химической реакции между фильтрующимися флюидами температура нефти повышается, а вязкость падает, в результате чего ускоряется процесс вытеснения. Кислотная обработка заключается в нагнетании раствора кислот в пористый пласт при давлении ниже давления разрыва. Кислота растворяет часть породы и загрязнений, образуя расходящуюся от ствола скважины сеть каналов, в результате чего повышается проницаемость пористой среды. Продукты реакции, ввиду их высокой растворимости, не выпадают в осадок и после проведения кислотной обработки и запуска скважины выносятся вместе с продукцией скважины.

*Ключевые слова:* многофазные течения, фильтрация, фазовые переходы, методы увеличения нефтеотдачи.

*Благодарности:* работа поддержана грантом РФФИ № 20-07-00378.

*Для цитирования:* Душин В. Р., Никитин В. Ф., Скрылева Е. И., Макеева М. Н., Манахова А. Н. Моделирование вытеснения жидкостей из пористых сред с учетом химических взаимодействий между фазами. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):20–27. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-3.

**SIMULATION OF LIQUID DISPLACEMENT IN POROUS MEDIA AND INTERPHASE CHEMICAL INTERACTIONS****V. R. Dushin<sup>1</sup>, V. F. Nikitin<sup>1,2</sup>, E. I. Skryleva<sup>1,2,a</sup>, M. N. Makeeva<sup>1,2</sup>, A. N. Manahova<sup>1</sup>**<sup>1</sup> *Moscow State University, Moscow, Russian Federation*<sup>2</sup> *Federal State Institution “Scientific Research Institute for System Analysis of the Russian Academy of Sciences”, Moscow, Russian Federation*<sup>a</sup> *jennyne@yandex.ru*

*Abstract:* the paper deals with the simulation of oil displacement from a porous reservoir using thermochemical stimulation. An exothermic chemical reaction between the fluids increases the oil temperature and decreases the viscosity. As a result, the displacement is accelerated. Acidizing involves injecting an acid solution into a porous formation at a pressure below the fracture pressure. The acid dissolves part of the rock and contaminants, forming a network of channels diverging from the wellbore. It increases the permeability of the porous medium. The reaction products are highly soluble and do not precipitate. After acid injection and well startup, they are removed with the product.

*Keywords:* multiphase flows, filtration, phase transitions, oil recovery stimulation.

*Acknowledgements:* this work is as supported by RFBR, grant No. 20-07-00378.

*Cite this article:* Dushin V. R., Nikitin V. F., Skryleva E. I., Makeeva M. N., Manahova A. N. Simulation of Liquid Displacement in Porous Media and Interphase Chemical Interactions. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):20–27. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-3.

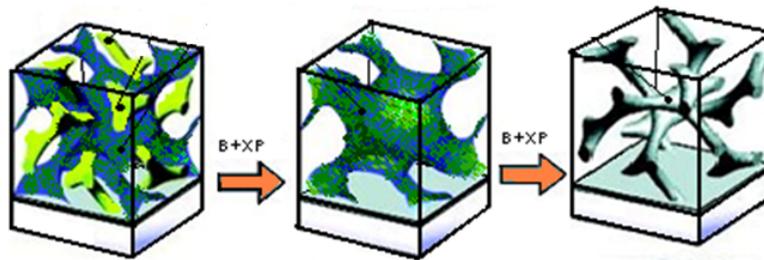
**Введение**

Фильтрационные течения вязких жидкостей в пористых средах являются определяющими в процессах добычи жидких полезных ископаемых. Отношение количества добытой нефти к первоначальному ее запасу в залежи называется коэффициентом нефтеотдачи. Коэффициент нефтеотдачи

зависит от геологического строения залежи, свойств породы, пластовых жидкостей и самой нефти. Существует множество методов увеличения нефтеотдачи пласта. Для повышения эффективности вытеснения углеводородов применяются в том числе химические методы:

- внутрипластовое горение, приводящее к повышению температуры и уменьшению вязкости вытесняемого углеводорода;
- добавление в вытесняющую жидкость реагента, частично растворяющего пористый известняковый скелет, таким образом, увеличивая пористость и проницаемость, — кислотная обработка.

При бурении и эксплуатации скважины проницаемость призабойной зоны снижается вследствие ее загрязнения буровым раствором в процессе бурения, наплыва мелких частиц породы, выпадения солей из пластовой жидкости и т.д. Кислотные обработки связаны с подачей на забой скважины под определенным давлением растворов кислот, которые под давлением проникают в имеющиеся в пласте мелкие поры и трещины и расширяют их. Одновременно с этим образуются новые каналы, по которым нефть может проникать к забою скважины.



**Рис. 1.** Кислотная обработка призабойной зоны

Сущность кислотной обработки призабойной зоны заключается в нагнетании кислотного состава в поровое пространство при давлении ниже давления разрыва. Кислотный состав растворяет часть породы и загрязнений, образуя расходящуюся от ствола скважины сеть расширенных каналов, увеличивая тем самым проницаемость пласта.

**Математическая модель**

Рассматривается двухфазная система флюидов в пористом скелете. Фазы флюида — нефть и вода; вода представляет собой в общем случае раствор химического реагента и продуктов реакции в воде. Химическая реакция идет между скелетом и реагентом; часть скелета способна реагировать, часть нейтральна. Реакция выглядит как растворение, поскольку продукты реакции переходят в водную фазу; она экзотермична, и за счет подъема температуры вязкость нефти уменьшается, что также вносит вклад в ее просачивание.

Предполагаются следующие допущения. Истинные плотности всех компонент постоянны (жидкости малосжимаемы), хотя при химической реакции возможно уплотнение либо разуплотнение среды. Вязкости всех жидкостей, кроме нефти, постоянны; вязкость нефти зависит от температуры флюида. В общем случае модель двухтемпературная. Химическая реакция при температуре выше критической протекает значительно быстрее динамических процессов в среде; при температуре ниже критической не протекает вообще. Оценка зависимости проницаемости от пористости ведется на основе формулы Кармана–Козени.

**Кинетическая модель**

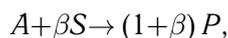
Обозначим пористость среды  $\varphi$ , ее начальное состояние  $\varphi_0$ , тогда зависимость  $\varphi$  от объемной доли  $\alpha_s$  твердой фазы, способной к растворению, выглядит следующим образом:

$$\frac{1 - \varphi}{1 - \varphi_0} = \frac{1 - \alpha_{s0}}{1 - \alpha_s}; \quad 0 \leq \alpha_s \leq \alpha_{s0}; \quad \varphi_0 \leq \varphi \leq \varphi_0 + \alpha_{s0} (1 - \varphi_0). \tag{1}$$

Если обратить выражение (1), получится зависимость  $\alpha_s$  ( $\varphi$ ):

$$\alpha_s = 1 - (1 - \alpha_{s0}) \frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi}. \tag{2}$$

Реакцию в терминах реагирующих масс скелета (S), реагирующего агента (A) и продуктов реакции (P) можно записать следующим образом:



что значит: на единицу массы агента приходится  $\beta$  массы растворенного скелета, отчего получается  $1 + \beta$  массы продуктов реакции. На тепловыделение расходуется химический потенциал агента; прочие химические потенциалы для простоты описания приравняются к нулю. Реакция необратима.

Интенсивность расхода массы агента в химической реакции:

$$J = J_f(T) \cdot (Y_a \rho s_w \varphi) \cdot (\alpha_s (1 - \varphi)).$$

Здесь  $s_w$  — водонасыщенность,  $Y_a \rho$  — масса реагента в водной фазе,  $\rho$  — плотность водной фазы, а  $Y_a$  — массовая доля реагента.

$$J = J_f(T) Y_a \rho s_w \varphi \alpha_s (1 - \varphi); \quad J_f = A \cdot \exp\left(-\frac{\theta}{T}\right) \cdot H, \quad H = \begin{cases} 1, & T \geq T_m \\ 0, & T < T_m \end{cases}. \quad (3)$$

Физический смысл  $J$  — изменение массы активного агента за счет химической реакции в единице объема пористой среды в единицу времени.

Изменение пористости за счет растворения скелета должно вести к изменению абсолютной проницаемости среды  $K$ . Для оценки этого изменения привлечем модель Кармана–Козени. Зависимость такова:

$$\frac{K}{K_0} = \left(\frac{\varphi}{\varphi_0}\right)^3 \cdot \left(\frac{1 - \varphi_0}{1 - \varphi}\right)^2, \quad (4)$$

где  $K_0$  — начальное значение проницаемости. Поскольку имеем алгебраическую зависимость  $\varphi(\alpha_s)$  (1), то и зависимость (4) фактически является алгебраической зависимостью  $K = K(\alpha_s)$ .

### Уравнения баланса массы

Баланс массы фазы скелета:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_s (1 - \varphi)) = -\beta J. \quad (5)$$

Баланс массы водной фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w s_w \varphi) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_w s_w \varphi u_w) = \beta J. \quad (6)$$

Баланс массы нефтяной фазы:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_o s_o \varphi) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_o s_o \varphi u_o) = 0. \quad (7)$$

Баланс массы активного химического агента:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w Y_a s_w \varphi) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_w Y_a s_w \varphi u_w) = -J. \quad (8)$$

Баланс массы продуктов реакции:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w Y_p s_w \varphi) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho_w Y_p s_w \varphi u_w) = (1 + \beta) J. \quad (9)$$

Где  $\rho_s$  — истинная плотность материала скелета,  $\rho_w$  — истинная плотность всей водной фазы,  $\rho_o$  — истинная плотность нефти;  $u_w$  — компонента истинной скорости водной фазы,  $u_o$  — компонента истинной скорости просачивания нефти;  $t$  — время,  $x$  — пространственная координата;  $Y_a$  — массовая доля активного агента,  $Y_p$  — массовая доля продуктов реакции,  $s_o$  — нефтенасыщенность. Заметим, что по определению насыщенностей и условию того, что имеются лишь две фазы флюида, можно записать:

$$s_o = 1 - s_w = 1 - s; \quad s = s_w. \quad (10)$$

Обозначим  $F_w$  — поток массы водной фазы,  $F_o$  — поток массы нефтяной фазы, а также суммарный поток флюида  $F$  (сумма потоков масс). Определим их как:

$$\begin{cases} F_w = \varphi \rho_w s u_w \\ F_o = \varphi \rho_o (1-s) u_o \\ F = F_w + F_o \end{cases} \quad (11)$$

Перепишем уравнения (8), (9), (6) и (7) в терминах массовых потоков и упрощая, если это возможно. Получим:

$$\rho_w s \varphi \frac{\partial Y_a}{\partial t} + F_w \frac{\partial Y_a}{\partial x} = -Y_a \left( \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w s \varphi) + \frac{\partial F_w}{\partial x} \right) - J = -(1+Y_a \beta) J; \quad (12)$$

$$\rho_w s \varphi \frac{\partial Y_p}{\partial t} + F_w \frac{\partial Y_p}{\partial x} = -Y_p \left( \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w s \varphi) + \frac{\partial F_w}{\partial x} \right) + (1+\beta) J = (1+\beta(1-Y_p)) J; \quad (13)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_w s \varphi) + \frac{\partial F_w}{\partial x} = \beta J; \quad (14)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_o (1-s) \varphi) + \frac{\partial F_o}{\partial x} = 0. \quad (15)$$

Баланс массы всего флюида (сумма уравнений (14) и (15) — сумма фаз):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho_f \varphi) + \frac{\partial}{\partial x} (F_w + F_o) = \beta J, \quad (16)$$

где плотность флюида рассчитывается на основе нелинейной зависимости плотности водной фазы от массовых долей  $Y_a, Y_p$ :

$$\rho_f = \rho_w (Y_a, Y_p) s + \rho_o (1-s). \quad (17)$$

### Динамическая модель просачивания

Используем модель Дарси с относительными проницаемостями, так что скорости просачивания фаз в терминах потоков массы будут зависеть от их мобильностей и градиента давления в межпоровом пространстве:

$$F_w = -\rho_w \frac{K k_w}{\mu_w} \frac{\partial p}{\partial x}; \quad F_o = -\rho_o \frac{K k_o}{\mu_o} \frac{\partial p}{\partial x}. \quad (18)$$

Здесь  $p$  — давление в межпоровом пространстве,  $k_w(s)$  — относительная проницаемость водной фазы, а  $k_o(s)$  — нефтяной. Динамические вязкости водной и нефтяной фаз  $\mu_w$  и  $\mu_o$  соответственно; последнюю считаем зависящей от температуры. Мобильностями фаз назовем коэффициенты перед градиентом давления в формулах (18), обозначим их  $M_w$  и  $M_o$ ; для них получим выражения:

$$M_w = \frac{K k_w(s)}{\nu_w}, \quad M_o = \frac{K k_o(s)}{\nu_o(T)}, \quad (19)$$

где  $\nu_w, \nu_o$  — кинематические вязкости фаз. Суммируя уравнения (18), получим модель для суммарного потока фильтрации; коэффициент в соответствующем законе равен суммарной мобильности  $M$ :

$$F = -M \frac{\partial p}{\partial x}; \quad M = M_w + M_o. \quad (20)$$

Из моделей просачивания (18) и (20) следует, что потоки массы фаз удобно выразить через суммарный поток массы флюида и долю мобильности соответствующей фазы; последняя зависит лишь от насыщенности и температуры и не зависит от абсолютной проницаемости:

$$F_w = f(s, T) F, \quad F_o = (1-f(s, T)) F, \quad f(s, T) = \frac{M_w(s)}{M_w(s) + M_o(s, T)}. \quad (21)$$

Зависимость  $f(s, T)$  (доля мобильности водной фазы) называется также функцией Леверетта.

Относительные проницаемости фаз зависят от водонасыщенности как монотонные функции в общем случае. В модели Брукса–Кори они выражаются через приведенную водонасыщенность  $S$ .

$$k_w(s) = k_w^0 S^{n_w}, \quad k_o(s) = k_o^0 (1-S)^{n_o}, \quad S = \frac{s-s_w^r}{1-s_w^r-s_o^r} \quad (22)$$

В модели (22)  $k_w^0, k_o^0$  — положительные константы, меньшие 1;  $n_w, n_o$  — положительные степени, большие 1;  $s_w^r, s_o^r$  — остаточные насыщенности фаз. В общем случае последние могут зависеть от температуры и пористости.

### Тепловой баланс

С учетом пренебрежения потоками кинетической энергии по сравнению с тепловой и с учетом малости работы сил объемного расширения (жидкости и скелет состоят из несжимаемых материалов) баланс тепловой энергии в скелете и во флюиде может быть записан как:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s (1-\varphi) h_s) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_s (1-\varphi) \frac{\partial T_s}{\partial x} \right) - \beta J h_s + A_T (T_f - T_s) \\ \frac{\partial}{\partial t} (\rho_w \varphi s h_w + \rho_o \varphi (1-s) h_o) + \frac{\partial}{\partial x} (F_w h_w + F_o h_o) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda_f \varphi \frac{\partial T_f}{\partial x} \right) + \beta J h_s + A_T (T_s - T_f) \end{cases} \quad (23)$$

Здесь  $h_s, h_w, h_o$  — внутренняя (тепловая и химическая) энергия фаз, включая фазу скелета, в расчете на единицу массы,  $\lambda_s, \lambda_f$  — теплопроводность материала фаз,  $T_s, T_f$  — температура фаз,  $A_T$  — коэффициент межфазного кондуктивного теплообмена. Считаем формально, что реакция проходит в фазе флюида, так что межфазный обмен энергией за счет потока массы идет на внутренней энергии скелета.

Перейдем в систему координат, связанную с фронтом реакции, тогда система (23) переписывается следующим образом:

$$\begin{cases} 0 = \frac{d}{dx} \left( \lambda_s (1-\varphi) \frac{dT_s}{dx} \right) - \beta J h_s + A_T (T_f - T_s) \\ \frac{d}{dx} (F_w h_w + F_o h_o) = \frac{d}{dx} \left( \lambda_f \varphi \frac{dT_f}{dx} \right) + \beta J h_s + A_T (T_s - T_f) \end{cases} \quad (24)$$

Введем предположение термически толстого слоя скелета: физическая толщина превышает термическую, т.е. температура скелета перед фронтом реакции равна начальной температуре скелета (прогрев идет медленно из-за большого объема скелета).

В таком приближении можно считать  $T_s$  константой, и тогда первое уравнение оказывается вырожденным.

### Аналитическое решение

Найдём аналитическое решение. Рассмотрим второе уравнение системы (24):

$$\frac{d}{dx} (F_w h_w + F_o h_o) = \frac{d}{dx} \left( \lambda_f \varphi \frac{dT_f}{dx} \right) + \beta J h_s + A_T (T_s - T_f). \quad (25)$$

Внутренняя энергия флюида составлена из энергий его фаз, а последние — из компонент. Только при активном агенте имеем теплоту его образования (химический потенциал); теплоемкости же все считаем постоянными, так что имеем:

$$\begin{cases} h_w = C_{fw} T + h_a Y_a \\ h_o = C_{fo} T \\ h_s = C_s T \end{cases}.$$

Здесь  $h_a$  — химический потенциал (энтальпия образования при 0 К) агента,  $C_s$  — удельная теплоемкость скелета,  $C_{fo}$  — удельная теплоемкость нефтяной фазы,  $C_{fw}$  — удельная теплоемкость водной фазы.

В предположении постоянства скорости (25) примет вид:

$$\lambda_f \frac{d^2 T_f}{dx^2} - U_c C_f \frac{dT_f}{dx} = -J \left( F_w h_a \frac{(1+Y_a \beta)}{f F \varphi} + \frac{\beta h_s}{\varphi} \right) + \widetilde{A}_T (T_f - T_0),$$

где:

$$U_c C_f = s u_w C_{fw} + \rho_o (1-s) u_o C_{fo}, \quad \widetilde{A}_T = \frac{A_T}{\varphi}, \quad Q = F_w h_a \frac{(1+Y_a \beta)}{f F \varphi} + \frac{\beta h_s}{\varphi}, \quad T_s = T_0$$

$$\lambda_f \frac{d^2 T_f}{dx^2} - U_c C_f \frac{dT_f}{dx} = -JQ + \widetilde{A}_T (T_f - T_0) \tag{26}$$

$$J = \begin{cases} 0, & \text{при } x \leq 0 \\ J_f(T) Y_a \rho_s \varphi (1 - \alpha_s), & \text{при } 0 < x \leq \Delta x \\ 0, & \text{при } x \geq \Delta x \end{cases}$$

$\Delta x$  – условный размер зоны химической реакции.

Граничные условия для (26) таковы:

- 1)  $x \rightarrow -\infty: T_f = T_0, \frac{dT_f}{dx} = 0,$
- 2)  $x \rightarrow +\infty: \frac{dT_f}{dx} = 0.$

Общее решение (26):

$$T_f - T_0 - \frac{JQ}{\widetilde{A}_T} = C_1 e^{b_1 x} + C_2 e^{b_2 x}, \tag{27}$$

где  $b_1$  и  $b_2$  – корни характеристического уравнения.

$$b_{1,2} = \frac{U_c C_f}{2 \lambda_f} \left( 1 \pm \sqrt{1 + \frac{4 \widetilde{A}_T \lambda_f}{U_c^2 C_f^2}} \right), \quad \begin{matrix} b_1 > 0 \\ b_2 < 0 \end{matrix} \tag{28}$$

Коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  будем определять из граничных условий в каждой из рассмотренных областей. Размер зоны реакции не может быть выбран произвольным образом:

$$\Delta x = \frac{U \rho_s (1 - \varphi) \alpha_s}{\beta J}.$$

С учётом граничных условий получим уравнение для определения  $F_c$ :

$$\frac{\widetilde{A}_T \Delta x}{U_c Q} (T_2 - T_0) = -\frac{b_2}{b_1 - b_2} \left( 1 - e^{-b_1 \frac{U_c}{J}} \right). \tag{29}$$

В случае, когда отсутствуют потери, т.е.  $\widetilde{A}_T = 0$ , получим:

$$z^2 \theta = 1 - e^{-z^2},$$

где  $z = U_c \sqrt{\frac{C_f}{\lambda_f J}}, \theta = \frac{C_f}{Q} (T_2 - T_0)$  – безразмерная температура реакции.

Запишем полученное уравнение для средней скорости реакции  $U_c$  в безразмерном виде с параметром  $a = \frac{\widetilde{A}_T}{J C_f}$  ( $a = 0$  – отсутствие потерь):

$$a \theta = \frac{1}{2} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + 4 \frac{a}{z^2}}} \right) \left( 1 - e^{-\frac{z^2}{2} \left( 1 + \sqrt{1 + 4 \frac{a}{z^2}} \right)} \right). \tag{30}$$

$a$  характеризует отношение энергоотвода в пористую среду к общему энерговыделению в процессе химической реакции.

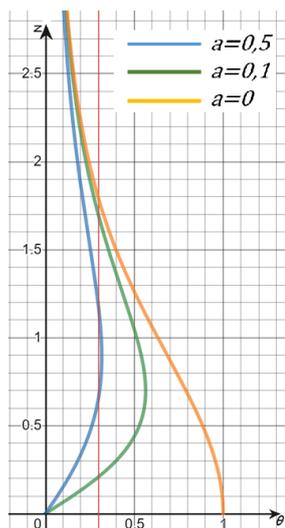


Рис. 2. Зависимость скорости реакции от температуры для различных значений параметра  $a$

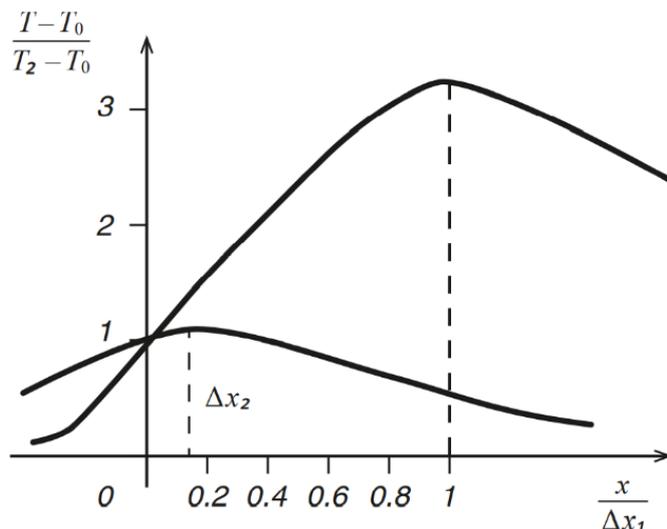


Рис. 3. Высокотемпературный и низкотемпературный режимы реакции

### Результаты

Чтобы проиллюстрировать смысл параметра  $a$ , проведем некоторые преобразования. При этом будем учитывать, что справедлива следующая оценка для температуры флюида:  $T_* = T_0 + \frac{Q}{C_f}$ .

$$a = \frac{\widetilde{A}_T}{JC_f} = \frac{\widetilde{A}_T(T_* - T_0)}{JC_f(T_* - T_0)} = \frac{\widetilde{A}_T(T_* - T_0)}{JQ}. \quad (31)$$

Формула (31) показывает, что параметр  $a$  фактически имеет порядок отношения тепловой энергии, отводимой от единицы объема в результате теплопотерь в пористый скелет, к тепловой энергии, выделяемой в той же единице объема в результате экзотермической реакции.

Из графика (рис. 2) видно, что при данном значении  $\theta$ , лежащем в физически реальной области  $0 < \theta < 1$ , для  $a = 0$  существует только одно положительное значение скорости горения  $z$ .

При  $\theta > 1$  не существует действительных решений, так как эти значения  $\theta$  соответствуют температурам, превышающим адиабатическую температуру реакции. При таких условиях распространение процесса невозможно.

При  $a > 0$  уравнение (30) имеет два положительных решения при  $0 < \theta < \theta_{max}(a) < 1$ .

При  $\theta > \theta_{max}$  реакция распространяться также не может, потому что температура не может быть достигнута ввиду влияния потерь.

При наличии потерь, когда  $0 < \theta < \theta_{max}$ , могут существовать два значения скорости горения. Решение, соответствующее большему значению скорости реакции, отвечает устойчивому режиму распространения. Решение, соответствующее меньшему значению скорости, отвечает другому режиму распространения фронта экзотермической реакции.

На рисунке 2 показаны распределения температуры, соответствующие двум скоростям распространения реакции для значений  $\theta = 0.3$ ;  $a = 0.1$ .

Как видно из рисунка 3, одним и тем же граничным условиям при наличии потерь энергии на прогрев пористой среды могут соответствовать два различных режима распространения реакции: высокотемпературный, при котором температура в зоне реакции существенно выше температуры реакции, и низкотемпературный, при котором температура в зоне реакции не поднимается высоко за счет интенсивного теплоотвода, зато среда перед зоной реакции прогрета существенно выше в результате большой средней теплопроводности за счет влияния скелета.

Низкотемпературные режимы распространения фронта реакции характеризуются более низкой скоростью, они встречаются также и в других условиях, например при ржавлении металлов, гниении органики и т. п.

Однако в предположении термически толстого слоя пористого скелета реакция, вероятнее, будет происходить в низкотемпературном режиме.

### Заключение

Разработана математическая модель для описания вытеснения нефти из пористого пласта с учётом химического воздействия на пористый скелет. Рассмотрены связь пористости с проницаемостью и долей твёрдой фазы, способной к растворению, особенности реакции и интенсивности расхода массы агента. Описаны уравнения баланса массы, теплового баланса, динамическая модель просачивания, основанная на законе Дарси, с учётом капиллярных эффектов на границе фаз и изменения вязкости нефти в результате экзотермической реакции.

Получено аналитическое решение задачи в стационарном случае, в предположении равенства и постоянства массовых скоростей и удельных теплоемкостей флюидов и в предположении термически толстого слоя.

Получена зависимость скорости реакции от температуры реакции. Показано, что возможны два режима протекания реакции: высокотемпературный и низкотемпературный. В предположении термически толстого слоя пористого скелета реакция, вероятнее, будет происходить в низкотемпературном режиме.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Скрылева Е. И., Никитин В. Ф., Смирнов Н. Н., Душин В. Р. Моделирование использования химического реагента для интенсификации просачивания нефти. *Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе: сборник трудов международной конференции, посвященной дню рождения великого русского математика академика П.Л. Чебышёва*, 2019. С. 122–132. Режим доступа: [http://chebconf.ru/wp-content/uploads/2019/12/cheb19proc\\_xindy.pdf](http://chebconf.ru/wp-content/uploads/2019/12/cheb19proc_xindy.pdf).
2. Коленкина Е. И., Никитин В. Ф., Логвинов О. А., Смирнов Н. Н. *Фильтрационные течения в пористых средах*: монография. Москва: Изд-во ФГУ ФНЦ НИИСИ РАН; 2020. 73 с.
3. Хахимов М. Ю., Мотузов И. С. *Методическое руководство к подготовке дипломного проекта по геологическому изучению, подсчёту запасов и доразведке месторождений нефти и газа (с применением компьютерных технологий обработки геологогеофизических данных)*. М.: Изд-во РУДН; 2011. 120 с.
4. Зверев И. Н., Смирнов Н. Н. *Газодинамика горения*. М.: Изд-во Моск. ун-та; 1987. 307 с.
5. Kaviany M. *Principles of Heat Transfer in Porous Media*. NY: Dover Publications Inc.; 1988.
6. Бетелин В. Б., Смирнов Н. Н. О проблеме импортонезависимости в нефтегазовой отрасли и машиностроении России. *Математика и информационные технологии в нефтегазовом комплексе: тезисы докладов международной конференции, посвященной дню рождения великого русского математика академика П.Л. Чебышёва*, 2016. С. 18. Режим доступа: [http://dvm-system.org/static\\_data/papers/rBakhtinChebconf2016.pdf](http://dvm-system.org/static_data/papers/rBakhtinChebconf2016.pdf).

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-4

## СОЗДАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ТЕХНОЛОГИИ СКАНИРОВАНИЯ БУМАЖНЫХ ДОКУМЕНТОВ РОСГИДРОМЕТА

**Е. В. Колесников, В. М. Шаймарданов**

*Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации — мировой центр данных, г. Обнинск, Российская Федерация*  
*evgeni-kolesnikov@mail.ru*

*Аннотация:* настоящая статья посвящена вопросам обеспечения долговременной сохранности, оперативного обслуживания и удаленного многопользовательского доступа к архивным документам на бумажных носителях по гидрометеорологии и смежным с ней областям (метеорологии, гидрологии, аэрологии, океанологии, агрометеорологии, гелиогеофизики и др.). Данные, собранные в такого рода документах, представляют собой информацию о состоянии окружающей природной среды, её загрязнении, полученную в результате деятельности Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Данная информация имеет не только историческую ценность, но и практический интерес для деятельности органов власти, физических и юридических лиц.

В работе представлена автоматизированная информационная технология (АИТ) сканирования архива документов на бумажной основе. АИТ имеет многоуровневую архитектуру и решает следующие задачи: автоматизация учета, структуризация информации, долговременное хранение и удаленный доступ к электронным копиям бумажных документов с помощью поискового модуля, интегрированного в автоматизированную информационную систему (АИС). АИТ использует современное программное и аппаратное обеспечение. В работе описан весь технологический процесс сканирования бумажных документов и проведена оценка полученных результатов в ходе эксплуатации АИТ на примере одной из организаций Росгидромета — Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации — мирового центра данных (ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»).

*Ключевые слова:* бумажные документы, сканирование документов, автоматизированная информационная технология, автоматизированная информационная система, электронный архив, удаленный доступ, модель описания данных, метаданные, долговременное хранение, Госфонд Росгидромета.

*Для цитирования:* Колесников Е. В., Шаймарданов В. М. Создание автоматизированной информационной технологии сканирования бумажных документов Росгидромета. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):28–38. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-4.

## DEVELOPMENT OF AN AUTOMATED PAPER DOCUMENTS SCANNING TECHNOLOGY FOR THE RUSSIAN METEOROLOGICAL SERVICE

**E. V. Kolesnikov, V. M. Shaimardanov**

*Russian Research Institute for Hydrometeorological Information, World Data Center,  
Obninsk, Russian Federation*  
*evgeni-kolesnikov@mail.ru*

*Abstract:* this paper considers the issues of long-term preservation, maintenance, and remote multi-user access to paper records in hydrometeorology and related fields (meteorology, hydrology, aerology, oceanology, agrometeorology, heliogeophysics, etc.). Such records contain the environment and pollution status data acquired by the Russian Meteorological Service. This information is not only of historical value but also of practical interest for the authorities and other consumers.

The paper presents an automated information technology (AIT) for scanning historical paper records. AIT has a multi-level architecture and performs the following: automated document tracking, data structuring, long-term storage, and remote access to digital copies of paper documents with an integrated search module of an automated information system (AIS). The AIT uses advanced software and hardware. The paper describes the entire process of paper records scanning and evaluates the results of the AIT pilot operation at the Russian National Research Institute for Hydrometeorological Information, World Data Center.

*Keywords:* paper records, document scanning, automated information technology, automated information system, electronic archive, remote access, data models, metadata, long-term storage, Russian Meteorological Service National Archive.

*Cite this article:* Kolesnikov E. V., Shaimardanov V. M. Development of an Automated Paper Documents Scanning Technology for the Russian Meteorological Service. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):28–38. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-4.

## **Введение**

На сегодняшний день сеть организаций – структурных подразделений Росгидромета (НИУ, управления и центры Гидрометеорологической службы (УГМС, ЦГМС)) обладает большими объемами бумажных документов по гидрометеорологии и смежным с ней областям. На начало 2021 года в Госфонде Росгидромета накоплено 2 754 038 единиц хранения на бумажной основе, хранящихся в специализированных архивохранилищах, с поддержанием необходимых температурно-влажностных условий долговременного хранения [1, 2]. Ежегодно количество документов в Госфонде Росгидромета в среднем увеличивается на 25 000 единиц хранения. Таким образом, идет непрерывное пополнение архива по всем организациям.

Ведение Госфонда на бумажных носителях является надежным способом долговременного хранения при условии соблюдения всех методических рекомендаций архивного дела [3]. Однако существует проблема получения информации, связанная с ограниченным тиражом (1–3 экземпляра) бумажных документов, достаточно длительным по сегодняшним меркам процессом их поиска в архивохранилище с последующей выдачей конечному пользователю при личном посещении архива. Также существует проблема многократного использования, особенно актуально это для документов в единственном экземпляре, которая ведет к их физическому износу и потере ценной информации, как частичной, так и полной. Таким образом, обслуживание бумажными документами пользователей является ресурсозатратным процессом.

Данный вид документов является ценным и востребованным материалом для различной деятельности современного общества. Гидрометеорологическая информация используется в таких сферах деятельности, как строительство, сельское хозяйство, энергетика, авиация, нефтегазовая промышленность, наука и юриспруденция, что говорит об актуальности проблем долговременного хранения и удаленного доступа. В связи с этим необходимо разработать и организовать технологический процесс перевода информации с бумажных носителей на современные технические носители. Это позволит в полном объеме решить актуальные на сегодняшний день проблемы архивного дела, а именно: упрощение доступа к информации, обеспечение сохранности подлинников за счет их постепенного вывода из оборота, организация удаленного доступа к электронному фонду [4].

На сегодняшний день наиболее быстрым и эффективным способом перевода информации в электронный вид является процесс сканирования бумажных документов. В результате полученные электронные объекты можно будет классифицировать, описать и поместить в электронный архив для долговременного хранения. Благодаря клиент-серверной архитектуре АИС и метаданным объектов хранения будет организован удаленный многопользовательский доступ к необходимым пользователю электронным копиям бумажных документов.

В статье представлено полное описание всех этапов автоматизированной технологии оцифровки бумажных документов Госфонда Росгидромета и реализующей ее АИС ЭФОД.

## **Анализ исходного состояния архива бумажных документов**

Прежде чем перейти к разработке технологического процесса, необходимо провести предварительный анализ исходного состояния архива бумажных документов Росгидромета, а именно: состава и качества бумажного архива, его объема (количества единиц хранения) – и провести классификацию по видам наблюдений.

Результаты анализа крайне важны, поскольку без стопроцентной оценки состава архива и вариативности видов документов нельзя переходить к подготовке технического задания и инженерно-техническим работам, т.к. ошибочное представление (оценка) повлечет за собой неправильные расчеты временных, вычислительных и человеческих ресурсов, а также ошибочный выбор необходимого для сканирования оборудования.

Например, при неправильном проведении классификации архивных документов в процессе разработки информационной модели описания будут учтены не все аспекты, что приведет в дальнейшем к серьезным правкам в базе данных и логике работы АИС. Вследствие чего уже проделанную работу по формированию электронного архива (могут быть уже сканированы, описаны и загружены несколько тысяч объектов хранения) придется выполнять заново. Поэтому была проведена тщательная, кропотливая, пусть и затратная по времени работа перед непосредственным процессом сканирования документов.

В этой работе были задействованы преимущественно сотрудники, ответственные за фонд данных: архивариусы, персонал, обслуживающий пользователей, специалисты смысловых гидрометеорологических подразделений и методического сопровождения сети Росгидромета.

В результате проведенного анализа сформирована информационная база, позволяющая перейти к разработке ключевой составляющей технологии оцифровки бумажных документов – модели описания бумажных документов. Модель описания представляет собой совокупность полей (метаданных), каждое из которых описывает конкретное свойство объекта хранения. Создание модели описания обеспечивает однозначную идентификацию каждого объекта хранения в АИС и определяет его как уникальную единицу хранения электронного и бумажного хранилищ.

В ходе работы по классификации документов и оценке объемов были использованы нормативные и руководящие документы, проведены интервью с сотрудниками, работающими с фондом, и специалистами в области гидрометеорологии и смежных с ней дисциплин. В итоге получена следующая классификация видов массивов архива бумажных документов Росгидромета:

- метеорологические таблицы и ежемесячники;
- гидрологические ежегодники;
- отчеты научно-исследовательских судов (НИС);
- таблицы аэрологических наблюдений (ТАЭ);
- спутниковые снимки;
- документы по загрязнению окружающей среды;
- климатические справочники;
- исторические данные (летописи ГГО);
- зарубежная информация и т.д.

В следующем разделе подробно охарактеризован процесс создания модели описания, достаточной для точного определения каждого объекта в среде долговременного хранения.

### **Модель описания бумажных документов**

На основе изучения архива бумажных документов (оценки объемов и классификации документов) разработана модель описания бумажных документов.

Основная идея заключается в том, чтобы выделить минимально достаточное количество свойств бумажных документов, необходимых для однозначного определения каждого объекта хранения как уникальной единицы и достаточного смыслового содержания, которые в дальнейшем может использовать пользователь, составив соответствующий поисковый запрос к базе данных АИС ЭФОД [4].

Выделенные критерии, составляющие модель описания бумажных документов фонда гидрометеорологических данных, раскрывают как свойства документа, так и контент — смысловое содержимое документа, что в совокупности позволяет идентифицировать каждый объект хранения.

Отметим, что перед тем, как пользователи смогут составлять поисковые запросы для получения интересующих их документов, необходимо проиндексировать каждый оцифрованный бумажный документ в единой базе мета-описаний объектов хранения АИС ЭФОД в соответствии с разработанной моделью описания.

Для реализации данного процесса разработан программный компонент, позволяющий через веб-интерфейс пополнить базу мета-информацией об объектах хранения. Пользователю предоставлены поля как с фиксированными, заранее заполненными списками, например, дисциплина, вид наблюдений, в которых он выбирает значение из списка, так и текстовые поля для заполнения в свободной форме, например, район наблюдений.

Использование полей с фиксированным набором данных (тезаурусов) позволяет пользователю облегчить задачу по составлению поискового запроса, поскольку ему не нужно будет задумываться, какие гидрометеорологические дисциплины и виды наблюдений используются для описания бумажных

документов, а также сократит время подготовки запроса.

В таблице представлена разработанная модель описания АИС ЭФОД. Столбец «Название поля» несет информацию о кратком названии атрибута модели описания. «Описание поля» вносит пояснение в значение названия поля. «Тип данных» – это тип данных, определяющий значение в базе данных (числовые, символьные, дата и время, логические и т.д.). «Обязательность к заполнению» указывает на обязательность заполнения конкретного атрибута модели описания в базе данных. «Несколько значений» обозначает, что данный атрибут может иметь несколько значений. Например, один документ может относиться к нескольким дисциплинам (метеорология и океанография).

Таблица

## Перечень метаданных

№	Название поля	Описание	Тип данных
<b>Блок «Идентификатор»</b>			
1	Код документа (уникальный идентификатор объекта)	<i>Автоматически заполняется на основе заполненных полей:</i> <i>Категория документа</i> <i>Дисциплина</i> <i>Вид наблюдения</i> <i>Номер инвентарной книги</i> <i>Инвентарный номер</i>	текст
2	Номер инвентарной книги	Поле для формирования кода документа	числовой
3	Инвентарный номер	Поле для формирования кода документа	числовой
4	Категория документа	Поле для формирования кода документа <i>Заполняется из словаря</i>	текст
5	Код дисциплины	Поле для формирования кода документа <i>Содержит код гидрометеорологической дисциплины</i> <i>Заполняется из словаря</i>	текст
6	Код вида наблюдений	Поле для формирования кода документа <i>Содержит код вида наблюдений</i> <i>Заполняется из словаря</i>	текст
<b>Блок свойств</b>			
7	Организация	Название организации, выпустившей документ	текст
8	Название документа	Имя документа в АИС ЭФОД	текст
9	Авторы/редакторы	Авторы документа	текст
11	Язык издания	Язык(и), на котором издан документ <i>Заполняется из словаря</i>	текст
11	Страна	Страна <i>Заполняется из словаря</i>	текст
12	Место издания / издательство	Издатель документа	текст
13	Год издания	Год, в котором издан документ	числовой
14	Вид представления	Вид, в котором представлена структура документа (таблица, карта, атлас, ежегодник и т.д.) <i>Заполняется из словаря</i>	текст
15	Количество страниц/листов	Количество страниц документа	числовой
16	Том	Номер тома	текст
17	Выпуск	Номер выпуска	текст
18	Серия	Номер серии	текст
19	Часть	Номер части	текст
20	Доступ	Тип доступа (открытый, для служебного пользования) <i>Заполняется из словаря</i>	текст
21	Способ получения	Способ получения информации (платный, бесплатный) <i>Заполняется из словаря</i>	текст

№	Название поля	Описание	Тип данных
22	Владелец информации	Владелец документа (УГМС, НИИ)	текст
<b>Блок «Контент»</b>			
23	Дисциплина	Содержит название гидрометеорологической дисциплины <i>Заполняется из словаря</i>	текст
24	Вид наблюдений	Содержит название вида наблюдений <i>Заполняется из словаря</i>	текст
25	Параметры	Содержит перечень параметров наблюдений, входящих в состав документа	текст
26	Массив	Название массива, к которому принадлежит документ <i>Заполняется из словаря</i>	текст
27	Начало наблюдений	Дата начала наблюдений	дата
28	Конец наблюдений	Дата окончания наблюдений	дата
29	Район наблюдений	Район, в котором проводились наблюдения	текст
30	Дополнительная информация	Дополнительная информация включает в себя особенности документа, такие как дополнительные виды наблюдений, которые являются уточнением, пояснением <i>Заполняется из словаря</i>	текст

Структура модели описания бумажных документов состоит из 3 блоков и 30 полей.

**Блок «Идентификатор»** позволяет определить каждый оцифрованный документ как уникальную единицу хранения в АИС.

Поле «Код документа» позволяет идентифицировать, определять каждый сканированный документ, помещенный в среду долговременного хранения, и предоставлять пользователю по запросу. Данное поле имеет кодовую структуру, состоящую из совокупности соответствующих кодов полей: номера инвентарной книги, инвентарного номера документа, категории документа, кода дисциплины и кода вида наблюдений (рис. 1).

В основе кода документа лежит инвентарный номер. Было бы логично использовать его в качестве кода документа, так как он позволяет идентифицировать объект хранения в автоматизированной системе, однако в случае фонда гидрометеорологических бумажных документов инвентарный номер не является сквозным и обнуляет номерной ряд в каждой из инвентарных книг, имеющих в фонде. Поэтому к нему добавлен инвентарный номер книги, в состав которой он входит.

Кроме того, код документа был расширен добавлением в идентификатор категории документа, дисциплины и вида наблюдений. Это расширение позволяет организовать поиск по крупным категориям для удобства просмотра массивов однотипных документов в одном рабочем пространстве.

Например, по такой схеме можно получить массив востребованных документов, таких как гидрологические ежегодники или метеорологические ежемесячники. Также это снижает нагрузку на аппаратную часть технологии за счет увеличения размерности каталожной структуры и уменьшения количества файлов внутри каждого каталога.

В **блок свойств** помещены описания «паспортных» данных объекта хранения, которые включают: название документа, организации, подготовившей документ, год издания и т.д.

«Организация» — данное поле определяет организацию, департамент, структуру, которая выпустила данный документ, например, ФГБУ «Северное УГМС».

«Название документа» — определяет название книги.

«Язык издания» — сообщает, на каком языке издан документ.

«Страна» указывает территориальную принадлежность содержимого документа. Например, если это Россия/СССР, то данные, которые содержит документ, относятся к данной стране.

«Год издания» — год, в котором был издан документ (не путать с периодом наблюдений).

«Вид представления» документа определяет тип издания, например, таблица, карта, ежегодник, бюллетень, справочник и т.д.

«Количество страниц», «Том», «Выпуск», «Серия», «Часть» — поля, говорящие сами за себя.

«Способ получения» — поле определяет условия предоставления документа: на платной или бесплатной основе.

«Владельцем информации» является организация Росгидромета — НИУ или УГМС.

**Блок «Контент»** включает в себя смысловую часть документа, а именно:

- гидрометеорологические дисциплины;
- виды наблюдений с указанием параметров и периода наблюдений;
- районы (территорию), где проведены наблюдения;
- массив гидрометеорологических документов, к которому принадлежит текущий объект хранения.



**Рис. 1.** Процесс формирования кода документа

Отметим, что поля «Дисциплина» и «Вид наблюдений» – связанные поля отношением «один ко многим», т.е. у одной дисциплины может быть несколько видов наблюдений. Например, у дисциплины «Гидрология» имеются следующие виды наблюдений:

- наблюдения на реках и каналах;
- наблюдения на озерах и водохранилищах;
- наблюдения на болотах.

В поисковом веб-интерфейсе все связанные списки меняют свои значения в зависимости от выбора значения в родительском списке. Таким образом, использование заполненных ранее словарей существенно облегчает процесс составления поискового запроса.

Поле «Дополнительная информация» введено в связи с некоторыми особенностями документов, а именно, когда один документ совмещает в себе несколько видов наблюдений, что не позволяет хранить в данном поле агрегированные данные.

В таблицу модели описания не вошли так называемые служебные поля:

- «Имя оператора, формировавшего описание документа»;
- «Дата создания мета-описания»;
- «Статус объекта»;
- «Дата загрузки объекта хранения в автоматизированную систему»;
- «Количество просмотров и загрузок документов».

Эти поля включены в структуру базы данных, несут информацию для обслуживания системы и используются для подготовки отчетности и контроля за жизнедеятельностью АИС ЭФОД.

Разработанная информационная модель описания бумажных гидрометеорологических документов позволяет формализовать процесс наполнения базы данных и реализовать разработку автоматизированной информационной технологии.

### Описание этапов технологии

Работа с документами выполняется с помощью АИС ЭФОД. Она предоставляет инструменты для каждого из этапов оцифровки бумажных документов Единого государственного фонда данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении (ЕГФД).

Первым этапом работ по оцифровке бумажного фонда данных является подготовка документов. На этом этапе формируются описи передаваемых из архивохранилища на участок сканирования доку-

ментов. Участок состоит из сканеров различных форматов (А0-А5) для сканирования разных типов бумажных документов. На этом же этапе специалист формирует уникальный идентификатор, который входит в опись. На основе уникальных идентификаторов формируются штрих-коды, наклеиваемые на документы, которые объединяются в партии по форматам для оптимизации процесса сканирования.

После завершения процесса сканирования контролер образов проводит проверку отсканированных образов. В случае когда документ соответствует всем критериям качества, электронный образ документа становится доступен для индексирования — формирования мета-описания в базе данных, иначе документ возвращается на повторное сканирование и процесс проверки повторяется до тех пор, пока не будет достигнут приемлемый результат.

Индексатором является специалист, владеющий предметной областью, способный грамотно описать документ. С целью минимизации ошибок каждый документ индексируют два специалиста независимо друг от друга, при этом не имея доступа к информации, кто из группы индексаторов описывает текущий документ. Как показала практика, такой подход позволил на порядок сократить количество ошибок.

Далее описанный документ проходит этап верификации. На этом этапе верификатор проверяет мета-описание, при этом он уже знает, кто из группы индексаторов описывал документ, соответственно, может указывать на ошибки в работе индексаторов и улучшать результат их работы.

Одновременно с переходом на этап индексирования физический бумажный документ возвращается в архивохранилище с очень важным нововведением, а именно: каждому документу присваиваются координаты стеллажа, ряда и полки в специализированной базе данных.

Ранее местоположение документов в архивохранилище можно было найти в книге учета и с помощью алфавитного указателя, что требовало некоторого количества времени. Теперь же этот процесс в разы проще и быстрее, поскольку имеется база данных координат на технических носителях.

На заключительном этапе верифицированная партия документов проходит экспертизу, после чего принимается в фонд. Параллельно подготавливаются соответствующие документы.

### **Описание автоматизированной информационной системы электронного фонда оцифрованных бумажных документов Росгидромета**

АИС ЭФОД предназначена для автоматизации всех этапов процесса оцифровки архивных бумажных документов различных форматов о состоянии окружающей природной среды и её загрязнении и формирования электронного фонда документов.

Структурно система представляется в виде компонент (рис. 2), каждой из которых соответствует определенное множество логически связанных между собой функций по обработке и представлению данных, относящихся к той или иной сущности предметной области.

Система состоит из следующих структурных компонент:

- средств хранения файлов различного типа;
- контрольно-принимающей системы;
- среды обеспечения сетевого взаимодействия компонентов.

Средства хранения файлов в зависимости от их назначения включают в себя различные программные и технические средства:

- базу данных с метаданными, предназначенную для хранения атрибутивных карт со ссылками на каталог файлов с электронными копиями различных видов бумажных документов;
- ленточную библиотеку, предназначенную для хранения многостраничных tiff-файлов (образы документов) и csv-файлов, содержащих атрибутивные карты [5];
- систему хранения данных, обеспечивающую хранение многостраничных PDF-файлов образов документов и csv-файлов, содержащих атрибутивные карты;
- контрольно-принимающую систему, которая представляет собой непосредственно программные компоненты АИС ЭФОД, обеспечивающие реализацию функций обработки и подготовки данных для последующего их сохранения на средствах, описанных выше;
- среду обеспечения сетевого взаимодействия, необходимую для коммутации структурных компонент системы между собой с целью передачи необходимых данных.

Система реализована в виде трёхзвенной архитектуры:

- сервер базы данных;
- сервер приложений;

- клиентское приложение.

Клиентское приложение развёрнуто на специализированных рабочих местах: специалиста предварительной обработки документов, технолога, контролера документов, контролера образов, специалиста группы сканирования, индексатора, специалиста по обработке бумажных документов (ОБД), администратора системы, аналитика, верификатора. Внешние пользователи подключаются к АИС ЭФОД посредством сети Интернет через брандмауэр, настроенный по сетевым правилам. АИС ЭФОД предоставляет несколько АРМов, каждый из которых предназначен для выполнения определённых функций.

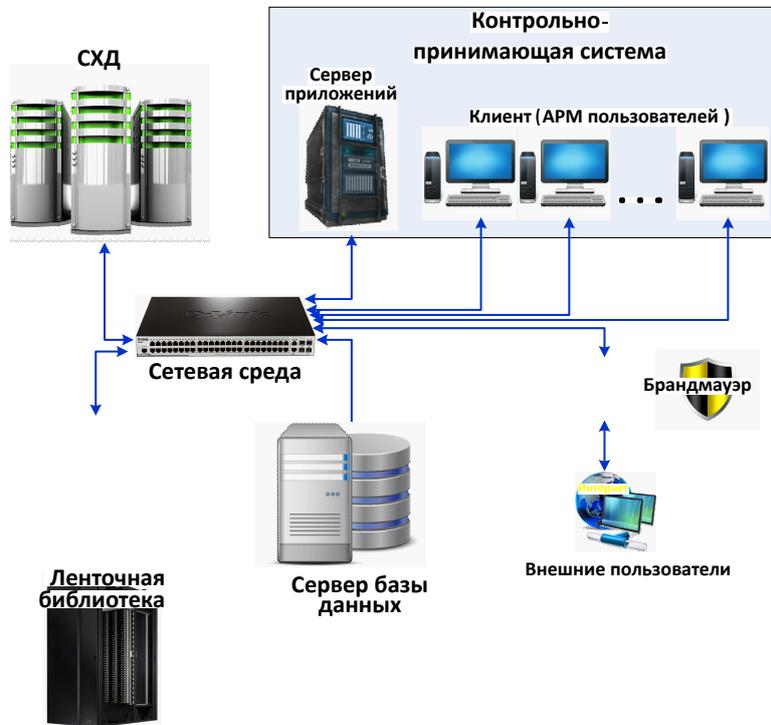


Рис. 2. Структурная схема АИС ЭФОД

АРМ специалиста предварительной обработки документов предоставляет возможность фиксации выдачи из архива материалов и возврата, добавления в систему новых (на основе уникального идентификатора) документов, печати штрих-кодов на основании вышеуказанного идентификатора, назначения документу профиля.

АРМ технолога позволяет формировать список документов, отобранных для коррекции метаданных, выполнить его редактирование из списка, просмотреть метаданные, введенные каждым из индексаторов, указать, какой вариант является правильным, либо задать свой вариант, сохранить документ. Кроме того, АРМ технолога обеспечивает возможность редактирования справочных данных, управления профилями постобработки, управления документами, просмотра и печати статистики.

АРМ контролера документов обеспечивает:

- отображение списка выданных из архива документов, предоставление возможности ручного добавления документа в список, вывод на печать описи переданных и принятых из архива бумажных документов;
- отображение списка неразобранных документов, предоставление возможности назначения документу профиля, отображение списка профилированных документов с возможностью внесения корректив;
- автоматическое распределение документов по специалистам группы сканирования на основании форматов сканеров и загрузки (и плана на смену), предоставление возможности печати описи переданных на сканирование документов;
- отображение списка отсканированных документов;
- отображение списка переданных и обработанных на этапе ОБД документов, предоставление возможности печати описи;
- отображение списка возвращенных в архив документов, предоставление возможности печати

описи возвращаемых документов.

АРМ контролера образов позволяет сформировать список документов, отобранных для их контроля, открыть для просмотра, выполнить просмотр облегченного образа. В случае необходимости АРМ предоставляет возможность корректировки страницы документа, получения для редактирования исходного (облегченного) образа данной страницы, внесения изменений каким-либо внешним графическим редактором, замены исходного образа страницы в системе с последующим обновлением многостраничного pdf-документа.

АРМ специалиста группы сканирования предоставляет пользователю список документов, переданных ему для работы, а также возможность отметки о ее начале/завершении.

АРМ индексатора предоставляет пользователю для просмотра список документов, переданных ему на индексирование. Данный АРМ обеспечивает параллельную индексацию одного и того же документа разными индексаторами, а также предоставляет возможность внести значения атрибутов в ее карточку для сохранности.

АРМ администратора предоставляет возможность работы с системой, включая:

- управление пользователями системы и их ролями;
- редактирование справочных данных;
- управление профилями постобработки;
- управление профилями сканеров;
- управление документами, включая редактирование атрибутов, изменение статуса, постановку/снятие отметок о передаче на этапы сканирования, сшивки/расшивки, отправку на проверку, отметку о готовности для записи в хранилище;
- просмотр и печать статистики.

АРМ верификатора позволяет пользователю сформировать список документов, отобранных для коррекции метаданных, открыть на редактирование документ из списка, просмотреть метаданные, введенные каждым из индексаторов, указать, какой вариант является правильным, либо задать свой вариант, сохранить документ.

АРМ аналитика предоставляет возможность вывода на печать или экран всех статистических отчетов, предусмотренных в системе.

### Порядок работы с автоматизированной информационной системой

Работа начинается с авторизации в системе путём ввода логина и пароля в форму (рис. 3). После чего пользователю будет предоставлен соответствующий интерфейс для работы с системой. В зависимости от роли пользователя интерфейс подразделяется на: специалиста предварительной обработки документов, технолога, контролера документов, контролера образов, специалиста группы сканирования, индексатора, специалиста по обработке бумажных документов, администратора системы, аналитика, верификатора, поиск.

ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД»

Электронный фонд  
отсканированных документов

Вход в систему

Имя пользователя:

Пароль:

Версия: 1.18.353

© 2018 Росгидромет

Рис. 3. Форма авторизации в АИС ЭФФД

Для поиска документов необходимо заполнить поля поисковой формы (рис. 4). После чего АИС обработает значения, введенные пользователем, и сформирует запрос к базе данных.

The screenshot shows a search form with the following fields and options:

- Дисциплина:** Dropdown menu.
- Вид наблюдений:** Dropdown menu with a red 'X' icon.
- Период наблюдений:** Fields for 'с:' and 'по:' followed by a dropdown menu 'Любой год из указанного периода'.
- Параметры среды (ключевые слова):** Text input field and a dropdown menu 'Все значения'.
- Дополнительная информация:** Text input field.
- Расширенный поиск:** A blue link.
- Название книги:** Text input field.
- Категория документа:** Dropdown menu with a red 'X' icon.
- Страна:** Dropdown menu with a red 'X' icon.
- Организация:** Text input field.
- Место издания, издательство:** Text input field.
- Год издания:** Text input field.
- Вид представления:** Dropdown menu with a red 'X' icon.
- Район наблюдений:** Text input field.
- Доступ:** Dropdown menu with a red 'X' icon.
- Способ получения:** Dropdown menu with a red 'X' icon.
- Язык издания:** Text input field.
- Искать документы:** Dropdown menu.
- Очистить:** Button.
- Найти:** Button.

**Рис. 4.** Краткая и расширенная формы поиска документов

В соответствии с запросом пользователю формируется и выводится результат в виде списка документов (рис. 5).

The screenshot displays search results for 'Государственный водный кадастр. Ежегодные данные о режиме и ресурсах поверхностных вод суши. (ГВК. ЕДС)'. The top bar indicates 'Количество документов: 28' and a 'Печать' button.

**Summary of search results:**

- ЕДС Азербайджанское УГМС 1985г. т.VII ч.1,2**  
ГИДРОЛОГИЯ Наблюдения на реках и каналах  
Дополнительно: Наблюдения на озерах и водохранилищах.  
Период наблюдений: 1985.01.01 - 1985.12.31
- ЕДС Армянское УГМС 1985г. т. XIII ч. 1,2**  
ГИДРОЛОГИЯ Наблюдения на реках и каналах  
Дополнительно: Наблюдения на озерах и водохранилищах.  
Период наблюдений: 1985.01.01 - 1985.12.31
- ЕДС Верхне- Волжское УГМС 1984г Т.1 вып.23 ч.1**  
ГИДРОЛОГИЯ Наблюдения на реках и каналах  
Дополнительно:  
Период наблюдений: 1984.01.01 - 1984.12.31
- ЕДС Верхне- Волжское УГМС 1985г т.1 вып.23 ч.1**  
ГИДРОЛОГИЯ Наблюдения на реках и каналах  
Дополнительно:  
Период наблюдений: 1985.01.01 - 1985.12.31
- ЕДС Грузинское УГМС 1985г. т.VI ч.1,2**  
ГИДРОЛОГИЯ Наблюдения на реках и каналах  
Дополнительно: Наблюдения на озерах и водохранилищах.  
Период наблюдений: 1985.01.01 - 1985.12.31
- ЕДС Забайкальское УГМС 1984г Т.1 вып.20 ч.1,2**  
ГИДРОЛОГИЯ Наблюдения на реках и каналах  
Дополнительно: Наблюдения на озерах и водохранилищах.  
Период наблюдений: 1984.01.01 - 1984.12.31
- ЕДС Западно-Сибирское УГМС 1985г Т.1 вып.10 ч.1**  
ГИДРОЛОГИЯ наблюдения на реках и каналах

**Details of the selected document (ЕДС Верхне- Волжское УГМС 1985г т.1 вып.23 ч.1):**

- СССР/Россия / Верхне-Волжское территориальное управление по гидрометеорологии и контролю природной среды
- Издано: Обнинск: ВНИИГМИ- МЦД / Верхне- Волжское УГМС /1987
- ГИДРОЛОГИЯ Наблюдения на реках и каналах
- Дополнительно:  
Период наблюдений: 1985.01.01 - 1985.12.31  
Район наблюдений: Бассейн Волги (верхнее течение).
- Параметры среды (ключевые слова): Мутность воды; Ледовые явления; Толщина льда; Температура воды; Оценка надежности подсчета стока воды; Высота снега на льду; Наносы; Уровень воды; Расход воды;
- Вид представления: Ежегодник
- Объем: 470
- Место хранения документов:  
Доступ: Открытый фонд
- Способ получения документа: Платный
- Документ из ВНИИГМИ-МЦД
- Количество просмотров:
- Количество скачиваний:

Buttons: [Загрузить](#), [Смотреть](#)

**Рис. 5.** Результат работы поискового модуля

Документ можно скачать или открыть для просмотра в браузере. Для этого достаточно кликнуть по необходимому документу в списке.

### Заключение

В данной статье было представлено описание текущего состояния фонда бумажных документов Росгидромета, обозначены проблемы и способы их решения, а также охарактеризована автоматизированная информационная технология электронного фонда оцифрованных архивных бумажных

документов Росгидромета. Новизна и актуальность данной разработки заключается в том, что она позволяет решить для Росгидромета существующие на сегодняшний день задачи: долговременное хранение архивных документов и доступ, в том числе и удаленный сетевой, к одному и тому же документу большому числу пользователей с применением современных программных средств и технологий.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ведение ЕГФД, архивация данных, обслуживание данными и информацией ЕГФД. Сведения о составе Госфонда Росгидромета. Режим доступа: <http://meteo.ru/egfd/142-about-egfd>.
2. Шаймарданов В. М., Шаймарданов М. З. Развитие автоматизированной архивной системы Росгидромета. *Ученые записки РГГМУ*. 2014;36:60–66.
3. РД 52.19.568-2010 *Организация комплектования, учета, хранения и использования документов архивного фонда данных о состоянии окружающей среды, ее загрязнении*.
4. Шаймарданов В. М., Долгих С. Г. Создание технологии управления данными в автоматизированной архивной системе. *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2014;572:162–174.
5. Шаймарданов В.М. Развитие архивной системы данных о состоянии окружающей природной среды на базе современных технических средств. *Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова*. 2011;563:179–190.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-5

## МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАДЕЖНОСТИ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ С СИСТЕМАМИ БЕЗОПАСНОСТИ

**А. И. Перегуда**

*Обнинский институт атомной энергетики — филиал федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Обнинск, Российская Федерация  
Pereguda@iate.obninsk.ru*

*Аннотация:* статья посвящена созданию математической модели надежности информационных систем, состоящих из объекта защиты и систем безопасности. С целью получения несанкционированного доступа к объекту защиты предпринимаются различного рода атаки. Поскольку процесс функционирования рассматриваемой системы имеет стохастический характер, математической моделью является случайный процесс, представляющий собой наложение альтернирующих процессов восстановления. Анализ модели, рассматриваемой в этой статье, позволил получить асимптотические соотношения оценок: вероятность того, что на цикле регенерации рассматриваемого процесса аварии не было; среднее время наработки информационной системы до аварии.

Статья рассчитана на инженеров и математиков, занимающихся вопросами надежности систем, состоящих из объекта защиты и систем безопасности.

*Ключевые слова:* информационная система, функция распределения, система безопасности, останов, авария, альтернирующий процесс восстановления, среднее время наработки, цикл регенерации.

*Для цитирования:* Перегуда А. И. Математическая модель надежности информационных систем с системами безопасности. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):39–43. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-5.

## A SIMULATION MODEL OF IT SYSTEMS WITH SECURITY FEATURES

**A. I. Pereguda**

*Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering, a branch of the National Research Nuclear University MEPhI, Obninsk, Russian Federation  
Pereguda@iate.obninsk.ru*

*Abstract:* the paper covers the development of a simulation model for the reliability of IT systems consisting of a protected asset and a security module. There are various types of attacks to obtain unauthorized access to the protected asset. Since the system under consideration operates stochastically, the simulation model is a random process as overlapping of alternating recovery processes. We analyzed the proposed model and obtained asymptotic estimate ratios: the probability of no-accident state during the recovery stage of the process; IT system mean time between failures.

The paper is intended for engineers and mathematicians dealing with the reliability of systems consisting of a protected asset and a security module.

*Keywords:* information system, distribution function, security system, outage, accident, alternating recovery process, MTBF, recovery cycle.

*Cite this article:* Pereguda A. I. A Simulation Model of IT Systems with Security Features. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):39–43. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-5.

### **Введение**

Использование различных автоматизированных систем, построенных на базе вычислительной техники, сделало актуальной проблему надежности информационной безопасности. Для обеспечения защиты информации от несанкционированного доступа требуется обеспечить определенный уровень надежности таких систем, включая надежность их аппаратных средств и программного обеспечения. Математические модели надежности систем защиты информации рассматривались в различных работах, например в [1].

Рассмотрим вначале структуру предлагаемой модели. Будем считать, что информационная система состоит из объекта защиты и системы безопасности. Предполагается, что могут быть приняты различные виды атак с целью получения несанкционированного доступа к объекту защиты. Система безопасности призвана парировать эти атаки, тем самым обеспечивая защиту от несанкционированного доступа. Отметим, что система безопасности не является абсолютно надежной, причем она может оказаться в неисправном состоянии из-за двух видов ее отказа, влияние которых необходимо учитывать. Во-первых, это *скрытые отказы*, при которых система теряет способность при необходимости вырабатывать адекватное защитное воздействие. Это такие отказы системы безопасности, которые не могут быть обнаружены без проведения профилактических мероприятий. Во-вторых, это ложные отказы, при которых система безопасности вырабатывает защитное воздействие без каких-либо причин, т.е. системы безопасности формирует ложные срабатывания, которые приводят к *останову* информационной системы. Заметим, что скрытые отказы и ложные срабатывания несовместны, т.е. они одновременно не могут быть реализованы. Таким образом, несанкционированный доступ к информации с использованием определенного класса атак возможен только тогда, когда атака приходится на период неработоспособности соответствующей подсистемы системы безопасности. Данное событие есть *авария* информационной системы.

Поскольку в такой сложной технической системе, какой является система безопасности, невозможно сразу обнаружить отказы отдельных подсистем, то для целей обнаружения неисправностей применяются различные диагностические процедуры, которые контролируют состояние подсистем в заданные моменты времени. Таким образом, необходимо рассматривать процедуру контрольных профилактик, которые выполняются не мгновенно. Структура подсистем системы безопасности, как правило, достаточно сложна. Поэтому необходимо также включить в рассмотрение структуры этих подсистем.

Целью данной работы является создание математической модели надежности информационной системы с системами безопасности с учётом контрольных профилактик. Поставленную задачу будем решать, используя методы, аналогичные тем, которые применяются в [2].

Введем следующие обозначения. Предполагаем, что имеется несколько типов атак и при этом атаки разных видов статистически независимы. Заметим, что после отражения атаки либо после восстановления исправного состояния после ложного срабатывания системы безопасности случайный процесс, соответствующий процессу функционирования, как бы возвращается в исходное состояние с теми же вероятностными характеристиками, что и в начальный момент времени, а это означает, что процесс генерации атак на систему и их парирования можно описать с помощью альтернирующего процесса восстановления. Также будем предполагать, что одновременное воздействие двух и более атак маловероятно, т.е. такие события являются практически невозможными событиями. Следует отметить, что хотя данные ограничения и являются, вообще говоря, достаточно строгими, но указанные предположения, как правило, выполняются.

Пусть случайные времена до очередной атаки  $i$ -го вида на каждом цикле рассматриваемого случайного процесса независимы и одинаково распределены с функцией  $F_{\chi_i}(t)$ . Соответственно, случайные времена отражения атаки  $i$ -го вида на каждом цикле рассматриваемого случайного процесса независимы и распределены с одной и той же функцией распределения  $F_{\gamma_i}(t)$ . Также будем предполагать, что все наработки  $i$ -ой подсистемы системы безопасности до ложного отказа  $\varphi_i$  на каждом цикле рассматриваемого случайного процесса так же независимы и одинаково распределены с функцией распределения  $F_{\varphi_i}(t)$  и, наконец, все времена восстановления после ложного срабатывания  $i$ -ой подсистемы системы безопасности (СБ)  $\psi_i$  на каждом цикле рассматриваемого случайного процесса независимы и одинаково распределены с функцией распределения  $F_{\psi_i}(t)$ .

Структуру подсистем СБ по отношению к ложным отказам будем учитывать следующим образом. Пусть  $i$ -ая подсистема СБ состоит из  $M_i$  элементов. Считаем, что все наработки  $j$ -го элемента  $i$ -ой подсистемы СБ до ложного отказа на каждом цикле рассматриваемого случайного процесса независимы и одинаково распределены с функцией  $F_{\varphi_i^j}(t)$ . При этом восстановление производится только после ложного отказа. Тогда время наработки подсистемы СБ до ложного отказа можно записать в виде функции  $\varphi_i = \varphi_i(\varphi_i^1, \dots, \varphi_i^{M_i})$ , вид которой будем записывать исходя из следующих определений.

*Ложным сечением* назовем такое множество элементов подсистемы системы безопасности, ложный отказ которых приводит к ложному отказу подсистемы.

*Минимальным ложным сечением* назовем такое ложное сечение, ни одно из подмножеств элементов которого не является ложным сечением.

Тогда время наработки до ложного отказа минимального ложного сечения определяется как максимум из всех времен наработки до ложного отказа его элементов. Для заданной структуры подсистемы системы безопасности необходимо выделить все минимальные ложные сечения. Время наработки до ложного отказа подсистемы в таком случае представляет собой минимум из наработок до ложного отказа всех имеющихся минимальных ложных сечений.

Рассмотрим теперь подробнее процесс функционирования системы безопасности. Как уже упоминалось ранее,  $i$ -ая подсистема системы безопасности состоит из  $M_i$  элементов, каждый из которых может находиться только в одном из двух состояний — исправном и неисправном, также и подсистема системы безопасности может находиться только в одном из этих двух состояний. Для описания состояния  $j$ -го элемента  $i$ -ой подсистемы системы безопасности можно ввести бинарные или булевы переменные:

$$x_i^j = \begin{cases} 1, & \text{если } j\text{-й элемент } i\text{-й подсистемы работоспособен, } j = 1, 2, \dots, M_i, \\ 0, & \text{если } j\text{-й элемент } i\text{-й подсистемы неработоспособен.} \end{cases}$$

Функция  $g_i(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{M_i})$  называется структурной функцией [3]  $i$ -ой подсистемы системы безопасности. Функция надежности  $i$ -ой подсистемы системы безопасности — это функция

$$h_i(P_i^1, P_i^2, \dots, P_i^{M_i}) = Mg_i(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{M_i}) = P(g_i(x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^{M_i}) = 1),$$

где  $P_i^j = P(x_i^j = 1) = Mx_i^j$  — вероятность безотказной работы  $j$ -го элемента  $i$ -ой подсистемы системы безопасности.

Время безотказного функционирования до скрытого отказа  $\xi_i^j$   $j$ -го элемента  $i$ -ой подсистемы системы безопасности есть случайная величина. Будем считать, что восстановление подсистемы системы безопасности проводится только после того, как будет обнаружен отказ этой подсистемы. Время наработки подсистемы системы безопасности до скрытого отказа с учетом ее структуры запишем в виде  $\xi_i = \xi_i(\xi_i^1, \dots, \xi_i^{M_i})$ . Вид этой функции будем записывать, руководствуясь следующими определениями.

*Скрытым сечением* назовем такое множество элементов подсистемы системы безопасности, скрытый отказ которых приводит к скрытому отказу подсистемы.

*Минимальным скрытым сечением* назовем такое скрытое сечение, ни одно из подмножеств элементов которого не является скрытым сечением.

Время наработки скрытого сечения до скрытого отказа следует определять, как максимум из времен наработок до скрытого отказа его элементов. Время наработки подсистемы системы безопасности до скрытого отказа определяется как минимум из времен наработок до скрытого отказа всех имеющихся минимальных скрытых сечений. После обнаружения отказа  $i$ -ой подсистемы системы безопасности производится восстановление ее работоспособности в течение времени  $\eta_i$ , также случайного, причем восстановление системы безопасности полное. Пусть, кроме того, для оперативного обнаружения, а, следовательно, и восстановления системы после скрытого отказа составляющей ее подсистемы применяются процедуры периодических профилактик подсистем системы безопасности. Предположим, что промежуток времени между двумя профилактиками  $i$ -ой подсистемы системы безопасности равен  $T_i$ , а продолжительность профилактики этой подсистемы составит величину  $\theta_i$ .

### Математическая модель надежности систем защиты информации

Очевидно, что при данных предположениях процесс функционирования информационной системы можно описывать с помощью наложения двух альтернирующих процессов восстановления. Один из этих процессов описывает атаки на объект защиты, которые либо парируются системой безопасности, либо приводят к аварии, и ложные отказы подсистем системы безопасности. Прочие же процессы описывают скрытые отказы элементов подсистем системы безопасности, восстановление после этих отказов, а также периодическую профилактику системы безопасности.

Рассмотрим первый из упомянутых процессов. Представим длительность цикла регенерации

этого процесса, на котором не было аварии, в следующем виде:

$$\begin{aligned} \tau = & (\chi_1 + \gamma_1) J_{\chi_1 < \chi_2 \wedge \dots \wedge \chi_N \wedge \varphi_1(\varphi_1^1, \dots, \varphi_1^{M_1}) \wedge \dots \wedge \varphi_N(\varphi_N^1, \dots, \varphi_N^{M_N})} + \dots + \\ & + (\chi_N + \gamma_N) J_{\chi_N < \chi_1 \wedge \dots \wedge \chi_{N-1} \wedge \varphi_1(\varphi_1^1, \dots, \varphi_1^{M_1}) \wedge \dots \wedge \varphi_N(\varphi_N^1, \dots, \varphi_N^{M_N})} + \\ & + \left( \varphi_1(\varphi_1^1, \dots, \varphi_1^{M_1}) + \psi_1 \right) J_{\varphi_1(\varphi_1^1, \dots, \varphi_1^{M_1}) < \chi_1 \wedge \dots \wedge \chi_N \wedge \varphi_2(\varphi_2^1, \dots, \varphi_2^{M_2}) \wedge \dots \wedge \varphi_N(\varphi_N^1, \dots, \varphi_N^{M_N})} + \dots + \\ & + \left( \varphi_N(\varphi_N^1, \dots, \varphi_N^{M_N}) + \psi_N \right) J_{\varphi_N(\varphi_N^1, \dots, \varphi_N^{M_N}) < \chi_1 \wedge \dots \wedge \chi_N \wedge \varphi_1(\varphi_1^1, \dots, \varphi_1^{M_1}) \wedge \dots \wedge \varphi_{N-1}(\varphi_{N-1}^1, \dots, \varphi_{N-1}^{M_{N-1}})}, \end{aligned}$$

где  $J_A = J(\omega \in A) = \begin{cases} 1, & \omega \in A, \\ 0, & \omega \notin A. \end{cases}$  — индикатор события  $\omega \in A$ ,  $\varphi \wedge \chi = \min(\varphi, \chi)$  — обозначение для операции взятия минимума от двух случайных величин.

Если же происходит авария, то время работы информационной системы от начала цикла до аварии определяется так:

$$\tau' = \chi_1 \wedge \dots \wedge \chi_N \wedge \varphi_1(\varphi_1^1, \dots, \varphi_1^{M_1}) \wedge \dots \wedge \varphi_N(\varphi_N^1, \dots, \varphi_N^{M_N}).$$

Все время работы информационной системы до аварии есть сумма циклов регенерации, произошедших за это время:

$$\omega = \sum_{k=1}^{\nu-1} \tau_k + \tau'_\nu,$$

где  $\nu$  — номер цикла регенерации, на котором произошла авария.

Поскольку рассматриваемый процесс является альтернирующим процессом восстановления, то вероятность того, что авария произошла на  $n$ -ом цикле регенерации, можно представить в виде  $P(\nu = n) = r_1^{n-1} r_2$ , где  $r_1$  — вероятность того, что на цикле регенерации рассматриваемого процесса аварии не было,  $r_2$  — вероятность того, что на цикле регенерации рассматриваемого процесса произошла авария ( $r_1 + r_2 = 1$ ).

Используя ранее записанные соотношения, можно записать среднее время наработки информационной системы до аварии  $M\omega$  в виде:

$$M\omega = M\tau' + \frac{1 - r_2}{r_2} M\tau.$$

Не останавливаясь на подробностях вычисления математических ожиданий  $M\tau$ ,  $M\tau'$ , приведем их конечные выражения, так:

$$\begin{aligned} M\tau' = & \int_0^\infty (1 - F_{\tau'}(t)) dt = \int_0^\infty \left( \prod_{i=1}^N (1 - F_{\chi_i}(t)) \right) \prod_{i=1}^N \left( 1 - F_{\varphi_i(\varphi_i^1, \dots, \varphi_i^{M_i})}(t) \right) dt, \\ M\tau = & \int_0^\infty \left( \prod_{i=1}^N (1 - F_{\chi_i}(t)) \prod_{i=1}^N (1 - F_{\varphi_i(\varphi_i^1, \dots, \varphi_i^{M_i})}(t)) \right) dt + \\ & + \sum_{i=1}^N M\gamma_i \int_0^\infty \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (1 - F_{\chi_j}(t)) \prod_{j=1}^N (1 - F_{\varphi_j(\varphi_j^1, \dots, \varphi_j^{M_j})}(t)) dF_{\chi_i}(t) + \\ & + \sum_{i=1}^N M\psi_i \int_0^\infty \prod_{j=1}^N (1 - F_{\chi_j}(t)) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (1 - F_{\varphi_j(\varphi_j^1, \dots, \varphi_j^{M_j})}(t)) dF_{\varphi_i(\varphi_i^1, \dots, \varphi_i^{M_i})}(t), \end{aligned}$$

$$\text{и } r_2 = \int_0^\infty \prod_{i=1}^N (1 - F_{\varphi_i}(\varphi_i^1, \dots, \varphi_i^{M_i})(t)) dF_{\chi_1 \wedge \dots \wedge \chi_N}(t) \times \sum_{i=1}^N q_i \int_0^\infty \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N (1 - F_{\chi_j}(t)) dF_{\chi_i}(t), \quad \text{где}$$

$$F_{\chi_1 \wedge \dots \wedge \chi_N}(t) = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - F_{\chi_i}(t)), \quad q_i \approx 1 - \frac{M\xi_i(\xi_i^1, \dots, \xi_i^{M_i})}{M\eta_i + (T_i + \theta_i) + (T_i + \theta_i)M \left[ \xi_i(\xi_i^1, \dots, \xi_i^{M_i}) / (T_i + \theta_i) \right]},$$

$\left[ \xi_i(\xi_i^1, \dots, \xi_i^{M_i}) / (T_i + \theta_i) \right]$  – целая часть числа  $\xi_i(\xi_i^1, \dots, \xi_i^{M_i}) / (T_i + \theta_i)$ .

Очевидно, что получить точное аналитическое выражение для вероятности аварии не представляется возможным, но можно записать экспоненциальную оценку для функции распределения времени до первой аварии. Для этого применим известные результаты [6]:

$$\lim_{\substack{r_2\tau \xrightarrow{E} 0 \\ M\tau \rightarrow 0}} P \left\{ \frac{r_2\omega}{M\tau} > x \right\} = e^{-x},$$

где  $r_2$  – вероятность аварии на полуинтервале  $[t_n, t_{n+1})$ , являющемся периодом регенерации;  $\tau$  – длительность периода регенерации при условии, что на этом периоде аварии не произошло,  $\omega$  – момент первой аварии. Здесь  $\xi \xrightarrow{X} 0$  означает сходимость  $\xi$  к нулю по Хинчину. Кроме того, известно [4], что если

$$\frac{M \left( \frac{r_2\tau}{M\tau} \right)^2}{M \left( \frac{r_2\tau}{M\tau} \right)} = \frac{M\tau^2 r_2}{(M\tau)^2} \rightarrow 0,$$

то  $\frac{r_2\tau}{M\tau} \xrightarrow{X} 0$ .

Тогда можно записать:

$$F_\omega(t) \approx 1 - e^{-\frac{r_2 t}{M\tau}}$$

при условии  $\frac{M\tau^2 r_2}{(M\tau)^2} \rightarrow 0$ , т.е. при  $r_2 \ll 1$ .

Рассмотрим теперь пример, когда все случайные величины распределены экспоненциально. Тогда:  $F_{\chi_i}(t) = 1 - e^{-\lambda_{\chi_i} t}$ ,  $F_{\gamma_i}(t) = 1 - e^{-\lambda_{\gamma_i} t}$ ,  $F_{\varphi_i}(t) = 1 - e^{-\lambda_{\varphi_i} t}$ ,  $F_{\psi_i}(t) = 1 - e^{-\lambda_{\psi_i} t}$ ,  $F_{\xi_i}(t) = 1 - e^{-\lambda_{\xi_i} t}$ ,  $F_{\eta_i}(t) = 1 - e^{-\lambda_{\eta_i} t}$ . Будем считать, что имеется два вида атак и две подсистемы системы безопасности. При этом каждая подсистема системы безопасности состоит из двух параллельно соединенных элементов. Опуская несложные преобразования, запишем сразу результат:

$$M \left[ \frac{\xi}{T + \theta} \right] = \frac{2e^{-\lambda_\xi(T+\theta)}}{1 - e^{-\lambda_\xi(T+\theta)}} - \frac{e^{-2\lambda_\xi(T+\theta)}}{1 - e^{-2\lambda_\xi(T+\theta)}}, \quad q = 1 - \frac{\frac{3}{2} \frac{1}{\lambda_\xi}}{\frac{1}{\lambda_\eta} + (T + \theta) + (T + \theta)M \left[ \frac{\xi}{T + \theta} \right]},$$

$$M\tau' = \frac{1}{2\lambda_\chi}, \quad M\tau = \frac{1}{(\lambda_\chi + 2\lambda_\varphi)} \left( \frac{1}{2} + \frac{\lambda_\chi}{\lambda_\gamma} + \frac{2\lambda_\varphi}{\lambda_\psi} \right), \quad r_2 = \frac{\lambda_\chi}{\lambda_\chi + 2\lambda_\varphi} q, \quad M\omega = M\tau' + \frac{1 - r_2}{r_2} M\tau.$$

### Заключение

В данной работе удалось получить асимптотические оценки для показателей надежности систем защиты информации. Предложенные оценки достаточно просто вычисляются и учитывают большое число различных параметров процесса функционирования информационной системы.

### ЛИТЕРАТУРА

- Щеглов А. Ю. *Защита компьютерной информации от несанкционированного доступа*. СПб.: Наука и техника; 2004. 384 с.
- Перегуда А. И., Тимашов Д. А. Моделирование процесса функционирования АТК «ОЗ-СБ» с периодически контролируемой системой безопасности. *Надежность*. 2007;2:38–48.
- Байхельт Ф., Франкен П. *Надежность и техническое обслуживание. Математический подход*. Пер. с нем. М.: Радио и связь; 1988. 393 с.
- Барзилович Е. Ю., Беляев Ю. К., Каштанов В. А. и др. *Вопросы математической теории надежности* / Под ред. Б.В. Гнеденко. М.: Радио и связь; 1983. 376 с.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-6

## УТОЧНЕНИЕ ПОЛЯ ТЕЧЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ В ЗАДАЧАХ ВНЕШНЕЙ АЭРОДИНАМИКИ

С. В. Зими́на<sup>а</sup>, М. Н. Петро́в<sup>б</sup>

Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),

г. Долгопрудный, Российская Федерация

<sup>а</sup> sofya.zimina@phystech.edu

<sup>б</sup> mikhail.petrov@phystech.edu

*Аннотация:* численное моделирование турбулентных течений около тел различной конфигурации является вычислительно затратным, особенно при проведении серийных расчетов, и требует нахождения баланса между скоростью и точностью вычислений. Целью работы является построение оператора, уточняющего результаты расчета, полученные менее точной вычислительно эффективной моделью, на основании расчетов схожих течений, полученных с помощью более точной базовой модели, с помощью методов машинного обучения. В качестве уточняемой модели был использован метод приближенной пристенной декомпозиции (ANDD) для модели Спаларта–Аллмараса, в качестве базовой модели — модель Спаларта–Аллмараса. В данной работе задача решена в нелокальной постановке, то есть учитывается влияние всего поля течения на ошибку в конкретной его точке. Оператор перехода от уточняемой модели к базовой строится с помощью сверточных нейронных сетей (CNN) архитектуры энкодер-декодер. Эффективность и точность построенной суррогатной модели демонстрируется на примере двумерной задачи сверхзвукового турбулентного обтекания угла сжатия при различных величинах угла сжатия и числах Рейнольдса (рассмотрены задачи интерполяции и экстраполяции по  $Re$ , а также интерполяции и экстраполяции по величине угла сжатия  $\alpha$ ).

*Ключевые слова:* сверточные нейронные сети, пристенная декомпозиция, турбулентные течения.

*Для цитирования:* Зими́на С. В., Петро́в М. Н. Уточнение поля течения с помощью сверточных нейронных сетей в задачах внешней аэродинамики. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):44–48. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-6.

## APPLICATION OF CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS TO FLOW FIELDS REFINING IN EXTERNAL AERODYNAMICS PROBLEMS

S. V. Zimina<sup>a</sup>, M. N. Petrov<sup>b</sup>

Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),

Dolgoprudny, Russian Federation

<sup>a</sup> sofya.zimina@phystech.edu

<sup>b</sup> mikhail.petrov@phystech.edu

*Abstract:* the simulation of turbulent flows around objects is computationally expensive and requires a balance between accuracy and computational performance. The objective of this work is to construct an operator that would improve the result of a less accurate, but more computationally efficient model using simulation results for similar flows obtained by a slower but more accurate method. The Spalart-Allmaras model is used as the turbulence model. The approximate near-wall domain decomposition (ANDD) approach is used as the fast, less accurate model, while the one-block approach (without decomposition) is used as the baseline, more accurate model. In this work, the operator is constructed with a non-local approach, where the entire input flow field affects every point of the output flow field. The operator is constructed with a convolutional neural network (CNN) of an encoder-decoder architecture. The efficiency and accuracy of the obtained surrogate model are demonstrated with a supersonic flow over a compression corner with different angle  $\alpha$  and Reynolds number values. We considered interpolation and extrapolation both by  $Re$  and  $\alpha$ .

*Keywords:* convolutional neural network, approximate near-wall domain decomposition, turbulent flows.

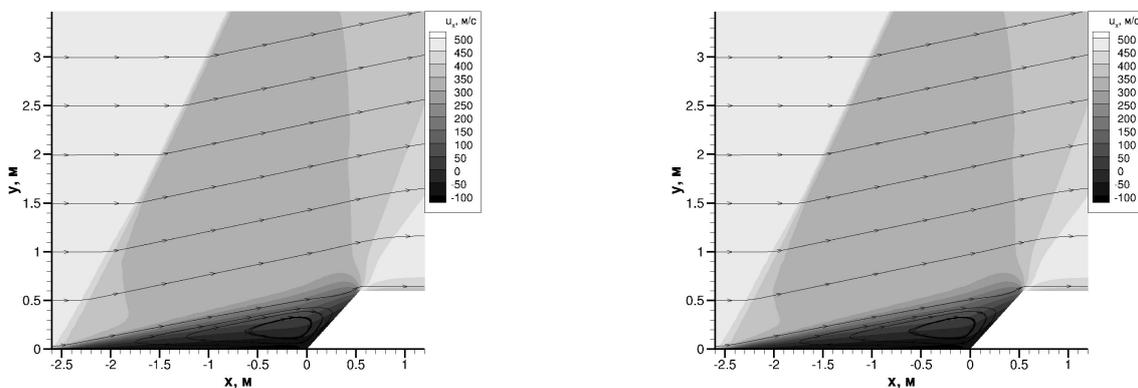
*Cite this article:* Zimina S. V., Petrov M. N. Application of Convolutional Neural Networks to Flow Fields Refining External Aerodynamics Problems. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):44–48. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-6.

## Введение

В промышленности широко востребованы методы численного моделирования турбулентных течений. При этом для высокой точности расчета важно хорошее разрешение пограничного слоя, которое в некоторых задачах может занимать до 90 %. Разработаны специальные модели, к примеру RANS-модели с использованием пристеночных функций [1] или модели, основанные на методах декомпозиции расчетной области [2, 3], которые являются более вычислительно эффективными по сравнению с базовыми моделями, однако могут существенно проигрывать им в точности. Хотя для некоторых таких моделей, например для метода приближенной пристенной декомпозиции (ANDD) [4], потери в точности проявляются лишь локально и не затрагивают общую физику течения. Одним из путей построения одновременно вычислительно эффективной и точной модели может быть построение суррогатной модели с использованием методов машинного обучения.

Применение методов машинного обучения к задачам газовой динамики стремительно набирает популярность. Так, в работе [5] строится модель, уточняющая результаты расчетов на грубой сетке по результатам расчетов задач того же класса на более подробной сетке. Это позволяет локально скорректировать переменные поля течения на ошибку, вызванную огрублением сетки. Алгоритм строится на основании фактической разницы между переменными признакового пространства приближенного и точного решений. Также проводятся исследования по более глубокой адаптации суррогатной модели к задаче. Например, непосредственный учет дифференциальных уравнений, описывающих задачу, в архитектуре нейросети [6] или геометрии рассматриваемой области [7].

В работе с помощью методов машинного обучения предлагается построить суррогатную модель, уточняющую результаты расчетов, полученных специальной (менее точной) моделью, на основании данных расчетов, полученных для схожего класса задач в рамках базовой (более точной) модели. Построенная таким образом суррогатная модель позволит улучшить точность расчётов при сохранении преимуществ по вычислительной эффективности.



**Рис. 1.** Поле компоненты скорости  $v_x$  для задачи с  $\alpha = 132^\circ$ ,  $Re = 10^7$  для базовой одноблочной модели (слева) и уточняемой модели ANDD (справа)

## Идея построения суррогатной модели

В предлагаемом в статье подходе при проведении серии из  $N$  расчетов малое число расчетов  $m$  проводится как базовой, так и специальной моделью и используется для обучения суррогатной модели. Оставшиеся  $N - m$  расчетов серии проводятся быстрой специальной моделью и уточняются суррогатной моделью. При построении суррогатной модели нелокальным методом предполагается использование нейронной сети, предобученной на большом числе различных полей течения с последующим дообучением под конкретную задачу на малом объеме данных.

Общая методология, рассматриваемая в статье, может быть применена к любой паре выбранных специальной и базовой модели. В исследовании в качестве базовой модели используется модель

Спаларта–Аллмараса [8], решение для которой получается на подробной сетке с хорошим разрешением пристенной области. В качестве специальной (уточняемой) модели используется метод ANDD [4] для модели Спаларта–Аллмараса, так как дает достаточно хорошее решение для лучшего обучения суррогатной модели. Суть метода ANDD заключается в разделении расчетной области на внутреннюю пристенную и внешнюю область. При этом во внутренней области решаются уравнения тонкого слоя (TBLе). Во внешней области решаются полные уравнения с граничным условием третьего рода на границе сопряжения областей. Далее выполняется пересчет поля течения во внутренней области с использованием граничного условия Дирихле на границе между областями, полученного из решения задачи во внешней области. Вышеперечисленные шаги выполняются до выполнения условия сходимости. Одним из преимуществ данного метода является высокая скорость сходимости расчетов. Все расчеты проведены на основе имеющегося кода лаборатории Flowmodellium [9] для решения пространственных уравнений Навье–Стокса на неструктурированных сетках.

### Построение суррогатной модели нелокальным методом

Для построения суррогатной модели используется нейронная сеть архитектуры энкодер–декодер. Используемая архитектура схожа с архитектурой нейросети–генератора, использованной в работе [10], но имеет ряд отличий, описанных ниже. Как и генератор из работы, используемая архитектура включает residual–блоки [11], позволяющие бороться с проблемой затухания градиентов. К другим особенностям архитектуры относятся: сквозные соединения между энкодером и декодером, позволяющие при генерации выходного изображения лучше учитывать признаки, выделенные каждым слоем энкодера; механизм self-attention [12] для лучшего учета пространственных зависимостей. Последний слой сети представляет собой сглаживание по ближайшим соседям с обучаемыми весами.

В качестве входных данных и целевой переменной для обучения суррогатной модели используется все поле течения, при этом нейронная сеть обучается предсказывать результат расчета базовой модели, получая на вход результаты расчета приближенной модели. Так как расчетная сетка в рассматриваемой задаче структурированная, входные данные можно представить в виде матрицы с размерами  $(\omega, h, c)$ , где  $\omega, h$  – размеры расчетной сетки,  $c$  – число признаков переменных. Исследуемыми переменными в работе являются компоненты скорости  $v_x, v_y$ . С целью повышения значимости ошибки в пристенной области, являющейся областью наибольшего интереса, применяется логарифмирование, и в качестве признаков переменных используются нормированные логарифмы модуля скорости  $(\ln(|v_x| + 1)/(\ln(|\max(v_x)| + 1)), \ln(|v_y| + 1)/(\ln(|\max(v_y)| + 1)))$ , а также безразмерное расстояние от стенки  $l/\max(l)$ .

В качестве функции потерь при обучении нейронной сети используется средняя абсолютная ошибка (MAE), в качестве оптимизатора – Adam.

### Результаты

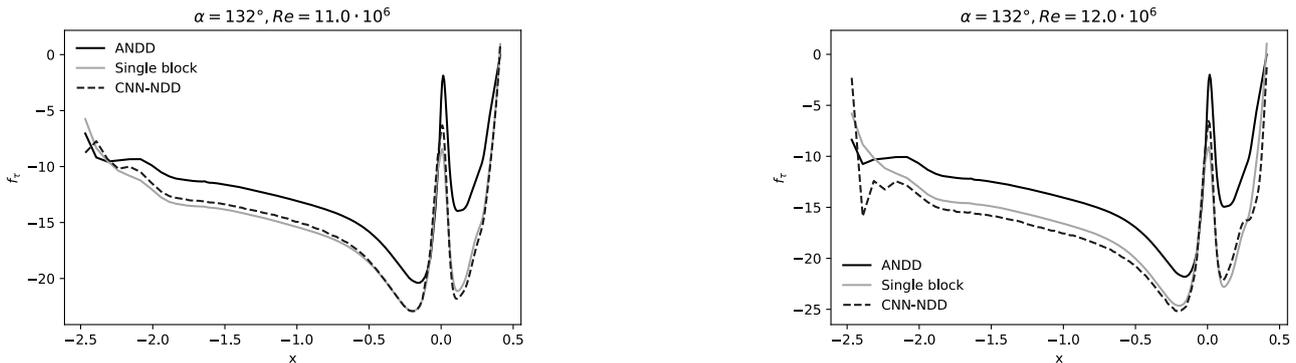
Оператор перехода от уточняемой модели к базовой строится на примере двумерной задачи сверхзвукового турбулентного обтекания угла сжатия с числом Маха  $M = 1.5$  при различных числах Рейнольдса  $Re$  и величине угла сжатия  $\alpha$ . На рисунке 1 показаны поля компоненты скорости  $v_x$  для задачи с  $Re = 10^7$ ,  $\alpha = 132^\circ$ , рассчитанные с помощью базовой одноблочной модели и менее точной модели ANDD. При расчете методом ANDD граница между внутренней и внешней областью находится на расстоянии от стенки, соответствующем  $y^+ \approx 100$ .

Была проведена серия расчетов с одинаковой геометрией ( $\alpha = 132^\circ$ ), отличающихся параметрами набегающего потока ( $M = 1.5, Re \in [8 \cdot 10^6; 1.3 \cdot 10^7]$ ), а также серия расчетов с одинаковыми параметрами набегающего потока, но разной геометрией обтекаемого тела ( $\alpha \in [124^\circ; 144^\circ]$ ). Каждый расчет был проведен с помощью базовой модели и с помощью специальной модели (ANDD). Далее результаты расчетов были поделены на обучающую и тестовую выборку. При этом были рассмотрены сценарии интерполяции и экстраполяции по числу Рейнольдса (для серии расчетов с одинаковой геометрией), а также сценарии интерполяции и экстраполяции по величине угла  $\alpha$  (для серии расчетов с одинаковыми параметрами набегающего потока).

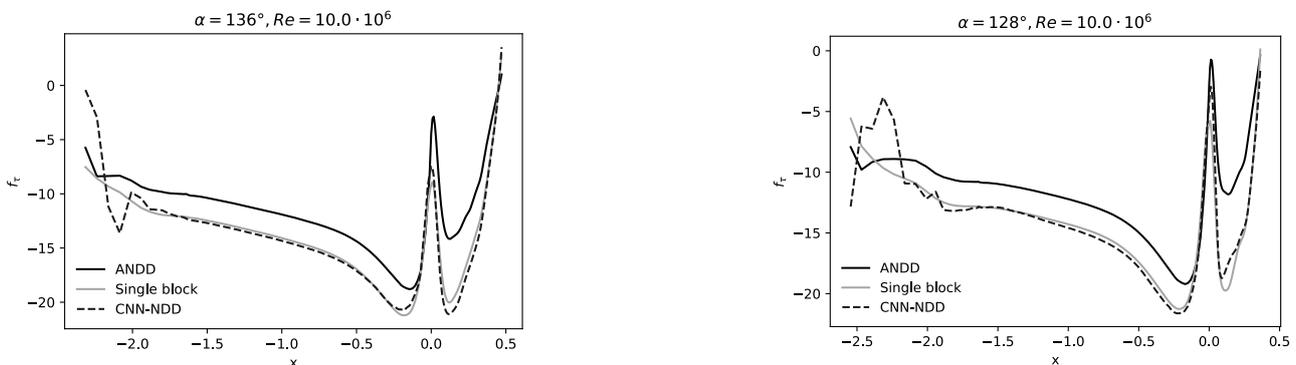
На основании полученных компонент поля скорости  $v_x, v_y$  рассчитывались трение на стенке  $f_\tau$  и коэффициент трения  $C_f$ . При расчете коэффициента трения интегрирование проводилось по части стенки, соответствующей области, где находится вихрь ( $x \in [-2.5, 0.5]$ ). Полученные с помощью суррогатной модели результаты для тестовой выборки сравнивались с результатами одноблочного расчета

и расчета методом ANDD. На рисунках 2–3 показано трение на стенке  $f_\tau$ , рассчитанное с помощью базовой, уточняемой и суррогатной модели для всех описанных выше сценариев. В таблице показаны коэффициенты трения  $C_f$  для базовой, уточняемой и суррогатной модели, а также относительная ошибка  $\varepsilon$ .

Из графиков и таблицы видно, что даже при обучении нейросети с нуля на малом числе данных метод показывает достаточно неплохие результаты. Построенный оператор уточняет результат расчета, проведенного по приближенной модели, с достаточно высокой точностью, особенно для задач интерполяции и экстраполяции по числу Рейнольдса. Для задач экстраполяции в топологическом случае метод дает более плохие результаты, чем для всех остальных сценариев, однако ошибка в интегральной характеристике — коэффициенте трения  $C_f$  все еще меньше, чем для расчетов, проведенных по приближенной модели ANDD.



**Рис. 2.** Трение на стенке для задач интерполяции (слева) и экстраполяции (справа) по числу Рейнольдса  $Re$ . Результаты для базовой модели (Single block), уточняемой модели (ANDD) и результат уточнения (CNN-NDD)



**Рис. 3.** Трение на стенке для задач интерполяции (слева) и экстраполяции (справа) по величине угла  $\alpha$ . Результаты для базовой модели (Single block), уточняемой модели (ANDD) и результат уточнения (CNN-NDD)

Таблица

Коэффициенты трения  $C_f$  для базовой модели (Single block), уточняемой модели (ANDD) и уточненной модели (CNN-NDD), а также относительная ошибка  $\varepsilon$

Сценарий	$C_f \cdot 10^{-4}$			$\varepsilon$	
	Single Block	ANDD	CNN-NDD	ANDD	CNN-NDD
1) Интерполяция по $Re$	-3.24	-2.64	-3.2	0.1849	0.0115
2) Экстраполяция по $Re$	-3.19	-2.6	-3.32	0.1841	0.04
3) Экстраполяция по $Re$	-3.35	-2.71	-3.59	0.1891	0.0731
4) Интерполяция по $\alpha$	-3.35	-2.74	-3.32	0.1822	0.009
5) Экстраполяция по $\alpha$	-3.32	-2.71	-3.25	0.1822	0.0213
6) Экстраполяция по $\alpha$	-3.15	-2.59	-3.43	0.1757	0.0877

### Заклучение

В работе был рассмотрен нелокальный метод построения оператора, уточняющего результаты расчетов. На примере задачи сверхзвукового турбулентного обтекания угла сжатия было рассмотрено несколько сценариев: интерполяция и экстраполяция по числу Рейнольдса (при одинаковой геометрии), а также топологический случай: интерполяция и экстраполяция по величине угла сжатия  $\alpha$ . Для каждого из сценариев результаты уточняющей суррогатной модели оказались достаточно близки к результатам, полученным с помощью более точной базовой модели. При этом были получены неплохие результаты даже при обучении модели на малом количестве данных с нуля. При проведении серии из  $N$  расчетов число расчетов  $m$ , которые проводятся как уточняемой, так и базовой моделью и используются для обучения модели, достаточно мало, а остальные  $N - m$  расчетов проводятся только с помощью быстрой уточняемой модели, что подтверждает вычислительную эффективность метода.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Grotjans H., Menter F. R. Wall Functions for Industrial Applications. *Computational Fluid Dynamics*. 1998;98(1):2.
2. Utyuzhnikov S., Petrov M., Chikitkin A., Titarev V. On Extension of Near-Wall Non-overlapping Domain Decomposition to Essentially Unsteady Turbulent Flows. *Smart Modeling for Engineering Systems: Proceedings of the Conference 50 Years of the Development of Grid-Characteristic Method*. 2019;133:199. Springer. DOI: 10.1007/978-3-030-06228-6\_17.
3. Chikitkin A., Utyuzhnikov S., Petrov M., Titarev V. Non-Overlapping Domain Decomposition for Modeling Essentially Unsteady Near-Wall Turbulent Flows. *Computers & Fluids*. 2020;202:104506. DOI: 10.1016/j.compfluid.2020.104506.
4. Petrov M., Utyuzhnikov S., Chikitkin A., Titarev V. On Extension of Near-Wall Domain Decomposition to Turbulent Compressible Flows. *Computers & Fluids*. 2020;210:104629. DOI: 10.1016/j.compfluid.2020.104629.
5. Hanna B. N., Dinh N. T., Youngblood R. W., Bolotnov I. A. Machine-Learning Based Error Prediction Approach for Coarse-Grid Computational Fluid Dynamics (CG-CFD). *Progress in Nuclear Energy*. 2020;118:103140. DOI: 10.1016/j.pnucene.2019.103140.
6. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G. E. Physics-Informed Neural Networks: A Deep Learning Framework for Solving Forward and Inverse Problems Involving Nonlinear Partial Differential Equations. *Journal of Computational Physics*. 2019;378:686–707. DOI: 10.1016/j.jcp.2018.10.045.
7. Guo X., Li W., Iorio F. Convolutional Neural Networks for Steady Flow Approximation. *Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. 2016;481–490. DOI: 10.1145/2939672.2939738.
8. Spalart P. R., Allmaras S. R. 30th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. *Aerospace Sciences Meetings. American Institute of Aeronautics and Astronautics, Reston, VA*. 1992. DOI: 10.2514/6.1992-439.
9. Petrov M. N., Tambova A. A., Titarev V. A., Utyuzhnikov S. V., Chikitkin A. V. FlowModellium Software Package for Calculating High-Speed Flows of Compressible Fluid. *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. 2018;58(11):1865–1886. DOI: 10.1134/S0965542518110118.
10. Zhu J. Y., Park T., Isola P., Efros A. A. Unpaired Image-To-Image Translation Using Cycle-Consistent Adversarial Networks. *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision*. 2017;2223–2232.
11. He K., Zhang X., Ren S., Sun J. Deep Residual Learning for Image Recognition. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2016;770–778.
12. Zhang H., Goodfellow I., Metaxas D., Odena A. Self-Attention Generative Adversarial Networks. *International Conference on Machine Learning*. 2019;7354–7363.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-7

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОХЛАЖДЕНИЯ КРИСТАЛЛИЗАТОРА МАШИН НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ ЗАГОТОВОК ВОДЯНЫМ И ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯМИ

**М. А. Коновалов, В. В. Ульянов, М. М. Кошелев, С. Е. Харчук**

*АО «Государственный научный центр Российской Федерации — Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского», г. Обнинск, Российская Федерация, mkonovalov@ippe.ru*

*Аннотация:* на сегодняшний день тепло, отводимое от машин непрерывного литья заготовок, сбрасывается в окружающую среду и практически не используется. Одним из способов сокращения энергетических затрат при производстве стали является замена воды на жидкометаллический теплоноситель в контуре охлаждения кристаллизатора и повышение температуры до уровня, достаточного для осуществления паросилового цикла с последующей генерацией электроэнергии [1, 2]. Установлено, что наиболее приемлемым жидкометаллическим теплоносителем при охлаждении кристаллизаторной стали в машинах непрерывного литья заготовок является свинец-висмутовая эвтектика. На основе сравнительного анализа охлаждения различными теплоносителями затвердевающей стали в кристаллизаторе круглого сечения с использованием кода OpenFOAM показано, что эффективность охлаждения практически идентична при охлаждении водой и охлаждении свинец-висмутовой эвтектикой. При этом наибольший поток тепла, снимаемый с кристаллизатора, достигается при величине подогрева теплоносителя от 180 °С на входе в кристаллизатор до 400 °С на выходе. Для оценки целесообразности предлагаемого решения выполнен тепловой расчет парогенерирующего контура. Показано, что КПД паросилового цикла составит ~ 32 %. При условии работы на одном предприятии шести кристаллизаторов на протяжении года (250 рабочих дней) количество выработанной электроэнергии составит примерно 6,2 млн кВтч.

*Ключевые слова:* машины непрерывного литья заготовок, затвердевание стали, кристаллизатор, теплообмен, жидкометаллический теплоноситель.

*Благодарности:* исследования проводятся при поддержке Правительства Калужской области и Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 19-48-400003).

*Для цитирования:* Коновалов М. А., Ульянов В. В., Кошелев М. М., Харчук С. Е. Моделирование охлаждения кристаллизатора машин непрерывного литья заготовок водяным и жидкометаллическим теплоносителями. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):49–52. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-7.

## SIMULATION OF WATER AND LIQUID-METAL COOLANT HEAT TRANSFER IN CONTINUOUS CASTING MACHINE

**M. A. Konovalov, V. V. Ulyanov, M. M. Koshelev, S. E. Kharchuk**

*Russian National Research Center Leypunsky Institute for Physics and Power Engineering, Obninsk, Russian Federation, mkonovalov@ippe.ru*

*Abstract:* to date, heat to be dissipated in a continuous casting machine is discharged in the environment and not utilized much. A way of saving energy in steel production is replacing the water-cooling system with liquid-metal coolant to increase the temperature sufficiently to produce steam and, subsequently, electricity [1, 2]. We identified that lead-bismuth eutectic is the most suitable liquid coolant for continuous casting machines. We performed a simulation of the heat transfer process during steel solidification with various coolants with OpenFOAM. The cooling efficiency is virtually identical for water and lead-bismuth eutectic. The max dissipated heat flux occurs when the inlet coolant temperature is 180 °C and the outlet coolant temperature is 400 °C. To check the feasibility, we analyzed the steam generation efficiency. It would be ~ 32 %. For six machines, 6.2 mln. kWh can be generated annually.

*Keywords:* continuous casting machine, steel solidification, mold, heat transfer, liquid-metal coolant.

*Acknowledgements:* this study is supported by the Kaluga Region Government and the Russian Foundation for Basic Research, grants YY No. 19-48-400003.

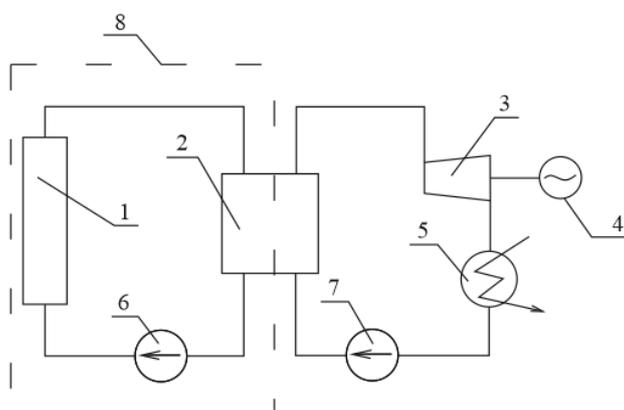
*Cite this article:* Konovalov M. A., Ulyanov V. V., Koshelev M. M., Kharchuk S. E. Simulation of Water and Liquid-Metal Coolant Heat Transfer in Continuous Casting Machine. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):49–52. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-7.

## Введение

На сегодняшний день отводимое тепло от машин непрерывного литья заготовок (МНЛЗ) сбрасывается в окружающую среду и практически не используется. Одним из способов сокращения энергетических затрат (рекуперации энергии) при производстве стали является замена воды на жидкометаллический теплоноситель в контуре охлаждения кристаллизатора и повышение температуры до уровня, достаточного для осуществления паросилового цикла с последующей генерацией электроэнергии [1].

## Рекуперация тепла с использованием паротурбинной установки

Тепловая мощность, отводимая от одного кристаллизатора, на основе данных [2], составляет 605 кВт. На основе теплового расчета предлагаемой системы «сталь — жидкометаллический теплоноситель — парогенератор — турбогенератор» можно показать, что при использовании паротурбинной установки, работающей по циклу Ренкина (рисунок 1), с температурой пара на входе 275 °С и давлением 5 МПа, КПД цикла составит 28,5 %. При этом электрическая мощность, вырабатываемая системой рекуперации одного кристаллизатора, составит от 150 кВт и выше. При условии работы на одном предприятии шести кристаллизаторов на протяжении года (250 рабочих дней) получим, что количество выработанной электроэнергии составит примерно 6,2 млн кВтч. В пересчете на стоимость электроэнергии предприятие будет экономить около 31 млн руб. в год при тарифе на электроэнергию 5 руб./кВтч.



**Рис. 1.** Упрощенная тепловая схема утилизации тепла кристаллизатора МНЛЗ с последующей генерацией электроэнергии. 1 — кристаллизатор стали; 2 — парогенератор; 3 — паровая турбина; 4 — электрогенератор; 5 — конденсатор турбины; 6 — циркуляционный насос жидкометаллического контура; 7 — питательный насос; 8 — жидкометаллический контур охлаждения кристаллизатора

## Сравнительный анализ охлаждения стали в кристаллизаторе различными хладагентами (вода, свинец-висмут)

Конструкция МНЛЗ и общий вид расчетной модели кристаллизатора представлены на рисунке 2. Сталь из промежуточного ковша попадает в кристаллизатор, в котором происходит ее частичное затвердевание. Скорость перемещения стали через кристаллизатор регулируется с использованием роликов, установленных на выходе из кристаллизатора и вытягивающих заготовку.

Затвердевание металла в кристаллизаторе и сопутствующие ему процессы наиболее полно описываются на основе представлений о частичном контакте слитка со стенкой, исходя из которых участки поверхности слитка отделены от кристаллизатора зазорами [3]. В процессе разлива стали величина зазора зависит от многих факторов, поэтому удобно пользоваться понятием о кажущемся сплошном воздушном зазоре между стенкой кристаллизатора и слитком. При дальнейшем моделировании этот факт учитывался путем задания термического сопротивления на границе затвердевающая сталь — стенка кристаллизатора, равного 1250 Вт/м<sup>2</sup>К.

Расчет полей скорости и температуры при затвердевании стали проводился с использованием вычислительного модуля `interCondensatingEvaporatingFoam`, основанного на VOF-методе, в котором процесс превращения жидкой стали в твердую основан на модели превращения фаз Ли [4]. Массообмен между фазами зависит от температурного режима и описывается уравнениями:



Рис. 2. Конструкция МНЛЗ и общий вид расчетной модели кристаллизатора

$$\dot{m}_{12} = \text{coeff}_1 \cdot \alpha_1 \cdot \rho_1 \cdot \frac{(T_1 - T_{sat})}{T_{sat}}, \quad (1)$$

$$\dot{m}_{21} = \text{coeff}_2 \cdot \alpha_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{(T_2 - T_{sat})}{T_{sat}}, \quad (2)$$

где индекс «1» — фаза «1», «2» — фаза «2»;  $\alpha$  — объемная доля фазы;  $\rho$  — плотность, кг/м<sup>3</sup>;  $T$  — температура, К;  $T_{sat}$  — температура превращения фаз. Коэффициенты coeff могут быть интерпретированы как время релаксации и должны настраиваться по известным экспериментальным данным. Значение коэффициента coeff<sub>1</sub> задавалось равным 40 с<sup>-1</sup> [3],  $T_{sat}$  стали — 1420 °С.

### Результаты

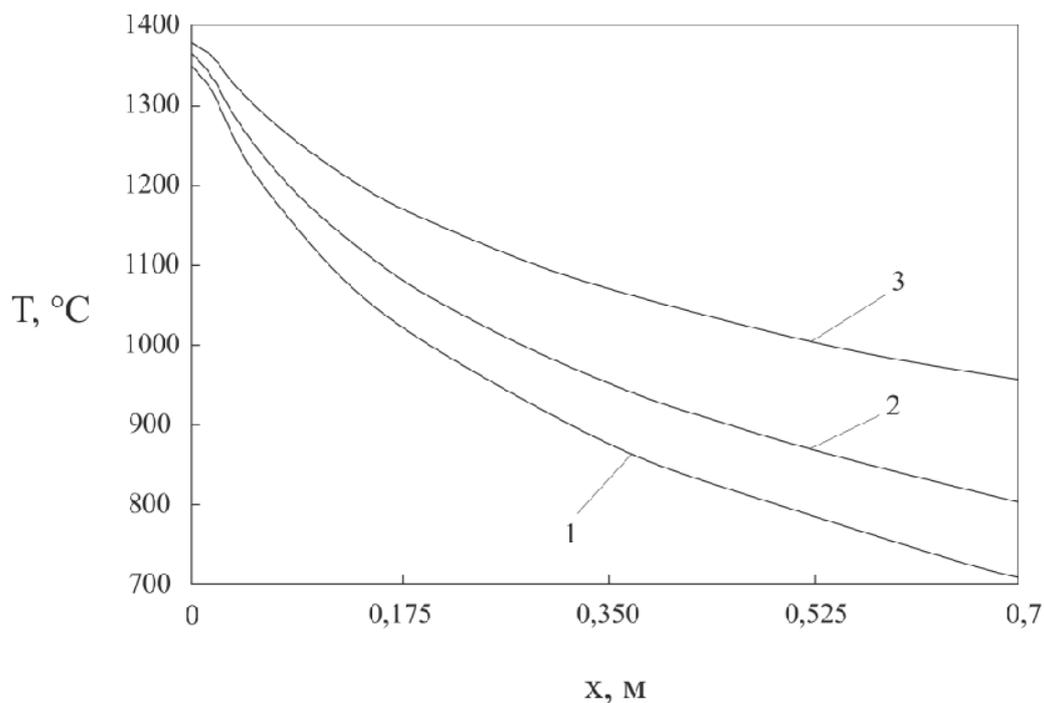
Анализ показал, что объемные доли твердой фазы стали на выходе из кристаллизатора при охлаждении различными хладагентами практически совпадают. Толщина затвердевшего слоя стали на выходе из кристаллизатора, охлаждаемого водой, составила 35 мм, свинец-висмутовой эвтектикой с температурой на входе в кристаллизатор 180 °С — 32 мм, свинец-висмутовой эвтектикой с температурой на входе в кристаллизатор 450 °С — 30 мм.

Наибольший поток тепла 1,01 МВт/м<sup>2</sup> при охлаждении свинец-висмутовой эвтектикой достигается при минимально допустимой для реализации паросилового цикла температуре свинец-висмута на входе в кристаллизатор 180 °С. Температура поверхности слитка стали в кристаллизаторе представлена на рисунке 3.

Наравне с определением толщины слитка на выходе из кристаллизатора и теплового потока, снимаемого теплоносителем, важной задачей являлось обоснование оптимального направления течения жидкометаллического теплоносителя. При температуре свинец-висмута на входе в кристаллизатор 180 °С получено, что для обоих вариантов направления течения жидкометаллического теплоносителя (сонаправленного/противоположного) при ширине кольцевого зазора 5 мм и скорости теплоносителя 0,5 м/с достигается среднесмешанная температура на выходе из системы охлаждения ~ 400 °С. Максимальная температура стенки кристаллизатора, контактирующей со свинец-висмутовой эвтектикой, при сонаправленном течении составила ~ 470 °С, при противоположном — ~ 530 °С. Перепад температур по стенке кристаллизатора, контактирующей со свинец-висмутовой эвтектикой, при сонаправленном течении составил ~ 280 °С, при противоположном — ~ 340 °С.

При использовании в качестве теплоносителя в кристаллизаторе свинец-висмутовой эвтектики материал стенки должен быть применим при максимальной температуре стенки, контактирующей со свинец-висмутовой эвтектикой: 470 °С при сонаправленном течении и 530 °С при противоположном течении теплоносителя и кристаллизующей стали.

Таким образом, видно, что оптимальным направлением движения жидкометаллического теплоносителя является сонаправленное направлению перемещения стали через кристаллизатор. При этом



**Рис. 3.** Температура поверхности слитка стали в кристаллизаторе. 1 – вода, 2 – Pb-Bi 180 °C, 3 – Pb-Bi 450 °C

перепад температуры вдоль стенки, контактирующей с хладагентом, составит 280 °C, а максимальная температура равна ~ 470 °C.

Полученные результаты подтверждают принципиальную возможность перехода от охлаждения водой кристаллизатора к жидкометаллическому охлаждению с термодинамическими параметрами теплоносителя на выходе из кристаллизатора, достаточными для реализации паросилового цикла.

Необходимо продолжение начатых исследований для обоснования конструкционного материала корпуса кристаллизатора, стойкого в свинец-висмутовой эвтектике, а также моделирования охлаждения теплоносителем канала кристаллизатора щелевой формы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ульянов В. В., Кошелев М. М., Коновалов М. А., Харчук С. Е. Моделирование теплопередачи в каналах круглой формы машин непрерывного литья заготовок с перспективным свинцово-висмутовым кристаллизатором. *ВАНТ. Серия: Ядерно-реакторные константы*. 2020;2:131–140. Режим доступа: <https://vant.ippe.ru/year2020/2/thermal-physics-hydrodynamics/1877-12.html>.
2. Лукин С. В., Шумова А. А., Завлин М. В., Шестаков Н. И., Ригин А. Н. Использование теплоты, отводимой от стальных слябов кристаллизаторами и роликами машин непрерывного литья заготовок, в системе теплоснабжения предприятия. *Вестник Череповецкого государственного университета*. 2017;3:28–37. DOI: 10.23859/1994-0637-2017-3-78-3.
3. Козырев Н. А., Гизатулин Р. А. *Машины и процессы непрерывного литья заготовок*. Новокузнецк: СибГИУ; 2011. 357 с.
4. Lee Wah Cheng. *Filmwise Condensation on a Horizontal Tube in the Presence of Forced Convection and Non-condensing Gas*. A thesis submitted for the Degree of Doctor of Philosophy to the University of London. 1982. 341 p.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-8

## ПРИМЕНЕНИЕ ПОПЕРЕМЕННО-ТРЕУГОЛЬНОГО ИТЕРАЦИОННОГО МЕТОДА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ГИДРОДИНАМИКИ МЕЛКОВОДНОГО ВОДОЕМА НА ГРАФИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ

**В. Н. Литвинов<sup>1,2,a</sup>, Н. Н. Грачева<sup>1,b</sup>, Е. А. Шабаев<sup>1,c</sup>**

<sup>1</sup> Азово-Черноморский инженерный институт ФГБОУ ВО Донской ГАУ, г. Зерноград,  
Российская Федерация

<sup>2</sup> Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

<sup>a</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8234-3194>, [LitvinovVN@rambler.ru](mailto:LitvinovVN@rambler.ru)

<sup>b</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3699-7255>, [grann72@mail.ru](mailto:grann72@mail.ru)

<sup>c</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2675-0670>, [sea007@rambler.ru](mailto:sea007@rambler.ru)

*Аннотация:* процесс прогнозирования экологических катастроф как техногенного, так и природного характера в настоящее время базируется на достижениях в области математического моделирования. Получение прогноза за короткое время является весьма затруднительным без применения параллельных вычислений и суперкомпьютерных технологий. Большой объем обрабатываемой информации и сложность вычислений приводят к необходимости использования вычислительных кластеров, в состав которых добавляются видеоадаптеры для увеличения производительности вычислительной системы и скорости обработки информации. Статья посвящена разработке программного модуля на языке CUDA C, предназначенного для моделирования гидродинамических процессов мелководных водоёмов, включая решение возникающих при дискретизации систем сеточных уравнений высокой размерности. Для повышения эффективности расчетов часть вычислительной нагрузки передавалась на графические ускорители, для чего был разработан алгоритм параллельных расчетов и его программная реализация в виде модуля. В результате вычислительных экспериментов определена оптимальная двумерная конфигурация потоков в вычислительном блоке, исполняемом на одном потоковом мультипроцессоре. Разработанный алгоритм и программный модуль позволяют более эффективно задействовать вычислительные ресурсы графических ускорителей, используемых для решения вычислительно трудоемких задач гидрофизики.

*Ключевые слова:* математическое моделирование, гидродинамические процессы, мелководный водоем, графический ускоритель.

*Благодарности:* исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда, проект № 21-71-20050.

*Для цитирования:* Литвинов В. Н., Грачева Н. Н., Шабаев Е. А. Применение попеременно-треугольного итерационного метода для решения задач гидродинамики мелководного водоема на графическом ускорителе. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):53–57. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-8.

## APPLICATION OF THE ALTERNATING TRIANGULAR ITERATIVE METHOD TO SOLVING SHALLOW WATER HYDRODYNAMICS PROBLEMS WITH GRAPHICS ACCELERATORS

**V. N. Litvinov<sup>1,2,a</sup>, N. N. Gracheva<sup>1,b</sup>, E. A. Shabaev<sup>1,c</sup>**

<sup>1</sup> Azov-Black Sea Engineering Institute, Don State Agrarian University, Zernograd, Russian Federation

<sup>2</sup> Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

<sup>a</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8234-3194>, [LitvinovVN@rambler.ru](mailto:LitvinovVN@rambler.ru)

<sup>b</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3699-7255>, [grann72@mail.ru](mailto:grann72@mail.ru)

<sup>c</sup> ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2675-0670>, [sea007@rambler.ru](mailto:sea007@rambler.ru)

*Abstract:* forecasting environmental disasters, both artificial and natural, is currently based on advances in simulation. Fast forecasting is very difficult without the use of parallel computing and super-computer technologies. The large volume of information to be processed and the complexity of calculations require to use of computing clusters with graphics cards to increase the computing performance and the data processing rate. This paper deals with the development of a software module in CUDA C to simulate the hydrodynamic processes in shallow water bodies, including the solution of systems of high-dimensional

grid equations during discretization. To improve computing performance, graphics accelerators take a part of the load. To enable this, we developed an algorithm for parallel calculations and implemented it as a software module. As a result of computational experiments, the optimal 2D configuration of streams in a computational unit run on a single streaming multiprocessor was determined. The proposed algorithm and software module enables more efficient use of GPU computational resources when solving computationally intensive hydro physics problems.

*Keywords:* simulation, hydrodynamic processes, shallow water.

*Acknowledgements:* this study is supported by the Russian Science Foundation grant, project No. 21-71-20050.

*Cite this article:* Litvinov V. N., Gracheva N. N., Shabaev E. A. Application of the Alternating Triangular Iterative Method to Solving Shallow Water Hydrodynamics Problems with Graphics Accelerators. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):53–57. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-8.

## Введение

Процесс прогнозирования экологических катастроф как техногенного, так и природного характера в настоящее время базируется на достижениях в области математического моделирования. При этом нормативными актами установлены требования к временному интервалу от возникновения чрезвычайной ситуации до получения результатов прогнозирования. Получение таких результатов в ограниченное время является весьма затруднительным без применения параллельных вычислений и суперкомпьютерных технологий [1, 2]. Высокая стоимость вычислительных кластеров актуализирует исследования в области гетерогенных вычислений, целью которых является максимальное использование всех доступных аппаратных ресурсов, в число которых наряду с центральным процессором входят и видеоадаптеры [3, 4].

В настоящее время компьютерное моделирование не только заменяет собой сложные системы и физические модели, но и позволяет прогнозировать различные явления и процессы, происходящие в природе. В основе компьютерного моделирования, как правило, лежат математические модели, дискретизация которых приводит к системе линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) большой размерности. Для решения таких систем сеточных уравнений требуются большие вычислительные мощности, в том числе получаемые посредством использования графических ускорителей.

Многие российские и зарубежные ученые занимаются исследованиями, связанными с оптимизацией производительности вычислений при решении задач гидродинамики на нескольких графических процессорах [1-5]. Современные видеоадаптеры обладают большим объемом видеопамати (до 24 Гб) и потоковых процессоров, число которых может достигать нескольких тысяч. Имеются программные интерфейсы, позволяющие реализовать вычислительный процесс на графическом ускорителе, одним из которых является NVIDIA CUDA.

Целью исследования является разработка алгоритма и программного модуля для решения СЛАУ попеременно-треугольным итерационным методом для задачи гидродинамики с использованием технологии NVIDIA CUDA и определение оптимальной двумерной конфигурации потоков в вычислительном блоке, исполняемом на одном потоковом мультипроцессоре.

## Метод решения сеточных уравнений

Разрабатываемые алгоритмы и программы применяются при решении СЛАУ высокой размерности, получаемых в ходе моделирования гидродинамических процессов в мелководных водоёмах [6].

Сеточные уравнения, полученные в результате конечноразностных аппроксимаций рассматриваемых модельных задач с помощью схем с весами, можно записать в матричном виде [7]:

$$Ax = f, \quad (1)$$

где  $A$  — линейный, положительно определенный оператор ( $A > 0$ ).

В качестве решателя сеточных уравнений использовался модифицированный попеременно-треугольный метод (МПТМ).

Для нахождения решения задачи (1) будем использовать неявный итерационный процесс:

$$B \frac{x^{m+1} - x^m}{\tau_{m+1}} + Ax^m = f. \quad (2)$$

В уравнении (2)  $m$  – номер итерации,  $\tau_{m+1} > 0$  – итерационный параметр, а  $B$  – некоторый обратимый оператор, который называется предобуславливателем или стабилизатором. Обращение оператора  $B$  в (2) должно быть существенно проще, чем непосредственное обращение исходного оператора  $A$  в (1).

Предобуславливатель  $B$  построен из аддитивного представления оператора  $A_0$  – симметричной части оператора  $A$ :

$$A_0 = R_1 + R_2, \quad R_1 = R_2^*, \quad A = A_0 + A_1, \quad A_0 = A_0^*, \quad A_1 = -A_1^*. \quad (3)$$

Оператор-предобуславливатель запишется в следующем виде:

$$B = (D + \omega R_1)D^{-1}(D + \omega R_2), \quad D = D^* > 0, \quad \omega > 0, \quad (4)$$

где  $D$  – диагональная часть оператора  $A$ ,  $R_1$  и  $R_2$  – операторы с верхне- и нижнетреугольными матрицами соответственно.

Алгоритм вычисления сеточных уравнений модифицированным переменнотреугольным методом записан в виде (5):

$$\begin{aligned} r^m &= Ax^m - f, \quad B(\omega_m)\omega^m = r^m, \quad \tilde{\omega}_m = \sqrt{\frac{(D\omega^m, \omega^m)}{(D^{-1}R_2\omega^m, R_2\omega^m)}}, \\ s_m^2 &= 1 - \frac{(A_0\omega^m, \omega^m)^2}{(B^{-1}A_0\omega^m, A_0\omega^m)(B\omega^m, \omega^m)}, \quad k_m^2 = \frac{(B^{-1}A_1\omega^m, A_1\omega^m)}{(B^{-1}A_0\omega^m, A_0\omega^m)}, \\ \theta_m &= \frac{1 - \sqrt{\frac{s_m^2 k_m^2}{(1+k_m^2)}}}{1 + k_m^2 (1 - s_m^2)}, \quad \tau_{m+1} = \theta_m \frac{(A_0\omega^m, \omega^m)}{(B^{-1}A_0\omega^m, A_0\omega^m)}, \quad x^{m+1} = x^m - \tau_{m+1}\omega^m, \quad \omega_{m+1} = \tilde{\omega}_m, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $r^m$  – вектор невязки,  $\omega^m$  – вектор коррекции, параметр  $s_m$  описывает скорость сходимости метода,  $k_m$  описывает отношение нормы кососимметричной части оператора к норме симметричной части.

### Программная реализация

Для решения уравнений (1)-(4) был разработан параллельный алгоритм решения сеточных уравнений методом МПТМ, ориентированный на многопроцессорную вычислительную систему [7, 8]. Для повышения эффективности расчетов часть вычислительной нагрузки перекладывается на графический ускоритель, для чего разработан соответствующий алгоритм и его программная реализация на языке CUDA C [5]. В процессе экспериментальных исследований использовался видеоадаптер GeForce GT 710, объём видеопамати которого составляет 2Гб, тактовые частоты ядра и памяти – соответственно 954 МГц и 1800 МГц, разрядность шины видеопамати – 64 бита, число ядер CUDA – 192.

В процессе использования программной реализации алгоритма выяснилось, что потоковые мультипроцессоры графического ускорителя не всегда загружены оптимальным образом. Таким образом, возникла необходимость определения оптимальной конфигурации потоков в вычислительном блоке, исполняемом на одном потоковом мультипроцессоре.

Был проведен эксперимент, в котором распределялись потоки по осям  $OX$  и  $OZ$  расчетной сетки при фиксированном значении узлов сетки по оси  $OY = 10000$ , с целью уменьшения времени вычисления на GPU одного шага МПТМ.

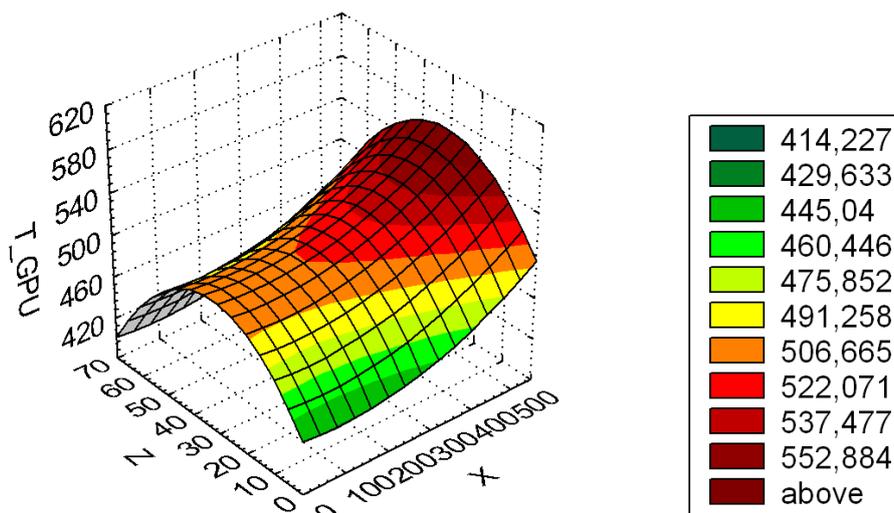
В качестве факторов эксперимента были приняты две величины:  $X$  – количество потоков по оси  $OX$ ,  $Z$  – количество потоков по оси  $OZ$ . Целевая функция:  $T_{GPU}$  – время вычисления одного шага МПТМ на GPU, мс. Произведение потоков  $X \cdot Z$  не должно превышать 1024. Такое ограничение накладывает CUDA, т.к. 1024 – это максимальное количество потоков в одном блоке. Для выбранных факторов и уровней их варьирования программно измерялось время вычисления 1 шага МПТМ на GPU. Результаты вычислений вынесены в таблицу.

Анализ экспериментальных данных проводился в программе Statistica. Было получено регрессионное уравнение (6), по нему построен график (см. рис.).

$$T_{GPU} = 450,56 - 0,048 \cdot X + 4,6 \cdot Z + 0,0003 \cdot X^2 - 0,0718 \cdot Z^2. \quad (6)$$

## Результаты эксперимента

№ п/п	X	Z	$T_{GPU}$ , мс
	16	64	430
	32	32	503
	64	16	484
	128	8	462
	256	4	457
	512	2	501

Рис. Поверхность функции отклика  $T_{GPU} = f(X, Z)$ 

Анализ результатов эксперимента показал, что время вычисления на GPU одного шага МПТМ будет минимальным при следующем распределении потоков:  $X \in [0; 400]$ ,  $Z \in [64; 70]$ . Поэтому при вычислении одного шага МПТМ на GPU принимаем  $X = 16$ ,  $Z = 64$ .

**Заключение**

В результате проведенных исследований разработаны алгоритм и программный модуль для решения СЛАУ МПТМ для задачи гидродинамики с использованием технологии NVIDIA CUDA. Определена оптимальная двумерная конфигурация потоков в вычислительном блоке, исполняемом на одном потоковом мультипроцессоре: время вычисления на GPU одного шага МПТМ является минимальным при  $X = 16$ ,  $Z = 64$  и составляет 430 мс.

**ЛИТЕРАТУРА**

- Zheng L., Gerya T., Knepley M., Yuen D., Zhang H., Shi Ya. *GPU Implementation of Multigrid Solver for Stokes Equation with Strongly Variable Viscosity*. In: Yuen D., Wang L., Chi X., Johnsson L., Ge W., Shi Y. (eds) *GPU Solutions to Multi-scale Problems in Science and Engineering. Lecture Notes in Earth System Sciences*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-16405-7\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16405-7_21).
- Xue W., Roy C. J. Multi-GPU Performance Optimization of a Computational Fluid Dynamics Code Using OpenACC. *Concurrency and Computation Practice and Experience*. 2021;33(5).
- Oyarzun G., Borrell R., Gorobets A., Oliva A. MPI-CUDA Sparse Matrix-Vector Multiplication for the Conjugate Gradient Method with an Approximate Inverse Preconditioner. *Computers and Fluids*. 2014;92:244-252.
- Nagatake T., Kunugi T. Application of GPU to Computational Multiphase Fluid Dynamics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2010;10.

5. Belova Y., Chistyakov A., Nikitina A., Litvinov V. Mathematical Modeling of Sustainable Coastal Systems Development Scenarios Based on Game-Theoretic Concepts of Hierarchical Management Using Supercomputer Technologies. In: Voevodin V., Sobolev S. (eds) *Supercomputing. RuSCDays 2020. Communications in Computer and Information Science*. 2020;1331. Springer, Cham. Режим доступа: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-64616-5\\_22](https://doi.org/10.1007/978-3-030-64616-5_22).
6. Сухинов А. И., Атаян А. М., Белова Ю. В., Литвинов В. Н., Никитина А. В., Чистяков А. Е. Обработка данных натурных измерений экспедиционных исследований для математического моделирования гидродинамических процессов Азовского моря. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2020;13(2):161–174. Режим доступа: <https://doi.org/10.7242/1999-6691/2020.13.2.13>.
7. Сухинов А. И., Чистяков А. Е., Литвинов В. Н., Никитина А. В., Белова Ю. В., Филина А. А. Вычислительные аспекты математического моделирования гидробиологических процессов в мелководном водоеме. *Вычислительные методы и программирование*. 2020;21(4):452–469. DOI: 10.26089/NumMet.v21r436.
8. Xue W., C. W. Jackson, Roy C. J. Multi-CPU/GPU Parallelization, Optimization and Machine Learning based Autotuning of Structured Grid CFD Codes. *2018 AIAA Aerospace Sciences Meeting*. P. 0362. DOI: 10.2514/6.2018-0362.

DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-9

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕОДНОРОДНЫХ СРЕД С ЯВНЫМ ВЫДЕЛЕНИЕМ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ СЕТОЧНО-ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ****И. А. Митьковец<sup>а</sup>, Н. И. Хохлов<sup>б</sup>***Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),**г. Долгопрудный, Российская Федерация**<sup>а</sup> mitkovets@phystech.edu, <sup>б</sup> k\_h@inbox.ru*

*Аннотация:* при моделировании распространения сейсмических волн в среде важной составляющей является учет разнообразных неоднородностей, так как они вносят существенный вклад в сейсмограммы, полученные в процессе реальных измерений. Основной идеей данной работы является использование наложенных сеток для описания различных неоднородностей, таких как трещины или незаполненные поры. Ожидается что данный подход позволит упростить построение сеток относительно альтернативных методов, таких как метод конечных элементов, а также позволит повысить точность.

*Ключевые слова:* сеточно-характеристический метод, метод наложенных сеток, неоднородности, трещины, пористая среда.

*Благодарности:* исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-71-10028).

*Для цитирования:* Митьковец И. А., Хохлов Н. И. Моделирование неоднородных сред с явным выделением неоднородностей сеточно-характеристическим методом. *Успехи кибернетики*. 2022;3(1):58–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-9.

**SIMULATION OF INHOMOGENEOUS MEDIA WITH EXPLICIT IDENTIFICATION OF INHOMOGENEITIES BY THE GRID-CHARACTERISTIC METHOD****I. A. Mitskovets<sup>а</sup>, N. I. Khokhlov<sup>б</sup>***Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), Dolgoprudny,**Russian Federation**<sup>а</sup> mitkovets@phystech.edu, <sup>б</sup> k\_h@inbox.ru*

*Abstract:* a key aspect of simulating seismic waves propagation in a medium is the consideration of various inhomogeneities, since significantly affect the actual seismograms. The concept of this work is the use of superimposed grids to define various inhomogeneities such as cracks or unfilled pores. It is expected that this approach will simplify meshing compared to alternative methods such as the finite element method, and improve accuracy.

*Keywords:* grid-characteristic method, superimposed grid method, inhomogeneities, cracks, porous medium.

*Acknowledgements:* this study is supported by the Russian Science Foundation grant (project No. 20-71-10028).

*Cite this article:* Mitskovets I. A., Khokhlov N. I. Simulation of Inhomogeneous Media with Explicit Identification of Inhomogeneities by the Grid-Characteristic Method. *Russian Journal of Cybernetics*. 2022;3(1):58–62. DOI: 10.51790/2712-9942-2022-3-1-9.

Рассматривается применение сеточно-характеристического метода [1] в комбинации с методом наложенных сеток в целях учета неоднородностей среды. В данной работе демонстрируются способы описания трещин и отверстий при помощи описывающих их наложенных сеток. Описание моделируемых отверстий осуществляется посредством наложения криволинейной сетки, а для учета трещин применяется регулярная прямоугольная наложенная сетка. В обоих случаях для моделирования остальной однородной среды используется регулярная прямоугольная сетка. Рассматриваемая задача – это распространение динамических волновых возмущений в неоднородных средах, с учетом пор и трещин соответственно, в упругой модели.

Эта работа основывается на идее использования наложенных сеток как средства локализации модификаций, применяемых к классическому сеточно-характеристическому методу для описания неоднородностей. Используя множество неоднородностей с различными параметрами при создании модели среды, мы таким образом создаем пористые и трещиноватые среды.

В случае моделирования отверстий такой модификации появляется криволинейная сетка со свободной поверхностью, возможность интерпретации между ней и основной сеткой позволяет нам создавать замкнутые свободные поверхности внутри регулярной прямоугольной сетки. Альтернативой данного подхода является использование неструктурных сеток в методе спектральных элементов или использование сеток с лестничной границей. По сравнению с первым альтернативным методом ожидается, что наш подход значительно упростит построение сеток. А по сравнению со вторым наш подход должен увеличить точность результатов.

Для задания единичной трещины также используется единичная наложенная сетка, которая моделирует трещину. Метод, используемый для моделирования трещины, описанный в [2], требует, чтобы сетка обладала соосностью с моделируемой ею трещиной, использование наложенной сетки позволяет задавать трещины произвольной ориентации относительно основной прямоугольной регулярной сетки. Альтернативный метод задания моделирования трещин, не обладающих соосностью относительно основной регулярной сетки, с использованием множества более мелких трещин, обладающих соосностью, и без использования наложенных сеток описан в [2].

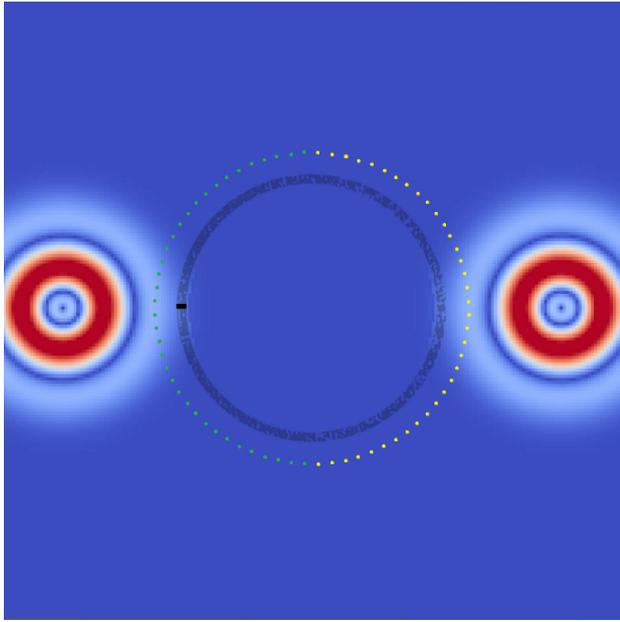
Валидация метода, в случае моделирования одного отверстия, в данной работе была произведена посредством тестового расчета, моделирующего распространение возмущений от двух идентичных источников возмущений, запущенных одновременно и расположенных симметрично относительно центра отверстия. Возмущения, порождаемые данными источниками, определяются импульсом Риккера с частотой 15 Гц. Регулярная прямоугольная сетка, используемая для валидации, имеет размер  $200 \times 200$  узлов, размером  $5 \times 5$  метров каждый. Криволинейная сетка, которая формирует собой отверстие, имеет размер  $407 \times 5$  и характерный размер ячейки 3 метра. Характеристики среды, в которой располагается отверстие, следующие:  $C_s = 2850$  м/с;  $C_p = 1650$  м/с;  $\rho = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. Моделирование проведено в течение 0.5 секунд с шагом  $\Delta t = 0.1$  мс. На рис. 1 приведена постановка данного эксперимента.

Поскольку среди общедоступных разработок не удалось найти модель, описывающую круглое отверстие в выбранной нами постановке задачи, было решено прибегнуть к свойствам симметричности отверстий и попарно симметричным, переходящим друг в друга после поворота на 180 градусов источникам, образующим кольцо вокруг отверстия. По норме МАЕ, отраженной на рис. 2, относительная разность показаний симметричных источников не превышает 1,8 %.

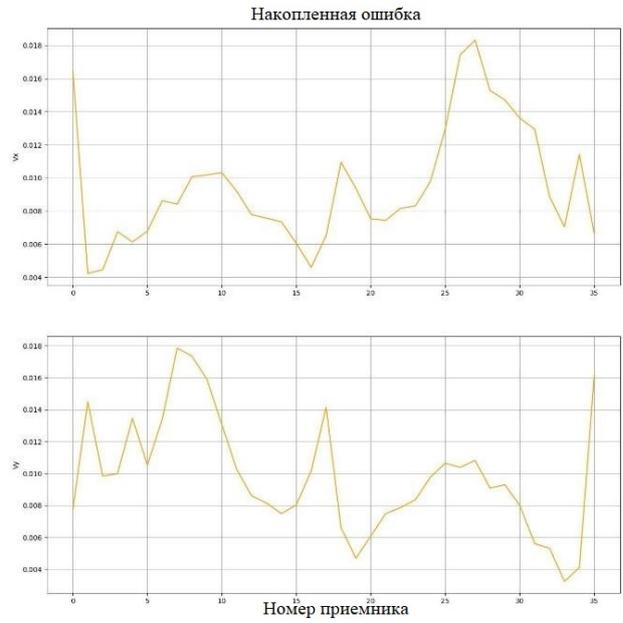
Валидация метода в случае моделирования трещины в данной работе была проведена на ряде синтетических расчетов с целью исследования зависимости изменения ошибки расчетов от угла поворота наложенной сетки, задающей трещину. Возмущения, порождаемые данными источниками, определяются импульсом Риккера с частотой 15 Гц. Регулярная прямоугольная сетка, используемая для исследования, имеет размер  $400 \times 400$  узлов,  $2 \times 2$  м каждый. Наложённые сетки имеют размер  $32 \times 13$ , размер их ячеек  $2 \times 2$  м. Сплошная среда имеет следующие характеристики:  $C_s = 2850$  м/с;  $C_p = 1650$  м/с;  $\rho = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. В работе проведено моделирование распространения динамических волновых возмущений в течение 0.75 секунд с шагом  $\Delta t = 0.3$  мс.

Постановка экспериментов на примере одного из углов поворота представлена на рис. 3. Синим цветом отмечены не повернутая трещина и соответствующие ей 72 приемника, а зеленым — повернутая трещина и повернутые на тот же угол приемники. Зависимость относительной погрешности при попарном сравнении не повернутого и соответствующего ему повернутого источника по норме МАЕ от угла поворота отражена на рис. 4, как видно, она не превышает 11,1 %.

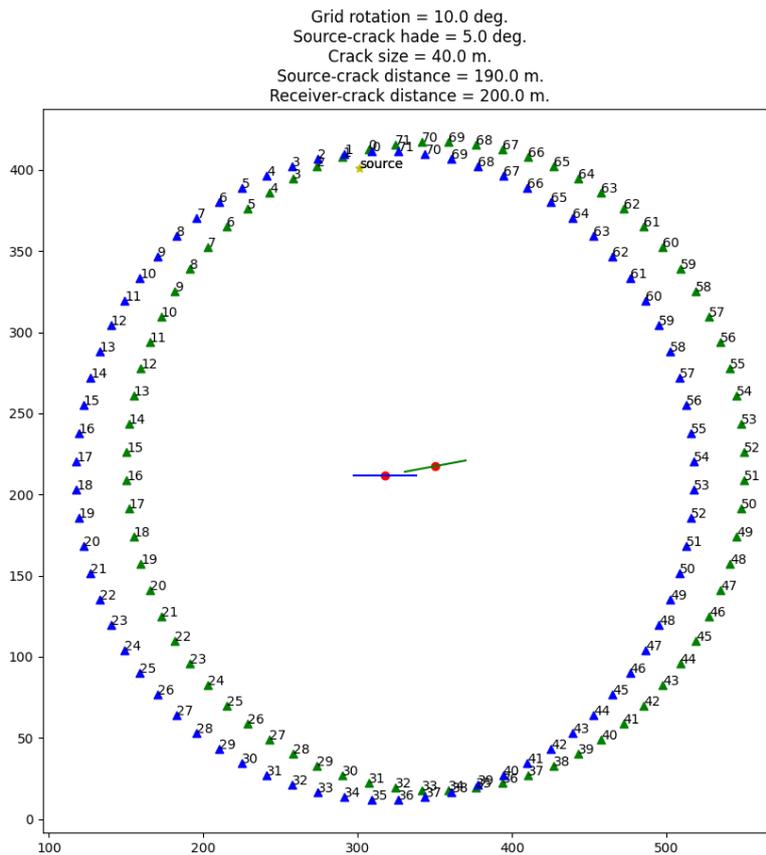
Пример использования данного подхода для моделирования пористой среды см. на рис. 5. В приведенных там расчетах среда различной пористости создается посредством описания ее как сгруппированного множества круглых отверстий со свободной границей внутри. Полученные в результате моделирования распространения плоской волны через описанную структуру волновые картины отображены на рис. 5. Регулярная прямоугольная сетка имеет размер  $400 \times 360$  узлов,  $5 \times 5$  м каждый. Размеры сеток, описывающих отверстия, варьируются от  $63 \times 5$  до  $125 \times 5$  узлов, характерный размер их ячеек 3–5 м. Сплошная среда имеет следующие характеристики:  $C_s = 2850$  м/с;  $C_p = 1650$  м/с;  $\rho = 2400$  кг/м<sup>3</sup>. Моделирование проведено в течение 0.6 секунд с шагом  $\Delta t = 0.1$  мс.



**Рис. 1.** Иллюстрация постановки задачи, цветами выделены симметрично расположенные приемники

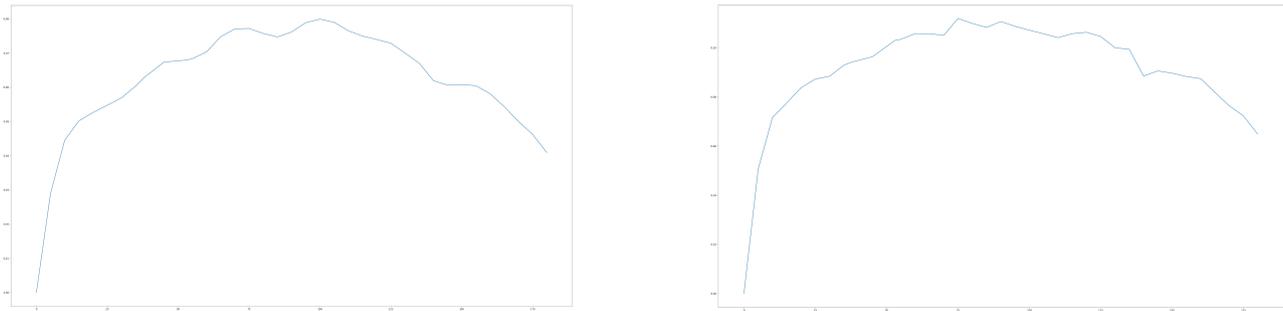


**Рис. 2.** Накопленная ошибка при попарном сравнении показаний на приемниках

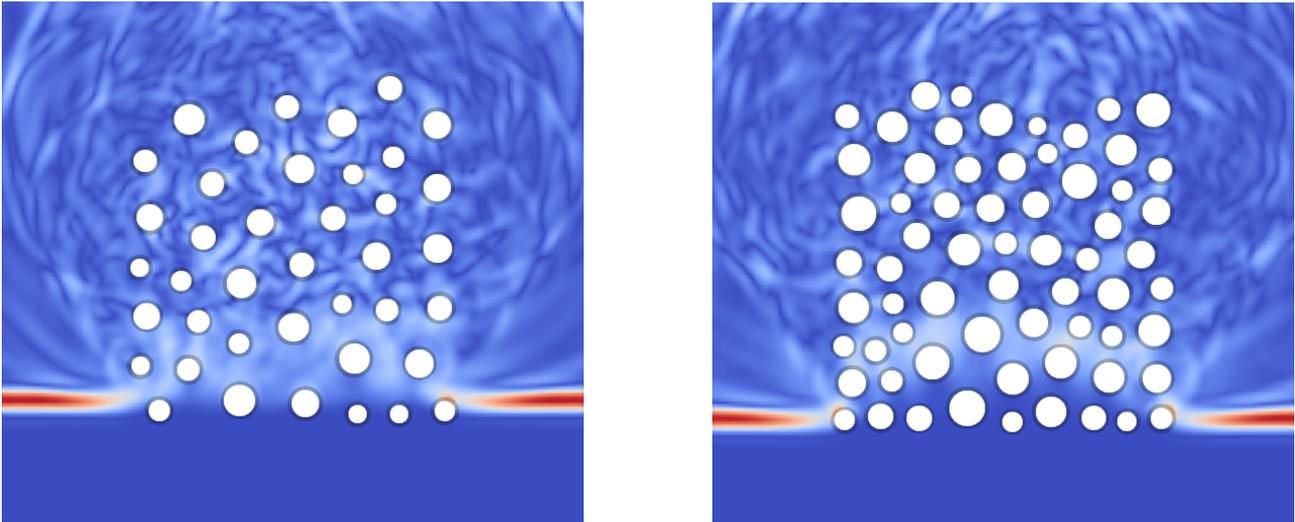


**Рис. 3.** Примеры эквивалентных конфигураций трещин и приемников

В качестве демонстрации работы предложенного метода было выполнено моделирование распространения волн в среде, содержащей трещины. Описание и параметры среды взяты из [3]. Распределение плотности в среде и контуры наложенных сеток, содержащих трещины, представлены на рис. 6. Источник возмущений точечный, описывается импульсом Риккера частотой 15 Гц. Результат произведенного моделирования в виде волновых картин представлен на рис. 7. Основная регулярная

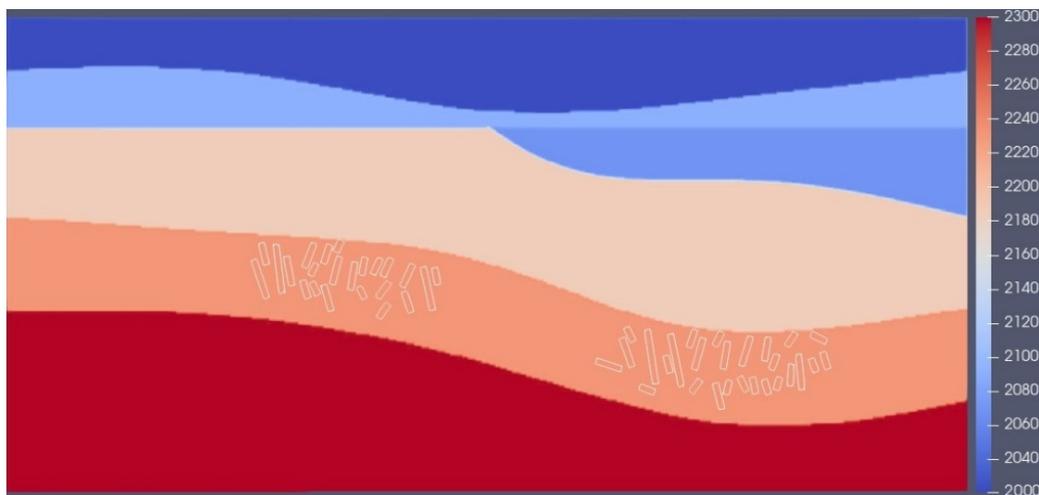


**Рис. 4.** Зависимость накопленной ошибки от угла поворота

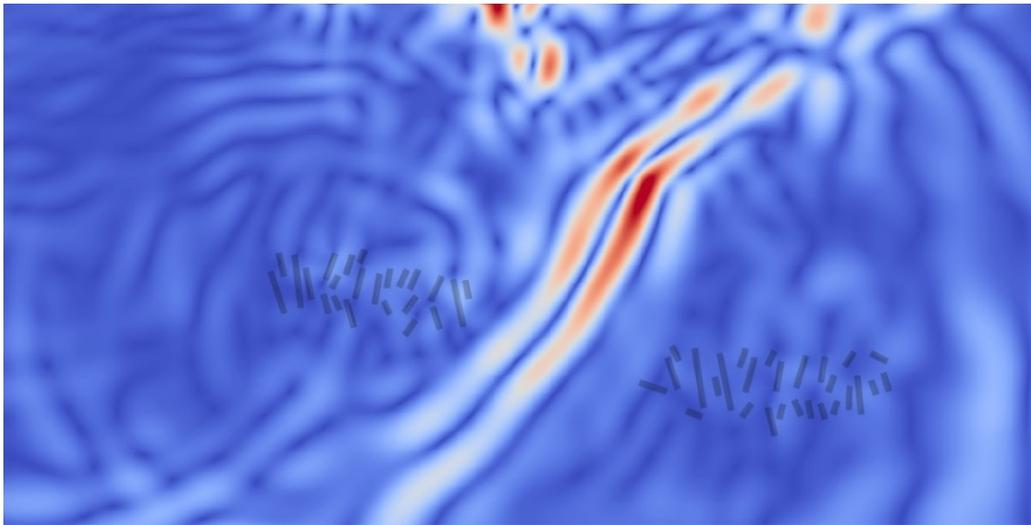


**Рис. 5.** Волновые картины, полученные в ходе моделирования распространения плоской волны в среде с меньшим (а) и большим (б) количеством пор

сетка имеет размер  $1280 \times 638$  узлов,  $0.78125 \times 0.78125$  м каждый узел. Размеры сеток, описывающих отверстия, варьируются от  $19 \times 9$  до  $74 \times 9$  узлов, размеры ячеек порядка 0.78 м. Моделирование проведено в течение 0.5 секунд с шагом  $\Delta t = 0.1$  мс. Распределение продольной и поперечной скорости соответствует постановке задачи в [3].



**Рис. 6.** Расположение наложенных сеток, используемых для учета трещин в демонстрационном расчете



**Рис. 7.** Волновая картина, полученная в демонстрационном расчете в трещиноватой среде с точечным источником

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Магомедов К. М., Холодов А. С. *Сеточно-характеристические численные методы*. М.: Наука, 1988.
2. Khokhlov N., Stognii P. Novel Approach to Modeling the Seismic Waves in the Areas with Complex Fractured Geological Structures. *Minerals*. 2020;10:122.
3. Cho Y., Gibson R. L., Vasilyeva M. V., Efendiev Y. Generalized Multi-Scale Finite Elements for Simulation of Elastic Wave Propagation in Fractured Media. *Geophysics*. 2018;83:9.

Сетевое издание. Полные тексты статей размещаются на официальном сайте издания [jcyb.ru](http://jcyb.ru).

Адрес учредителя и издателя:

Федеральное государственное учреждение «Федеральный научный центр  
Научно-исследовательский институт системных исследований Российской академии наук»,  
117218, г. Москва, Нахимовский просп., дом 36, корпус 1. Телефон: +7 (495) 718-21-10.

Дата выхода в свет 25.03.2022.

Формат 60 × 84/8.

Усл. печ. л. 4,3. Уч.-изд. л. 6,4.

Цена свободная.