СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 4 (88) **2022**

УДК 681.51(06)
С 409

Учредитель

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Редакционная коллегия

Главный редактор

Лемешко Борис Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Заместители главного редактора

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Шокин Юрий Иванович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

Воевода Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Члены редколлегии

Володин Андрей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доктор философии по статистике Университета Регины, проф., Канада
Воронин Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск
Воскобойников Юрий Евгеньевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск
Гайдук Анатолий Романович, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог
Генералов Владимир Михайлович, д-р техн. наук, ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, г. Новосибирск
Григорьев Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург
Гриф Михаил Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Дмитриев Александр Капитонович, д-р физ.-мат. наук, НГТУ, г. Новосибирск
Комаров Андрей Константинович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск
Лисицына Лилия Ивановна, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Наумова Елена Николаевна, д-р техн. наук, проф., Университет Тафтса, США
Носек Ярослав, д-р техн. наук, проф., Технический университет Либерец, Чехия
Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, проф., СПб ФИЦ РАН, г. Санкт-Петербург
Рубан Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск
Сидоров Денис Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
Уранчимэг Тудевдагва, д-р техн. наук, проф., Хемницкий технический университет, Германия
Фомин Василий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск
Хабаров Валерий Иванович, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск
Ханова Анна Алексеевна, д-р техн. наук, проф., АГТУ, г. Астрахань
Хлебников Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва
Шандаров Станислав Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., ТУСУР, г. Томск

Адрес редакции и издателя: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ
Тел. (383) 346-56-88, тел., факс (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

16+

Индекс: 82962 («РОСПЕЧАТЬ») **УДК 681.51(06)**

© Коллектив авторов, 2022
© Новосибирский государственный технический университет, 2022

СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 4 (88) **2022**

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Воевода А.А., Шипагин В.И. О выборе архитектуры нейрорегулятора 7

Казаринов А.В., Деревянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э. Классификация и анализ локализации проектов по производству водорода 31

Савельев А.И., Крестовников К.Д., Ерашов А.А. Анализ подходов к функционированию автономного необитаемого аппарата и надводного судна при проведении совместных миссий 49

Шорников Ю.В., Тимофеев К.А. Анализ численных методов интегрирования жестких систем высокой размерности в SimInTech 63

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ И ИНФОРМАТИКА

Гриф А.М., Соловейчик Ю.Г. Исследование эффективности методов постобработки потоков при решении задач многофазной фильтрации 75

Овчинникова А.С., Персова М.Г., Леонович Д.А. Подход к определению коэффициента теплообмена между породой и смесью флюидов при моделировании процессов неизотермической многофазной фильтрации 89

Правила для авторов 101

Корректор *Л.Н. Киншт*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации ПИ № ФС77-76010 от 03 июля 2019 г.
Периодичность издания – 4 номера в год.
Подписано в печать 19.12.2022. Выход в свет 27.12.2022.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 9,1. Печатных листов 6,5. Издательский № 255. Заказ № 10
Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 4 (88) **2022**

УДК 681.51(06)
С 409

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Editorial board

Chief editor

Lemeshko B. Yu., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Vostretsov A. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Shokin Yu. I., D.Sc. (Phys.& Math.), Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A. A., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Volodin A. I., D.Sc. (Phys. & Math.), Doctor of Philosophy in Statistics from the University of Regina, Professor of Statistics University of Regina, Canada
Voronin V. V., D.Sc. (Eng.), Pacific national University, Khabarovsk, RF
Voskoboinikov Yu. E., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, RF
Gaiduk A. R., D.Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF
Generalov V. M., D.Sc. (Eng.), FBUN GNTS VB «Vektor» Rospotrebnadzora, Novosibirsk, RF
Grigor'ev Yu. D., D.Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF
Grif M. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Dmitriev A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Komarov A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, RF
Kryukov A. V., D.Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Lisitcina L. I., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Naumova E. N., PhD. (Math.), Tufts University, USA
Nosek J., D.Sc. (Eng.), Technical University of Liberec, Czech Republic
Ronzhin A. L., D.Sc. (Eng.), Federal Research Center Russian Academy of sciences, Saint-Petersburg, RF
Ruban A. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF
Sidorov D. N., D.Sc. (Phys. & Math.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF
Uranchimeg T., D.Sc. (Eng.), Technische Universität Chemnitz, Germany
Fomin V. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Khristianovich Institut of theoretical and applied mechanics SB RAS, Novosibirsk, RF
Khabarov V. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF
Khanova A. A., D.Sc. (Eng.), Astrakhan State Technical University, Astrakhan, RF
Khlebnikov M. V., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Control Sciences, Moscow, RF
Shandarov S. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, RF

Editorial Adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
Tel. (383) 346-56-88, Fax (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

УДК 681.51(06)

© Authors, 2022
© Novosibirsk State Technical University, 2022

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 4 (88) **2022**

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATIONS

Voevoda A.A., Shipagin V.I. On the choice of the neuroregulator architecture 7

Kazarinov A.V., Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E. Classification and localization analysis of hydrogen production projects..... 31

Saveliev A.I., Krestovnikov K.D., Erashov A.A. Analysis of approaches to functioning of an autonomous unmanned vehicle and a surface ship in joint missions 49

Shornikov Yu.V., Timofeev K.A. Analysis of numerical methods for integrating high-dimensional stiff systems in SimInTech 63

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION SCIENCE

Grif A.M., Soloveichik Yu.G. Investigation of the efficiency of post-processing methods in solving problems of multi-phase filtration 75

Ovchinnikova A.S., Persova M.G., Leonovich D.A. Approach to the determination of the heat transfer coefficient between rock and fluid mixture for modeling non-isothermal multiphase flow..... 89

Rules for authors..... 101

Editor *L.N. Kinsht*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Publication frequency – 4 numbers a year.
Signed in print December 19, 2022.
Date of publication December 27, 2022. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 9,1. Printed pages 6,5.
Publishing number 255. Order number 10

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 88, № 4, 2022, с. 7–30

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 88, No. 4, 2022, pp. 7–30

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.873

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-7-30

О выборе архитектуры нейрорегулятора*

А.А. ВОЕВОДА[a], В.И. ШИПАГИН[b]

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *voevoda@corp.nstu.ru* [b] *shipagin@mail.ru*

На практике выбор вида нейронной сети осуществляется эмпирически на основе опыта исследователя и множества попыток обучения. При этом избыточная сложность нейронной сети приводит к увеличению времени ее обучения, а в некоторых случаях и вообще к невозможности обучения. Таким образом, обоснование выбора структуры искусственной нейронной сети и/или ее предварительный расчет на основе других моделей является актуальной задачей. Не менее важной задачей является выбор начальных весовых коэффициентов нейронной сети, от выбора которых зависит скорость сходимости поисковых алгоритмов. В настоящей работе продемонстрирован подход к решению вопроса выбора архитектуры и инициализации весовых коэффициентов нейронной сети. Один из них проводится на основании предварительно рассчитанной функции с помощью сетей Петри. Этот подход продемонстрирован для решения различных задач, к которым можно отнести реализацию функций с помощью предварительно определенных нейросетевых моделей простейших логических операций «и», «или» и т. д. Приведен подход, позволяющий оптимизировать архитектуру нейронной сети, решающую задачу аппроксимации функций одной и нескольких переменных. Принцип определения архитектуры и начальных весовых коэффициентов также используется в задачах обучения нейронных сетей с подкреплением. Отдельный раздел посвящен формированию методики определения архитектуры и инициализации весовых коэффициентов нейронной сети регулятора на основании информации о регуляторе, полученном модальным методом, использующем полиномиальное матричное разложение системы. Решается вопрос синтеза нейросетевого регулятора для системы, содержащей нелинейности и непараметрические неопределенности в канале управления.

Ключевые слова: нейронная сеть, инициализация весовых коэффициентов, выбор архитектуры нейронной сети, нейрорегулятор, сеть Петри, аппроксимация функции, логические операции, модальный метод

* *Статья получена 19 февраля 2022 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Применение нейросетевых регуляторов в настоящее время довольно распространено [1–14, 20, 21, 23–25, 27, 29–32, 34–36]. Это связано с набором некоторых преимуществ их использования перед классическими регуляторами[1]. Однако при использовании нейрорегуляторов также существует ряд неформализованных вопросов (например, выбор архитектуры и инициализация весовых коэффициентов нейронной сети). Решения перечисленных задач опираются в основном на эмпирический опыт исследователя. Поэтому довольно часто возникает проблема излишней сложности применяемой нейронной сети в регуляторе. Это, в свою очередь, приводит либо к увеличению времени обучения данного регулятора или, в некоторых случаях, к невозможности поиска оптимального решения.

В настоящей статье приведен краткий обзор статей, посвященных исследованию вопроса детерминированного подхода к выбору архитектуры и инициализации весовых коэффициентов для нейрорегулятора. Рассматриваются вопросы синтеза нейросетевых регуляторов для различного класса задач. В первом разделе описываются результаты работ по синтезу нейросетевых регуляторов для логико-арифметических задач, а также задач аппроксимации функции одной и нескольких переменных. Приводятся работы по синтезу нейросетевых регуляторов исходя из информации о регуляторе, сформированном на сетях Петри. Рассматриваются преимущества и недостатки метода обучения нейронных сетей методом «обучения с подкреплением». Второй раздел посвящен формированию методики синтеза нейросетевого регулятора на основе информации о регуляторе, полученном модальным методом, использующим полиномиальное матричное разложение системы.

1. ФОРМИРОВАНИЕ АЛГОРИТМА СИНТЕЗА НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА С ДЕТЕРМЕНИРОВАННЫМ СПОСОБОМ ВЫБОРА АРХИТЕКТУРЫ

В классических методах синтеза регуляторов создана достаточно большая база для решения вопроса синтеза системы автоматического управления для линеаризованных систем. Однако в случае, например, необходимости учета нелинейных параметров модели объекта набор существующих алгоритмов классических методов теории автоматического управления существенно ограничен. С другой стороны, нейронные сети по своей сущности являются универсальными аппроксиматорами, т. е. могут с большой степенью точности повторить, например, заданную кривую. Также из этого следует, что в отличие от классических алгоритмов системы, основанные на нейронных сетях, будут всегда иметь какой-то процент ошибок из-за своей вероятностной природы. В связи с вышеуказанными достоинствами и недостатками обоих подходов

[1] К таким преимуществам можно отнести возможность учета нелинейностей в модели объекта (Воевода А.А. Метод синтеза регуляторов с использованием нейронных сетей для нелинейных объектов / А.А. Воевода, Д.О. Романников // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2020. № 7. С. 23–30. EDN BBVHMK).

было принято решение о необходимости симбиоза нейронной сети и классических алгоритмов. Кроме этого, было выяснено, что использование предопределенной структуры нейронной сети позволяет существенно упростить процедуру обучения регулятора.

В статье [17] сравниваются два подхода к построению нейронной сети. Первый подход является классическим – архитектура нейронной сети взята из типовых и представляет собой несколько слоев (рис. 1).

```
ret_model.add(Dense(5, input_shape=(6,), activation='sigmoid'))
ret_model.add(Dense(4, input_shape=(5,), activation='sigmoid'))
ret_model.add(Dense(2, activation='sigmoid'))
ada_grad = Adagrad(lr=0.1, epsilon=1e-08, decay=0.0)
ret_model.compile(optimizer=ada_grad, loss='binary_crossentropy')
```

Рис. 1. Исходный код для реализации нейронной сети

Fig. 1. A source code for neural network implementation

В данной сети четыре слоя, во входном слое шесть нейронов, в первом скрытом – пять нейронов, во втором – четыре и в выходном слое – два.

Второй способ заключается в предварительном расчете структуры нейронной сети (на основании решения, представленного в сетях Петри) и дальнейшем ее обучении.

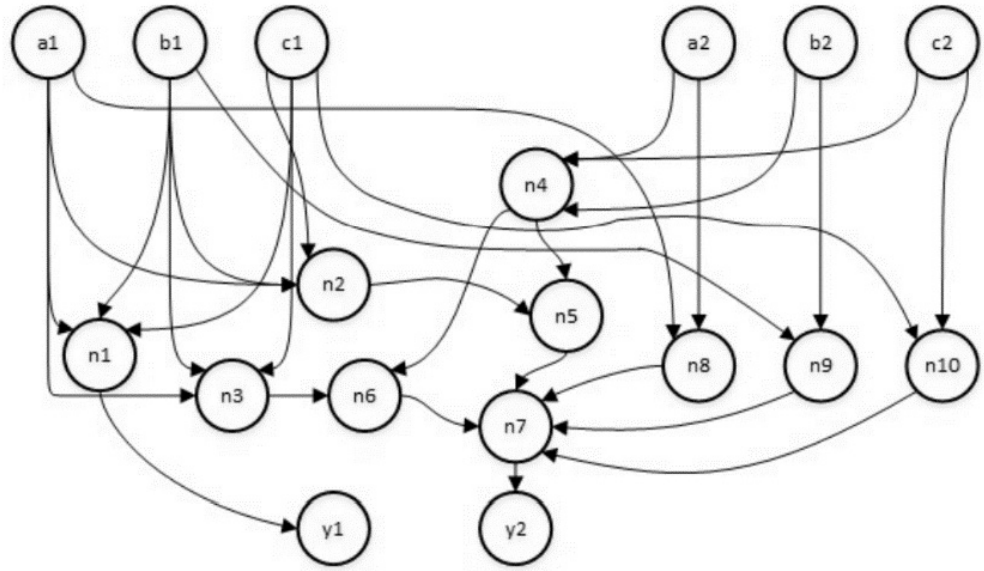
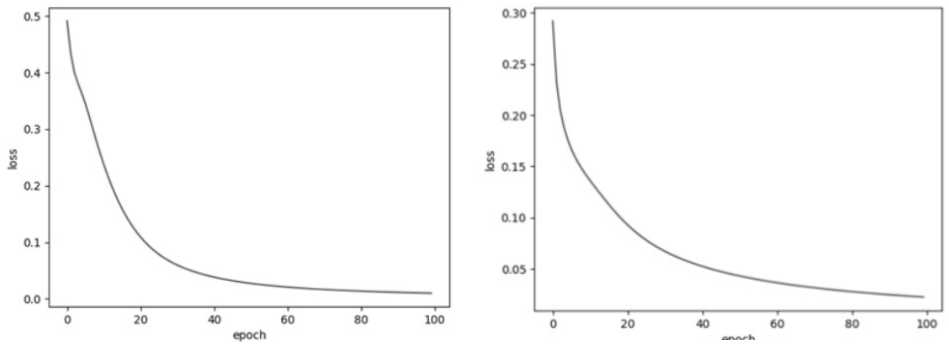


Рис. 2. Нейронная сеть для выбора максимального числа из трех чисел, представленных двумя разрядами

Fig. 2. A neural network for selecting the maximum number of three represented by two digits

Ни рис. 2 a1, a2; b1, b2; c1, c2 представляют собой три числа, в которых меньший номер соответствует старшему разряду. Нейроны обозначены как n1–n10, а выходной слой как y1, y2. В качестве нелинейности нейронов используется сигмоидальная функция. Графики обучения для первой и второй нейронных сетей представлены на рис. 3.



а *б*

Рис. 3. График стоимостной функции обучения типовой (*а*) и предварительно рассчитанной *б*) нейронных сетей

Fig. 3. Graphs of the cost function of training typical (*a*) and pre-calculated (*б*) neural networks

Из графиков на рис. 3 видно, что нейронная сеть с предварительно рассчитанными параметрами (*б*) обучается быстрее и за 100 эпох сошлась к меньшей ошибке, чем типовая нейронная сеть (*а*). Такой результат является ожидаемым, так как в типовой нейронной сети (рис. 3, *а*) 69 обучаемых параметров, а у предварительно рассчитанной нейронной сети 44 параметра. Уменьшение сложности приводит к увеличению скорости обучения.

Понимание работы любого инструмента основывается на осознании принципов его действия и практических навыках его использования. В частности, понимание работы нейронных сетей может быть достигнуто за счет моделирования различных примеров и анализа результатов. Этот подход был отработан на базе **некоторых логико-арифметических задачах**. В статье [15] предлагается алгоритм сортировки массива целых чисел с использованием нейронной сети. Предлагается готовая структура нейронной сети с обоснованием ее выбора и метод настройки ее весовых коэффициентов. В статье [26] рассматривается подход к синтезу нейронной сети для класса логико-арифметических задач, основанный на формировании сети из заранее определенных на нейронах элементарных функций.

Так, например, операции логического «или», «и», конъюнкции, дизъюнкции и функций сравнения могут быть реализованы на одном нейроне с помощью подстройки весовых коэффициентов w_1 и w_2, а также смещения b.

Известно, что логическую операцию «исключающего или» можно выразить через вышеприведенные логические операции. Тогда нейронная сеть, реализующая данную операцию, может быть составлена из представленных на рис. 4.

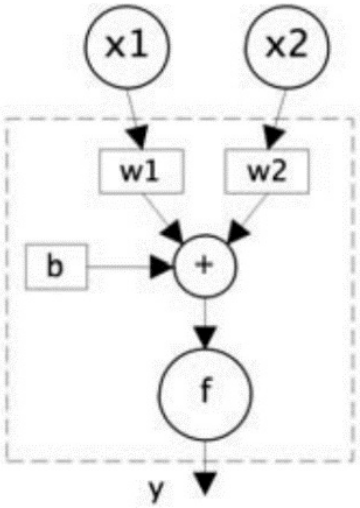


Рис. 4. Нейронная схема, составленная для реализации логических операций: «и», «или», конъюнкции, дизъюнкции и функций сравнения

Fig. 4. A neural circuit designed to implement logical operations: "and", "or", conjunctions, disjunctions and comparison functions

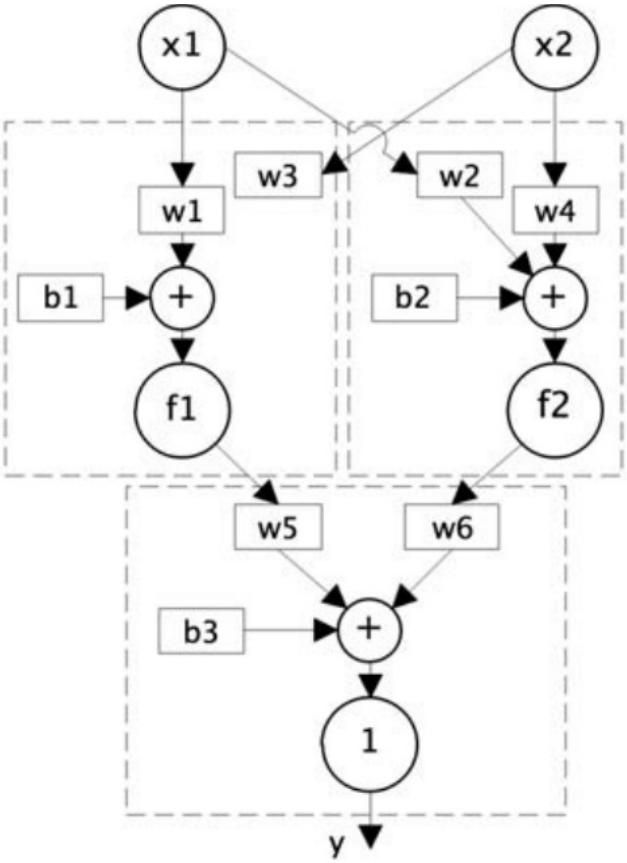


Рис. 5. Нейронная схема, составленная для реализации логической операции – «исключающего или» XOR

Fig. 5. A neural circuit designed to implement a logical operation – "exclusive or" XOR

Новизна предлагаемого подхода заключается в формировании нейронной сети по известному алгоритму с использованием предварительно построенных функций.

С использованием нейросетевого подхода исследуются возможности по предопределению структуры нейронной сети для задачи **аппроксимации функций**. В статье [22] рассматривается задача аппроксимации функций двух переменных с помощью нейронной сети с заранее определенной структурой.

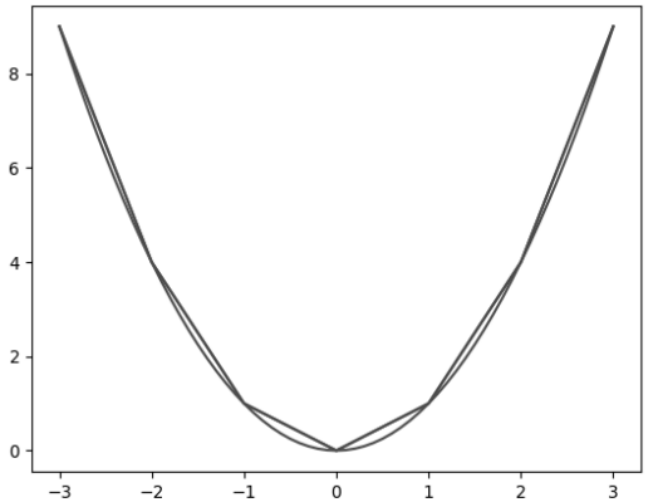


Рис. 6. Графики функции параболы и ее аппроксимации по семи точкам

Fig. 6. Graphs of the parabola function and its approximation by seven points

Этот подход основан на последовательном дополнении нейронов в структуру однослойного персептрона. То есть если аппроксимировать параболу с помощью прямых линий, как показано на рис. 6, то нейронная сеть может быть составлена исходя из последовательно соединенных аппроксимаций прямой линии. Аппроксимацию прямой линии можно осуществить с помощью нейронной сети, состоящей из одного нейрона. Причем в этой нейронной сети в качестве функции активации была использована функция *relu*: $f(x) = \{0,\ \ x <= 0;\ \ x,\ \ x > 0\}$. В итоге получается нейронная сеть, описываемая выражением *relu* $(-5x - 6)$ + *relu* $(2x + 4)$ – *relu* $(5x + 6)$ + *relu* $(2x + 2)$ + + *relu* $(2x)$ + *relu* $(2x - 2)$ + *relu* $(2x - 4)$. Часть данной нейронной сети продемонстрирована на рис. 7

Данный подход применен для функции нескольких переменных в работе [28].

Достаточно перспективным показал себя подход, основанный на расчете структуры нейронной сети на основании информации о регуляторе, рассчитанном на **сетях Петри**. В статье [16] на примере задачи выявления наименьшего (наибольшего) элемента среди двух сравниваемых чисел приводится пример преобразования сети Петри в нейронную сеть.

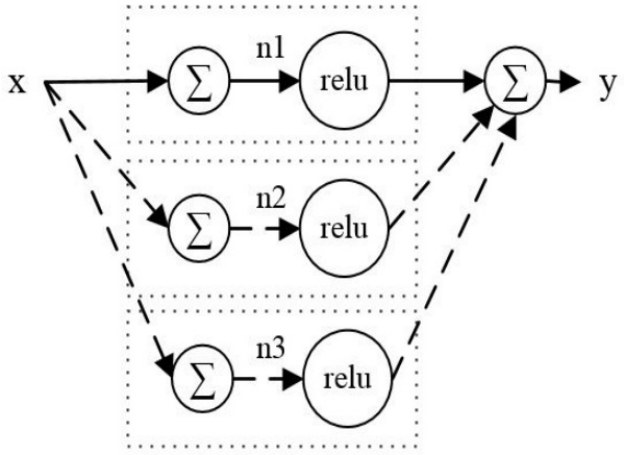


Рис. 7. Часть структуры нейронной сети, аппроксимирующей параболу

Fig. 7. A part of the neural network structure approximating parabolas

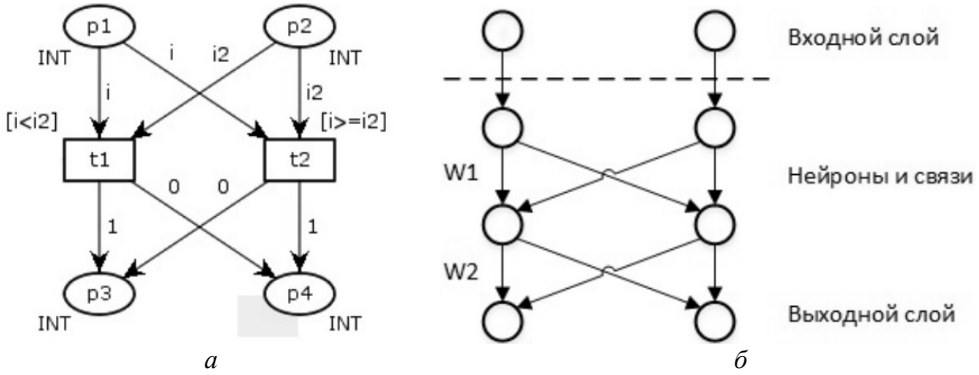


Рис. 8. Схематичное решение задачи поиска наименьшего элемента на сетях Петри (*а*) и на нейронной сети (*б*)

Fig. 8. A schematic solution of the problem of finding the smallest element on Petri nets (*a*) and on a neural network (*б*)

На рис. 8 показана нейронная сеть с использованием функции *relu* в первом слое и функции *softmax* в элементах второго слоя[2].

В статье [18] приведены реализации данного подхода на примерах построения нейронных сетей для логических функций «и», «или», «исключаю-

[2] Подход, основанный на расчете структуры нейронной сети на основании информации о регуляторе, рассчитанном на сетях Петри, продемонстрирован также в статье (Воевода А.А. Обучение нейронной сети с предварительно рассчитанной структурой / А.А. Воевода, Д.О. Романников // Сборник научных трудов Новосибирского государственного технического университета. 2018. № 2(92). С. 93–100. DOI 10.17212/2307-6879-2018-2-93-100. EDN YAKADB).

щего или», выбора максимального числа и другие. По результатам экспериментов выдвинут ***тезис о неоднозначности обучения в нейронных сетях***, а именно, что при различных начальных условиях могут получиться различные веса параметров. Например, при разных условиях инициализации весовых коэффициентов для логической операции «и» получались различные коэффициенты: $w_1 = 5.271$, $w_2 = 5.146$, $b_1 = -7.845$ или $w_1 = 11.462$, $w_2 = -4.774$, $b_1 = -2.326$ или $w_1 = 7.408$, $w_2 = 5.967$, $b_1 = -10.396$ для реализации структурной схемы согласно рис. 4.

Рассматривался тип нейронных сетей с типом **обучения с подкреплением**. Одним из очевидных преимуществ данного типа обучения можно считать возможность применения обучения из неустойчивого (произвольного) начального положения. При этом, в отличие от обучения «с учителем», заранее сформированной системы автоматического управления для обучения нейрорегулятора в данном случае не требуется. В статье [23] предлагается способ выбора структуры нейронной сети и замкнутой системы, в которой уставка является входным параметром нейронной сети регулятора. Предложена модификация метода синтеза регулятора, необходимая для устранения недостатка: при смене уставки было необходимо переобучать нейросетевой регулятор. Для этого предлагается использовать нормализованное значение сигнала уставки и изменение вычисления награды. В статье [19] предлагается способ, основанный на формировании структуры нейронной сети, позволяющий упростить процесс реализации и обучения нейронной сети за счет разбиения изначальной задачи на более простые, реализация и обучение которых является известной задачей. Также данный подход позволяет получить частичную наблюдаемость нейронной сети, когда в каждый момент времени известно текущее состояние, значения признаков переходов и управляющие сигналы как всей нейронной сети, так и каждого из состояний. В статье [20] обучение с подкреплением будет применяться к одному из динамических объектов – к перевернутому маятнику. В качестве модели указанного объекта рассматривается модель перевернутого маятника на тележке. Приводится реализация и исследование двух алгоритмов из данного подхода – Deep Q-learning и Double Deep Qlearning. В статье [21] нейронный регулятор, на вход которого подается вектор состояния объекта (для объектов с недоступным вектором состояния возможно использовать вектор оценки вектора состояния объекта), обучается для стабилизации в одном из возможных желаемых значений, а для обеспечения регулирования в других желаемых значениях предлагается пропорционально уменьшать / увеличивать сигнал вектора состояния и увеличивать / уменьшать сигнал управления, формируемого нейронным регулятором. Достоинства предлагаемого метода: отсутствие необходимости обучения на нескольких желаемых значениях, что существенно упрощает и ускоряет обучение нейронной сети, а также устраняет ошибки регулирования в диапазоне значений, для которого не выполнялось обучение нейронного регулятора, возможность обучения из начального неустойчивого состояния замкнутой системы. В статье [30] на примере задачи перевернутого маятника приводится сравнительный анализ различных методов поиска весовых коэффициентов для алгоритма обучения с подкреплением.

Таким образом, на достаточно широком классе задач (логико-арифметические задачи, аппроксимация функций одной и нескольких переменных, моделирование сетей Петри, обучение нейросети с подкреплением) была показана возможность детерминированного подхода к выбору структуры и весовым коэффициентам нейросетевого регулятора. Это, в свою очередь, позволяет уменьшить сложность поиска весовых коэффициентов нейросетевого регулятора и повысить вероятность поиска решения задачи настройки по сравнению с использованием типовых структур.

На следующем этапе было предложено использовать наработанную базу синтеза регуляторов с помощью модального метода, использующего полиномиальное матричное разложение системы для определения структуры и начальных весовых коэффициентов нейронной сети.

2. СИНТЕЗ НЕЙРОСЕТЕВОГО РЕГУЛЯТОРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИИ О РЕГУЛЯТОРЕ, ПОЛУЧЕННОМ МОДАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

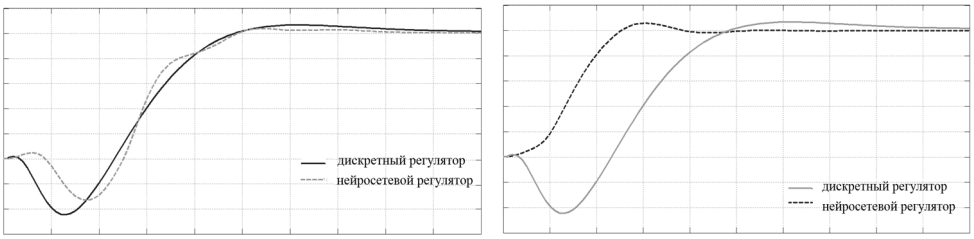
Создана достаточно обширная база знаний по синтезу регуляторов модальным методом, использующим полиномиальное матричное разложение системы. Указанные алгоритмы показали свою эффективность как на одноканальных [36, 37], так и на многоканальных [38] системах, в том числе имеющих неквадратную матричную передаточную функцию [39] (т. е. с числом входных каналов, не равным числу выходных каналов). Но, с другой стороны, указанное направление синтеза регуляторов имеет ограничение на использование для моделей объектов, содержащих нелинейные параметры.

На основе алгоритмов, представленных в работах [15–23, 26, 28, 30], сделано предположение, что синтез нейросетевого регулятора может быть также осуществлен с расчетом структуры и начальных весовых коэффициентов нейронной сети с использованием информации о регуляторе, полученном модальным методом, использующим полиномиальное матричное разложение передаточной функции замкнутой системы (далее PMFD – *polynomial matrix fraction decomposition*).

В статье [31] продемонстрирована методика синтеза нейросетевого регулятора на примере одноканальной модели, описываемой колебательным звеном. Выяснено, что в случае обучения нейросетевого регулятора обучения «с учителем» от подбора тренировочной выборки зависит результативность полученного регулятора. Так, в рассматриваемом примере если тренировочная выборка представлена в основном информацией о режиме работы регулятора для системы в установившемся режиме, то и показатели качества полученного нейросетевого регулятора выше.

Например нейросетевой регулятор, который обучался методом «с учителем» на примере дискретного регулятора с выборкой, составленной из информации о поведении регулятора на временном промежутке от 0 до 10 секунд, представлен на рис. 9, *а*. Нейросетевой регулятор, обученный на том же дискретном регуляторе, но с выборкой, составленной на времен-

ном промежутке от 0 до 20 секунд, представлен на рис. 9, *б*. Время переходного процесса уменьшается с 5 до 3 секунд. Это может быть связано с тем, что большая часть данных представлена статическим режимом системы. При длине ступенчатого воздействия 20 секунд данных, соответствующих статическому режиму или в непосредственной близости от него, будет около 77,5 %. Кроме этого, было выяснено, что в некоторых случаях возможна оптимизация структуры нейросетевого регулятора исходя из его статических характеристик.



а *б*

Рис. 9. Переходные процессы системы в случае использования нейросетевых регуляторов, обученных на поведении регулятора:

а – на временном промежутке от 0 до 10 секунд; *б* – на временном промежутке от 0 до 20 секунд

Fig. 9. Transients of the system in the case of using neural network controllers trained on the behavior of the controller:

a – for a time interval from 0 to 10 seconds; *б* – in the time interval from 0 to 20 seconds

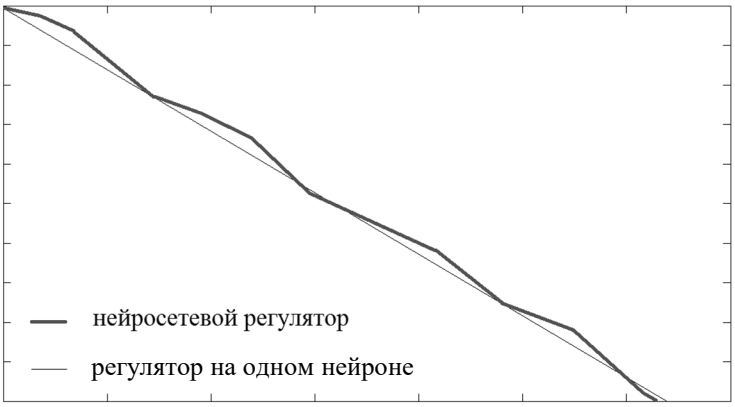


Рис. 10. Статическая характеристика нейросетевого регулятора и его аппроксимация с помощью регулятора на одном нейроне

Fig. 10. Static characteristics of a neural network controller and its approximation using a controller on one neuron

Изначально в статье использовалась типовая структура нейрорегулятора, состоящая из 10 нейронов в первом слое с функцией активации *tansig* – «гиперболический тангенс» и одного нейрона с «линейной функцией активации»

purelin. Из рис. 10 видно, что статическая характеристика нейросетевого регулятора достаточно хорошо аппроксимируется прямой линией $y = ax + b$. То есть достаточно одного нейрона для реализации регулятора. Так, например, для единичного ступенчатого воздействия параметры аппроксимирующего нейрона следующие: $a = -8$, $b = 10$. Структурная схема системы с оптимизированным регулятором представлена на рис. 11.

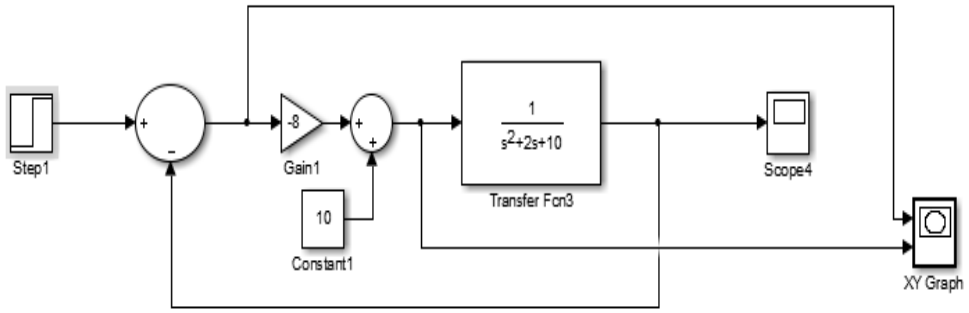


Рис. 11. Структурная схема системы с оптимизированным регулятором

Fig. 11. A block diagram of a system with an optimized regulator

Однако при этом под каждое задающее воздействие параметры a, b будут свои. Для создания «универсального» регулятора, способного выводить систему в соответствии с уставкой без изменения параметров регулятора, можно воспользоваться способом, основанным на ее нормировании и описанным в статье [21]. Таким образом, система будет выглядеть так (рис. 12).

Рис. 12. Структурная схема системы с нормированной уставкой

Fig. 12. A block diagram of a system with a normalized setpoint

В статье [32] данная методика была применена и для многоканальной модели объекта «перевернутый маятник на тележке». Отличительной особенностью данной модели объекта является то, что количество входных воздействий на него меньше, чем выходных регулируемых параметров. Расчет обобщенного регулятора осуществлялся на основе системы управления, рассчитанной методом подчиненного регулирования и состоящей из двух ПИД-регуляторов[3].

[3] Пример расчета системы, состоящей из двух ПИД-регуляторов, методом подчиненного регулирования можно увидеть в работе (Воевода А.А. Управление перевернутым маятником / А.А. Воевода, Е.В. Шоба // Сб. науч. тр. НГТУ. 2012. № 2(68). С. 3–14).

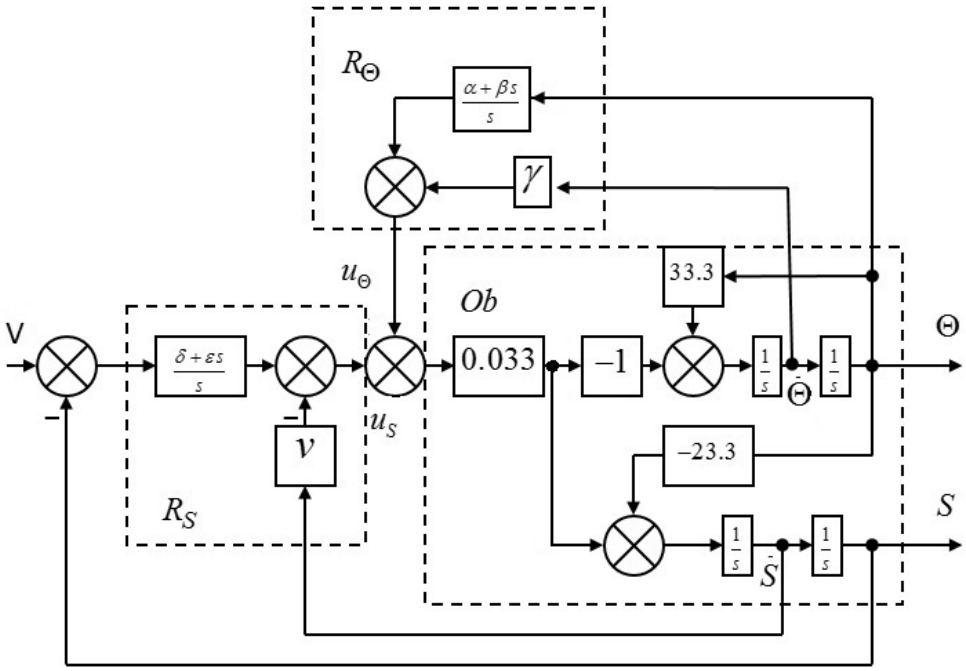


Рис. 13. Структурная схема системы с управлением двумя ПИД-регуляторами

Fig. 13. A block diagram of a system controlled by two PID controllers

На рис. 13 $\alpha = 9774.7$, $\beta = 5206.1$, $\gamma = 454.5$, $\delta = -378.8$, $\varepsilon = -984.9$, $\nu = 60.6$. В статье [32] был рассчитан один обобщенный регулятор для представленных выше параметров.

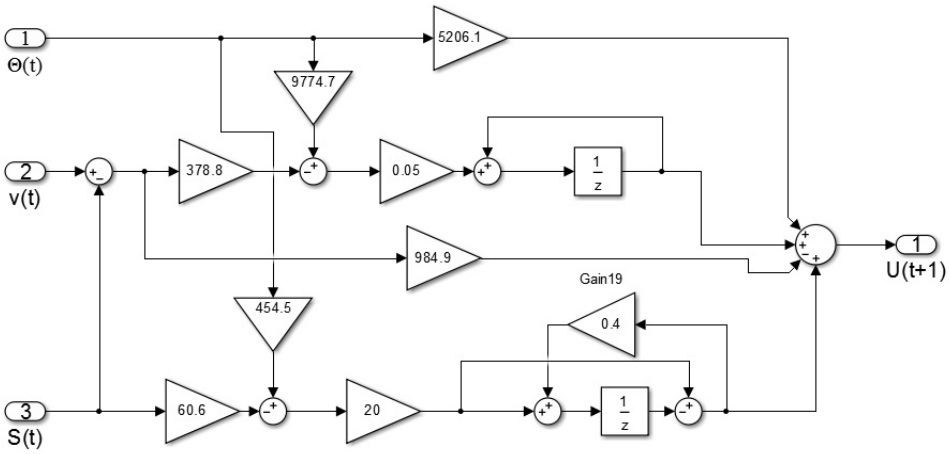


Рис. 14. Структурная схема обобщенного регулятора

Fig. 14. A block diagram of a generalized regulator

По представленной структурной схеме (рис. 14) в статье [35] был синтезирован обобщенный нейросетевой регулятор.

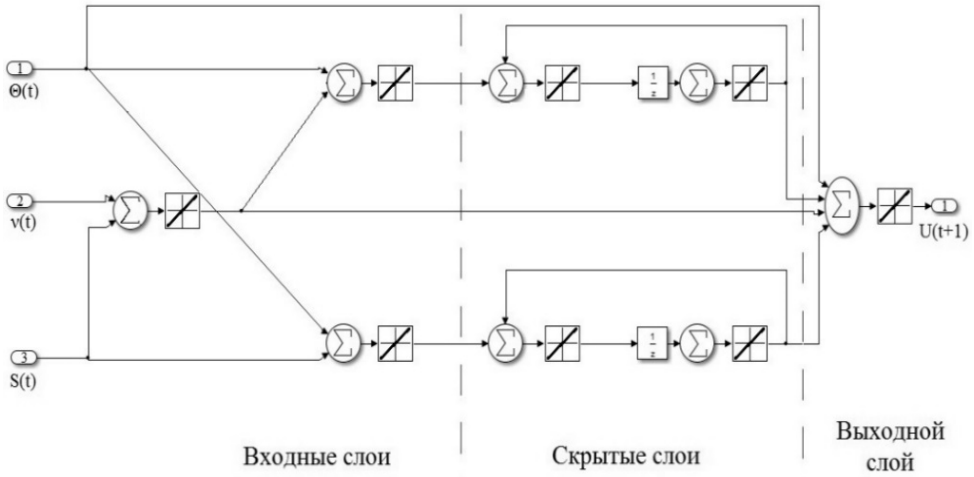


Рис. 15. Структурная схема обобщенного нейросетевого регулятора

Fig. 15. A block diagram of a generalized neural network controller

Кроме этого, был обозначен вопрос «взрывающихся» и «исчезающих» градиентов для нейронных сетей рекуррентного типа. Данный вопрос было предложено решать с помощью структурных преобразований регулятора. Они необходимы, чтобы все обратные связи вынести за пределы регулятора. Таким образом, был получен следующий нейросетевой регулятор из регулятора, представленного на рис. 15.

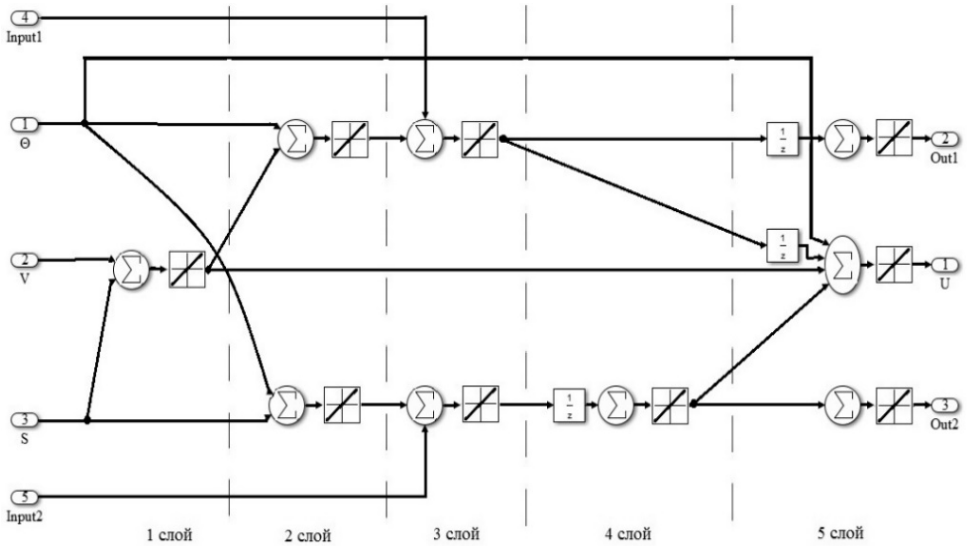


Рис. 16. Структурная схема преобразованного обобщенного нейросетевого регулятора

Fig. 16. A block diagram of the transformed generalized neural network controller

Структурная схема системы с обходными связями для регулятора будет выглядеть следующим образом (рис. 17).

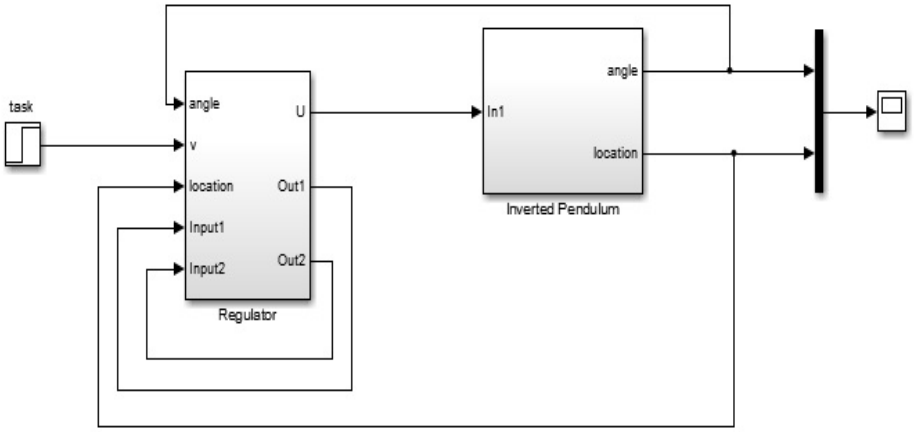


Рис. 17. Структурная схема системы с преобразованным обобщенным нейросетевым регулятором

Fig. 17. A block diagram of a system with a transformed generalized neural network controller

В статье [34] синтез нейросетевого регулятора по указанной методике проводится для нелинейной модели объекта «перевернутый маятник на тележке».

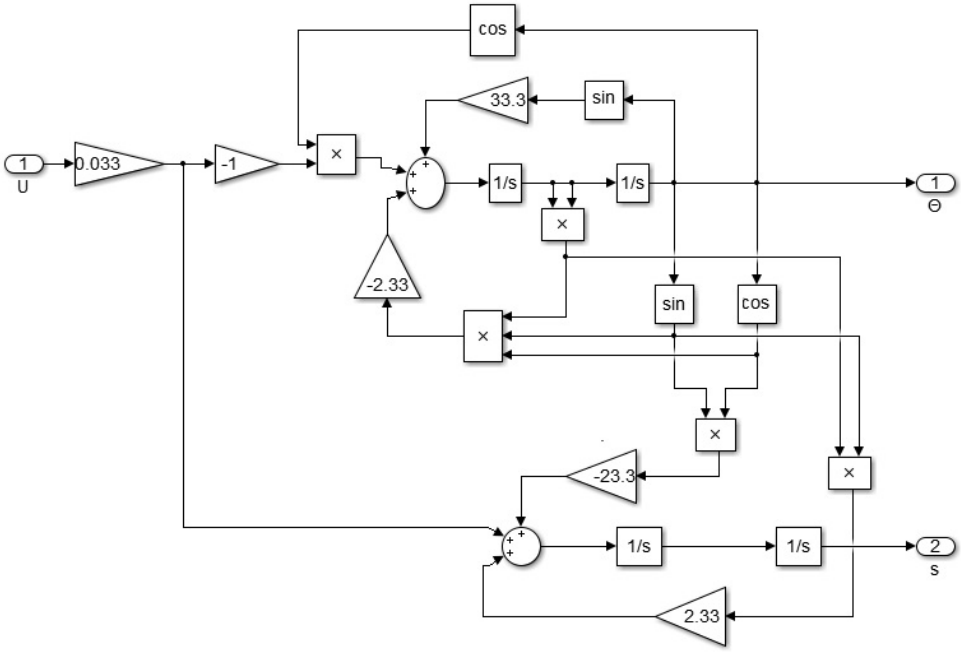


Рис. 18. Структурная схема модели объекта «перевернутый маятник на тележке»

Fig. 18. A block diagram of the "inverted pendulum on a cart" object model

Здесь в качестве усложнения нейросетевого регулятора стали применяться нелинейные функции активации типа *tansig* – гиперболический тангенс.

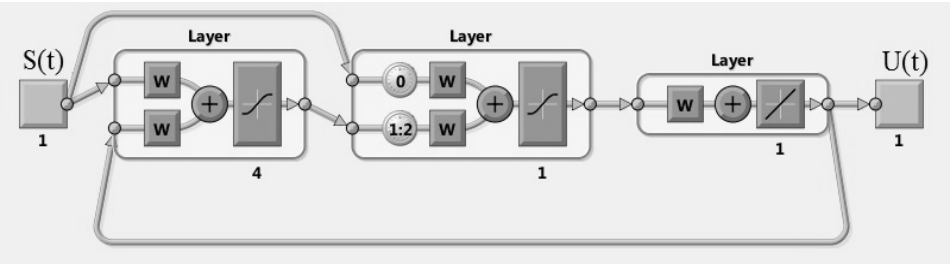
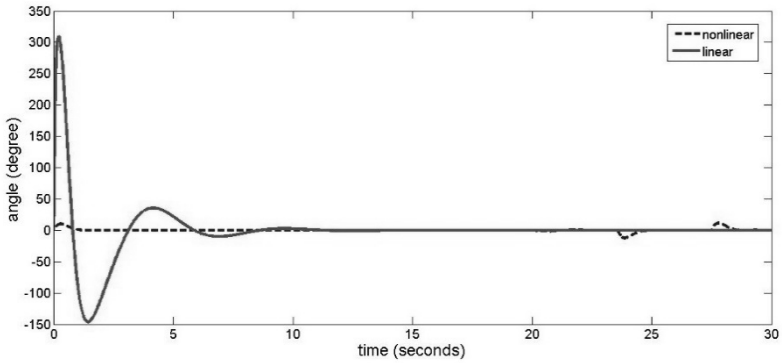


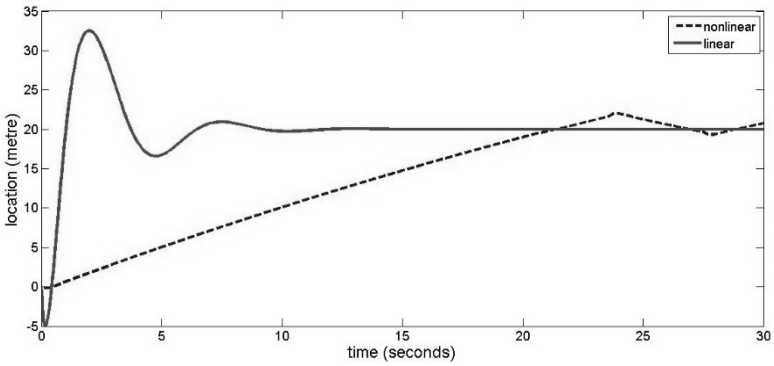
Рис. 19. Структурная схема нейросетевого регулятора с усложненной схемой

Fig. 19. A block diagram of a neural network controller with a complicated scheme

В результате получили нелинейный нейросетевой регулятор с принципиально новым характером поведения. Это можно увидеть исходя из переходных процессов для случая использования линейного и нелинейного нейросетевых регуляторов (рис. 20).



а



б

Рис. 20. Переходные процессы нелинейного и линейного регуляторов (сверху вниз):

а – по углу перевернутого маятника; *б* – по положению тележки

Fig. 20. Transient processes of nonlinear and linear regulators (from top to bottom):

a is by the angle of the inverted pendulum; *б* is by the position of the trolley

В статье [36] исследуются возможности по управлению системой, содержащей неопределенности в канале управления. Используем непараметрическую неопределенность, реализованную с помощью мультипликативной помехи способом, указанным в [41].

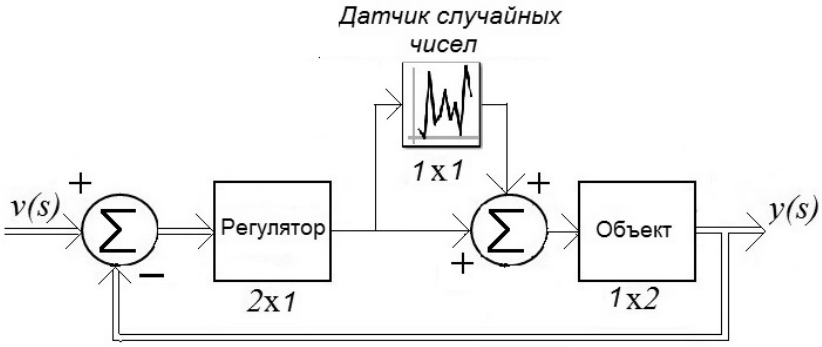


Рис. 21. Структурная схема САУ с нестационарной непараметрической неопределенностью

Fig. 21. A block diagram of an ACS with non-stationary nonparametric uncertainty

Установлено, что использование нейросетевого регулятора позволяет расширить возможности по управлению моделью объекта, содержащей неопределенности, по сравнению с регулятором, полученным модальным методом с использованием полиномиально-матричного разложения передаточной функции замкнутой системы PMFD.

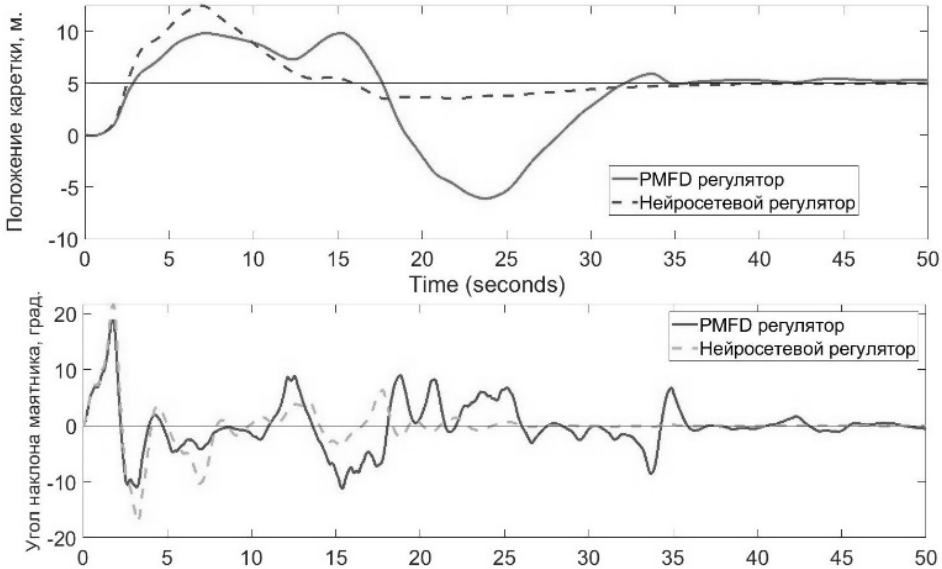


Рис. 22. Переходные процессы системы автоматического управления с неопределенностью в канале управления в пределах 45 %

Fig. 22. Transients of the automatic control system with uncertainty in the control channel within 45 %

На рис. 22 представлены системы, содержащие нейросетевой и PMFD регуляторы. Они справляются с управлением системой, содержащей неопределенности в канале управления. При этом в случае использования нейросетевого регулятора стабилизация угла перевернутого маятника происходит уже на 23-й секунде, в отличие от использования PMFD-регулятора (на 37-й секунде). Колебательность выхода модели объекта по положению каретки при этом также уменьшается в случае использования нейросетевого регулятора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках проведенной работы были проанализированы некоторые публикации, посвященные вопросам синтеза нейросетевых регуляторов с детерменированными структурами и инициализацией весовых коэффициентов нейронной сети. Приведены различные подходы к решению вопроса выбора архитектуры нейронной сети. К ним относятся формирование структуры нейронной сети исходя из:

– заранее сформированных фрагментов нейронной сети, соответствующих некоторым элементарным логическим и арифметическим операциям;

– разделения аппроксимируемой функции на некоторые участки и подбора формул, способных эти участки аппроксимировать. Затем данные формулы моделируются участками нейронной сети и компонуются в обобщенную нейронную сеть;

– знаний о регуляторе, построенном с помощью алгоритмов, использующих сеть Петри. Приведены работы, содержащие правила перевода из сетей Петри в нейронную сеть.

Отдельно рассмотрены работы, использующие информацию о регуляторе, полученном модальным методом, использующим полиномиальное матричное разложение передаточной функции замкнутой системы. Данный подход позволяет синтезировать нейросетевой регулятор как для одноканальных, так и для многоканальных динамических систем, в том числе с неквадратной матричной передаточной функцией (то есть имеющей количество входных каналов, не равное количеству выходных каналов). Приведены работы, позволяющие управлять моделями объекта, содержащими нелинейные параметры и непараметрические неопределенности в канале управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Werbos P.J.* Backpropogation and neurocontrol: a review and prospectus // IJCNN: International Joint Conference on Neural Networks. Vol. 1. – Washington, DC, USA, 1989. – P. 209–216.

2. Моделирование нейроуправления скоростью дождевальных машин / Д.А. Соловьев, Г.Н. Камышова, Н.Н. Терехова, С.М. Бакиров // Аграрный научный журнал. – 2020. – № 7. – С. 81–84. – DOI: 10.28983/asj.y2020i7pp78-84. – EDN: UJRKWT.

3. *Епихин А.И., Хекерт Е.В., Модина М.А.* Принципы нейроуправления и варианты архитектуры нейронных сетей применительно к сложной динамической системе СЭУ-СУДНО // Морские интеллектуальные технологии. – 2020. – № 4-4 (50). – С. 18–22. – DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.091.

4. *Токарев К.Е.* Интеллектуализация дождевальных машин на основе методов прогнозирующего нейроуправления // Молодые ученые России: сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 7 октября 2021 г. – Пенза: Наука, 2021. – С. 18–21.

5. *Hunter S.L.* Non-linear neurocontrol of chemical processes using reinforcement learning. Thesis (MScEng). – Stellenbosch University, 2011. – 111 p.

6. *Сагдатуллин А.М.* Методы, модели и алгоритмы повышения эффективности процессов добычи и транспортировки нефти и построения систем управления на основе нейросетевых и многомерных логических регуляторов с дискретными термами: дис. … д-ра техн. наук: 2.3.3. – Казань, 2022. – 277 с.

7. *Conradie A.v.E.* A neurocontrol paradigm for intelligent process control using evolutionary reinforcement learning. Diss. for the Degree of Doctor of philosophy. – Stellenbosch University, 2004. – 253 p.

8. *Боков А.А., Боляков А.А., Иваненков В.В.* Адаптивный нейросетевой регулятор для управления пьезоэлектрическим двигателем вращения // Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2012. – № 3. – 15 с.

9. *Во Конг Фыонг.* Разработка и исследование адаптивных систем с применением нейронных сетей для управления нелинейными электромеханическими объектами с упругими деформациями: дис. … канд. техн. наук. – СПб., 2010. – 172 с.

10. *Дерябин В.В.* Построение модели счисления пути судна на основе нейронной сети: дис. ... канд. техн. наук. – СПб., 2011. – 136 с.

11. *Динь Данг Чыонг.* Разработка системы управления электроприводами на основе нейронной сети: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. – СПб., 2022. – 168 с.

12. *Кабирова А.Н.* Методы и комплексы программ построения нейросетевых моделей регуляторов для управления динамическим объектом: дис. … канд. техн. наук: 05.13.18. – Казань, 2017. – 130 с.

13. *Романников Д.О.* Об использовании машинного обучения для решения задач регулирования // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 1 (83). – С. 123–127. – DOI: 10.17212/2307-6879-2016-1-123-127. – EDN: WAFPMF.

14. *Во Конг Фыонг.* Прямые адаптивные системы управления линейными электромеханическими объектами с применением нейронных сетей // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2010. – № 5. – С. 92–98.

15. *Воевода А.А., Полубинский В.Л., Романников Д.О.* Сортировка массива целых чисел с использованием нейронной сети // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 2 (63). – С. 151–157. – DOI: 10.17212/1814-1196-2016-2-151-157. – EDN: WHRSFZ.

16. *Романников Д.О.* О преобразовании сети Петри в нейронную // Сборник научных трудов НГТУ. – 2016. – № 4 (86). – С. 98–103. – DOI: 10.17212/2307-6879-2016-4-98-103. – EDN: YKQXER.

17. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Пример реализации выбора минимального числа в бинарном виде на нейронных сетях // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 1 (87). – С. 64–71. – DOI: 10.17212/2307-6879-2017-1-64-71. – EDN: YTAKQF.

18. *Романников Д.О.* Тезисы о нейронных сетях // Сборник научных трудов НГТУ. – 2017. – № 1 (87). – С. 98–108. – DOI: 10.17212/2307-6879-2017-1-98-108. – EDN: YTAKRJ.

19. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Формирование структуры нейронной сети посредством декомпозиции исходной задачи на примере задачи управления роботом-манипулятором // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2018. – № 9. – С. 27–32. – EDN: YPNBYT.

20. *Евсеенко А.А., Романников Д.О.* Применение алгоритмов Deep Q-learning и Double Deep Q-learning к задаче управления перевернутым маятником // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 1–2 (97). – С. 7–25. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-1-2-7-25. – EDN: ZMILWU.

21. *Романников Д.О.* Метод синтеза нейронных регуляторов для линейных объектов // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 4 (80). – С. 111–120. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-111-120. – EDN: ZJRRFN.

22. *Романников Д.О.* О синтезе нейронных сетей // Сборник научных трудов НГТУ. – 2018. – № 1 (91). – С. 104–111. – DOI: 10.17212/2307-6879-2018-1-104-111. – EDN: XRCBUT.

23. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Метод синтеза регуляторов для многоканальных систем с использованием нейронных сетей // Вычислительные технологии. – 2020. – Т. 25, № 3. – С. 111–118. – DOI: 10.25743/ICT.2020.25.3.012. – EDN: WAVYLO.

24. *Тимчук Н.А.* Разработка и исследование двухуровневых адаптивно-нейронных систем управления динамическими объектами: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – СПб., 2000. – 16 с.

25. *Махмуд Б.Ю.* Совершенствование электроприводов роботов на основе fuzzy-регуляторов и нейронных сетей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. – М., 2008. – 20 с.

26. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Синтез нейронной сети для решения логико-арифметических задач // Труды СПИИРАН. – 2017. – Вып. 5 (54). – С. 205–223. – DOI: 10.15622/sp.54.9. – EDN: ZMREZB.

27. *Лок Х.Д.* Синтез адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами на базе нечетких регуляторов и нейросетевых технологий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.01. – М., 2002. – 24 с.

28. *Воевода А.А., Романников Д.О., Трошина Г.В.* Метод синтеза нейронной сети для аппроксимации поверхностей двух переменных // Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям. – 2018. – Т. 1. – С. 732–735. – EDN XZOZMT.

29. *Жолобов Д.А.* Синтез нейронных сетей с адаптивной топологией: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.01. – М., 2006. – 16 с.

30. *Шипагин В.И.* Различные подходы к решению задачи перевернутого маятника // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 2 (95). – С. 18–27.

31. *Шипагин В.И.* Нейросетевая реализация регулятора для устойчивого объекта // Сборник научных трудов НГТУ. – 2019. – № 3–4 (96). – С. 53–63.

32. *Voevoda A., Shipagin V.I.* Neural network implementation of controllers for multi-channel objects synthesized by polynomial method // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 953. – P. 012071. – DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012071.

33. *Воевода А.А., Шоба Е.В.* О модели перевернутого маятника // Сборник научных трудов НГТУ. – 2012. – № 1 (67). – С. 3–14.

34. *Воевода А.А., Шипагин В.И.* Синтез нейросетевого регулятора управления нелинейной моделью перевернутого маятника на тележке // Научный вестник НГТУ. – 2020. – № 2–3 (79). – С. 25–36. – DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36.

35. *Воевода А.А., Шипагин В.И.* Структурные преобразования нейросетевого регулятора с рекуррентным типом сети // Сборник научных трудов НГТУ. – 2020. – № 3 (98). – С. 7–16. – DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-7-16.

36. *Воевода А.А., Шипагин В.И.* Расчет регулятора для многоканального объекта с нестационарными параметрами, содержащего звенья запаздывания // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 7–24. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24. – EDN: ZVHGOQ.

37. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 2nd ed. –New York: Oxford, 1999. – 334 p.

38. *Antsaklis P.J., Michel A.N.* Linear systems. – Switzerland: Birkhauser, 1997. – 669 p.

39. *Бобобеков К.М., Воевода А.А., Шипагин В.И.* Полиномиальный метод синтеза автоматического управления для одноканальных и многоканальных объектов: монография. – Душанбе: ТТУ им. М.С. Осими, 2021. – 192 с.

40. *Филюшов В.Ю.* Полиномиальный метод синтеза регуляторов для многоканальных объектов с неквадратной матричной передаточной функцией: дис. … канд. техн. наук: 2.3.1. – СПб., 2022. – 177 с.

41. *Целигоров Н.А.*, *Целигорова Е.Н., Мафура Г.М.* Математические модели неопределенностей систем управления и методы, используемые для их исследования // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4-2. – С. 48.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – управление многоканальными объектами. Имеет более 300 публикаций. E-mail: ucit@ucit.ru

Шипагин Виктор Игоревич, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. В настоящее время специализируется в области синтеза систем управления техническими системами. E-mail: shipagin@mail.ru

Voevoda Aleksandr A., D.Sc. (Eng.), professor, professor at the automation department, Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is management of multi-channel objects. He has more than 300 publications. E-mail: ucit@ucit.ru

Shipagin Victor I., a postgraduate student at the automation department in Novosibirsk State Technical University. Currently he specializes in the field of synthesis regulators for technical systems. E-mail: shipagin@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-7-30

On the choice of the neuroregulator architecture[*]

A.A. VOEVODA[a], *V.I. SHIPAGIN*[b]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *ucit@ucit.ru* [b] *shipagin@mail.ru*

Abstract

In practice, the choice of the type of neural network is carried out empirically based on an experience of an investigator and many training attempts. At the same time, the excessive complexity of the neural network leads to an increase in its training time, and in some cases, to the impossibility of learning at all. Thus, the justification of the choice of an artificial neural network structure and/or its preliminary calculation based on other models is an urgent task. An equally important task is the choice of an initial weighting coefficients of an neural network, the choice of which determines the speed of convergence of search algorithms. This paper demonstrates several approaches to solving the problem of choosing an architecture and initializing a weighting coefficients of a neural network. One of them is carried out on the basis of a previously calculated function using Petri nets. This approach is demonstrated for solving various tasks, which include the implementation of functions using previously defined neural network models of the simplest logical operations "and", "or", etc. An approach is given that allows optimizing an architecture of a neural network that solves the problem of approximating functions of one and several variables. The principle of determining an architecture and initial weight coefficients is also used in the tasks of training neural networks with reinforcement. A separate section is devoted to the formation of a methodology for determining an architecture and initialization of a weighting coefficients of a neural network of the controller based on information about the controller obtained by a modal method using a polynomial matrix decomposition of a system. The problem of synthesis of a neural network controller for an object model containing nonlinearities and nonparametric uncertainties in the control channel is solved.

Keywords: neural network, initialization of weighting coefficients, choice of neural network architecture, neuroregulator, petri net, function approximation, logical operations, modal method

[*] *Received 19 February 2022.*
The reported study was funded by RFBR, project number 20-08-00550 A.

REFERENCES

1. Werbos P.J. Backpropogation and neurocontrol: a review and prospectus. *IJCNN: International Joint Conference on Neural Networks*. Vol. 1, Washington, DC, USA, 18–22 Jun 1989, pp. 209–216.

2. Solovyev D.A., Kamyshova G.N., Terekhova N.N., Bakirov S.M. Modelirovanie neiroupravleniya skorost'yu dozhdeval'nykh mashin [Simulation of speed neural control for irrigation machines]. *Agrarnyi nauchnyi zhurnal = The Agrarian Scientific Journal*, 2020, no. 7, pp. 81–84. DOI: 10.28983/asj.y2020i7pp78-84. EDN UJRKWT.

3. Epikhin A.I., Khekert E.V., Modina M.A. Printsipy neiroupravleniya i varianty arkhitektury neironnykh setei primenitel'no k slozhnoi dinamicheskoi sisteme SEU-SUDNO [Principles of neural control and variants of neural network architecture, applied to a complex dynamic system of SEA-VESSEL]. *Morskie intellektual'nye tekhnologii = Marine Intelligent Technologies*, 2020, no. 4-4 (50), pp. 18–22. DOI: 10.37220/MIT.2020.50.4.091.

4. Tokarev K.E. [Development of an intelligent management system for irrigated agriculture based on a multi-layer neural network]. *Molodye uchenye Rossii* [Young scientists of Russia]. Collection of articles of the IX All-Russian scientific and practical conference. Penza, Nauka Publ., pp. 18–21. (In Russian).

5. Hunter S.L. *Non-linear neurocontrol of chemical processes using reinforcement learning*. Thesis (MScEng). Stellenbosch University, 2011. 111 p.

6. Sagdatullin A.M. *Metody, modeli i algoritmy povysheniya effektivnosti protsessov dobychi i transportirovki nefti i postroeniya sistem upravleniya na osnove neirosetevykh i mnogomernykh logicheskikh regulyatorov s diskretnymi termami*. Diss. dokt. tekhn. nauk [Methods, models and algorithms for improving the efficiency of oil production and transportation processes and building control systems based on neural network and multidimensional logic controllers with discrete terms. Dr. eng. sci. diss.]. Kazan, 2022. 277 p.

7. Conradie A.v.E. *A neurocontrol paradigm for intelligent process control using evolutionary reinforcement learning*. Diss. for the Degree of Doctor of philosophy. Stellenbosch University, 2004. 253 p.

8. Bokov A.A., Bolyakov A.A., Ivanenkov V.V. Adaptivnyi neirosetevoi regulyator dlya upravleniya p'ezoelektricheskim dvigatelem vrashcheniya [Adaptive neural network regulator to control piezoelectric rotation engine]. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2012, no. 3, pp. 1–15.

9. Vo Cong Phuong. *Razrabotka i issledovanie adaptivnykh sistem s primeneniem neironnykh setei dlya upravleniya nelineinymi elektromekhanicheskimi ob"ektami s uprugimi deformatsiyami*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of adaptive systems using neural networks to control nonlinear electromechanical objects with elastic deformations. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2010. 172 p. (In Russian).

10. Deryabin V.V. *Postroenie modeli schisleniya puti sudna na osnove neironnoi seti*. Diss. kand. tekhn. nauk [Construction of a ship's path numbering model based on a neural network. specialization. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2011. 136 p.

11. Din' Dang Chyong. *Razrabotka sistemy upravleniya elektroprivodami na osnove neironnoi seti*. Diss. kand. tekhn. nauk [Development of an electric drive control system based on a neural network. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2022. 168 p. (In Russian).

12. Kabirova A.N. *Metody i kompleksy programm postroeniya neirosetevykh modelei regulyatorov dlya upravleniya dinamicheskim ob"ektom*. Diss. kand. tekhn. nauk [Methods and software packages for building neural network models of regulators for controlling a dynamic object. PhD eng. sci. diss.]. Kazan, 2017. 130 p.

13. Romannikov D.O. Ob ispol'zovanii mashinnogo obucheniya dlya resheniya zadach regulirovaniya [On the use of machine learning for a particular purpose of regulation]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 1 (83), pp. 123–127. DOI: 10.17212/2307-6879-2016-1-123-127.

14. Vo Cong Phuong. Pryamye adaptivnye sistemy upravleniya lineinymi elektromekhanicheskimi ob"ektami s primeneniem neironnykh setei [Direct adaptive control systems for linear electromechanical objects using neural networks]. *Izvestiya SPbGETU "LETI" = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2010, no. 5, pp. 92–98. (In Russian).

15. Voevoda A.A., Polubinsky V.L., Romannikov D.O. Sortirovka massiva tselykh chisel s ispol'zovaniem neironnoi seti [Sorting the array of integers using a neural network]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 2 (63), pp. 151–157. DOI: 10.17212/1814-1196-2016-2-151-157.

16. Romannikov D.O. O preobrazovanii seti Petri v neironnuyu set' [On the transformation of Petri nets in neural network]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 4 (86), pp. 98–103. DOI: 10.17212/2307-6879-2016-4-98-103.

17. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Primer realizatsii vybora minimal'nogo chisla v binarnom vide na neironnykh setyakh [An example of realization of the choice of the minimum number in a binary form on neural networks]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1 (87), pp. 64–71. DOI: 10.17212/2307-6879-2017-1-64-71.

18. Romannikov D.O. Tezisy o neironnykh setyakh [Theses on neural networks]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2017, no. 1 (87), pp. 98–108. DOI: 10.17212/2307-6879-2017-1-98-108.

19. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Formirovanie struktury neironnoi seti posredstvom dekompozitsii iskhodnoi zadachi na primere zadachi upravleniya robotom manipulyatorom [Formation of the structure of a neuron network through decomposition of the initial task on a particular example of the robot-manipulator managing problem]. *Izvestiya SPbGETU "LETI" = Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University*, 2018, no. 9, pp. 27–32.

20. Evseenko A.A., Romannikov D.O. Primenenie algoritmov Deep Q-learning i Double Deep Q-learning k zadache upravleniya perevernutym mayatnikom [Application of deep Q-learning and double deep Q-learning algorithms to the task of control an inverted pendulum]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 1–2 (97), pp. 7–25. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-1-2-7-25.

21. Romannikov D.O. Metod sinteza neironnykh regulyatorov dlya lineinykh ob"ektov [A method for the synthesis of neural regulators for linear objects]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 4 (80), pp. 111–120. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-4-111-120.

22. Romannikov D.O. O sinteze neironnykh setei [About of synthesis of neural networks]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2018, no. 1 (91), pp. 104–111. DOI: 10.17212/2307-6879-2018-1-104-111.

23. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Metod sinteza regulyatorov dlya mnogokanal'nykh sistem s ispol'zovaniem neironnykh setei [The synthesis method of regulators for multichannel systems using neural networks]. *Vychislitel'nye tekhnologii = Computational Technologies*, 2020, vol. 25, no. 3, pp. 111–118. DOI: 10.25743/ICT.2020.25.3.012.

24. Timchuk N.A. *Razrabotka i issledovanie dvukhurovnevykh adaptivno-neironnykh sistem upravleniya dinamicheskimi ob"ektami*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Development and research of two-level adaptive neural control systems for dynamic objects. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2000. 16 p.

25. Makhmud B.Yu. *Sovershenstvovanie elektroprivodov robotov na osnove fuzzy-regulyatorov i neironnykh setei*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Improvement of electric drives of robots based on fuzzy controllers and neural networks. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2008. 19 p.

26. Voevoda A.A., Romannikov D.O. Sintez neironnoi seti dlya resheniya logiko-arifmeticheskikh zadach [Synthesis of neural network for solving logical-arithmetic problems]. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*, 2017, no. 5 (54), pp. 205–223. DOI: 10.15622/sp.54.9.

27. Lok Kh.D. *Sintez adaptivnykh sistem upravleniya nelineinymi dinamicheskimi ob"ektami na baze nechetkikh regulyatorov i neirosetevykh tekhnologii*. Avtoref. diss. dokt. tekhn. nauk [Synthesis of adaptive control systems for nonlinear dynamic objects based on fuzzy controllers and neural network technologies. Author's abstract of Dr. eng. sci. diss.]. Moscow, 2002. 24 p.

28. Voevoda A.A, Romannikov D.O., Troshina G.V. Metod sinteza neironnoi seti dlia aproksimatsii poverkhnostei dvukh peremennykh [The method of synthesis of a neural network for the approximation of surfaces of two variables]. *Mezhdunarodnaya konferentsiya po myagkim vychisleniyam i izmereniyam = International Conference on Soft Computing and Measurements*, 2018, vol. 1, pp. 732–735.

29. Zholobov D.A. *Sintez neironnykh setei s adaptivnoi topologiei*. Avtoref. diss. kand. tekhn. nauk [Synthesis of neural networks with adaptive topology. Author's abstract of PhD eng. sci. diss.]. Moscow, 2006. 16 p.

30. Shipagin V.I. Razlichnye podkhody k resheniyu zadachi perevernutogo mayatnika [Different approaches to solving the inverted pendulum problem]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 2 (95), pp. 18–27.

31. Shipagin V.I. Neirosetevaya realizatsiya regulyatora dlya ustoichivogo ob"ekta [Neural network implementation of a controller for a stable object]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2019, no. 3–4 (96), pp. 53–63.

32. Voevoda A., Shipagin V.I. Neural network implementation of controllers for multi-channel objects synthesized by polynomial method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 953, p. 012071. DOI: 10.1088/1757-899X/953/1/012071.

33. Voevoda A.A., Shoba E.V. O modeli perevernutogo mayatnika [About model inverted pendulum]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2012, no. 1 (67), pp. 3–14.

34. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Sintez neirosetevogo regulyatora upravleniya nelineinoi model'yu perevernutogo mayatnika na telezhke [Synthesis of a neural network control regulator of a nonlinear model of an inverted pendulum on a cart].]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 2–3 (79), pp. 25–36. DOI: 10.17212/1814-1196-2020-2-3-25-36.

35. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Strukturnye preobrazovaniya neirosetevogo regulyatora s rekurrentnym tipom seti [Structural transformations of a neural network controller with a recurrent network type]. *Sbornik nauchnykh trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Transaction of scientific papers of the Novosibirsk state technical university*, 2020, no. 3 (98), pp. 7–16. DOI: 10.17212/2307-6879-2020-3-7-16.

36. Voevoda A.A., Shipagin V.I. Raschet regulyatora dlya mnogokanal'nogo ob"ekta s nestatsionarnymi parametrami, soderzhashchego zven'ya zapazdyvaniya [Calculation of a controller for a multi-channel object with non-stationary parameters containing delay links]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 1 (85), pp. 7–24. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-1-7-24.

37. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 2nd ed. New York, Oxford, 1999. 334 p.

38. Antsaklis P.J., Michel A.N. *Linear systems*. Switzerland, Birkhauser, 1997. 669 p.

39. Bobobekov K.M., Voevoda A.A., Shipagin V.I. *Polinomial'nyi metod sinteza avtomaticheskogo upravleniya dlya odnokanal'nykh i mnogokanal'nykh ob"ektov* [Polynomial method for the synthesis of automatic control systems for single-channel and multi-channel objects]. Dushanbe, Tajik Technical University named after academician M.S. Osimi Publ., 2021. 192 p. (In Russian).

40. Filyushov V.Yu. *Polinomial'nyi metod sinteza regulyatorov dlya mnogokanal'nykh ob"ektov s nekvadratnoi matrichnoi peredatochnoi funktsiei*. diss. kand. tekhn. nauk [A polynomial method for

synthesizing regulators for multichannel objects with a non-square matrix transfer function. PhD eng. sci. diss.]. St. Petersburg, 2022. 177 p.

41. Tseligorov N.A., Tseligorova E.N., Mafura G.M. Matematicheskie modeli neopredelennostei sistem upravleniya i metody, ispol'zuemye dlya ikh issledovaniya [Mathematical model uncertainties management systems and methods used for their research]. *Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don*, 2012, no. 4-2, p. 48.

Для цитирования:

Воевода А.А., Шипагин В.И. О выборе архитектуры нейрорегулятора // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 4 (88). – С. 7–30. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-7-30.

For citation:

Voevoda A.A., Shipagin V.I. O vybore arkhitektury neiroregulyatora [On the choice of the neuro-regulator architecture]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 4 (88), pp. 7–30. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-7-30.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 88, № 4, 2022, с. 31–48

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 88, No. 4, 2022, pp. 31–48

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 662.769.21

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-31-48

Классификация и анализ локализации проектов по производству водорода*

А.В. КАЗАРИНОВ[a], М.Ю. ДЕРЕВЯНОВ[b], Ю.Э. ПЛЕШИВЦЕВА[c]

443100, Россия, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Самарский государственный технический университет

[a] *artemrus987@gmail.com* [b] *mder2007@mail.ru* [c] *yulia_pl@mail.ru*

Анализ водородных проектов основан на информации, представленной в открытой базе данных Международного энергетического агентства (МЭА), в которой представлено 1327 проектов по производству водорода и продуктов на его основе, реализуемых более чем в 100 странах мира. Для выявления сложившихся трендов развития водородных проектов предложено использовать два классификационных подхода. Первый подход основан на классификации проектов согласно периоду их реализации, а второй использует предлагаемую в базе МЭА классификацию стадий реализации проектов. Комплексное применение описанных подходов позволяет провести системный анализ представленных в базе МЭА данных. Проекты, использующие электролизные технологии производства водорода, рассматриваются отдельно от проектов, использующих альтернативные технологии. Проведен анализ географической локализации проектов в соответствии с местом их реализации в одном из четырех регионов мира: Европе, Азии, Америке или Океании и Африке. Для каждого из указанных регионов представлено распределение мощностей проектов по странам. Установлено, что глобальная мощность электролизных проектов для производства водорода достигла 310 МВт, и при успешной реализации разрабатываемых в настоящее время 350 перспективных проектов их суммарная мощность может достичь 65 ГВт к 2030 году. Кроме этого, около 80 концептуальных проектов общей мощностью более 230 ГВт находится на ранних стадиях разработки. Если все эти перспективные проекты будут реализованы, суммарные объемы производства водорода с учетом электролизных проектов могут достичь более 50 млн тонн уже к 2030 году, что будет способствовать выполнению глобальных целей по декарбонизации. Результаты анализа позволяют сделать вывод, что в настоящее время проекты по производству водорода и продуктов на его основе стремительно развиваются в мире в основном благодаря амбициозным водородным стратегиям стран Европейского союза и Великобритании.

Ключевые слова: МЭА, IEA, классификация, анализ, база данных, регионы мира, водород, водородные технологии

* *Статья получена 28 сентября 2022 г.*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы одним из наиболее стремительно развивающихся направлений в сфере энергетики стало применение низкоуглеродных технологий производства и потребления энергии. Актуальность проблемы декарбонизации энергетического сектора связана с тем, что основной причиной аномально высокого роста среднегодовой температуры и других экологических проблем являются парниковые газы, основным источником которых является энергетический сектор промышленности [1].

Одной из основных целей борьбы с климатическими изменениями остается предотвращение экстремального повышения температуры. Парижское соглашение, подписанное 22 апреля 2016 года многими странами – членами ООН, включая Россию, содержит в себе различные обязательства по сдерживанию роста и снижению выбросов парниковых газов. Каждые пять лет эти обязательства пересматриваются в направлении их постоянного ужесточения на последующий период. В настоящее время 48 стран, производящих более 46 % мировых выбросов парниковых газов, поставили цель к 2050–2060 годам достигнуть углеродной нейтральности своих экономик [2].

Многие развитые страны начинают внедрение планов по плавному отказу от использования ископаемых ресурсов в качестве энергоносителей и источников энергии. Помимо использования возобновляемых ресурсов, экономически развитые страны возлагают большие надежды на водород. Использование водорода является одним из наиболее перспективных направлений движения энергетики на пути декарбонизации. Водород имеет высокий потенциал применения в различных отраслях экономики и сферах человеческой деятельности: в нефтеперерабатывающей и химической промышленности, в энергетике, в жилищно-коммунальном и транспортном секторах. Экологическая «чистота» водорода обусловлена тем, что при его сгорании выделяется только вода [3]. Некоторые аналитики прогнозируют существенное увеличение мирового потребления водорода к 2030 году [4].

Технологически развитые страны интенсивно поддерживают выдвигаемые инициативы формирования водородной энергетики. Для этих стран инвестиции в создание высокотехнологичного водородного сектора, ориентированного на экспорт, являются перспективными [5].

На данный момент декарбонизация промышленности и транспорта не является центральной стратегической задачей развития экономики Российской Федерации. Технологии производств водорода разрабатываются в России, главным образом, для импорта водорода в другие страны и сохранения лидирующих позиций на энергетическом рынке, для чего имеются все необходимые предпосылки, в первую очередь практически неограниченные сырьевые ресурсы и достаточная технологическая инфраструктура [6, 7].

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИСТОЧНИКИ ИНФОРМАЦИИ

Обзор водородных проектов основан на полном наборе данных, представленном в опубликованной 4 октября 2021 года открытой базе данных Международного энергетического агентства (МЭА; англ. International Energy Agency, IEA), которая включает 1327 проектов по производству водорода и продуктов

на его основе. МЭА – международная организация, основанная для решения энергетических проблем, которая с момента создания занимается сбором и анализом официальной энергетической статистики из более чем 100 стран мира. МЭА была и остается наиболее влиятельной энергетической организацией, представляющей самые полные объемы аналитической информации и выпускающей признанные наиболее авторитетными отчеты по энергетической статистике [8].

Исследуемая в статье база данных МЭА, несмотря на полноту, не содержит все необходимые для проведения анализа данные по каждому из 1327 проектов [9]. По этой причине для достоверности и объективности проводимого исследования были приняты следующие условия:

- проекты без указанной страны происхождения и сроков реализации исключены из классификации по статусу реализации и географической локализации, но учтены в общем анализе, если известны их основные характеристики (электрическая мощность, нормализованная производительность, объем улавливаемого CO_2);
- проекты, основанные на применении электролизных технологий, по которым отсутствуют данные об электрической мощности и (или) нормализованной производительности, исключаются из анализа;
- проекты, основанные на применении альтернативных технологий, по которым отсутствуют данные об объеме улавливаемого CO_2, исключаются из анализа.

С учетом вышеизложенных условий была проведена обработка представленной в базе данных МЭА информации, в результате которой для анализа были отобраны 768 (57,8 %) проектов, реализуемых в 62 странах мира в 1975–2050 годах. Таким образом, 559 (42,2 %) проектов из-за отсутствия необходимых данных были исключены из дальнейшего анализа на данном этапе исследований.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЕКТОВ

Данный раздел содержит основные характеристики представленных в базе МЭА проектов. Проекты были разделены на группы электролизных (722 проекта) и альтернативных технологий (46 проектов).

Для выявления сложившихся трендов в области реализации водородных проектов предлагается использовать два классификационных подхода.

Первый подход предполагает следующие правила классификации периодов реализации проектов.

- Завершенными предлагается считать проекты, период реализации которых закончился не позднее 2021 года включительно.
- Действующими предлагается считать проекты, начало периода реализации которых указано в базе МЭА, а окончание этого периода не установлено.
- Планируемыми предлагается считать проекты, период реализации которых начинается не ранее 2022 года.
- К группе с неизвестным периодом реализации относятся проекты, данные о временных рамках реализации которых отсутствуют.

Второй подход основан на классификации проектов согласно следующим указанным в базе МЭА стадиям их реализации:

• Concept – стадия представления инновационной идеи проекта, направленная на улучшение характеристик технологий.

• Decommissioned – стадия выведения проекта из эксплуатации.

• Demo – стадия демонстрации возможностей используемой в проекте технологии.

• Feasibility study – стадия анализа экономической целесообразности и исследования возможностей проекта.

• FID (Final investment decision) – стадия принятия окончательного инвестиционного решения.

• Operational – рабочая стадия проекта.

• Other/Unknown – неизвестная стадия реализации проекта.

• Under construction – стадия технологической разработки.

В табл. 1 содержатся данные об электрической мощности и нормализованной производительности проектов в зависимости от периодов реализации. В табл. 2 представлены подробные данные об электрической мощности и нормализованной производительности проектов в зависимости от стадии их реализации.

Проведенный анализ периодов реализации проектов показывает, что в настоящий момент завершено 66 проектов, 235 проектов реализуется в настоящее время, 337 проектов запланировано к реализации в ближайшее десятилетие и для 130 проектов информация о сроках реализации отсутствует (табл. 1).

Таблица 1

Table 1

Основные характеристики проектов в зависимости от периодов реализации

Main characteristics of projects depending on the implementation periods

Характеристика	Завершенные (до 2021 года)	Действующие	Планируемые (2022–2050)	Сроки неизвестны	Всего
Электролизные технологии					
Количество проектов	65	221	311	125	722
Общая установленная электрическая мощность, МВт	277,20	389,46	168 854,03	128 571,33	298 092
Общая расчетная нормализованная производительность, тыс. нм³ H_2/ч	60,08	83,30	37 256,05	28 514,86	65 914,29
Средняя установленная электрическая мощность, МВт/проект	4,26	1,76	542,94	1028,57	412,87
Средняя расчетная нормализованная производительность, тыс. нм³ H_2/ч/проект	0,92	0,38	119,79	228,12	91,29

Окончание табл. 1

End of Tab. 1

Характеристика	Завершенные (до 2021 года)	Действу-ющие	Планируе-мые (2022–2050)	Сроки неиз-вестны	Всего
Альтернативные технологии					
Количество проектов	1	14	26	5	46
Общий уловленный объем CO_2, млн т	0,10	10,45	60,45	13,77	84,77
Общая расчетная нормализованная производительность, тыс. нм³ H_2/ч	12,54	939,93	6770,17	1697,48	9420,12
Средний уловленный объем CO_2, млн т/проект	0,10	0,75	2,33	2,75	1,84
Средняя расчетная нормализованная производительность, тыс. нм³ H_2/ч/проект	12,54	67,14	260,39	339,50	204,79
Все проекты					
Количество проектов	66	235	337	130	768
Общая расчетная нормализованная производительность, тыс. нм³ H_2/ч	72,62	1023,24	44 026,22	30 212,34	75 334,42
Средняя расчетная нормализованная производительность, тыс. нм³ H_2/ч/проект	1,10	4,35	130,64	232,40	98,09

В группе проектов, основанных на электролизных технологиях (см. табл. 1), наблюдается типичная ситуация, когда по суммарной электрической мощности завершенные проекты уступают действующим проектам, однако по средней электрической мощности завершенные проекты (4,26 МВт/проект) превосходят действующие проекты более чем в 2 раза (1,76 МВт/проект). Средняя производственная мощность (0,92 тыс. нм^3 H_2/ч/проект) действующих проектов больше, чем средняя мощность завершенных проектов (0,38 тыс. нм^3 H_2/ч/проект). Данную ситуацию можно объяснить тем, что 96,7 % завершенных электролизных проектов являлись демонстрационными (табл. 3). Однако в группе альтернативных технологий наблюдается типичная для современного технологического прогресса ситуация: завершенные проекты по всем показателям уступают действующим проектам.

В группе электролизных технологий по средней электрической мощности (4,26 МВт/проект) и средней производственной мощности

(0,92 тыс. нм^3 H_2/ч/проект) завершенные проекты уступают планируемым проектам: 542,94 МВт/проект и 119,79 тыс. нм^3 H_2/час/проект соответственно (см. табл. 1). Аналогичная ситуация наблюдается для проектов, использующих альтернативные технологии: средний объем уловленного CO_2 (0,1 млн т/проект) и средняя производственная мощность (12,54 тыс. нм^3 H_2/ч/проект) завершенных водородных проектов гораздо меньше, чем соответствующие показатели планируемых проектов: 2,33 млн т /проект и 260,39 тыс. нм^3 H_2/ч/проект соответственно.

В группе действующих неэлектролизных проектов средний объем уловленного CO_2 и средняя производительность превосходят показатели завершенных проектов на 650 % и 435,4 % соответственно.

Проекты с неизвестными сроками реализации характеризуются достаточно высокими значениями общей и средней мощности проектов (см. табл. 1), поэтому можно предположить, что они относятся к перспективным планируемым проектам.

Анализируя стадии реализации представленных в базе данных МЭА проектов (табл. 2), можно выявить следующие закономерности.

Действующие проекты (Operational) со средней электрической мощностью (1,26 МВт/проект) и средней производственной мощностью (0,26 тыс. нм^3 H_2/ч/проект) существенно превосходят демонстрационные проекты (Demo) (0,31 МВт/проект) и (0,06 тыс. нм^3 H_2/ч/проект), но заметно уступают проектам, находящимся в процессе разработки (Under construction) (5,4 МВт/проект) и (1,13 тыс. нм^3 H_2/ч/проект). Закономерно, что действующие проекты (Operational) сильно уступают проектам, находящимся в стадии окончательного инвестиционного решения (FID) (44,02 МВт/проект) и (9,38 тыс. нм^3 H_2/ч/проект).

Подобная ситуация имеет место и в группе проектов с альтернативными технологиями, при этом они не отличаются таким стремительным ростом средней мощности, как электролизные проекты. По среднему уловленному объему CO_2 (0,73 млн т/проект) и средней производственной мощности (64,41 тыс. нм^3 H_2/ч/проект) реализуемые в настоящее время проекты (Operational) превосходят демонстрационные проекты: 0,1 млн т/проект и 12,54 тыс. нм^3 H_2/ч/проект соответственно. Однако, сравнивая реализуемые в настоящее время проекты (Operational) с проектами, находящимися в процессе технологической разработки (Under construction), необходимо отметить отсутствие существенных отличий в средней производительности проектов по среднему объему улавливаемого CO_2 (0,92 млн т/ проект) и средней производственной мощности (55,06 тыс. нм^3 H_2/ч/проект). Проекты, находящиеся в статусе анализа экономической целесообразности и исследования возможностей проекта (Feasibility study), и концептуальные проекты (Concept) показывают существенный рост средней производительности по сравнению с действующими проектами. В целом проекты на основе электролизных технологий демонстрируют больший рост средней производительности по сравнению с альтернативными технологиями. Это можно объяснить тем, что электролизным проектам уделяется значительно большее внимание в западных странах благодаря их экологической безопасности [5, 10].

Таблица 2

Table 2

Характеристики проектов по стадиям их реализации

Characteristics of projects by stages of their implementation

Характеристики	Concept	Decom-misio-ned	Demo	Feasibi-lity study	FID	Opera-tional	Under con-struc-tion	Other/ Un-known	Всего
Электролизные технологии									
Количество проектов	82	2	122	219	73	167	56	1	722
Общая установленная электрическая мощность, МВт	232 539,9	265	37,5	61 518,02	3213,8	213,99	302,3	1,5	298 092,02
Общая расчетная нормализованная производитель-ность, тыс. нм³ H_2/ч	51 616,25	57,61	7,85	13 440,98	684,40	43,35	63,53	0,33	65 914,3
Средняя установленная электрическая мощность, МВт/проект	2835,85	132,50	0,31	280,90	44,02	1,28	5,40	1,50	412,87
Средняя расчетная нормализованная производитель-ность, тыс. нм³ H_2/ч/проект	629,47	28,80	0,06	61,37	9,38	0,26	1,13	0,33	91,29
Альтернативные технологии									
Количество проектов	4	–	1	23	–	15	3	–	46
Общий уловленный объем CO_2, млн т	6,50	–	0,10	64,52	–	10,89	2,76	–	84,8
Общая расчетная нормализованная производитель-ность, тыс. нм³ H_2/ч	814,95	–	12,54	7461,32	–	966,15	165,17	–	9 420,1
Средний уловлен-ный объем CO_2, млн т/проект	1,63	–	0,10	2,81	–	0,73	0,92	–	1,84
Средняя расчетная нормализованная производитель-ность, тыс. нм³ H_2/ч/проект	203,74	–	12,54	324,41	–	64,41	55,06	–	204,79
Все проекты									
Количество проектов	86	2	123	242	73	182	59	1	768
Общая расчетная нормализованная производитель-ность, тыс. нм³ H_2/ч	52 431,19	57,61	20,39	20 902,30	684,40	1009,50	228,70	0,33	75 334,4
Средняя расчетная нормализованная производитель-ность, тыс. нм³ H_2/ч/проект	609,67	28,80	0,17	86,37	9,38	5,55	3,88	0,33	98,09

Соотнесение средней расчетной нормализованной производительности водородных проектов со стадиями и сроками их реализации представлено в табл. 3–6, где суммарные показатели производительности по всем проектам представлены как средневзвешенные значения.

В проектах, находящихся на стадии Demo, альтернативные технологии не применяются независимо от сроков их реализации, следовательно, либо перспективные разработки новых альтернативных технологий производства водорода не ведутся в анализируемых странах, либо информация об этих технологиях отсутствует в открытых источниках.

Заметен существенный рост средней расчетной нормализованной производительности всех планируемых проектов по сравнению с действующими и завершенными проектами. Кроме того, необходимо отметить высокую среднюю нормализованную производительность проектов с неизвестными сроками реализации.

Средняя расчетная нормализованная производительность проектов с альтернативными технологиями заметно выше аналогичного показателя электролизных проектов. Однако разрыв между данными показателями заметно сокращается в группе планируемых проектов, находящихся на стадиях Concept и Feasibility study, что свидетельствует о стремительном развитии перспективных электролизных проектов.

Таблица 3

Table 3

Средняя расчетная производительность завершенных проектов, тыс. нм^3 H_2/ч/проект

Average estimated productivity of completed projects, thousand nm^3 H_2/hour/project

Статус / Технологии	Concept	Decommissioned	Demo	Feasibility study	FID	Operational	Under construction	Other/ Unknown	Все проекты
Электролизные	–	28,80	0,04	–	–	–	–	–	0,92
Альтернативные	–	–	12,54	–	–	–	–	–	12,54
Все проекты	–	28,80	0,23	–	–	–	–	–	1,10

Таблица 4

Table 4

Средняя расчетная производительность действующих проектов, тыс. нм^3 H_2/ч/проект

Average estimated productivity of existing projects, thousand nm^3 H_2/hour/project

Статус / Технологии	Concept	Decommissioned	Demo	Feasibility study	FID	Operational	Under construction	Other/ Unknown	Все проекты
Электролизные	–	–	0,05	–	3,76	0,26	–	–	0,38
Альтернативные	–	–	–	–	–	67,14	–	–	67,14
Все проекты	–	–	0,05	–	3,76	5,49	–	–	4,35

Таблица 5

Table 5

Средняя расчетная нормализованная производительность планируемых проектов, тыс. нм^3 H_2/ч/проект

Average calculated normalized productivity of planned projects, thousand nm^3 H_2/hour/project

Статус / Технологии	Concept	Decommissioned	Demo	Feasibility study	FID	Operational	Under construction	Other/ Unknown	Все проекты
Электролизные	652,29	–	0,16	70,99	11,43	–	1,15	–	119,79
Альтернативные	203,74	–	–	304,74	–	–	55,06	–	260,39
Все проекты	610,57	–	0,16	96,23	11,43	–	3,94	–	130,64

Таблица 6

Table 6

Средняя расчетная нормализованная производительность проектов с неизвестными сроками реализации, тыс. нм^3 H_2/ч/проект

Average estimated normalized productivity of projects with unknown implementation dates, thousand nm^3 H_2/hour/project

Статус / Технологии	Concept	Decommissioned	Demo	Feasibility study	FID	Operational	Under construction	Other/ Unknown	Все проекты
Электролизные	608,76	–	0,30	37,01	4,09	0,05	0,13	0,33	228,12
Альтернативные	–	–	–	417,82	–	26,21	–	–	339,50
Все проекты	608,76	–	0,30	60,09	4,09	8,77	0,13	–	232,40

3. АНАЛИЗ ГЕОГРАФИЧЕСКОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ПРОЕКТОВ

Для проведения анализа географического расположения все заявленные страны происхождения проектов были разделены на 4 региона: Европа, Азия, Америка и Океания совместно с Африкой. На рис. 1–4 представлены общие характеристики электролизных проектов для стран в рассматриваемых регионах.

Анализ европейских водородных проектов показал (рис. 1), что Германия лидирует по количеству реализуемых проектов в регионе и мире (116 проектов) с общей электрической мощностью 15,602 ГВт, что составляет 6,99 % от общей мощности всех анализируемых проектов в мире и 25,18 % от общей мощности в Европе. Нидерландам удалось превзойти Германию по общей электрической мощности на 20,1 % и по показателю расчетной нормализованной производительности – на 115,6 %, тем самым она обеспечила себе абсолютное лидерство по этим показателям в регионе.

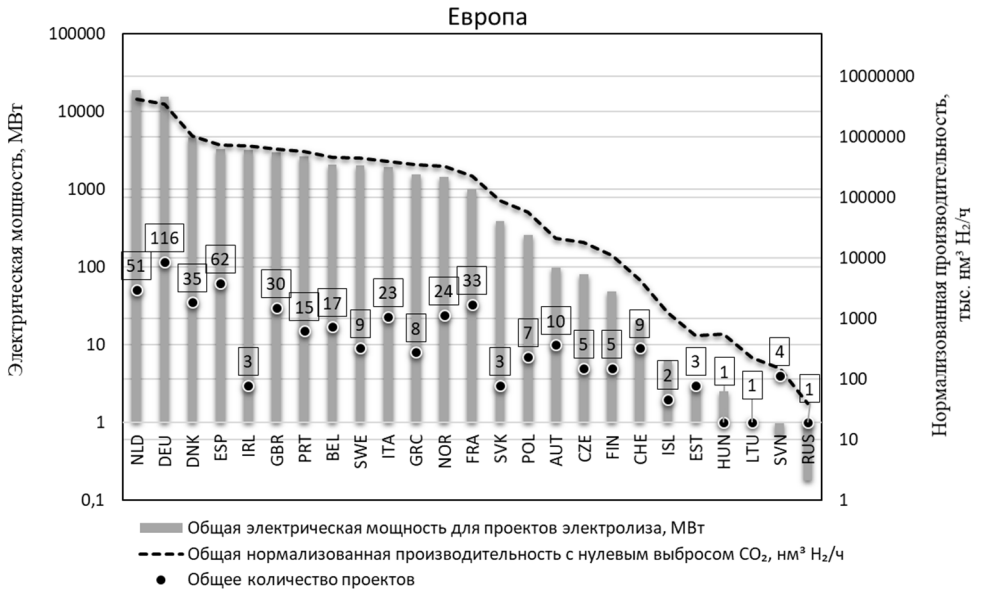


Рис. 1. Общая мощность и количество электролизных проектов в странах Европы

Fig. 1. Total capacity and number of electrolysis projects in European countries

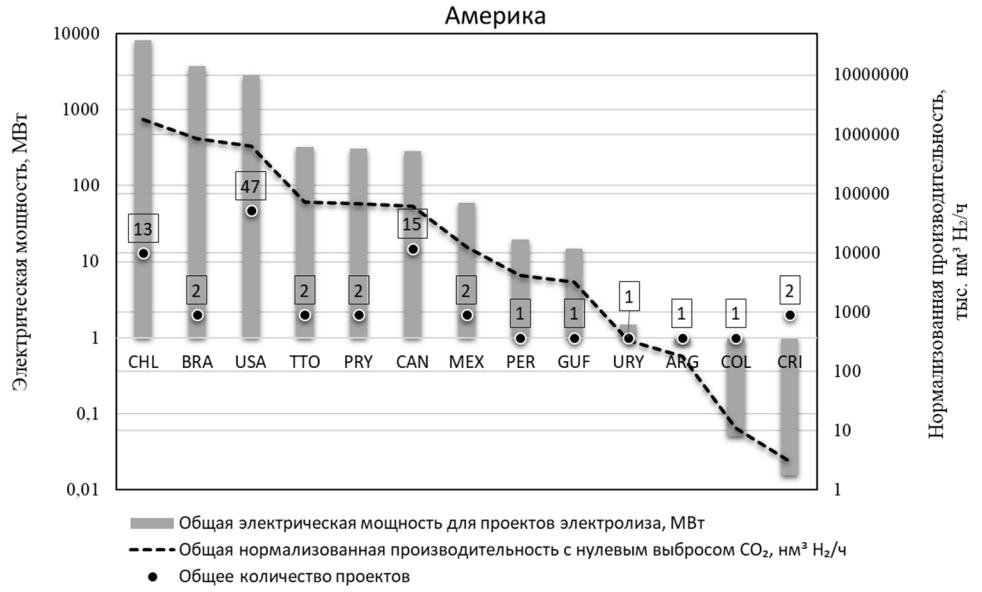


Рис. 2. Общая мощность и количество электролизных проектов в странах Америки

Fig. 2. Total capacity and number of electrolysis projects in the Americas

Россия, несмотря на принятые меры по развитию водородной энергетики [11], не демонстрирует существенно высокого уровня реализуемых проектов. Единственный представленный в базе проект «Kola Nuclear Power Plant» относится к электролизным технологиям, имеет сроки реализации 2020–2022 гг.

со статусом рабочего состояния Demo, его электрическая мощность составляет 0,18 МВт, а общая нормализованная производительность – 40 нм³ H_2/ч [9].

Благодаря амбициозным водородным стратегиям Европейского союза и Великобритании Европа лидирует по развертыванию мощностей электролизных проектов, на нее приходится более 40 % мировой установленной мощности, и в ближайшей перспективе она останется крупнейшим потенциальным рынком водорода [10, 12].

В Америке по количеству реализуемых электролизных проектов лидирует США (рис. 2), в которых реализуются 47 проектов общей мощностью 2,869 ГВТ, что составляет 0,96 % общей мощности всех мировых проектов. По данному показателю ближайший конкурент США – Канада, в которой разрабатывается 15 электролизных проектов. Среди стран этого региона мощности всех проектов США составляют 18,18 %, однако по данному показателю США заметно уступают Чили, где реализуется 13 проектов мощностью 51,54 % от всех проектов Америки. По общей нормализованной производительности в данном регионе также лидирует Чили, в которой данный показатель (1,8 млн нм³ H_2/ч) более чем в 2 раза превосходит показатель ближайшего конкурента – Бразилии (0,836 млн нм³ H_2/ч). По величине средней мощности в группе электролизных технологий лидирует Бразилия (1,882 ГВт/проект), далее следуют Чили (0,624 ГВт/проект) и США (0,061 ГВт/проект). США на данный момент не являются лидером по общей и средней мощности электролизных проектов. Однако ранее (с 2000 г.) в США было запущено более 16 демонстрационных маломощных проектов, в то время как лидирующие по общей и средней мощности проектов Чили и Бразилия имеют множество незапущенных перспективных и концептуальных проектов.

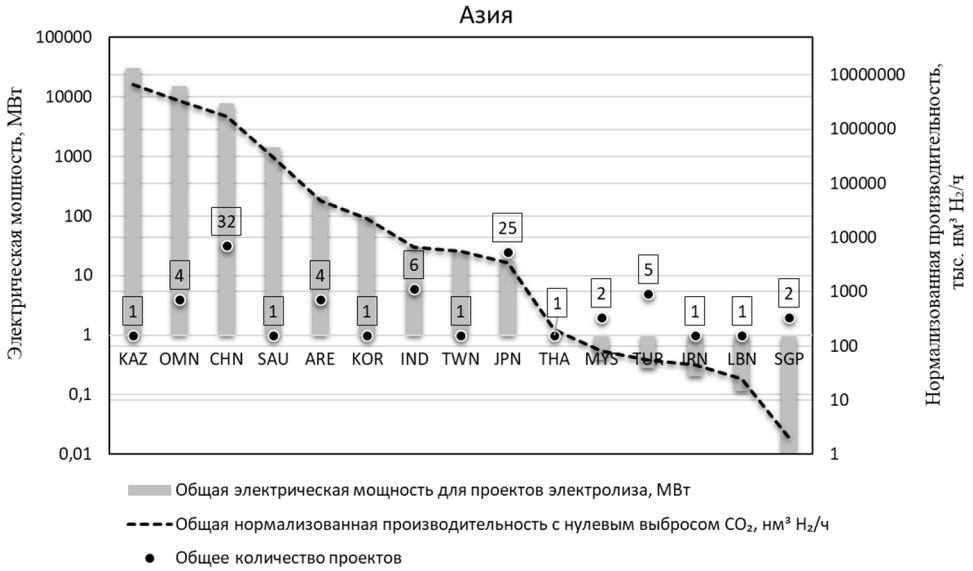


Рис. 3. Общая мощность и количество электролизных проектов в странах Азии

Fig. 3. Total capacity and number of electrolysis projects in Asian countries

В Азии по общему количеству проектов лидирует Китай (см. рис. 3), развивающий 32 проекта мощностью 7,76 ГВт, что составляет 14,17 % от общей мощности проектов в регионе. Ближайший конкурент Китая по количеству проектов – Япония (25 проектов) с общей электрической мощностью 17,18 МВт, что составляет лишь 0,031 % от общей мощности реализуемых в регионе проектов. Необходимо отметить высокую мощность единственного азиатского проекта, реализуемого в Казахстане, – Kazakhstan green hydrogen project (30 ГВт), поскольку на данный момент это наиболее мощный в мире электролизный проект, находящийся в стадии Concept [9].

Казахстан и Оман, занимающие в регионе лидирующие позиции по общей электрической мощности и нормализованной производительности, имеют проекты, находящиеся только на стадии Concept. Китай, занимающий 3-е место, реализует свои проекты в настоящее время, поэтому именно Китай можно считать лидером в Азии. Следует также отметить интенсивное развитие водородных проектов в странах Азиатского региона, на данный момент в этом регионе реализуются проекты, имеющие 24,54 % общемировой мощности.

Рис. 4. Общая мощность и количество электролизных проектов в странах Океании и Африки

Fig. 4. Total capacity and number of electrolysis projects in Oceania and Africa

Страны Океании и Африки анализируются совместно из-за малого количества стран, разрабатывающих водородные проекты (рис. 4). Электролизные проекты Австралии занимают лидирующую позицию по всем показателям в регионе: количество электролизных проектов – 51; их общая установленная электрическая мощность – 59,49 ГВт, что составляет 65,76 % от мощности проектов в данном регионе и 18,28 % от общей мощности всех мировых проектов. Ближайший по данному показателю конкурент в регионе, Мавритания,

обеспечивает 30 ГВт общей электролизной мощности, однако представленный проект (Aman – Green Hydrogen Project) находится на стадии реализации Concept без указанных сроков реализации. Австралия имеет как перспективные, так и уже реализованные проекты [9]. Помимо этого, водородные проекты в Австралии обеспечивают самую высокую общую расчетную нормированную производственную мощность 13,06 млн нм^3 H_2/ч, это составляет 26,5 % от общей мощности всех анализируемых проектов.

Необходимо отметить, что наибольшей средней мощностью в группе завершенных проектов (Decommissioned, табл. 1) обладают 2 проекта в Африке: проект «KIMA – Aswan electrolyser» мощностью 165 МВт в Египте и проект «Zimbabwe NH3 plant» мощностью 100 МВт в Зимбабве. Эти две страны ввели в эксплуатацию свои проекты в 1975 и 2000 годах соответственно, однако данные о других характеристиках и итогах реализации проектов отсутствуют [9].

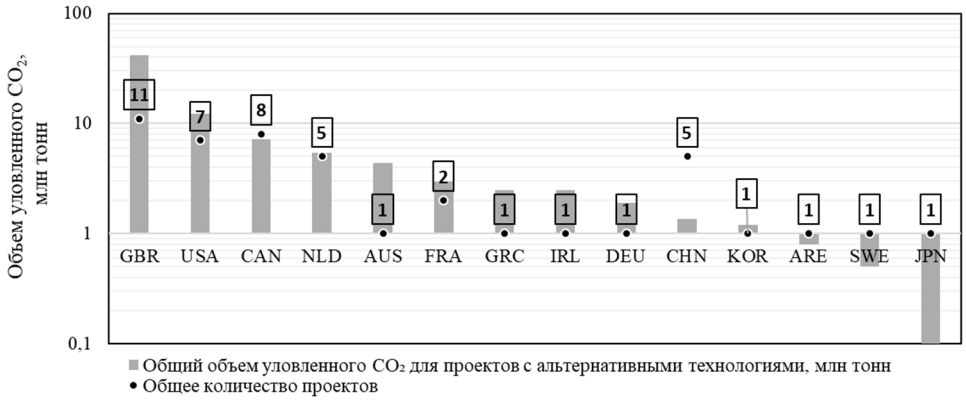


Рис. 5. Общий объем уловленного CO_2 и количество проектов с альтернативными технологиями

Fig. 5. The total amount of CO_2 captured and the number of projects with alternative technologies

В группе альтернативных технологий (рис. 5) водородные проекты Великобритании лидируют по величине общего объема улавливаемого CO_2. В Стране разрабатывается 11 проектов с 41,73 млн т уловленного CO_2, что составляет 49,23 % от мощности всех анализируемых проектов. По среднему объему уловленного CO_2 Великобритания также остаётся лидером (3,794 млн т/проект), ближайший конкурент – США – заметно уступает (1,75 млн т/проект).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показал, что в настоящее время водородные технологии развиваются в стремительном темпе. Разрабатывается множество перспективных водородных проектов, для качественной оценки тенденций развития которых необходимо совместно учитывать как временные рамки, так и стадии реализации разрабатываемых проектов.

Спрос на водород в 2020 г. составлял 90 млн т, большая часть этого объема использовалась в нефтеперерабатывающей и других отраслях промышленности. Этот водород производился в основном из ископаемого топлива, в результате чего выбросы CO_2 составили около 830 млн т [13].

Глобальная мощность электролизных проектов для производства водорода в настоящий момент (согласно последнему обновлению базы данных в октябре 2021 г.) достигла более 310 МВт. В случае успешной реализации 350 разрабатываемых в настоящее время перспективных проектов суммарная мощность электролизных проектов может достичь 65 ГВт в 2030 г. Кроме того, около 80 концептуальных проектов общей мощностью более 230 ГВт находятся на ранних стадиях разработки. Если все эти перспективные проекты будут реализованы, суммарные объемы производства водорода с учетом электролизных проектов могут достичь более 50 млн тонн уже к 2030 году.

Европа лидирует по объему общей мощности электролизных проектов, на нее приходится около 40 % мировой установленной мощности, поэтому в ближайшей перспективе она останется крупнейшим рынком водорода благодаря совместным амбициозным стратегиям развития водородной энергетики в Европейском союзе и Великобритании. Водородные планы Австралии нацелены на то, чтобы догнать Европу в течение нескольких лет. Многие страны уже заинтересованы в развертывании водородных проектов, имеющих большие мощности и ориентированных на экспорт. Китай медленно запускает свои проекты, однако, несмотря на это, количество разрабатываемых проектов стремительно растет.

Применение водорода является ключевым условием обезуглероживания промышленности, несмотря на то что большинство технологий его производства, которые могут выйти на промышленный уровень, всё еще находятся в ранней стадии разработки. Однако можно сказать, что в настоящее время наблюдаются серьезные успехи на пути декарбонизации экономики [14].

Ключевым барьером для массового применения «зеленого» водорода является его высокая стоимость по сравнению с водородом, полученным на основе ископаемого топлива. В настоящее время производство водорода из ископаемого топлива остается наиболее дешевым вариантом в большей части мира [15]. Несмотря на ускоренные темпы внедрения водорода в качестве «зеленого» топлива, всё еще не могут быть выполнены требования, необходимые для снижения объема выбросов CO_2 к 2050 г. Благодаря множеству развиваемых перспективных проектов и разрабатываемых современных технологий имеются все возможности для того, чтобы низкоуглеродный водород стал конкурентоспособным энергетическим и сырьевым ресурсом в течение следующего десятилетия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия низкоуглеродного развития России: возможности и выгоды замещения ископаемого топлива «зелеными» источниками энергии / АНО «Центр экологических инноваций». – М.: ТЕИС, 2016. – 47 с.

2. *Веселов Ф., Соляник А., Урванцева Л.* Низкоуглеродная перестройка электроэнергетики России до 2035 года: потенциал снижения эмиссии CO_2 и его «цена» для потребителя // Энергетическая политика. – 2021. – № 11. – С. 30–33.

3. *Радченко Р.В., Мокрушин А.С., Тюльпа В.В.* Водород в энергетике: учебное пособие. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. – 229 р.

4. Водородная лихорадка: аналитический обзор / Национальное рейтинговое агентство. – М., 2022, февраль. – URL: https://www.ra-national.ru/sites/default/files/analitic_article/Hydrogen_0.pdf (дата обращения: 05.12.2022).

5. *Соловьев Д.А.* Направления развития водородных энергетических технологий // Энергетическая политика. – 2020. – № 3 (145). – С. 64–71.

6. *Westphal K., Zabanova Y.* Russland im globalen Wasserstoff-Wettlauf: Überlegungen zur deutsch-russischen Wasserstoffkooperation. – Berlin: SWP-Aktuell, 2021. – 8 p.

7. *Белов В.Б.* Европейский альянс чистого водорода // Научно-аналитический вестник Института Европы РАН. – 2020. – № 5 (17). – С. 52–59.

8. Анализ политики энергоэффективности в Международном энергетическом агентстве (МЭА) / Международное энергетическое агентство. – OECD / IEA, 2008. – URL: https://view.ckcest.cn/AllFiles/ZKBG/Pages/210/6889b26924a00315ec23def8d1bb7e0eec6ec327.pdf (дата обращения: 05.12.2022).

9. Hydrogen Projects Database, October 2021. – URL: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database (accessed: 05.12.2022).

10. *Копытин И.А., Попадько А.М.* Водородные стратегии крупнейших европейских энергетических компаний // Современная Европа. – 2021. – № 4. – С. 83–94.

11. *Якубсон К.И.* Перспективы производства и использования водорода как одно из направлений развития низкоуглеродной экономики в Российской Федерации // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, № 12. – С. 1675–1695. – DOI: 10.31857/S0044461820120014.

12. *Белов В.Б.* ЕС: новые стратегии обеспечения климатически нейтральной экономики // Европейский союз: факты и комментарии. – 2020. – № 101. – С. 5–10.

13. *Жизнин С.З., Тимохов В.М.* Экономические аспекты развития ядерно-водородной энергетики в мире и в России // Международный научный журнал Альтернативная энергетика и экология. – 2019. – № 1–6. – С. 40–59.

14. Водород как топливо / С.В. Беляев, Г.А. Давыдков, А.А. Селиверстов, С.Н. Перский // Новые материалы и технологии в машиностроении. – 2015. – № 21. – С. 79–82.

15. Водород – энергоноситель и реагент. Технологии его получения / Н.Л. Солодова, Е.И. Черкасова, И.И. Салахов, В.П. Тутубалина // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2017. – Т. 19, № 11–12. – С. 39–50.

Казаринов Артем Витальевич, младший научный сотрудник кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета. Основное направление исследований – системный анализ, управление и обработка информации. E-mail: artemrus987@gmail.com.

Деревянов Максим Юрьевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов», руководитель регионального учебно-научного центра энергетической эффективности Самарского государственного технического университета. Основное направление исследований – системный анализ, управление, обработка информации и автоматизация технологических процессов и производств. Имеет более 60 печатных работ. E-mail: mder2007@mail.ru.

Плешивцева Юлия Эдгаровна, доктор технических наук, профессор кафедры «Управление и системный анализ теплоэнергетических и социотехнических комплексов» Самарского государственного технического университета. Основное направление исследований – системный анализ, управление, обработка информации и автоматизация технологических процессов и производств. Имеет более 300 печатных работ. E-mail: yulia_pl@mail.ru.

Kazarinov Artem V., a junior researcher at the Department of Control and System Analysis of Thermal Power and Socio-technical complexes in Samara State Technical University. Currently, his research interests are focused on system analysis, management and information processing. E-mail: artemrus987@gmail.com

Derevyanov Maksim Y., PhD (Eng.), Associate Professor at the Department of Control and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes, Head of the Regional Educational and Scientific Center for Energy Efficiency, Samara State Technical University. The main direction of his scientific research is system analysis, management, information processing and automation of technological processes and productions. He has more than 60 publications. E-mail: mder2007@mail.ru.

Pleshivtseva Yuliya E., Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Control and System Analysis of Thermal Power and Socio-technical Complexes, Samara State Technical University. Her research interests are currently focused on system analysis, rmanagement, information processing and automation of technological processes and productions. She has more than 300 publications. E-mail: yulia_pl@mail.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-31-48

Classification and localization analysis of hydrogen production projects[*]

A.V. KAZARINOV[a], *M.YU. DEREVYANOV*[b], *YU.E. PLESHIVTSEVA*[c]

Samara State Technical University, 244 Molodogvardeyskaya Street, Samara, [a]*443100, Russian Federation*

[a] *artemrus987@gmail.com* [b] *mder2007@mail.ru* [c] *yulia_pl@mail.ru*

Abstract

The analysis of hydrogen projects is based on the information presented in the open database of the International Energy Agency (IEA) which contains 1327 projects for the production of hydrogen and products based on it, implemented in more than 100 countries around the world. It is proposed to use two classification approaches to identify the current trends in the development of hydrogen projects. The first approach is based on the project classification according to their implementation period, and the second one uses the classification of project implementation stages proposed in the IEA database. The complex application of the described approaches makes it possible to carry out a systematic analysis of the data presented in the IEA database. Projects using electrolysis technologies for hydrogen production are considered separately from projects using alternative technologies. The geographical localization of projects was analyzed following the place of their implementation in one of the four regions of the world: Europe, Asia, America, and Oceania with Africa. The distribution of project capacities by country is presented for all regions. It has been established that the global capacity of electrolysis projects for hydrogen production has reached 310 MW, and, with the successful implementation of 350 promising projects currently being developed, their total capacity can reach 65 GW by 2030. In addition, about 80 concept projects with a total capacity of more than 230 GW are in the early stages of development. If all these promising projects are implemented, the total volume of hydrogen production, taking into account electrolysis projects, can reach more than 50 million tons by 2030, which will contribute to the achievement of global decarbonization goals. The results of the analysis allow us to conclude that currently, projects for hydrogen production and products based on it are rapidly developing in the world, mainly due to the ambitious hydrogen strategies of the countries of the European Union and the UK.

Keywords: IEA, classification, analysis, database, regions of the world, hydrogen, hydrogen technologies

[*] *Received 28 September 2022.*

REFERENCES

1. *Strategiya nizkouglerodnogo razvitiya Rossii: vozmozhnosti i vygody zameshcheniya iskopaemogo topliva «zelenymi» istochnikami energii* [Low-carbon development strategy of Russia: Opportunities and benefits of replacing fossil fuels with "green" energy sources]. Autonomous non-profit organization Center for Environmental Innovation. Moscow, TEIS Publ., 2016. 47 p.

2. Veselov F., Solyanik A., Urvantseva L. Nizkouglerodnaya perestroika elektroenergetiki Rossii do 2035 goda: potentsial snizheniya emissii SO_2 i ego «tsena» dlya potrebitelya [Low-carbon transition of the russian power industry until 2035: potential of emission reduction and its "cost" for consumers]. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, 2021, no. 11, pp. 30–33.

3. Radchenko R.V., Mokrushin A.S., Tyul'pa V.V. *Vodorod v energetike* [Hydrogen in the energy industry]. Ekaterinburg, Ural Federal University Publ., 2014. 229 p.

4. National Rating Agency. *Vodorodnaya likhoradka* [Hydrogen fever]. Moscow, February 2022. Available at: https://www.ranational.ru/sites/default/files/analitic_article/Hydrogen_0.pdf (accessed 05.12.2022).

5. Solov'ev D.A. Napravleniya razvitiya vodorodnykh energeticheskikh tekhnologii [Directions for the development of hydrogen energy technologies]. *Energeticheskaya politika = Energy Policy*, 2020, no. 3 (145), pp. 64–71.

6. Westphal K., Zabanova Y. *Russland im globalen Wasserstoff-Wettlauf: Überlegungen zur deutsch-russischen Wasserstoffkooperation*. Berlin, SWP-Aktuell, 2021. 8 p.

7. Belov V.B. Evropeiskii al'yans chistogo vodoroda [The European clean hydrogen alliance]. *Nauchno-analiticheskii vestnik Instituta Evropy RAN = Scientific and Analytical Herald of the Institute of Europe RAS*, 2020, no. 5 (17), pp. 52–59.

8. *Analiz politiki energoeffektivnosti v Mezhdunarodnom energeticheskom agentstve (MEA)* [Analysis of energy efficiency policy at the International Energy Agency (IEA)]. OECD / IEA, 2008. (In Russian). Available at: https://view.ckcest.cn/AllFiles/ZKBG/Pages/210/6889b26924a00315ec23def8d1bb7e0eec6ec327.pdf (accessed 05.12.2022).

9. Hydrogen Projects Database, October 2021. Available at: https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/hydrogen-projects-database (accessed 05.12.2022).

10. Kopytin I.A., Popad'ko A.M. Vodorodnye strategii krupneishikh evropeiskikh energeticcheskikh kompanii [Hydrogen strategies of the largest European energy companies]. *Sovremennaya Evropa = Contemporary Europe*, 2021, no. 4, pp. 83–94.

11. Yakubson K.I. Perspektivy proizvodstva i ispol'zovaniya vodoroda kak odno iz napravlenii razvitiya nizkouglerodnoi ekonomiki v Rossiiskoi Federatsii [Prospects for production and use of hydrogen as one of directions of the development of low-carbon economy in the Russian Federation]. *Zhurnal prikladnoi khimii = Russian Journal of Applied Chemistry*, 2020, vol. 93, no. 12, pp. 1675–1695. DOI: 10.31857/S0044461820120014. (In Russian).

12. Belov V.B. ES: novye strategii obespecheniya klimaticheski neitral'noi ekonomiki [EU: new strategies to ensure a climate-neutral economy]. *Evropeiskii soyuz: fakty i kommentarii = The European Union: facts and comments*, 2020, no. 101, pp. 5–10.

13. Zhiznin S.Z., Timokhov V.M. Ekonomicheskie aspekty razvitiya yaderno-vodorodnoi energetiki v mire i v Rossii [Economic aspects of nuclear and hydrogen energy development in the world and Russia]. *Mezhdunarodnyi nauchnyi zhurnal Al'ternativnaya energetika i ekologiya = International scientific journal for Alternative energy and ecology*, 2019, no. 1–6, pp. 40–59. (In Russian).

14. Belyaev S.V., Davydkov G.A., Seliverstov A.A., Persky S.N. Vodorod kak toplivo [Hydrogen fuel]. *Novye materialy i tekhnologii v mashinostroenii = New materials and technologies in mechanical engineering*, 2015, no. 21, pp. 79–82.

15. Solodova N.L., Cherkasova E.I., Salakhov I.I., Tutubalina V.P. Vodorod – energonositel' i reagent. Tekhnologii ego polucheniya [Hydrogen is an energy carrier and reagent. Technologies for its production]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki = Proceedings of the higher educational institutions. Energy sector problems*, 2017, vol. 19, no. 11–12, pp. 39–50.

Для цитирования:

Казаринов А.В., Деревянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э. Классификация и анализ локализации проектов по производству водорода // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 4 (88). – С. 31–48. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-31-48.

For citation:

Kazarinov A.V., Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E. Klassifikatsiya i analiz lokalizatsii proektov po proizvodstvu vodoroda [Classification and localization analysis of hydrogen production projects]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 4 (88), pp. 31–48. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-31-48.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 88, № 4, 2022, с. 49–62

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 88, No. 4, 2022, pp. 49–62

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 551.46.077; 551.46.073 DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-49-62

Анализ подходов к функционированию автономного необитаемого аппарата и надводного судна при проведении совместных миссий*

А.И. САВЕЛЬЕВ[a], К.Д. КРЕСТОВНИКОВ[b], А.А. ЕРАШОВ[c]

199178, г. Санкт-Петербург, 14-я линия, 39, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук» (СПб ФИЦ РАН), Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук

[a] *saveliev@iias.spb.su* [b] *k.krestovnikov@iias.spb.su* [c] *erashov.a@iias.spb.su*

Автономные необитаемые подводные аппараты позволяют успешно решать разнообразные гражданские, научные и военные задачи. Робототехнические комплексы данного класса демонстрируют свою высокую эффективность при выполнении сейсмических исследований, гидрохимического мониторинга акваторий и инспекции состояния технических объектов различного назначения. Аппараты, источником питания которых является аккумуляторная батарея, имеют, как правило, сильно ограниченный запас хода, а также при работе требуют периодического пополнения заряда батареи. Физические свойства среды функционирования накладывают значительные ограничения на применяемые способы коммуникации, что усложняет передачу информации между оператором и автономным необитаемым подводным аппаратом. Доставка аппарата к месту проведения миссии, а также обеспечение питания аппарата и информационного обмена с оператором требуют определенной дополнительной инфраструктуры. Данная работа направлена на поиск и выбор решений в области транспортировки, энергетического и коммуникационного обеспечения автономных необитаемых подводных аппаратов. Рассмотрены конструктивные решения подводных доков и общие принципы построения систем обеспечения функционирования аппаратов данного типа, а также выполнена классификация подходов к энергетическому обеспечению подводных аппаратов. На основании проведенного анализа выбраны наиболее перспективные решения, обеспечивающие долгосрочную автономную работу. Ряд преимуществ в эксплуатации имеют док-станции с возможностью подъема и погружения подводного аппарата непосредственно внутри станции. Использование контактных методов для передачи энергии и информации требует высокой точности позиционирования подводного аппарата и усложнения его сенсорной системы, а также применения особых методов для защиты

* *Статья получена 11 ноября 2022 г.*

Исследования выполнены при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-3094.2022.1.6.

контактных пар от воздействия окружающей среды. Данных недостатков лишены беспроводные решения, активно внедряющиеся в настоящее время.

Ключевые слова: автономный необитаемый подводный аппарат, докование АНПА, стыковка АНПА, резидентные системы, донное причальное устройство, способы заряда АНПА, беспроводная передача энергии, конструкция док-станции

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении автономными необитаемыми подводными аппаратами (АНПА) различных миссий периодически требуется обеспечивать информационный обмен с оператором и осуществлять заряд или замену его аккумуляторной батареи. Данные процессы могут реализовываться с помощью подъема аппарата на надводное судно, однако это возможно не при любых погодных условиях, а также сопряжено с затратами времени и необходимостью привлечения квалифицированного персонала, что увеличивает эксплуатационные издержки. Авторы работы [1] приводят ряд проблем, связанных с эксплуатацией АНПА: значительное время подготовительных работ, повышенная сложность конструкции обслуживающих систем и самого аппарата, а также проблемы энергетического и коммуникационного обеспечения. Данных недостатков при эксплуатации лишены телеуправляемые подводные аппараты (ТПА), использующие кабель-трос для взаимодействия с надводным судном. В акваториях с сильным течением, неблагоприятной ледовой обстановкой или глубоководными участками ТПА имеют значительные ограничения.

Исследования в области разработки решений для беспроводной передачи энергии, ранее проведенные авторами настоящей работы, позволили сделать вывод, что применение технологии для передачи энергии в водной среде является актуальным [2]. Предлагаемые конструктивные решения разработанных однонаправленных [3] и двунаправленных [4] беспроводных систем передачи энергии (БСПЭ) предназначены для применения в наземных робототехнических комплексах. Для успешной адаптации БСПЭ к эксплуатации в составе АНПА необходимо провести анализ существующих подходов и решений в данной области.

С учетом вышеизложенного задача данного исследования формулируется следующим образом: на основе анализа существующих решений в области управления и эксплуатации АНПА необходимо провести систематизацию перспективных способов их транспортировки, энергетического и коммуникационного обеспечения.

1. АНАЛИЗ

В первую очередь стоит обратить внимание на системы резидентного типа, где АНПА может быть размещен у стационарной подводной станции значительное время, получать от нее энергию и команды и совершать обмен информацией с надводным судном. Авторами работы [5] представлен результат

разработки гибридного интервенционного АНПА резидентного типа. Основными блоками представленной системы являются наземный пункт управления, подключенная к кабельной инфраструктуре подводная док-станция, подводный аппарат. Док-станция выполняет функции зарядной системы, передачи информации оператору, анализа состояния бортовых систем АНПА. Перемещение АНПА в ближней зоне и преодоление течений, как отмечают авторы, осуществляется посредством винтовых движителей. В бортовые системы АНПА входят навигационная, энергетическая, аварийная системы, а также система связи и группового управления.

Аналогичная система предложена в работе [6]. Предложенная распределенная система роботизированной подводной сейсморазведки предназначена для работы в подледных акваториях. Частями системы являются надводно-подводный робот-носитель «Тень», малогабаритные подводные автономные аппараты – носители сейсмоприемников, подводные автономные аппараты с возможностью отбора проб грунта и функционирования в качестве придонных станций наблюдения. Робот-носитель представляет собой устройство с изменяемой геометрией корпуса. Данный робот может передавать энергию, а также выполнять функции носителя и командно-навигационного ядра для группы более малогабаритных подводных автономных аппаратов – носителей сейсмоприемников. Авторы также ссылаются на аппарат, разработанный «Океанос» совместно с СПбГМТУ, в работе [5]. По представленным в работах иллюстрациям можно сделать вывод, что оба этих аппарата предполагается поднимать на борт надводного судна специальными лебедками для обслуживания.

Авторами изобретения [7] предложена конструкция АНПА, которая позволяет провести замену разряженных аккумуляторов. В качестве аккумуляторов авторами предложено использовать аккумуляторы с индивидуальными компенсаторами давления, которые не требуют специального оборудования. Для замены аккумуляторов необходим подъем АНПА на надводное судно и дополнительный персонал. Как отмечают авторы, процессы стыковки и расстыковки аккумулятора с электрическим разъемом могут составить несколько минут, расчетное время полной замены четырех контейнеров посредством двух человек составляет не более двух часов. Аналогичный подход с заменой предполагается использовать с АНПА Zeno, предназначенного для выполнения коротких миссий [8]. Помимо отмеченных ранее особенностей, подобные подходы требуют разработки специальных конструкций и устройств АНПА для фиксации и замены аккумуляторов.

Авторы работы [9] предлагают док-станцию, на которой заряд АНПА под водой производится с применением контактных методов. На АНПА и док-станции установлены части электрического штепсельного фланцевого разъема производства фирмы SIEMENS. Разъемное электрическое соединение также позволяет передавать информацию посредством интерфейса RS-485. Док-станция оборудована механизмом осевого центрирования, механизмом фиксации и механизмом коммутации разъемного соединения. Для навигации АНПА

перед входом в док-станцию используются четыре световых маяка, установленные по периметру воронки, направляющей аппарат в процессе входа в док. После захода аппарата в док выполняется осевое центрирование, фиксация, а далее – коммутация разъемного соединения. Для успешной коммутации разъемного соединения используется гибкий механизм, состоящий из пружины и карданного шарнира. Авторы работы провели успешные практические испытания разработанного решения. Иллюстрации в работе позволяют сделать вывод о том, что погружение и подъем АНПА на надводное судно посредством данной док-станции не рассматривается.

Система Seaeye Sabertooth [10, 11] предполагает стыковку АНПА с подводным доком, опускаемым с надводного судна или платформы. При стыковке Seaeye Sabertooth выполняет заряд аккумуляторной батареи, передает собранные данные и получает информацию о предстоящей миссии. Управление данным АНПА выполняется оператором и контролируется с использованием видео или данных гидролокатора, отправляемых оператору по каналу связи с низкой пропускной способностью (кабель-трос или низкочастотная радиосвязь). Кроме ручного режима управления АНПА также имеет автономный режим для выполнения заранее запрограммированного осмотра определенной территории или передвижения в определенное место. Док-станция помещена в защитное сооружение. Заряд АНПА выполняется посредством БСПЭ, которая может обеспечить передаваемую мощность до 2 кВт. Также авторы отмечают, что для передачи данных возможно применение расположенного на док-станции беспроводного радиомодема. Время автономной работы АНПА составляет примерно 2,4 часа, при этом максимально возможная дистанция перемещения аппарата соответствует диапазону 30…40 км.

Беспроводная передача энергии между подводным доком и АНПА является перспективным решением и позволяет повысить надежность функционирования АНПА. В книге [12] рассматривается проблема бесконтактной передачи энергии АНПА при базировании в подводном положении с применением донного причального устройства в качестве док-станции. Описываемая система представляет собой обмотки трансформатора, первичная часть которого установлена на донное причальное устройство, вторичная – на АНПА. Обе части системы представляют собой герметичные оболочки толщиной в несколько миллиметров, в которые помещены обмотки. Одним из ограничений работы системы является то, что оси обмоток при передаче энергии должны совпадать.

Бесконтактная система стыковки для АНПА с использованием донного причального устройства, оборудованного БСПЭ, рассматривается авторами работы [13]. Рассматриваемая док-станция состоит из несущей части конструкции и основного блока, оснащенного системой наведения и блокировки, камерой, навигационными устройствами, устройствами сбора данных и беспроводной связи. Станция имеет конструкцию для стыковки с АНПА, состоящую из направляющей воронкообразного типа и запорных элементов. Центр конструкции находится в 3,25 м от дна. Внутренний и наружный диаметры

входа составляют 300 мм и 1200 мм соответственно. Стыковка выполняется с использованием акустической (на дистанции в пределах 100 м) и оптической навигации (на дистанции в пределах 20 м). После успешной стыковки АНПА запирается в воронке электромагнитным замком. В случае успешной стыковки передающая часть БСПЭ с достаточной точностью совмещается с приемной катушкой АНПА. Док-станция подключена к кабельной сети океанских обсерваторий с помощью специального кабеля, посредством которого получается энергия и обеспечивается связь. Для передачи данных под водой используется электромагнитно-волновая связь.

Воронкообразный док и оптическая навигация используется для докования АНПА, представленного в [14] и [15]. В [14] воронка док-станции значительно больше АНПА. Для докования используется пять световых индикаторов. Эксперименты по докованию АНПА проводились в бассейне без течения, при этом док-станция была стационарной и всегда находилась в поле зрения камеры АНПА. Авторы работы [15] рассматривают способы докования в целом. В качестве преимуществ доков воронкообразного типа было отмечено, что данная конструкция дает возможность направлять АНПА при стыковке и не требует высокой точности позиционирования.

В задачах позиционирования АНПА относительно док-станции помимо световых индикаторов возможно использование технологии позиционирования на основе реперных маркеров ArUco, ARToolKit и AprilTag, применяемой в наземной робототехнике [16, 17]. Данное направление активно развивается, публикуются исследования, посвященные улучшению детектирования маркеров в подводных условиях, так как точность определения маркера зависит от условий освещенности, рассеивания света, а также от степени замутненности воды [18, 19].

Оптическая навигация используется при доковании АНПА в [20]. В работе представлена система подводных световых маркеров, которые возможно использовать для корректирования данных, получаемых с бортовой инерциальной навигационной системы. АНПА хранится на борту надводного судна внутри системы развертывания и возврата, представляющей собой стационарное донное устройство. Следует отметить, что применение подводных световых маркеров ограничено степенью замутненности воды.

Аналогичное решение с использованием световых маркеров и донной док-станции для АНПА рассматривается в [21], где показано, что донная станция используется для пополнения запаса энергии АНПА. В работе описываются проведенные эксперименты, в которых АНПА удалось проработать в течение трех суток, совершать стыковку со станцией в условиях видимости менее двух метров и течением 0,5 м/с. Передача команд АНПА и обмен данными для проверки состояния аппарата осуществлялись посредством акустических волн.

Для рассмотренных разновидностей АНПА в зависимости от их способа перемещения, а также типа док-станции возможно несколько подходов к процессу докования. На данный процесс также влияет то, как расположены приемные и передающие компоненты БСПЭ. Проведенный анализ в направлении

мест установки передающей части БСПЭ позволил выделить следующие способы размещения. Возможно горизонтальное размещение устройства на поверхности донных док-станций [22–24] (рис. 1).

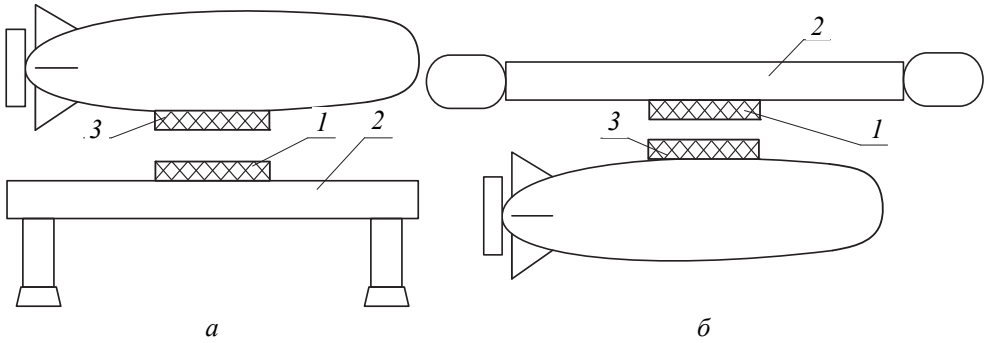


Рис. 1. Горизонтальная установка передающей части БСПЭ *1* на док-станции *2*:
а – на верхней части; *б* – в нижней части; *3* – приемная часть БСПЭ

Fig. 1. Horizontal installation of the WPTS transmitting part *1* on the doc-station *2*:
a – on the top; *б* – at the bottom; *3* is the receiving part of WPTS

Возможно горизонтальное размещение передающей части БСПЭ на надводной док-станции в нижней части таким образом, чтобы АНПА не потребовалось всплывать [25] (рис. 1, *б*). Также потенциально возможна установка передающей части вертикально в носовой или передней части АНПА [10].

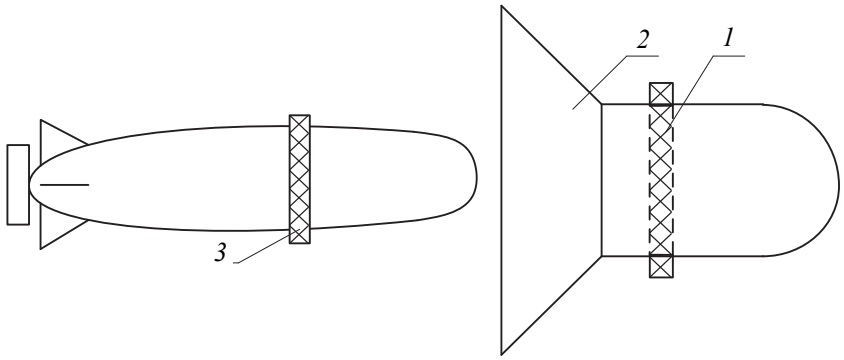


Рис. 2. Установка передающей части БСПЭ *1* на корпусе док-станции *2*,
3 – приемная часть БСПЭ

Fig. 2. Installation of the WPTS transmitting part *1* on the doc-station body *2*,
3 is the receiving WPTS part

В случае док-станций с воронкообразной направляющей для АНПА торпедообразной формы передающую катушку БСПЭ соленоидного типа располагают таким образом, чтобы аппарат находился внутри этой катушки (рис. 2). Данный способ установки представлен в работе [26]. Аналогичный способ установки в воронкообразной док-станции рассмотрен в [27, 28].

В рамках рассматриваемого способа установки БСПЭ необходимо, чтобы корпус аппарата был изготовлен из экранирующего материала, соответствующего по параметрам рабочей частоте БСПЭ, или чтобы электроника была размещена в местах, в которых нет воздействия магнитных полей, создаваемых БСПЭ. Перечисленные особенности делают данный вариант установки менее универсальным и конструктивно более сложным, чем способы горизонтального расположения.

Общими для рассмотренных вариантов расположения являются способы получения энергии для заряда аккумулятора АНПА: от надводного судна по кабель-тросу или от альтернативных источников энергии. Последний способ в случае горизонтального расположения передающей части возможно реализовать посредством дополнительного оборудования, размещаемого на надводной док-станции или иной платформе.

2. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Авторами рассмотренных работ в основном предлагаются системы для эксплуатации АНПА с донными док-станциями. Док-станции с находящимся внутри АНПА опускают в водоемы с палуб надводных судов. Затем при погружении док-станций происходит выход АНПА из дока, выполнение им миссии и докование для поднятия обратно на надводное судно. Крепление АНПА внутри док-станций может осуществляется посредством электромагнитов или механических устройств. Для снижения требований к точности позиционирования АНПА и упрощения задачи стыковки с док-станцией распространено применение направляющих конструкций воронкообразного типа.

Док-станции выполняют функции заряда аккумуляторной батареи АНПА, контроля его состояния, передачи информации или команд надводному судну от АНПА и наоборот. Результаты проведенного анализа позволили классифицировать возможные подходы к энергетическому обеспечению АНПА, схематично представленные на рис. 3.

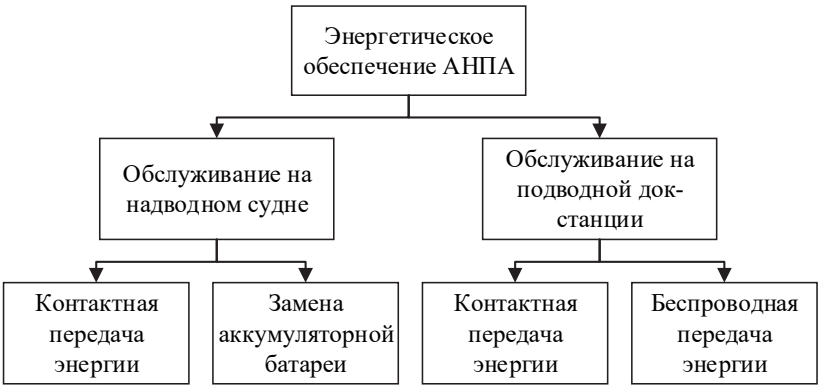


Рис. 3. Подходы к энергетическому обеспечению АНПА

Fig. 3. Approaches to energy supply of AUV

Из рис. 3 следует, что при обслуживании АНПА на подводной док-станции подход, подразумевающий замену аккумуляторной батареи, не используется. Это обусловлено высокой сложностью автоматизации данного процесса, а также требованиями к качественному контролю герметичности АНПА после проведения работ по замене батареи. Применение технологий беспроводной передачи энергии дает ряд преимуществ для подводной док-станции, но при обслуживании АНПА на надводном судне данный подход теряет свою актуальность. Данный факт обусловлен наличием потерь при передаче энергии [2], а также сравнительно большими габаритами приемной части системы по сравнению с электрическим разъемом. Стоит отметить, что для коммуникации с АНПА, как правило, используется тот же подход, который применяется для передачи энергии.

Использование контактных методов, подразумевающих автономную эксплуатацию, требует высокой точности позиционирования АНПА и усложнения его сенсорной системы, а также применения особых методов для защиты контактных пар от воздействия окружающей среды. Док-станции, оборудованные контактной системой для передачи энергии и информации, имеют в своем составе механизмы для центрирования и фиксации АНПА, а также механизмы для коммутации разъемного электрического соединения. Механические системы могут снижать общую надежность док-станции, а также требуют периодического обслуживания. Использование бесконтактных способов передачи энергии, а именно индуктивного способа, увеличивает общую надежность системы и снижает требования к точности позиционирования АНПА. Беспроводная передача энергии и информации в общем реализуется путем размещения передающей и приемной катушек таким образом, чтобы приемная часть находилась в соосном положении относительно расположенной на док-станции передающей части для достижения максимально возможной эффективности [29]. При этом сами док-станции имеют соединение с надводным судном или иным объектом через кабель-трос, посредством которого передается энергия и информация. В целом проведенный обзор позволяет сделать вывод, что док-станции дают возможность реализовать длительную и безопасную работу АНПА без поднятия на поверхность. Также они могут обеспечить легкий доступ человека к АНПА при необходимости и безопасность АНПА при поднятии его на борт судна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе был проведен анализ подходов к транспортировке АНПА, энергетическому и коммуникационному обеспечению при выполнении совместных миссий с надводным судном. Рассмотрены варианты размещения беспроводной системы передачи энергии на док-станции. Результаты анализа позволили выделить ряд подходов к энергетическому обеспечению АНПА, которые используются при обслуживании на подводной док-станции и надводном судне. Энергетические ресурсы АНПА с питанием от

аккумуляторной батареи ограничены, поэтому в случае удаленности миссии от берега или объекта базирования транспортировка аппарата осуществляется на надводном судне. В месте проведения миссии необходимо спустить АНПА на воду, при этом возможен либо спуск отдельного аппарата, либо спуск АНПА совместно с док-станцией. Перспективным способом погружения и подъема АНПА на надводное судно является применение док-станций, которые позволяют располагать АНПА внутри во время проведения данных операций. Док-станция позволяет функционировать АНПА продолжительное время без необходимости поднятия на надводное судно, а также позволяет более безопасно осуществлять погружение и поднятие. Для питания и заряда аккумуляторной батареи аппарата док-станции оборудуются контактными и беспроводными системами передачи энергии. Применение беспроводных технологий позволяет отказаться от сложных механических узлов, снизить требования к точности позиционирования аппарата и повысить общую надежность АНПА и док-станции.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Resident autonomous underwater vehicle systems – a review of drivers, applications, and integration options for the subsea oil and gas market / M. Furuholmen, A. Hanssen, R. Carter, K. Hatlen, J. Siesjo // Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. – Ravenna, Italy, 2013.

2. *Крестовников К.Д., Ерашов А.А.* Исследование эффективности беспроводной системы передачи энергии при эксплуатации в воде и растворах // Датчики и системы. – 2022. – № 2 (261). – С. 19–27. – DOI: 10.25728/datsys.2022.2.3.

3. *Krestovnikov K., Cherskikh E., Smirnov P.* Wireless power transmission system based on coreless coils for resource reallocation within robot group // International Conference on Interactive Collaborative Robotics. – Cham: Springer, 2019. – P. 193–203. – DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_19.

4. *Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A.* Structure and circuit solution of a bidirectional wireless power transmission system in applied robotics // Radioengineering. – 2021. – Vol. 30, N 1. – P. 142–149. – DOI: 10.13164/re.2021.0142.

5. *Маевский А.М., Гайкович Б.А.* Разработка легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // Перспективные системы и задачи управления: материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов н/Д., 2019. – С. 91.

6. Концепция роботизированной подводной сейсморазведки в подледных акваториях / Б.А. Гайкович, В.Ю. Занин, В.С. Тарадонов, А.П. Блинков, И.В. Кожемякин, М.Ю. Токарев, Е.А. Бирюков // Сборник работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2018 года. – М., 2018. – С. 64–86.

7. Патент № 2082646 Российская Федерация. Спасательно-рабочий подводный аппарат: опубл. 27.06.1997 / Доронин В.Д., Крылов Е.В., Дикарев Н.Ф., Лафер Р.И., Лавковский С.А., Федяев В.А., Козлов Ю.Г., Жучков А.И., Шитов Ю.Н., Агишев Е.Р., Голубев В.А. – 6 с.

8. Development and design of a compact autonomous underwater vehicle: Zeno AUV / J. Gelli, A. Meschini, N. Monni, M. Pagliai, A. Ridolfi, L. Marini, B. Allotta // IFAC-PapersOnLine. – 2018. – Vol. 51 (29). – P. 20–25. – DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.463.

9. Autonomous underwater vehicle docking system based on wired transmission / J. Guo, R. Zheng, X. Yu, A. Wei, B. Yang // 2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA). – IEEE, 2018. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/WRC-SARA.2018.8584153.

10. *Johansson B., Siesjö J., Furuholmen M.* Seaeye Sabertooth a hybrid AUV/ROV offshore system // OCEANS 2010 MTS/IEEE Seattle. – IEEE, 2010. – P. 1–3. – DOI: 10.1109/OCEANS.2010.5663842.

11. *Johansson B., Siesjö J., Furuholmen M.* Seaeye Sabertooth, a hybrid AUV/ROV offshore system // SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition. – Aberdeen, UK, 2011. – DOI: 10.2118/146121-MS.

12. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение / А.В. Инзарцев, Л.В. Киселев, В.В. Костенко, Ю.В. Матвиенко, А.М. Павин, А.Ф. Щербатюк; Институт проблем морских технологий Дальневосточного отделения Российской академии наук. – Владивосток: ИПМТ ДВО РАН, 2018. – 368 с.

13. A non-contact docking system for charging and recovering autonomous underwater vehicle / R. Lin, D.-J. Li, T. Zhang, M. Lin // Journal of Marine Science and Technology. – 2019. – Vol. 24 (3). – P. 902–916.

14. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera / J.Y. Park, B.H. Jun, P.M. Lee, J. Oh // Ocean Engineering. – 2009. – Vol. 36 (1). – P. 48–61.

15. *Bellingham J.G.* Autonomous underwater vehicle docking // Springer Handbook of Ocean Engineering. –Cham: Springer, 2016. – P. 387–406.

16. *Толстой И.М., Захаров К.С., Кан И.А.* Локализация и навигация мультиагентной робототехнической системы на основе ARUCO-маркеров // Пятый Всероссийский научно-практический семинар «Беспилотные транспортные средства с элементами искусственного интеллекта» (БТС-ИИ-2019). – СПб., 2019. – С. 39–47.

17. Метод оценки времени беспроводной передачи энергетических ресурсов между двумя роботами / А.А. Ерашов, К.В. Камынин, К.Д. Крестовников, А.И. Савельев // Информатика и автоматизация. – 2021. – Т. 20, № 6. – С. 1279–1306. – DOI: 10.15622/ia.20.6.4.

18. Detecting square markers in underwater environments / J. Čejka, F. Bruno, D. Skarlatos, F. Liarokapis // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11 (4). – P. 459. – DOI: 10.3390/rs11040459.

19. An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments / D.B. dos Santos Cesar, C. Gaudig, M. Fritsche, M.A. dos Reis, F. Kirchner // OCEANS 2015 – Genova. – IEEE, 2015. – P. 1–6. – DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271491.

20. Vision-based localization system suited to resident underwater vehicles / P. Trslić, A. Weir, J. Riordan, E. Omerdic, D. Toal, G. Dooly // Sensors. – 2020. – Vol. 20 (2). – P. 529.

21. *Jabari R., Cheng T.* Autonomous evolution robotic systems for underwater surveillance and inspection // Offshore Technology Conference (OTC-2020). – Houston, TX, USA, 2020. – Vol. 1. – P. 464–474.

22. *Wang T., Zhao Q., Yang C.* Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system // Ocean Engineering. – 2021. – Vol. 224. – P. 108744. – DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108744.

23. *Yang C., Wang T., Chen Y.* Design and analysis of an omnidirectional and positioning tolerant AUV charging platform // IET Power Electronics. – 2019. – Vol. 12 (8). – P. 2108–2117. – DOI: 10.1049/iet-pel.2018.5663.

24. Wireless power and data transfer system for station-based autonomous underwater vehicles / M. Ogihara, T. Ebihara, K. Mizutani, N. Wakatsuki // OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington. – IEEE, 2015. – P. 1–5. – DOI: 10.23919/OCEANS.2015.7404400.

25. Underwater wireless power transfer for non-fixed unmanned underwater vehicle in the ocean / S. Yoshida, M. Tanomura. Y. Hama, T. Hirose, A. Suzuki, Y. Matsui, N. Sogo, R. Sato // 2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV). – IEEE, 2016. – P. 177–180. – DOI: 10.1109/auv.2016.7778668.

26. A circumferential coupled dipole-coil magnetic coupler for autonomous underwater vehicles wireless charging applications / C. Cai, Y. Zhang, S. Wu, J. Liu, Z. Zhang, L. Jiang // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 65432–65442. – DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2984530.

27. *Shi J., Li D., Yang C.* Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications // Journal of Zhejiang University. Science C. – 2014. – Vol. 15 (1). – P. 51–62. – DOI: 10.1631/jzus.C1300171.

28. *Yang C., Lin M., Li D*. Improving steady and starting characteristics of wireless charging for an AUV docking system // IEEE Journal of Oceanic Engineering. – 2018. – Vol. 45 (2). – P. 430–441. – DOI: 10.1109/JOE.2018.2872449.

29. *Krestovnikov K., Erashov A*. Research of performance characteristics of WPT system associated with mutual arrangement of coils // Electromechanics and Robotics. – Singapore: Springer, 2022. – P. 359–369. – DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_31.

Савельев Антон Игоревич, кандидат технических наук, заведующий лабораторией автономных робототехнических систем, старший научный сотрудник Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра Российской академии наук. Основное направление научных исследований – математическое обеспечение, кросс-платформенные программные средства и мобильные сервисы окружающего киберфизического пространства, методы и алгоритмы управления робототехническими системами. Имеет более 100 печатных работ. E-mail: saveliev@iias.spb.su

Крестовников Константин Дмитриевич, младший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем Санкт-Петербургского Федерального исследовательского центра Российской академии наук. Основное направление научных исследований – модели и алгоритмы распределения энергетических ресурсов в рое робототехнических средств путем двунаправленной беспроводной передачи энергии, мехатроника. Имеет более 30 печатных работ. E-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su

Ерашов Алексей Алексеевич, младший научный сотрудник лаборатории технологий больших данных социокиберфизических систем Санкт-Петербургского федерального исследовательского центра Российской академии наук. Основное направление научных исследований – методы и алгоритмы управления робототехническими средствами с применением технического зрения и машинного обучения. Имеет более 15 печатных работ. E-mail: erashov.a@iias.spb.su

Saveliev Anton I., PhD (Eng.), head of the Autonomous Robotic System laboratory, senior researcher, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on mathematical software, cross-platform software and mobile services of the surrounding cyber-physical space, methods and algorithms of robotic systems controlling. He has more than 100 publications. E-mail: saveliev@iias.spb.su

Krestovnikov Konstantin D., junior researcher in the Autonomous Robotic Systems laboratory, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on models and algorithms for the distribution of energy resources in a swarm of robotic means by bi-directional wireless power transfer, and mechatronics. He has more than 30 publications. E-mail: k.krestovnikov@iias.spb.su

Erashov Aleksei A., junior researcher in the laboratory of Big Data Technologies in Sociocyberphysical Systems, Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on methods and algorithms for controlling robots using computer vision and machine learning. He has more than 15 publications. E-mail: erashov.a@iias.spb.su

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-49-62

Analysis of approaches to functioning of an autonomous unmanned vehicle and a surface ship in joint missions *

A.I. SAVELIEV[a], *K.D. KRESTOVNIKOV*[b], *A.A. ERASHOV*[c]

Saint Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 39, 14 Line V.O., Saint Petersburg, 199178, Russian Federation

[a] *saveliev@iias.spb.su* [b] *k.krestovnikov@iias.spb.su* [c] *erashov.a@iias.spb.su*

Abstract

Autonomous unmanned vehicles can successfully solve a variety of civil, scientific and military tasks. Robotic complexes of this class demonstrate their high efficiency when performing seismic surveys, hydrochemical monitoring of water areas and inspection of technical facilities of various purposes. Vehicles powered by a rechargeable battery, as a rule, have a very limited power reserve, and require periodic replenishment of the battery charge. The physical properties of the operating environment impose significant limitations on the communication methods used, which complicates the transfer of information between the operator and an autonomous unmanned submersible. Delivery of the vehicle to the mission site, as well as providing power to the vehicle and information exchange with the operator require some additional infrastructure. This paper focuses on finding and selecting solutions for transportation, power and communications support for autonomous underwater vehicles. The constructional solutions of underwater docks and general principles of building systems for ensuring the operation of this type of vehicles are considered, and a classification of approaches to the energy supply of underwater vehicles is made. Based on the analysis the most perspective solutions ensuring long-term autonomous operation were selected. Docking stations with the ability to lift and dive an underwater vehicle directly inside the station have a number of operational advantages. The use of contact methods for energy and information transfer requires high accuracy of underwater vehicle positioning and complication of its sensor system, as well as application of special methods for protection of contact pairs from environmental impacts. These disadvantages are deprived by wireless solutions, which are actively introduced at present.

Keywords: autonomous underwater vehicle, AUV docking, AUV docking, resident systems, bottom mooring device, AUV charging methods, wireless power transfer, docking station design

REFERENCES

1. Furuholmen M., Hanssen A., Carter R., Hatlen K., Siesjo J. Resident autonomous underwater vehicle systems – a review of drivers, applications, and integration options for the subsea oil and gas market. *Offshore Mediterranean Conference and Exhibition*, Ravenna, Italy, 2013.

2. Krestovnikov K.D., Erashov A.A. Issledovanie effektivnosti besprovodnoi sistemy peredachi energii pri ekspluatatsii v vode i rastvorakh [Study of efficiency of wireless power transmission system when operating in water and solutions]. *Datchiki i sistemy = Sensors and Systems*, 2022, no. 2 (261), pp. 19–27. DOI: 10.25728/datsys.2022.2.3.

3. Krestovnikov K., Cherskikh E., Smirnov P. Wireless power transmission system based on coreless coils for resource reallocation within robot group. *International Conference on Interactive Collaborative Robotics*. Cham, Springer, 2019, pp. 193–203. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_19.

* *Received 11 November 2022.*

The reported study was funded by the grant MK-3094.2022.1.6 from the President of the Russian Federation.

4. Krestovnikov K., Cherskikh E., Saveliev A. Structure and circuit solution of a bidirectional wireless power transmission system in applied robotics. *Radioengineering*, 2021, vol. 30 (1), pp. 142–149. DOI: 10.13164/re.2021.0142.

5. Maevskiy A.M., Gaykovich B.A. [Development of a lightweight interventional autonomous unmanned underwater vehicle for use in underwater resident systems]. *Perspektivnye sistemy i zadachi upravleniya* [Perspective systems and control tasks]. Materials of XIV All-Russian Scientific and Practical Conference and X Youth School-Seminar "Management and Processing of Information in Technical Systems", Rostov-on-Don, 2019, p. 91. (In Russian).

6. Gaikovich B.A., Zanin V.Yu., Taradonov V.S., Blinkov A.P., Kozhemyakin I.V., Tokarev M.Yu., Biryukov E.A. Kontseptsiya robotizirovannoi podvodnoi seismorazvedki v podlednykh akvatoriyakh [Concept of robotic underwater seismic survey in submarine areas]. *Sbornik rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitie i osvoenie Arktiki i kontinental'nogo shel'fa 2018 goda* [Collection of works by laureates of the International contest of scientific, scientific-technical and innovative developments aimed at the development and exploitation of the Arctic and the continental shelf, 2018]. Moscow, 2018, pp. 64–87.

7. Doronin V.D., Krylov E.V., Dikarev N.F., Lafer R.I., Lavkovskij S.A., Fedjaev V.A., Kozlov Yu.G., Zhuchkov A.I., Shitov Yu.N., Agishev E.R., Golubev V.A. *Spasatel'no-rabochii podvodnyi apparat* [Rescue work submersible vehicle]. Patent RF, no. 2082646, 1997.

8. Gelli J., Meschini A., Monni N., Pagliai M., Ridolfi A., Marini L., Allotta B. Development and design of a compact autonomous underwater vehicle: Zeno AUV. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, vol. 51 (29), pp. 20–25. DOI: 10.1016/j.ifacol.2018.09.463.

9. Guo J., Zheng R., Yu X., Wei A., Yang B. Autonomous underwater vehicle docking system based on wired transmission. *2018 WRC Symposium on Advanced Robotics and Automation (WRC SARA)*. IEEE, 2018, pp. 1–6. DOI: 10.1109/WRC-SARA.2018.8584153.

10. Johansson B., Siesjö J., Furuholmen M. Seaeye Sabertooth a hybrid AUV/ROV offshore system. *OCEANS 2010 MTS/IEEE Seattle*. IEEE, 2010, pp. 1–3. DOI: 10.1109/OCEANS.2010.5663842.

11. Johansson B., Siesjö J., Furuholmen M. Seaeye Sabertooth, a hybrid AUV/ROV offshore system. *SPE Offshore Europe Oil and Gas Conference and Exhibition*, Aberdeen, UK, 2011. DOI: 10.2118/146121-MS.

12. Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. *Podvodnye robototekhnicheskie kompleksy: sistemy, tekhnologii, primenenie* [Underwater robotic: systems, technologies, applications]. Vladivostok, Institute of Marine Technology Problems of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2018. 368 p.

13. Lin R., Li D.-J., Zhang T., Lin M. A non-contact docking system for charging and recovering autonomous underwater vehicle. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, vol. 24 (3), pp. 902–916.

14. Park J.Y., Jun B.H., Lee P.M., Oh J. Experiments on vision guided docking of an autonomous underwater vehicle using one camera. *Ocean Engineering*, 2009, vol. 36 (1), pp. 48–61.

15. Bellingham J.G. Autonomous underwater vehicle docking. *Springer Handbook of Ocean Engineering*, Cham, Springer, 2016, pp. 387–406.

16. Tolstoi I.M., Zakharov K.S., Kan I.A. [Localization and navigation of a multi-agent robotics system based on ARUCO markers]. *Pyatyi Vserossiiskii nauchno-prakticheskii seminar «Bespilotnye transportnye sredstva s elementami iskusstvennogo in-tellekta» (BTS-II-2019)* [Fifth All-Russian Scientific and Practical Seminar "Unmanned Vehicles with Artificial Intelligence"], St. Petersburg, 2019, pp. 39–47. (In Russian).

17. Erashov A., Kamynin K., Krestovnikov K., Saveliev A. Metod otsenki vremeni besprovodnoi peredachi energeticheskikh resursov mezhdu dvumya robotami [Method for estimating time of wireless transfer of energy resources between two robots]. *Informatika i avto-matizatsiya = Informatics and Automation*, 2021, vol. 20 (6), pp. 1279–1306. DOI: 10.15622/ia.20.6.4.

18. Čejka J., Bruno F., Skarlatos D., Liarokapis F. Detecting square markers in underwater environments. *Remote Sensing*, 2019, vol. 11 (4), p. 459. DOI: 10.3390/rs11040459.

19. Santos Cesar D.B. dos, Gaudig C., Fritsche M., Reis M.A. dos, Kirchner F. An evaluation of artificial fiducial markers in underwater environments. *OCEANS 2015 – Genova*. IEEE, 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271491.

20. Trslić P., Weir A., Riordan J., Omerdic E., Toal D., Dooly G. Vision-based localization system suited to resident underwater vehicles. *Sensors*, 2020, vol. 20 (2), p. 529.

21. Jabari R., Cheng T. Autonomous evolution robotic systems for underwater surveillance and inspection. *Offshore Technology Conference (OTC-2020)*, Houston, TX, USA, 2020, vol. 1, pp. 464–474.

22. Wang T., Zhao Q., Yang C. Visual navigation and docking for a planar type AUV docking and charging system. *Ocean Engineering*, 2021, vol. 224, p. 108744. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2021.108744.

23. Yang C., Wang T., Chen Y. Design and analysis of an omnidirectional and positioning tolerant AUV charging platform. *IET Power Electronics*, 2019, vol. 12 (8), pp. 2108–2117. DOI: 10.1049/iet-pel.2018.5663.

24. Ogihara M., Ebihara T., Mizutani K., Wakatsuki N. Wireless power and data transfer system for station-based autonomous underwater vehicles. *OCEANS 2015-MTS/IEEE Washington*. IEEE, 2015, pp. 1–5. DOI: 10.23919/OCEANS.2015.7404400.

25. Yoshida S., Tanomura M., Hama Y., Hirose T., Suzuki A., Matsui Y., Sogo N., Sato R. Underwater wireless power transfer for non-fixed unmanned underwater vehicle in the ocean. *2016 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*. IEEE, 2016, pp. 177–180. DOI: 10.1109/auv.2016.7778668.

26. Cai C., Zhang Y., Wu S., Liu J., Zhang Z., Jiang L. A circumferential coupled dipole-coil magnetic coupler for autonomous underwater vehicles wireless charging applications. *IEEE Access*, 2020, vol. 8, pp. 65432–65442. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2984530.

27. Shi J., Li D., Yang C. Design and analysis of an underwater inductive coupling power transfer system for autonomous underwater vehicle docking applications. *Journal of Zhejiang University Science C*, 2014, vol. 15 (1), pp. 51–62. DOI: 10.1631/jzus.C1300171.

28. Yang C., Lin M., Li D. Improving steady and starting characteristics of wireless charging for an AUV docking system. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 2018, vol. 45 (2), pp. 430–441. DOI: 10.1109/JOE.2018.2872449.

29. Krestovnikov K., Erashov A. Research of performance characteristics of WPT system associated with mutual arrangement of coils. *Electromechanics and Robotics*. Singapore, Springer, 2022, pp. 359–369. DOI: 10.1007/978-981-16-2814-6_31.

Для цитирования:

Савельев А.И., Крестовников К.Д., Ерашов А.А. Анализ подходов к функционированию автономного необитаемого аппарата и надводного судна при проведении совместных миссий // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 4 (88). – С. 49–62. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-49-62.

For citation:

Saveliev A.I., Krestovnikov K.D., Erashov A.A. Analiz podkhodov k funktsionirovaniyu avtonomnogo neobitaemogo apparata i nadvodnogo sudna pri provedenii sovmestnykh missii [Analysis of approaches to functioning of an autonomous unmanned vehicle and a surface ship in joint missions]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 4 (88), pp. 49–62. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-49-62.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 88, № 4, 2022, с. 63–74

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 88, No. 4, 2022, pp. 63–74

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.876.5 DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-63-74

Анализ численных методов интегрирования жестких систем высокой размерности в SimInTech*

Ю.В. ШОРНИКОВ[a], К.А. ТИМОФЕЕВ[b]

630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *shornikov@corp.nstu.ru* [b] *k.timofeev@corp.nstu.ru*

При численном моделировании различных динамических систем часто возникает вопрос эффективности того или иного численного метода интегрирования применительно к определенному классу задач.

Важным классом задач Коши являются жесткие задачи высокой размерности. Одним из примеров такой задачи является модель проникновения помеченных радиоактивной меткой антител в пораженную опухолью ткань живого организма.

Методом прямых исходная начально-краевая задача для системы дифференциальных уравнений в частных производных аппроксимируется задачей Коши. Приведена компьютерная модель, выполненная в программном комплексе SimInTech. Проведен сравнительный анализ эффективности явных адаптивных методов и диагонально-неявных методов при различных размерах шага сетки по пространственной переменной.

Показано, что наиболее эффективными при решении задач рассмотренного класса являются диагонально-неявные методы интегрирования типа Рунге-Кутты – DIRK2 и DIRK4 из пакета SimInTech. Метод DIRK3 уступает в связи с большим количеством вычислений матрицы Якоби. Предпочтительным в данном случаем скорее является метод DIRK2, так как он имеет при практически той же производительности большее количество шагов по времени и не так сильно увеличивает шаг интегрирования при сравнительно низких настройках точности метода интегрирования. Из явных методов типа Рунге-Кутты с адаптивной численной схемой наиболее эффективным для решения задач подобного класса является метод «Адаптивный-5». Для задач подобного класса можно рекомендовать использование явных методов интегрирования «Адаптивный-5», «Адаптивный-1» при небольшой размерности системы.

Традиционные неявные методы интегрирования Гира и Эйлера также эффективно решают данную задачу при условии эффективной реализации алгоритма вычисления матрицы Якоби.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения, диффузия, радиоактивные метки, жесткие динамические системы, программная модель, численные методы, неявные методы интегрирования, диагонально-неявные методы интегрирования Рунге-Кутты, моделирование

---

* *Статья получена 04 октября 2022 года.*

ВВЕДЕНИЕ

При моделировании сложных динамических процессов возникает необходимость численного решения задачи Коши для систем обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ). Эффективность применяемых численных методов зависит от степени жесткости и размерности задачи [1–3]. В статье проводится сравнительный анализ явных адаптивных и диагонально-неявных методов интегрирования, реализованных в отечественной инструментальной среде моделирования SimInTech [4, 6, 12], которая предназначена для моделирования сложных динамических процессов. Программные модели в SimInTech специфицируются графическим языком структурных схем и символьным представлением в виде алгебро-дифференциальных уравнений средствами встроенного языка программирования PL. Библиотека численных методов в системе моделирования SimInTech состоит из традиционных и оригинальных численных схем интегрирования ОДУ.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим задачу проникновения помеченных радиоактивной меткой антител в пораженную опухолью ткань живого организма, сформулированную лабораторией Akzo Nobel Central Research [5, 11]. Исследование проводилось в диагностических и терапевтических целях. Процесс моделируется системой одномерных уравнений реакции-диффузии

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -kuv, \quad \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - kuv, \tag{1}$$

где k – постоянная скорости реакции; u, v – концентрации помеченных радиоактивной меткой антител и пораженной опухолью ткани соответственно.

Заданы начальные и граничные условия:

$$u(x,\ 0) = 0, \qquad v(x,\ 0) = v_0, \qquad x > 0;$$

$$u(0,\ t) = \phi(t), \qquad 0 < t < t_k\ .$$

После замены пространственной переменной x на $\zeta = \dfrac{x}{x+c}$, $c > 0$, аппроксимации частных производных первого и второго порядков по новой пространственной переменной соответственно имеют вид:

$$\frac{\partial u_j}{\partial \zeta} = \frac{u_{j+1} - u_{j-1}}{2\Delta\zeta},$$

$$\frac{\partial^2 u_j}{\partial \zeta^2} = \frac{u_{j-1} - 2u_j + u_{j+1}}{(\Delta\zeta)^2}, \qquad 1 \le j \le N.$$

Значения u_0 и u_{N+1} получаются из граничных условий:

$$u_0 = \phi(t), \qquad u_{N+1} = u_N .$$

Полагая $y = (u_1, \nu_1, \ldots, u_N, \nu_N)^T$ и время окончания моделирования $t_k = 20,$ запишем задачу (1) в виде задачи Коши для обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\frac{dy}{dt} = f(t, y), \tag{2}$$

$$y(0) = g, \qquad y \in \mathbb{R}^{2N}, \qquad 0 \le t \le 20,$$

где N – изменяемый параметр, а компоненты функции $f(t, y)$ определяются выражениями

$$f_{2j-1} = \alpha_j \frac{y_{2j+1} - y_{2j-3}}{2\Delta\zeta} + \beta_j \frac{y_{2j-3} - 2y_{2j-1} + y_{2j+1}}{(\Delta\zeta)^2} - k y_{2j-1} y_{2j},$$
$$f_{2j} = -k y_{2j} y_{2j-1}, \tag{3}$$

где

$$\alpha_j = 2(j\Delta\zeta - 1)^3 / c^2, \qquad \beta_j = (j\Delta\zeta - 1)^4 / c^2, \qquad 1 \le j \le N, \qquad \Delta\zeta = \frac{1}{N},$$

$$y_{-1}(t) = \phi(t), \qquad y_{2N+1} = y_{2N-1}, \qquad g \in \mathbb{R}^{2N}, \qquad g = (0,\ v_0,\ 0,\ v_0, \ldots,\ 0,\ v_0)^T.$$

Функция $\phi(t)$ является кусочно-непрерывной и имеет вид

$$\phi(t) = \begin{cases} 2, & t \in [0,5], \\ 0, & t \in 5,20. \end{cases}$$

Подходящими значениями параметров являются $k = 100,$ $v_0 = 1$ и $c = 4.$

2. КОМПЬЮТЕРНАЯ МОДЕЛЬ

Структурная схема компьютерной модели (2) – (3) в SimInTech приведена на рис. 1. Параметр phi соответствует функции $\phi(t),$ формируется блоком ступенчатого воздействия (0) и подается на вход модели (2) на встроенном языке программирования, в котором система уравнений описана в текстовом виде. Остальные блоки на схеме предназначены для выборки и вывода на график результатов моделирования.

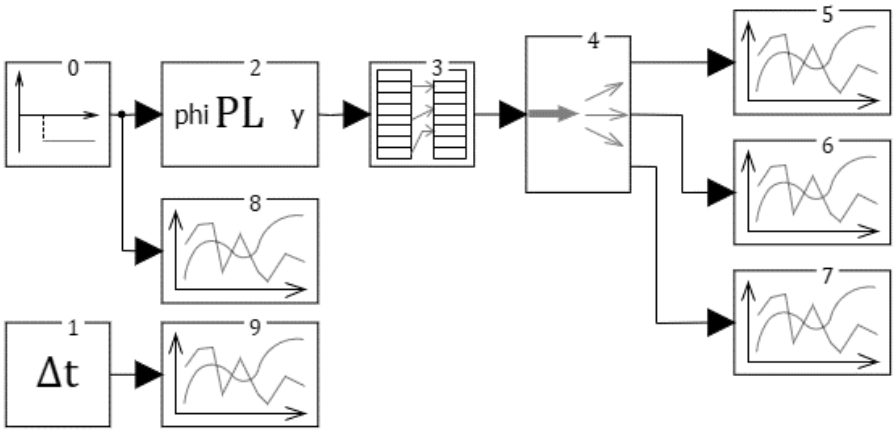


Рис. 1. Компьютерная модель в SimInTech

*Fig. 1. A c*omputer model in SimInTech

На рис. 2 приведено текстовое описание системы уравнений в блоке PL (язык программирования) компьютерной модели SimInTech.

```
input phi;

const N = 200, K = 100, C2 = 16, V0 = 1, U0 = 0;

init y[2*N];

output y;

var alpha = N#0, beta = N#0, i;

initialization
  for (i=1, N) begin
    y[2*i-1]    = U0;
    y[2*i]      = V0;
    alpha[i]    = 2*((i/N-1)^3)/C2;
    beta[i]     = 2*((i/N-1)^4)/C2;
  end;
end;

if getderi then begin

  y'[1]    = alpha[1]*(y[3] - phi)*N/2 + beta[1]*(phi - 2*y[1] + y[3])*N*N - k*y[1]*y[2];
  y'[2]    = -k*y[2]*y[1];

  for (i=2, N-1) begin
    y'[2*i - 1] = alpha[i]*(y[2*i+1] - y[2*i -3])*N/2 + beta[i]*(y[2*i - 3] - 2*y[2*i - 1] +
                  y[2*i + 1])*N*N - k*y[2*i - 1]*y[2*i];
    y'[2*i]     = -k*y[2*i]*y[2*i - 1];
  end;

  y'[2*N-1] = -k*y[2*N]*y[2*N-1];
  y'[2*N]   = -k*y[2*N-1]*y[2*N];

end;
```

Рис. 2. Текстовое описание системы уравнений в PL

Fig. 2. Text description of the system of equations in PL

3. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

В настройках параметров расчета задана относительная точность решения $\varepsilon = 10^{-3}$, начальный шаг интегрирования $h_0 = 10^{-9}$. Допустимый диапазон шага интегрирования задан от $h_{\min} = 10^{-20}$ до $h_{\max} = 1$ с. Конечное время моделирования равно 20 с.

Для сравнительного анализа будем применять явные методы интегрирования типа Рунге-Кутты с адаптивным выбором численной схемы и переменным шагом «Адаптивный-1» – «Адаптивный-5» [7], а также диагонально-неявные методы типа Рунге-Кутты [10, 13–15] с переменным шагом DIRK2, DIRK3, DIRK4 [4, 8, 9], реализованные в программном комплексе SimInTech [6].

На рис. 3–6 приведены компоненты решений y_{79}, y_{172} и y_{199}, а также компонента $\varphi(t)$.

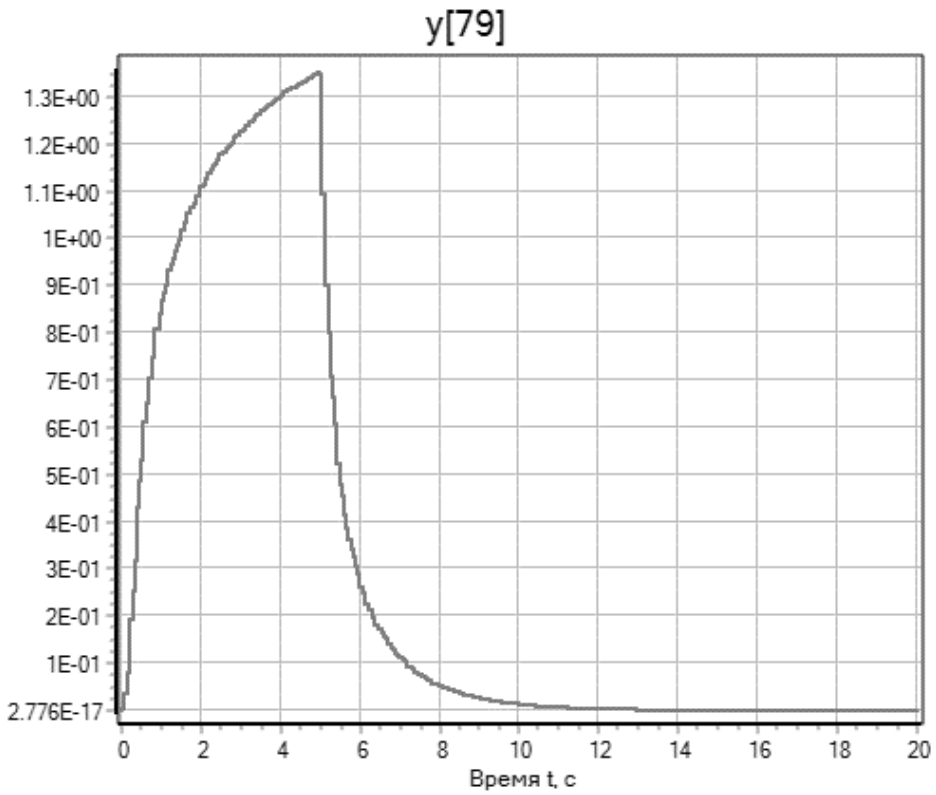


Рис. 3. Компонент решения y_{79}

Fig. 3. Solution component y_{79}

На рис. 7 показана зависимость времени расчета задачи от ее размерности для рассмотренных методов интегрирования.

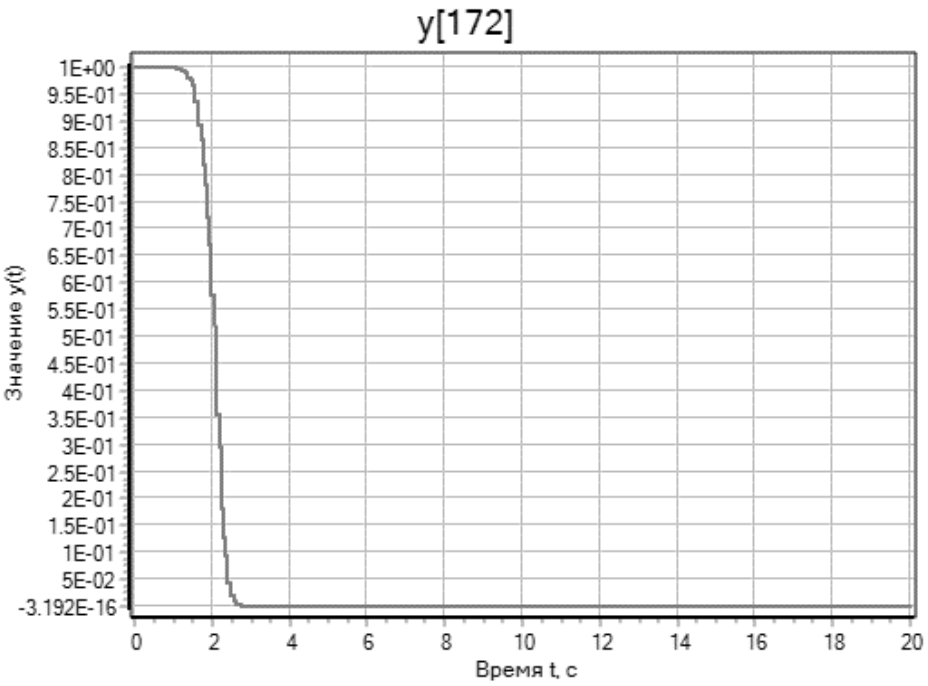


Рис. 4. Компонент решения y_{172}

Fig. 4. Solution component y_{172}

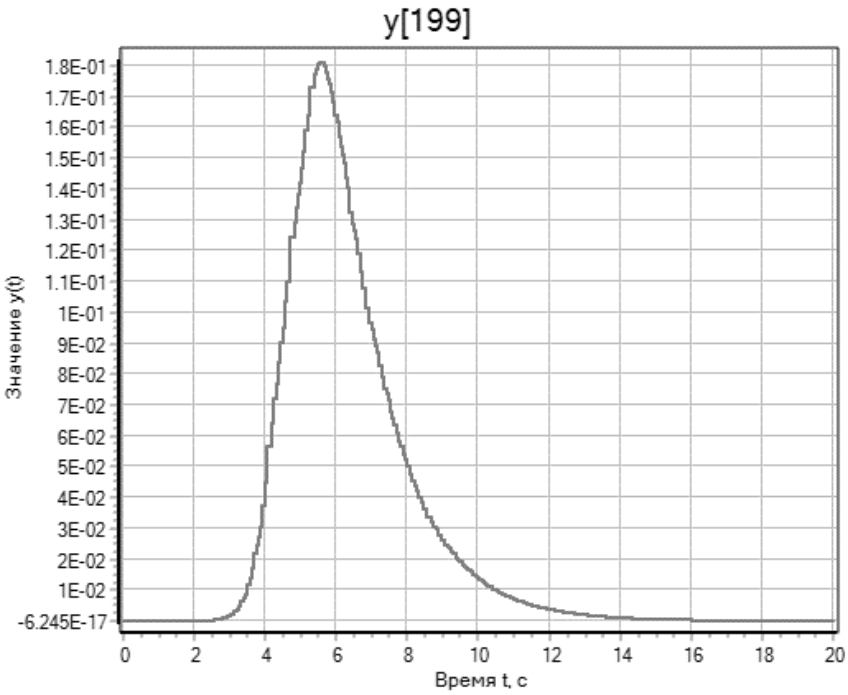


Рис. 5. Компоненты решения y_{199}

Fig. 5. Solution components y_{199}

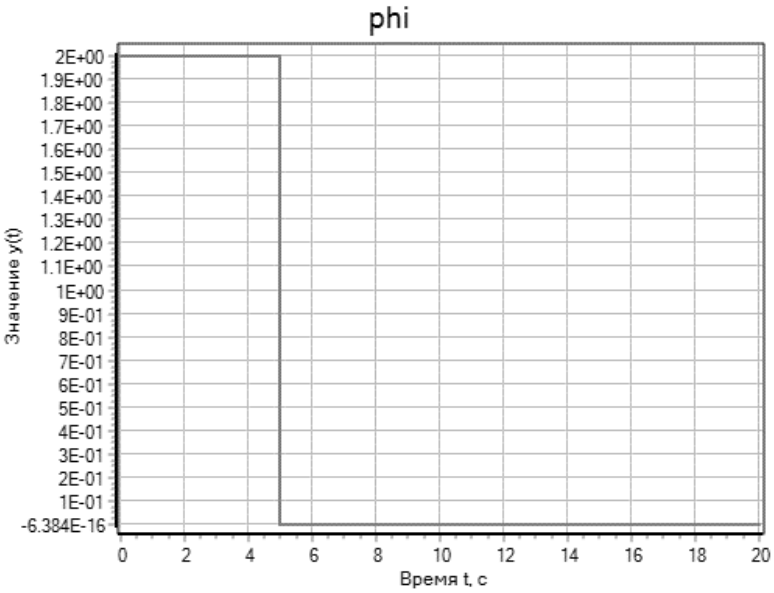


Рис. 6. Функция $\varphi(t)$

Fig. 6. Function $\varphi(t)$

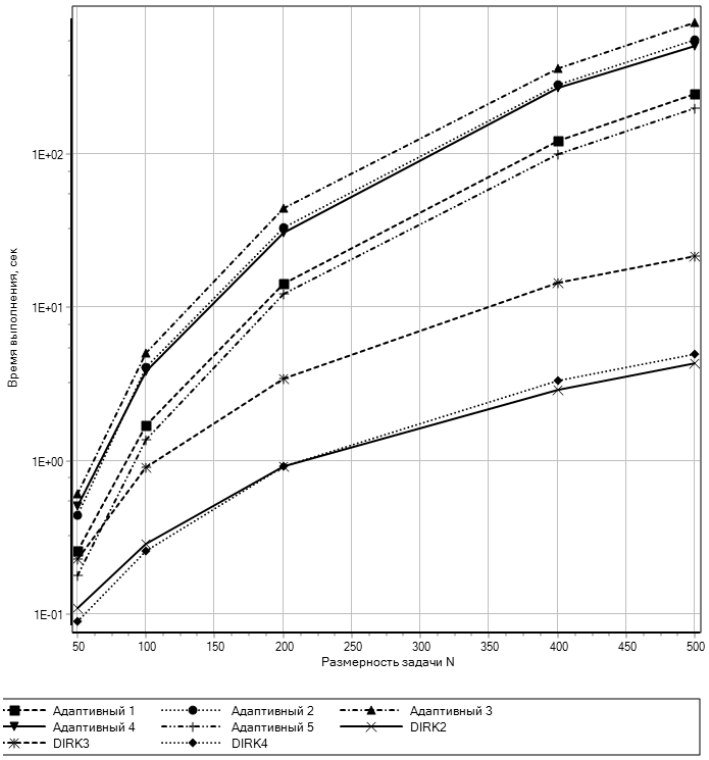


Рис. 7. Зависимость времени расчета задачи от ее размерности

Fig. 7. Dependence of the calculation time of the problem on its dimension

В таблице приведены численные характеристики методов при различных размерностях задачи, N_h – количество хороших шагов, N_{bad} – количество ошибочных шагов N_f – количество расчетов правой части ОДУ, T – физическое время расчета в секундах.

Характеристики методов интегрирования

Characteristics of integration methods

$N = 50$								
Характеристики	Адаптивный-1	Адаптивный-2	Адаптивный-3	Адаптивный-4	Адаптивный-5	DIRK2	DIRK3	DIRK4
N_h	1187	871	2126	2565	579	321	126	108
N_{bad}	387	179	27	79	106	24	11	22
N_f	4334	8223	10740	7855	3321	1064	644	822
T, с	0.26	0.44	0.61	0.51	0.18	0.11	0.23	0.09
$N = 100$								
N_h	3994	3827	9516	10664	2151	395	144	125
N_{bad}	1740	1187	11	468	588	44	17	31
N_f	15467	38934	47626	32930	13109	1347	745	973
T, с	1.71	4.05	5.06	3.81	1.37	0.29	0.91	0.26
$N = 200$								
N_h	17608	15813	41459	45254	9255	442	165	132
N_{bad}	7691	5231	18	1902	2582	59	40	32
N_f	68241	163123	207369	139568	56605	1541	879	1003
T, с	14.37	33.1	44.1	30.88	12.18	0.92	3.44	0.92
$N = 400$								
N_h	74886	66508	172980	194507	39384	467	176	144
N_{bad}	33496	22126	19	7583	11243	59	32	39
N_f	291697	686948	864978	598689	241894	1611	927	1110
T, с	122.43	281.75	360.85	269.08	99.32	2.89	14.4	3.33
$N = 500$								
N_h	118957	105962	277235	304947	62500	486	168	145
N_{bad}	53552	35261	22	11798	17938	72	22	38
N_f	464050	1094525	1386265	938439	384254	1708	859	1111
T, с	245.25	558.08	719.47	506.57	198.47	4.35	21.59	4.98

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наиболее эффективными при решении задач рассмотренного класса являются диагонально-неявные методы интегрирования типа Рунге-Кутты –DIRK2 и DIRK4. Метод DIRK3 уступает в связи с большим количеством вычислений матрицы Якоби. Предпочтительным в данном случаем скорее является метод DIRK2, так как он имеет при практически той же производительности большее количество шагов по времени и не так сильно увеличивает шаг интегрирования при сравнительно низких настройках точности метода интегрирования.

Из явных методов типа Рунге-Кутты с адаптивной численной схемой наиболее эффективным для решения задач подобного класса является метод «Адаптивный-5». Для задач подобного класса можно рекомендовать использование явных методов интегрирования «Адаптивный-5», «Адаптивный-1» при небольшой размерности системы.

Полностью традиционные неявные методы интегрирования Гира и Эйлера также эффективно решают данную задачу; время расчета неявным методом Эйлера, реализованным в SimInTech, составляет 11 с против 4.98 с у DIRK4 на размерности $N = 500$. Таким образом, можно сделать вывод, что использование неявных методов интегрирования оправдано при условии использования алгоритмов решения СЛАУ с разреженными матрицами и эффективной реализации вычисления матрицы Якоби (в частности, выполнения LU-разложений не на каждом шаге интегрирования).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Колесов Ю.Б., Сениченков Ю.Б.* Моделирование систем. Динамические и гибридные системы. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 224 с.

2. *Хайрер Э., Ваннер Г.* Решение обыкновенных дифференциальных уравнений: жесткие и дифференциально-алгебраические задачи. – М.: Мир, 1999. – 685 с.

3. *Cellier F.E., Kofman E.* Continuous system simulation. – Springer US, 2006. – 644 p.

4. *Скворцов Л.М.* Численное решение обыкновенных дифференциальных и дифференциально-алгебраических уравнений. – М.: ДМК Пресс, 2018. – 230 с. – ISBN 978-5-97060-636-0.

5. *Mazzia F., Iavernaro F.* Test set for initial value problem solvers. Report 40/2003 / Department of Mathematics, University of Bari. – Bari, Italy, 2003.

6. Среда динамического моделирования технических систем SimInTech: практикум по моделированию систем автоматического регулирования / Б.А. Карташов, Е.А. Шабаев, О.С. Козлов, А.М. Щекатуров. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 424 с. – ISBN 978-5-97060-482-3.

7. *Скворцов Л.М.* Явные адаптивные методы численного решения жестких систем // Математическое моделирование. – 2000. – Т. 12, № 12. – С. 97–107.

8. *Скворцов Л.М.* Диагонально неявные FSAL-методы Рунге–Кутты для жестких и дифференциально-алгебраических систем // Математическое моделирование. – 2002. – Т. 14, № 2. – С. 3–17.

9. *Скворцов Л.М.* Неявный метод пятого порядка для численного решения дифференциально-алгебраических уравнений // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2015. – Т. 55, № 6. – С. 978–984.

10. *Alexander R.* Diagonally implicit Runge–Kutta methods for stiff O.D.E.'s // SIAM Journal on Numerical Analysis. – 1977. – Vol. l4, N 6. – P. l006–1021.

11. *Lioen W.M., Swart J.J.B de.* Test set for initial value problem solvers. Report MAS-R9832 / Centrum Wiskunde & Informatica (CWI). – Amsterdam, December 1998.

12. Программный комплекс для исследования динамики и проектирования технических систем / О.С. Козлов, Д.Е. Кондаков, Л.М. Скворцов, К.А. Тимофеев, В.В. Ходаковский // Информационные технологии. – 2005. – № 9. – С. 20–25.

13. *Kværnø A.* Singly diagonally implicit Runge–Kutta methods with an explicit first stage // BIT Numerical Mathematics. – 2004. – Vol. 44, N 3. – P. 489–502.

14. *Hosea M.E., Shampine L.F.* Analysis and implementation of TR BDF2 // Applied Numerical Mathematics. – 1996. – Vol. 20, N 1–3. – P. 21–37.

15. *Левыкин А.И., Новиков А.Е., Новиков Е.А.* (m, k)-схемы решения дифференциально-алгебраических и жестких систем // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2020. – Т. 23, № 1. – С. 39–51.

Шорников Юрий Владимирович, доктор технических наук, профессор кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета, старший научный сотрудник Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук (ИАиЭ СО РАН). Основное направление научных исследований – математическое моделирование, исследования гибридных динамических систем. Имеет более 200 печатных работ. E-mail: shornikov@corp.nstu.ru

Тимофеев Константин Александрович, аспирант кафедры автоматизированных систем управления Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование, исследования динамических систем. Имеет более 10 печатных работ. E-mail: k.timofeev@corp.nstu.ru

Shornikov Yury V., Doctor of Technical Sciences, Professor at the department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University, senior researcher in the Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. The main direction of his scientific research is mathematical modeling and research of hybrid dynamic systems. He has over 200 publications. E-mail: shornikov@corp.nstu.ru

Timofeev Konstantin A., *a* postgraduate at the department of automated control systems, Novosibirsk State Technical University. The main direction of his scientific research is mathematical modeling and studies of dynamic systems. He has more than 10 publications. E-mail: k.timofeev@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-63-74

Analysis of numerical methods for integrating high-dimensional stiff systems in SimInTech[*]

Yu.V, Shornikov[a], *K.A. Timofeev*[b]

630073, Novosibirsk, 20 K. Marx Prospekt, Department of Automated Control Systems, Novosibirsk State Technical University

[a] *shornikov@corp.nstu.ru* [b] *k.timofeev@corp.nstu.ru*

Abstract

When modeling complex dynamic processes, it becomes necessary to numerically solve the Cauchy problem for systems of ordinary differential equations (ODEs). The efficiency of the applied numerical methods depends on the degree of stiffness and dimension of the problem [1–3]. Depending on the task class, different methods behave differently.

[*] *Received 04 October 2022.*

This article provides a comparative analysis of explicit adaptive and diagonal-implicit integration methods implemented in the SimInTech software [4]. The SimInTech software package is designed to simulate complex dynamic processes in systems of various classes. The system supports the ability to develop models in the form of block diagrams, as well as describe systems of differential equations using the built-in programming language and simulate event-driven systems and finite automata.

It is shown that the most effective in solving problems of the considered class are the diagonal-implicit Runge-Kutta type integration methods – DIRK2 and DIRK4 from the SimInTech package. The DIRK3 method is inferior due to the large number of calculations of the Jacobian matrix. The preferred method is rather The DIRK2 method is preferable in this case, because it has a greater number of time steps with almost the same performance and does not increase the integration step so much with relatively low accuracy settings of the integration method. Of the explicit methods of the Runge-Kutta type with an adaptive numerical scheme, the “Adaptive-5” method is the most effective for solving problems of this class. For problems of this class, we can recommend the use of explicit integration methods “Adaptive-5”, “Adaptive-1” with a small system dimension.

The traditional implicit Gear and Euler integration methods also effectively solve this problem, provided that the algorithm for calculating the Jacobian matrix is effectively implemented.

Keywords: differential equations, diffusion, radioactive labels, stiff dynamic systems, software model, numerical methods, implicit integration methods, diagonal-implicit Runge-Kutta integration methods, simulation

REFERENCES

1. Kolesov Yu.B., Senichenkov Yu.B. *Modelirovanie sistem. Dinamicheskie i gibridnye sistemy* [Modeling systems. Dynamic and hybrid systems]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2012. 224 p.

2. Hairer E., Wanner G. *Solving ordinary differential equations II. Stiff and differential-algebraic problems*. Berlin, Springer-Verlag, 1996 (Russ. ed.: Khairer E., Vanner G. *Reshenie obyknovennykh differentsial'nykh uravnenii: zhestkie i dif-ferentsial'no-algebraicheskie zadachi*. Moscow, Mir Publ., 1999. 685 p.).

3. Cellier F.E., Kofman E. *Continuous system simulation*. Springer US, 2006. 644 p.

4. Skvortsov L.M. *Chislennoe reshenie obyknovennykh differentsial'nykh i differentsial'no-algebraicheskikh uravnenii* [Numerical solution of ordinary differential and differential-algebraic equations]. Moscow, DMK-Press, 2018. 230 p. ISBN 978-5-97060-636-0.

5. Mazzia F., Iavernaro F. *Test set for initial value problem solvers*. Report 40/2003. Department of Mathematics, University of Bari, Italy, 2003.

6. Kartashov B.A., Shabaev E.A., Kozlov O.S., Shchekaturov A.M. *Sreda dinamicheskogo modelirovaniya tekhnicheskikh sistem SimInTech: praktikum po mo-delirovaniyu sistem avtomaticheskogo regulirovaniya* [The environment for dynamic modeling of technical systems SimInTech: a workshop on modeling automatic control systems]. Moscow, DMK Press, 2017. 424 p. ISBN 978-5-97060-482-3.

7. Skvortsov L.M. Yavnye adaptivnye metody chislennogo resheniya zhestkikh sistem [Explicit adaptive methods for the numerical solution of stiff systems]. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Modeling*, 2000, vol. 12, no. 12, pp. 97–107. (In Russian).

8. Skvortsov L.M. Diagonal'no neyavnye FSAL-metody Runge–Kutty dlya zhestkikh i differentsial'no-algebraicheskikh sistem [Diagonally implicit Runge–Kutta FSAL methods for stiff and differential-algebraic systems]. *Matematicheskoe modelirovanie = Mathematical Modeling*, 2002, vol. 14, no. 2, pp. 3–17. (In Russian).

9. Skvortsov L.M. Neyavnyi metod pyatogo poryadka dlya chislennogo resheniya differentsial'no-algebraicheskikh uravnenii [An implicit fifth-order method for the numerical solution of differential-algebraic equations]. *Zhurnal vychislitel'noi matematiki i matematicheskoi fiziki = Journal of Computational Mathematics and Mathematical Physics*, 2015, vol. 55, no. 6, pp. 978–984. (In Russian).

10. Alexander R. Diagonally implicit Runge–Kutta methods for stiff O.D.E.'s. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 1977, vol. l4, no. 6, pp. l006–1021.

11. Lioen W.M., Swart J.J.B de. *Test set for initial value problem solvers*. Report MAS-R9832. Amsterdam, Centrum Wiskunde & Informatica (CWI), December 1998.

12. Kozlov O.S., Kondakov D.E., Skvortsov L.M., Timofeev K.A., Hodakovsky V.V. Programmnyi kompleks dlya issledovaniya dinamiki i proektirovaniya tekhnicheskikh sistem [Software for research dynamics and design of technical systems]. *Informatsionnye tekhnologii = Information Technologies*, 2005, no. 9, pp. 20–25.

13. Kværnø A. Singly diagonally implicit Runge–Kutta methods with an explicit first stage. *BIT Numerical Mathematics*, 2004, vol. 44, no. 3, pp. 489–502.

14. Hosea M.E., Shampine L.F. Analysis and implementation of TR BDF2. *Applied Numerical Mathematics*, 1996, vol. 20, no. 1–3, pp. 21–37.

15. Levykin A.I., Novikov A.E., Novikov E.A. (*m*, *k*)-skhemy resheniya differentsial'no-algebraicheskikh i zhestkikh sistem [Schemes of (m, k)-type for solving differential-algebraic and stiff systems]. *Sibirskii zhurnal vychislitel'noi matematiki = Numerical Analysis and Applications*, 2020, vol. 23, no.◦1, pp. 39–51. (In Russian).

Для цитирования:

Шорников Ю.В., *Тимофеев К.А.* Анализ численных методов интегрирования жестких систем высокой размерности в SimInTech // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 4 (88). – С. 63–74. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-63-74.

For citation:

Shornikov Yu.V., Timofeev K.A. Analiz chislennykh metodov integrirovaniya zhestkikh si-stem vysokoi razmernosti v SimInTech [Analysis of numerical methods for integrating high-dimensional stiff systems in SimInTech]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 4 (88), pp. 63–74. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-63-74.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 88, № 4, 2022, с. 75–88

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 88, No. 4, 2022, pp. 75–88

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ
И ИНФОРМАТИКА

COMPUTER SCIENCE
AND INFORMATION SCIENCE

УДК 004.94 DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-75-88

Исследование эффективности методов постобработки потоков при решении задач многофазной фильтрации*

А.М. ГРИФ[a], Ю.Г. СОЛОВЕЙЧИК[b]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *alexgrif@inbox.ru* [b] *soloveychik@ami.nstu.ru*

Рассматриваются методы постобработки конечноэлементных решений при моделировании многофазных течений. Для моделирования процессов фильтрации используется специальный метод, основанный на неявном расчете поля давления и явном расчете насыщенностей. Постобработка потоков выполняется с помощью двух технологий – метода балансировки и метода проецирования. Метод балансировки численных потоков смеси обеспечивает выполнение локальных законов сохранения за счет нахождения поправок к вычисленным с помощью МКЭ потокам смеси. Для близости модифицированных потоков смеси к исходным численным параметры регуляризации в методе балансировки вычисляются с помощью осредненного небаланса. В методе проецирования сбалансированные значения потоков через грани конечных элементов корректируются путем добавления постоянных поправок (константа на элементе).

Вычислительные эксперименты проведены на тестовой задаче, модели месторождения простой структуры и модели реального нефтяного месторождения Республики Татарстан. При моделировании задач с соответствующей коррекцией известных потоков смеси на гранях скважин полученные с помощью метода балансировки и метода проецирования решения имеют малое различие. Результаты исследований на задачах показали, что обе технологии обеспечивают получение консервативных решений, для которых выполняются законы сохранения. При этом применение метода балансировки численных потоков смеси обеспечивает выше точность, чем метод проецирования, когда в процессе постобработки корректируются потоки на скважинах (то есть фактически эмулируется отбор/закачка при выдерживании фиксированного давления). Метод проецирования может быть улучшен за счет использования весовых функций, предложенных для метода балансировки. Однако даже в этом случае метод балансировки позволяет получать более точные решения.

Ключевые слова: многофазная фильтрация, нефтяные месторождения, нефтедобыча, метод конечных элементов, закон сохранения массы, постобработка потоков, метод балансировки потоков, метод проецирования потоков

---

* *Статья получена 10 мая 2022 г.*

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (НИЛ «Моделирование и обработка данных наукоемких технологий», проект FSUN-2020-0012).

ВВЕДЕНИЕ

Математическое моделирование в настоящее время является важным инструментом решения задач нефтедобычи и построения цифровых моделей месторождений углеводородов [1–3].

Высокая точность узлового метода конечных элементов и его возможности по локальному повышению порядков элемента не дает большого эффекта, потому что при его использовании закон локального сохранения веществ лишь аппроксимируется [4–7]. Поэтому приходится выполнять расчеты на очень подробных сетках для аппроксимационного приближения к этому закону, что существенно ухудшает вычислительную эффективность.

При этом в последнее время ряд исследователей стали предлагать специальные методы постобработки потоков, которые гарантируют выполнение локальных законов сохранения. Например, такие методы были предложены в работах [8–10] как метод проецирования. Однако эти методы рассматривались только для переноса концентрации, а для моделирования многофазных потоков в пористых средах в этих работах не были рассмотрены.

В данной работе рассматривается специальная технология постобработки потоков, которую мы будем называть методом балансировки [11–15]. Она основывается на выполнении баланса объемов втекающей и вытекающей смеси для всех конечных элементов. При этом будет показано сравнение метода балансировки потоков с методом проецирования.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Метод балансировки численных потоков смеси обеспечивает выполнение локальных законов сохранения за счет нахождения поправок $\delta V'_{\Gamma_i}$ к вычисленным с помощью МКЭ потокам смеси V'_{Γ_i}.

Поправки $\delta V'_{\Gamma_i}$ находятся в результате минимизации следующего функционала:

$$\sum_{e=1}^{N^e} \beta_e \left(\sum_{i \in I_{\Omega_e}} \left(\tilde{\gamma}_{\Gamma_i,\Omega_e} \cdot \left| V'_{\Gamma_i} \right| + \gamma_{\Gamma_i,\Omega_e} \cdot \delta V'_{\Gamma_i} \right) \right)^2 + \sum_{i=1}^{N^f} \alpha_i \left(\delta V'_{\Gamma_i} \right)^2 \to \min_{\delta V'_{\Gamma_i}}, \qquad (1)$$

в котором N^e и N^f – число конечных элементов и граней в сетке; e – номер элемента; I_{Ω_e} – номера граней Γ_i элемента Ω_e; β_e и α_i – регуляризирующие параметры, а множители $\tilde{\gamma}_{\Gamma_i,\Omega_e}$ определяют знак потока V'_{Γ_i} относительно элемента Ω_e.

В результате дифференцирования функционала (1) по искомым параметрам и приравнивания соответствующих производных к нулю поправки $\delta V'_{\Gamma_i}$ могут быть найдены в результате решения СЛАУ

$$(\mathbf{B} + \boldsymbol{\alpha})\mathbf{q} = \mathbf{d}, \qquad (2)$$

в которой α – матрица, составленная из элементов α_i на главной диагонали; **q** – вектор, содержащий поправки $\delta V'_{\Gamma_i}$, а элементы матрицы **B** и вектора правой части **d** задаются следующими соотношениями:

$$B_{ij} = \begin{cases} \beta_e \gamma_{\Gamma_i,\Omega_e} \gamma_{\Gamma_j,\Omega_e}, \quad i,j \in I_{\Omega_e}, \quad i \neq j, \quad e = 1...N^e, \\ \sum\limits_{k \in I_{\Gamma_i}} \beta_k, \; i = j, \\ 0, \; \text{иначе}, \end{cases} \tag{3}$$

$$d_i = -\sum_{e=1}^{N^e} \left(\beta_e \gamma_{\Gamma_i,\Omega_e} \left(\sum_{j \in I_{\Omega_e}} \tilde{\gamma}_{\Gamma_j,\Omega_e} \left| V'_{\Gamma_j} \right| \right) \right).$$

Здесь I_{Γ_i} – номера содержащих грань Γ_i конечных элементов.

Дисбаланс смеси на элементах задается с помощью значений:

$$\delta_{\Omega_e} = \left| \sum_{i \in I_{\Omega_e}} \left(\tilde{\gamma}_{\Gamma_i,\Omega_e} \left| V'_{\Gamma_i} \right| + \gamma_{\Gamma_i,\Omega_e} \delta V'_{\Gamma_i} \right) \right|. \tag{4}$$

Для близости модифицированных потоков смеси к исходным численным параметры регуляризации α_i вычисляются с помощью осредненного небаланса на грани $\Gamma_i = \partial\Omega_e \cap \partial\Omega_k$ по соотношению

$$\alpha_i = \frac{\delta_{\Omega_e} + \delta_{\Omega_k}}{2\delta_{\Omega_e}\delta_{\Omega_k}}. \tag{5}$$

Известен другой метод вычисления модифицированных потоков смеси, в котором численные потоки корректируются добавлением кусочно-постоянных добавок (*метод проецирования*). Подробное описание этого метода дано в работах [8–10]. Вектор $\mathbf{y} \in \mathrm{R}^{N^e}$, содержащий кусочно-постоянные добавки, вычисляется в результате решения СЛАУ

$$\mathbf{By} = \mathbf{d}, \tag{6}$$

где элементы матрицы $\mathbf{B} \in \mathrm{R}^{N^e \times N^e}$ и вектора правой части $\mathbf{d} \in \mathrm{R}^{N^e}$ задаются с помощью соотношений

$$B_{ek} = \begin{cases} -\omega_l^{-1}\mathrm{mes}\left(\Gamma_l\right), \ e \neq k, \Gamma_l = \partial\Omega_e \bigcap \partial\Omega_k, \\ \sum\limits_{l \in I_{\Omega_e}/\Gamma^2} \omega_l^{-1}\mathrm{mes}\left(\Gamma_l\right), \ e = k, \end{cases} \tag{7}$$

$$d_e = \sum_{l \in I_{\Omega_e}} \tilde{\gamma}_{\Gamma_l,\Omega_e} \left| V'_{\Gamma_l} \right|.$$

Поправки к численным потокам смеси вычисляются с помощью соотношений

$$\delta V'_{\Gamma_i} = \omega_i^{-1}\mathrm{mes}\left(\Gamma_i\right) \sum_{e \in I_{\Gamma_i}} \gamma_{\Gamma_i,\Omega_e} y_e \,. \tag{8}$$

Веса для граней определяются путем осреднения абсолютной проницаемости

$$\omega_i = \frac{\delta_{\Omega_e} + \delta_{\Omega_k}}{2\delta_{\Omega_e}\delta_{\Omega_k}}, \tag{9}$$

где $\delta_{\Omega_p} = \boldsymbol{n}_l^{\mathrm{T}} \mathbf{K}_{\Omega_p} \boldsymbol{n}_l$.

2. ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Исследование метода балансировки численных потоков и метода проецирования проведем на модельных задачах и модели реального месторождения высоковязкой нефти Республики Татарстан. В первую очередь рассмотрим задачу переноса концентрации (однофазная фильтрация), представленную в работе [10]. В качестве расчетной области задана проницаемая зона размерностью $1\,\text{м}^2$ с включением в нее слабопроницаемого объекта. Через нижнюю и верхнюю границы задано условие отсутствия потока, а на левой и правой границе задан перепад давления в 1 Па. В начальный момент времени в области задана нулевая концентрация. Расчетная сетка содержит 1024 элемента (равномерное разбиение). Моделирование происходит с шагом $\Delta t = 0.01$ суток до 2 суток.

На рис. 1 показаны поля концентрации, представленные в статье [10] и рассчитанные как с помощью метода проецирования, так и без коррекции численных потоков.

Видно, что результаты, представленные в статье [10] и рассчитанные с помощью метода проецирования, совпадают, из чего следует корректность

реализации этого метода. При этом решение, полученное без использования технологии постобработки численных потоков (применяется математическая модель из работы [11]), уже является довольно точным, в то время как соответствующее решение, представленное в работе [10], является некорректным.

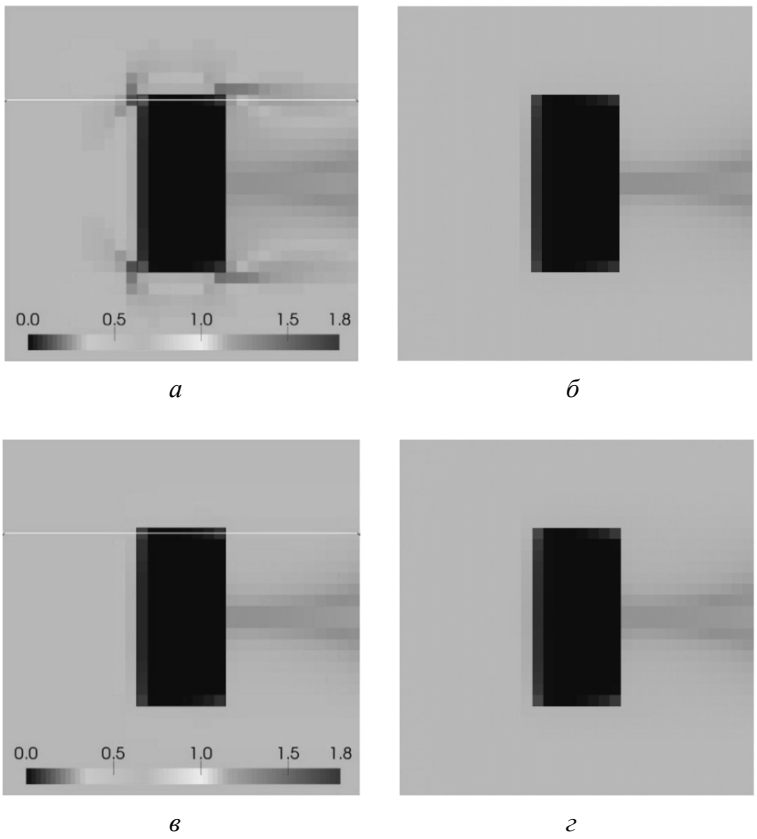


Рис. 1. Концентрации на конец расчета:

а – без постобработки [10]; *б* – без постобработки; *в* – метод проецирования [10]; *г* – метод проецирования

Fig. 1. Concentrations at the end of the calculation:

a – without post-processing [10]; *b* – no post-processing; *c* – projection method [10]; *d* – projection method

На рис. 2 приведена концентрация вдоль прямой $y = 0.735$, рассчитанная без применения постобработки потоков, с помощью метода балансировки потоков и метода проецирования, а также представленная в работе [10].

Очевидно, что полученные с помощью метода балансировки и метода проецирования решения имеют малое различие.

Рассмотрим теперь задачу, представляющую собой моделирование нефтяного месторождения простой структуры, включающее одну добывающую (№ 1) и три нагнетательные скважины (№ 2, 3, 4). Подробное описание этой модели приведено в работе [11].

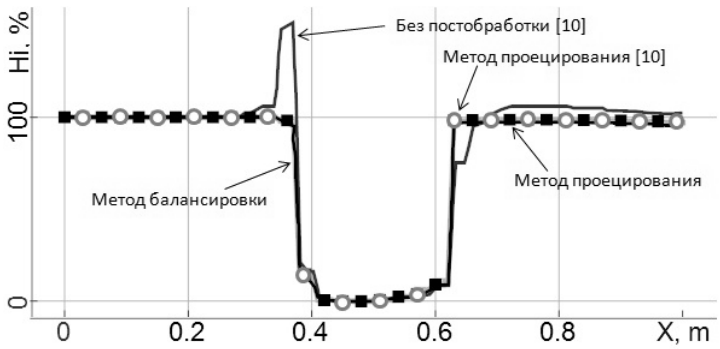


Рис. 2. Концентрации вдоль прямой

Fig. 2. Concentrations along a line

При моделировании, как и ранее, будет использоваться как метод балансировки потоков, так и метод проецирования. На рис. 3 представлено отклонение добычи нефти при расчете методом балансировки и методом проецирования.

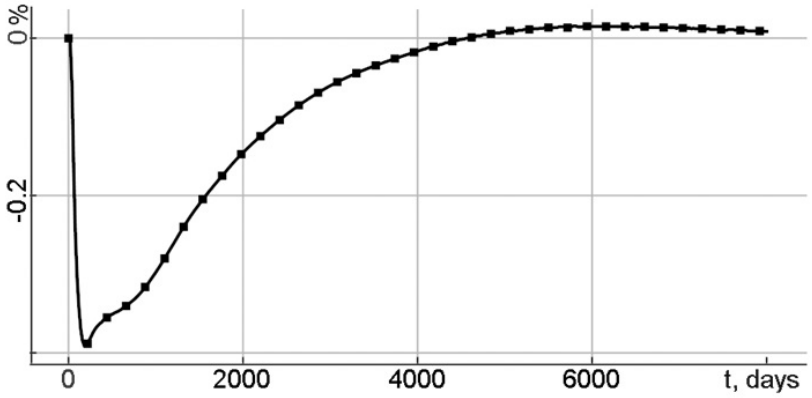


Рис. 3. Отклонение добычи нефти при расчете с использованием постобработки

Fig. 3. Deviation of oil production when calculating using post-processing

Из результатов видно малое различие решений, полученных с использованием метода балансировки потоков и метода проецирования (менее 0.4 %).

Для оценки точности метода балансировки и метода проецирования модифицируем рассмотренную ранее задачу таким образом, что в процессе постобработки будут корректироваться потоки на некоторых скважинах, а не присваиваться в соответствии с известным краевым условием. В этом случае точность метода определяется по близости скорректированных в процессе постобработки потоков на скважинах к известным, заданным в краевых условиях. В качестве таких выберем скважины № 1, 3, 4. Фактически эмулируется ситуация, когда скважины добывают/нагнетают при заданном давлении.

Рассчитанные отборы / нагнетания при использовании метода балансировки и метода проецирования представлены в табл. 1. Из данных видно, что метод балансировки позволил восстановить на скважинах довольно точные потоки; метод проецирования из работы [10] хоть и приблизил потоки к истинным, но в результате погрешность составила на два порядка больше, чем при использовании метода балансировки.

Таблица 1

Table 1

Известные и рассчитанные отборы / нагнетания, м^3/сут

Known and calculated productions / injections, m^3/day

Отбор, нагнетание / скважина	№ 1	№ 3	№ 4
Известный	40	13.3	13.3
Численный	29.74	9.46	9.46
Метод балансировки потоков	39.99	13.33	13.32
Метод проецирования [10]	36.11	11.82	11.75

Рассмотрим теперь модель нефтяного месторождения Республики Татарстан. Подробное описание модели приводится в работе [2]. Исследование вычислительной эффективности метода балансировки и метода проецирования будем проводить на пяти скважинах: № 7, 20, 24, 36, 47. Для расчетов использованы вложенные сетки H и H/2.

На рис. 4 представлены совокупные отборы нефти для анализируемых скважин при использовании метода балансировки и метода проецирования. В табл. 2 приведены соответствующие различия отборов относительно решений, рассчитанных на подробной сетке с использованием метода балансировки потоков.

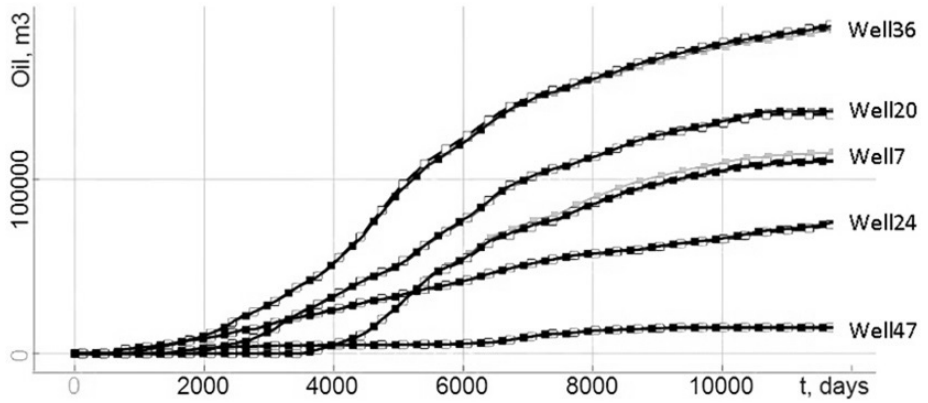


Рис. 4. Совокупная добыча нефти: балансировки на сетке H (черные маркеры), H/2 (пустые маркеры), и метод проецирования на сетке H (серые маркеры)

Fig. 4. Graphs of accumulated oil volumes obtained using the balancing method for mesh H (black markers), H/2 (empty markers), and projection method for mesh H (gray markers)

Таблица 2

Table 2

Отклонения отборов нефти при использовании методов постобработки, %

Deviations of oil recovery when using various post-processing methods, %

Метод / скважина	№ 7	№ 20	№ 24	№ 36	№ 47
Балансировка	0.62	0.7	0.59	0.69	0.56
Проецирование	1.94	0.51	0.75	0.45	0.39

Из представленных в табл. 2 значений видно хорошую согласованность решений при расчете с помощью метода балансировки и метода проецирования на сетках H относительно решения, полученного с помощью метода балансировки на сетке H/2.

Проанализируем точность обоих методов постобработки так же, как рассматривали для предыдущего примера: на некоторых скважинах месторождения (исследуемые скважины) не будем фиксировать истинный поток. При этом для метода проецирования из работы [10] будут использованы как весовые функции (9), так и весовые функции (5), предложенные для метода балансировки.

В табл. 3 представлена погрешность в рассчитанных отборах при использовании метода балансировки потоков и метода проецирования (в качестве истинных взяты практические данные нефтедобычи).

Таблица 3

Table 3

Погрешность отборов при использовании метода балансировки потоков и метода проецирования, %

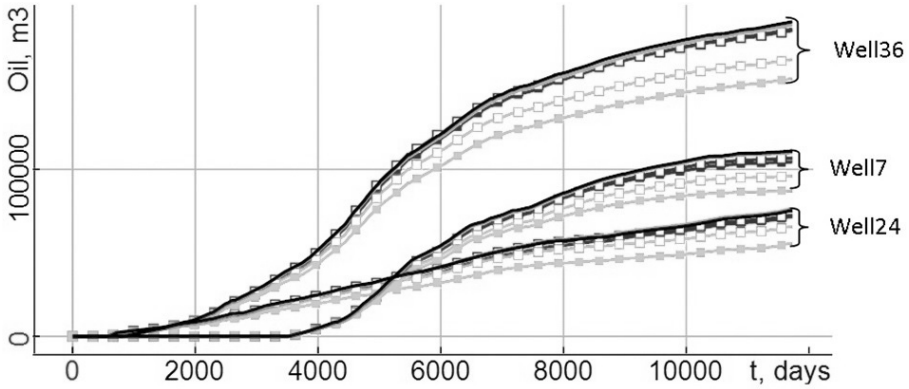
Errors when the flow balancing method and the projection method are used, %

Метод / скважина	№ 7	№ 20	№ 24	№ 36	№ 47
Численный поток, H	25.71	42.7	29.1	30.3	40.7
Численный поток, H/2	16.6	25.2	20.1	22.6	30.34
Балансировка, H	1.48	2.16	3.69	0.95	3.7
Проецирование, H, веса (9)	14.6	26.3	17.1	14.6	27.4
Проецирование, H/2, веса (9)	8.2	16.3	10.4	9.9	17.4
Проецирование, H, веса (5)	6.2	10.9	6.8	3.11	14.9
Проецирование, H/2, веса (5)	2.5	7.8	4.5	2.7	5.3

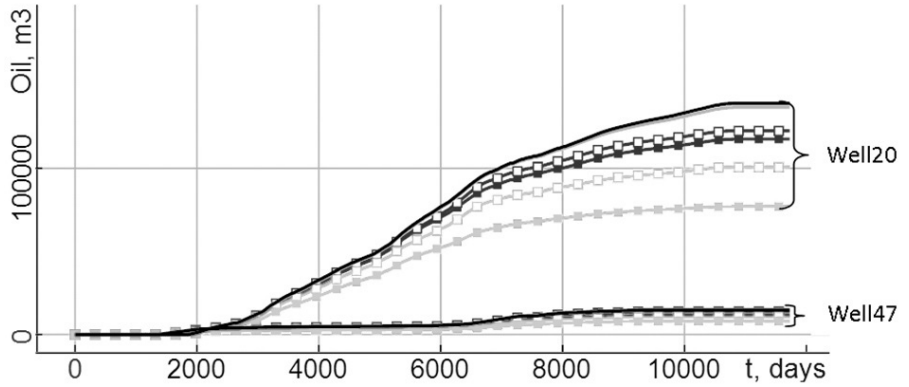
Из результатов, представленных в табл. 3, видно, что погрешность численного потока даже на подробной сетке составляет примерно 25 %; метод проецирования (предложенный в работе [10]) при расчете на подробной сетке H/2 с использованием стандартных весовых функций (9) позволяет снизить эту погрешность в два раза; метод проецирования при расчете на подроб-

ной сетке H/2 с использованием весовых функций (5), предложенных для метода балансировки в данной работе, позволяет снизить погрешность в четыре раза, в то время как метод балансировки при расчете даже на грубой сетке H позволяет снизить погрешность более чем на порядок.

На рис. 5 представлены соответствующие совокупные отборы нефти. Погрешность при использовании метода балансировки и метода проецирования приведена в табл. 4 (в качестве истинных значений взяты отборы нефти, рассчитанные на сетке H/2 с использованием метода балансировки).



а



б

Рис. 5. Совокупные отборы нефти: истинные (черным цветом), рассчитанные с помощью метода балансировки (серые без маркеров практически совпадают с истинными), рассчитанные с помощью метода проецирования для стандартных весов (9) (светло-серые с маркерами) и предложенные для метода балансировки весов (5) (темно-серые с маркерами); для сетки H маркеры закрашены, для H/2 – пустые

Fig. 5. Cumulative oil recovery: true (in black), calculated using the balancing method (gray without markers – almost the same as true) and calculated using the projection method for standard weights (9) (light gray with markers) and proposed for the weight balancing method (5) (dark gray with markers); for grid H the markers are filled, for H/2 they are empty

Таблица 4

Table 4

Погрешность отборов нефти, %

Errors of oil recovery, %

Метод / скважина	№ 7	№ 20	№ 24	№ 36	№ 47
Балансировка, H	0.74	1.23	1.52	0.87	0.82
Проецирование, H, веса (9)	13.4	29.2	21.3	14.9	40.0
Проецирование, H/2, веса (9)	6.9	15.9	9.3	9.7	25.9
Проецирование, H, веса (5)	3.3	9.1	6.5	3.1	19.9
Проецирование, H/2, веса (5)	2.5	5.8	2.2	1.8	6.7

Видно, что точность применения метода балансировки относительно метода проецирования еще более возрастает. При этом затраты вычислительного времени при расчете методом балансировке на сетке H составили порядка 0.5 часа, в то время как для получения менее точного решения с использованием метода проецирования на сетке H/2 потребовалось уже более 8.5 часа (для расчетов использовался ПК с процессором Intel Core I7 3.7ГГц).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассматриваются методы постобработки конечноэлементных решений при моделировании многофазных течений. Для моделирования процессов фильтрации используется специальный метод, основанный на неявном расчете поля давления и явном расчете насыщенностей. Постобработка потоков выполняется с помощью двух технологий – метода балансировки и метода проецирования. Оба метода обеспечивают получение консервативного решения, что очень важно при решении практических задач нефтедобычи.

Вычислительные эксперименты показали, что применение метода балансировки численных потоков смеси обеспечивает выше точность, чем метод проецирования. Для рассмотренных моделей месторождений его точность практически на два порядка выше. При этом временные затраты, необходимые на выполнение процедуры балансировки потоков, не превышают 15 % от общих затрат на моделирование.

Метод проецирования может быть улучшен за счет использования весовых функций, предложенных для метода балансировки потоков. При этом метод балансировки даже в этом случае обеспечивает точность на порядок выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aziz K., Settari A.* Petroleum reservoir simulation. – London: Applied Science Publ., 1979. – 476 p.

2. The design of high-viscosity oil reservoir model based on the inverse problem solution / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, A.M. Grif, D.S. Kiselev, I.I. Patrushev, A.V. Nasybullin, B.G. Ganiev // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2021. – Vol. 199. – P. 108245.

3. *Shirangi M.G., Durlofsky L.J.* Closed-loop field development under uncertainty by use of optimization with sample validation // SPE Journal. – 2015. – Vol. 20, N 5. – P. 908–922.

4. Interface control volume finite element method for modelling multi-phase fluid flow in highly heterogeneous and fractured reservoirs / A.S. Abushaikha, M.J. Blunt, O.R. Gosselin, C.C. Pain, M.D. Jackson // Journal of Computational Physics. – 2015. – Vol. 298. – P. 41–61.

5. *Schmid K.S., Geiger S., Sorbie K.S.* Higher order FE-FV method on unstructured grids for transport and two-phase flow with variable viscosity in heterogeneous porous media // Journal of Computational Physics. – 2013. – Vol. 241. – P. 416–444.

6. *Nick H.M., Matthäi S.K.* A hybrid finite-element finite-volume method with embedded discontinuities for solute transport in heterogeneous media // Vadose Zone Journal. – 2011. – Vol. 10, N 1. – P. 299–312.

7. Numerical simulation of water flooding in natural fractured reservoirs based on control volume finite element method / R.-h. Zhang, L.-h. Zhang, J.-x. Luo, Z.-d. Yang, M.-y. Xu // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2016. – Vol. 146. – P. 1211–1225.

8. *Sun S., Wheeler M.F.* Projections of velocity data for the compatibility with transport // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2006. – Vol. 195, N 7–8. – P. 653–673.

9. *Lee S., Lee Y.J., Wheeler M.F.* A locally conservative enriched Galerkin approximation and efficient solver for elliptic and parabolic problems // SIAM Journal on Scientific Computing. – 2016. – Vol. 38, N 3. – P. A1404–A1429.

10. Postprocessing of non-conservative flux for compatibility with transport in heterogeneous media / L.H. Odsæter, M.F. Wheeler, T. Kvamsdal, M.G. Larson // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2017. – Vol. 315. – P. 799–830.

11. A method of FE modeling multiphase compressible flow in hydrocarbon reservoirs / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, A.M. Grif, A.S. Ovchinnikova, I.I. Patrushev, D.V. Vagin, D.S. Kiselev // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Elsevier. – 2022. – Vol. 390. – P. 114468.

12. Flow balancing in FEM modelling of multi-phase flow in porous media / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, A.M. Grif, I.I. Patrushev // Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2018): труды. 14 Международной научно-технической конференции, Новосибирск, 2–6 окт. 2018 г.: в 8 т. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – Т. 1, ч. 4. – С. 205–211.

13. Ovchinnikova A.S. Computational scheme of temperature field calculation during modeling multiphase flow in porous media // Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference «Actual problems of electronic instrument engineering», Novosibirsk, 19–21 Novtmber 2021. – Novosibirsk, 2021. – P. 564–567. – DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647473.

14. *Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Гриф А.М.* Балансировка потоков на неконформных конечноэлементных сетках при моделировании многофазной фильтрации // Программная инженерия. – 2021. – Т. 12, № 9. – С. 450–458.

15. Конечноэлементное моделирование многофазных потоков с их балансировкой при фиксировании рабочего давления на скважинах в процессе нефтедобычи / А.С. Овчинникова, И.И. Патрушев, А.М. Гриф, М.Г. Персова, Ю.Г. Соловейчик // Вычислительные методы и программирование. – 2022. – Т. 23, № 1. – С. 60–74.

Гриф Александр Михайлович, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование процессов многофазной фильтрации. Является автором 20 публикаций. E-mail: alexgrif@inbox.ru

Соловейчик Юрий Григорьевич, заведующий кафедрой прикладной математики факультета прикладной математики и информатики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – моделирование с использованием метода конечных элементов и решение обратных задач математической физики. Является автором более 170 научных и учебно-методических публикаций. E-mail: soloveychik@ami.nstu.ru

Grif Alexander M., a post-graduate student, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on mathematical modeling of multiphase filtration processes in porous media. He is the author of 20 scientific papers. E-mail: alexgrif@inbox.ru

Soloveichik Yuri G., head of the Department of Applied Mathematics, Faculty of Applied Mathematics and Computer Science, Novosibirsk State Technical University. His research interests cover finite element modeling and solution of inverse problems of mathematical physics. He is the author of more than 170 scientific and educational publications. Email: soloveychik@ ami.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-75-88

Investigation of the efficiency of post-processing methods in solving problems of multi-phase filtration[*]

A.M. GRIF[a], YU.G. SOLOVEICHIK[b]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *alexgrif@inbox.ru* [b] *soloveychik@ami.nstu.ru*

Abstract

Methods for post-processing of finite element solutions in the simulation of multiphase flows are considered. To simulate filtration processes, a special method based on the implicit calculation of the pressure field and the explicit calculation of saturations is used. Post-processing of flows is performed using two technologies - the balancing method and the projection method. The method of balancing the numerical flows of the mixture ensures the fulfillment of local conservation laws by finding corrections to the flows of the mixture calculated using the FEM. For the closeness of the modified mixture flows to the original numerical ones, the regularization parameters in the balancing method are calculated using the averaged unbalance. In the projection method, the balanced values of fluxes through the faces of finite elements are corrected by adding constant corrections (constant per element).

Computational experiments were carried out on a test problem, a model of a field with a simple structure, and a model of a real oil field in the Republic of Tatarstan. When modeling problems with the appropriate correction of the known mixture flows on the faces of the wells, the solutions obtained using the balancing method and the projection method have little differ-

[*] *Received 10 May 2022.*

This work was financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Research Laboratory “Modeling and data processing of high technologies”, the project code is FSUN-2020-0012).

ence. The results of research on problems have shown that both technologies provide conservative solutions for which conservation laws are satisfied. At the same time, the use of the method of balancing the numerical flows of the mixture provides a higher accuracy than the projection method, when the flows in the wells are corrected in the post-processing process (that is, in fact, production/injection is emulated while maintaining a fixed pressure). The projection method can be improved by using the weight functions proposed for the balancing method. However, even in this case, the balancing method allows obtaining more accurate solutions.

Keywords: multiphase flow, oil fields, oil production, finite element method, mass conservation law, flow post-processing, flow balancing method, flow projection method

REFERENCES

1. Aziz K., Settari A. *Petroleum reservoir simulation*. London, Applied Science Publ., 1979. 476 p.

2. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Grif A.M., Kiselev D.S., Patrushev I.I., Nasybullin A.V., Ganiev B.G. The design of high-viscosity oil reservoir model based on the inverse problem solution. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2021, vol. 199, p. 108245.

3. Shirangi M.G., Durlofsky L.J. Closed-loop field development under uncertainty by use of optimization with sample validation. *SPE Journal*, 2015, vol. 20, no. 5, pp. 908–922.

4. Abushaikha A.S., Blunt M.J., Gosselin O.R., Pain C.C., Jackson M.D. Interface control volume finite element method for modelling multi-phase fluid flow in highly heterogeneous and fractured reservoirs // Journal of Computational Physics, 2015, vol. 298, pp. 41–61.

5. Schmid K.S., Geiger S., Sorbie K.S. Higher order FE-FV method on unstructured grids for transport and two-phase flow with variable viscosity in heterogeneous porous media. *Journal of Computational Physics*, 2013, vol. 241, pp. 416–444.

6. Nick H.M., Matthäi S.K. A hybrid finite-element finite-volume method with embedded discontinuities for solute transport in heterogeneous media. *Vadose Zone Journal*, 2011, vol. 10, no. 1. pp. 299–312.

7. Zhang R.-h., Zhang L.-h., Luo J.-x., Yang Z.-d., Xu M.-y. Numerical simulation of water flooding in natural fractured reservoirs based on control volume finite element method. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2016, vol. 146, pp. 1211–1225.

8. Sun S., Wheeler M.F. Projections of velocity data for the compatibility with transport. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2006, vol. 195, no. 7–8, pp. 653–673.

9. Lee S., Lee Y.J., Wheeler M.F. A locally conservative enriched Galerkin approximation and efficient solver for elliptic and parabolic problems. *SIAM Journal on Scientific Computing*, 2016, vol. 38, no. 3, pp. A1404–A1429.

10. Odsæter L.H., Wheeler M.F., Kvamsdal T., Larson M.G. Postprocessing of non-conservative flux for compatibility with transport in heterogeneous media. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2017, vol. 315, pp. 799–830.

11. Soloveichik Y.G., Persova M.G., Grif A.M., Ovchinnikova A.S., Patrushev I.I., Vagin D.V., Kiselev D.S. A method of FE modeling multiphase compressible flow in hydrocarbon reservoirs. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, vol. 390, p. 114468.

12. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Grif A.M., Patrushev I.I. Flow balancing in FEM modelling of multi-phase flow in porous media. *14th International Scientific-Technical Conference on Actual problems of electronic instrument engineering (APEIE 2018): proceedings*, Novosibirsk, 2–6 October 2018, vol. 1, pt. 4, pp. 205–211.

13. Ovchinnikova A.S. Computational scheme of temperature field calculation during modeling multiphase flow in porous media. *Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference «Actual problems of electronic instrument engineering»*, Novosibirsk, 19–21 November 2021, pp. 564–567. DOI: 10.1109/APEIE52976.2021.9647473.

14. Persova M.G., Soloveichik Yu.G., Grif A.M. Balansirovka potokov na nekonformnykh konechnoelementnykh setkakh pri modelirovanii mnogofaznoi fil'tratsii [Flow balancing in modeling

of multi-phase flow using non-conformal finite element meshes]. *Programmnaya inzheneriya = Software Engineering*, 2021, vol. 12, no. 9, pp. 450–458.

15. Ovchinnikova A.S., Patrushev I.I., Grif A.M., Persova M.G., Soloveichik Y.G. Konechno-elementnoe modelirovanie mnogofaznykh potokov s ikh balansirovkoi pri fiksirovanii rabochego davleniya na skvazhinakh v protsesse neftedobychi [Finite element modeling of multiphase flows with their balancing while setting the working pressure on wells during oil production]. *Vychislitel'nye metody i programmirovanie = Numerical Methods and Programming*, 2022, vol. 23 (1), pp. 60–74. (In Russian).

Для цитирования:

Гриф А.М., Соловейчик Ю.Г. Исследование эффективности методов постобработки потоков при решении задач многофазной фильтрации // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 4 (88). – С. 75–88. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-75-88.

For citation:

Grif A.M., Soloveichik Yu.G. Issledovanie effektivnosti metodov postobrabotki potokov pri reshenii zadach mnogofaznoi fil'tratsii [Investigation of the efficiency of post-processing methods in solving problems of multi-phase filtration]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 4 (88), pp. 75–88. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-75-88.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 88, № 4, 2022, с. 89–100

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 88, No. 4, 2022, pp. 89–100

КОМПЬЮТЕРНЫЕ НАУКИ
И ИНФОРМАТИКА

COMPUTER SCIENCE
AND INFORMATION SCIENCE

УДК 004.94

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-89-100

Подход к определению коэффициента теплообмена между породой и смесью флюидов при моделировании процессов неизотермической многофазной фильтрации*

А.С. ОВЧИННИКОВА[a], М.Г. ПЕРСОВА[b], Д.А. ЛЕОНОВИЧ[c]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *ovchinnikova.2014@stud.nstu.ru* [b] *persova@ami.nstu.ru*
[c] *leonovich.2018@stud.nstu.ru*

В работе представлен подход к вычислению коэффициента, характеризующего скорость теплообмена между смесью флюидов в нефтяном коллекторе и матрицей-породой. Этот коэффициент необходим для дальнейшего совместного моделирования гидродинамических и тепловых процессов, возникающих в коллекторе месторождения в ходе его разработки с использованием, например, тепловых методов увеличения нефтеотдачи. Для моделирования процессов неизотермической многофазной фильтрации используется подход, основанный на неявном расчете давления с использованием метода конечных элементов и явном расчете насыщенностей фаз. Подход к определению значения коэффициента теплообмена основан на решении тепловой задачи в среде, соответствующей каналу пористой среды и части матрицы-породы вокруг него. При этом в канал с заданной скоростью поступает смесь флюидов с известным значением температуры, отличным от начальной температуры в канале и матрице-породе. Решается двумерная задача в осесимметричной постановке методом конечных элементов.

Численные эксперименты по определению коэффициента теплообмена были проведены на моделях для различных значений размера канала, пористости, начальных температур среды, температуры смеси, поступающей в канал, тепловых свойств смеси флюидов и породы. В результате исследования было получено, что наиболее существенное влияние на значение коэффициента теплообмена оказывают размер канала и пористость, так как эти характеристики определяют объем матрицы-породы, который должен «прогреться / остыть» при изменении температуры смеси флюидов в канале. Также полученные значения коэффициента были достаточно велики, так как теплообмен между породой и смесью в канале происходит за минуты, что практически соответствует мгновенному теплообмену, если речь идет о моделировании процессов разработки месторождений, где временные шаги составляют сутки и месяцы.

---

* *Статья получена 10 мая 2022 г.*

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ (НИЛ «Моделирование и обработка данных наукоемких технологий», проект FSUN-2020-0012).

Ключевые слова: математическое моделирование, неизотермическая многофазная фильтрация, теплообмен между смесью флюидов и породой, микроструктура пористой среды, коэффициент теплообмена, численное моделирование, метод конечных элементов, разработка нефтяных месторождений

ВВЕДЕНИЕ

В России около 60 % общих запасов нефти относится к трудноизвлекаемым [1]. К таким запасам относятся, в частности, месторождения сверхвязкой нефти и природных битумов. Доля их добычи с каждым годом увеличивается [2]. Разработка таких месторождений практически невозможна без применения тепловых методов [3, 4]. Одними из наиболее распространенных тепловых методов являются циклическая закачка пара, закачка нагретого пара или воды, парогравитационное дренирование [4–6].

Рентабельная разработка месторождений сверхвязких нефтей и природных битумов – достаточно сложная проблема. В настоящее время отмечается повышенный интерес к использованию программных комплексов, позволяющих моделировать процессы нефтедобычи, для анализа и дальнейшего повышения эффективности существующих технологий разработки таких месторождений. Важнейшим этапом создания такого программного обеспечения для управления разработкой месторождения является создание математической модели, которая должна как адекватно отражать все физические процессы с учетом особенностей применяемых технологий разработки, так и обеспечивать выполнение всех фундаментальных законов сохранения.

Предложенный подход для моделирования процессов неизотермической фильтрации основан на разделении конвективного теплопереноса и теплообмена между породой и смесью флюидов. Для вычисления температуры породы и смеси флюидов после теплообмена между ними решается система уравнений, основанная на законе сохранении энергии и использовании коэффициента, характеризующего скорость теплообмена. Этот коэффициент может быть получен экспериментально или оценен теоретически. В настоящей работе рассматривается подход к определению значения данного коэффициента на основе решения уравнения теплопроводности в среде, соответствующей каналу, по которому движется смесь флюидов, и окружающей его части матрицы-породы.

1. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

В данной работе для моделирования процессов многофазной фильтрации используется подход с неявным расчетом давления и явным расчетом насыщенности фаз. Общий алгоритм такого подхода заключается в последовательном выполнении на каждом временном шаге следующих шагов:

1) расчет поля давления методом конечных элементов [7–9];

2) расчет численных потоков смеси $\tilde{V}'_{\Gamma_i}$, перетекающих через грани Γ_i конечных элементов Ω_e;

3) использование метода балансировки [10, 11] для получения потоков смеси V'_{Γ_i}, гарантирующих выполнение закона сохранения масс фильтрующейся смеси;

4) деление потоков смеси на потоки фаз $V'^{m}_{\Gamma_i}$ и вычисление на их основе нового фазово-компонентного состава расчетной области на конец временного шага Δt.

Более подробно вычислительная схема расчета потоков фаз и нового распределения насыщенностей на основе значений V'_{Γ_i} описана в работе [12].

Вместе с объемами фаз $V^{m}_{\Gamma_i}$, перетекающими через грани конечных элементов, также переносится тепловая энергия. Для расчета новых значений температуры смеси флюидов используется формула

$$\tilde{T}^{mix}_{\Omega_e} = \frac{\sum\limits_{m=1}^{NP}\left(c^{m}_{\Omega_e} T^{m}_{\Omega_e} \rho^{m}_{\Omega_e} \tilde{V}^{m}_{\Omega_e} + \sum\limits_{i \in I^{m,in}_{\Omega_e}} c^{m}_{\Omega_{e'}} T^{m}_{\Omega_{e'}} \rho^{m}_{\Omega_{e'}} V^{m}_{\Gamma_i} \right)}{\sum\limits_{m=1}^{NP}\left(c^{m}_{\Omega_e} \rho^{m}_{\Omega_e} \tilde{V}^{m}_{\Omega_e} + \sum\limits_{i \in I^{m,in}_{\Omega_e}} c^{m}_{\Omega_{e'}} \rho^{m}_{\Omega_{e'}} V^{m}_{\Gamma_i} \right)}, \tag{1}$$

где NP – число фаз; $I^{m,in}_{\Omega_e}$ – множество номеров граней конечного элемента Ω_e, через которые объем фазы m втекает в элемент Ω_e; $\tilde{V}^{m}_{\Omega_e}$ – объем фазы m в Ω_e с учетом вытекших за шаг Δt объемов $V^{m}_{\Gamma_i}$, вычисляемый по формуле

$$\tilde{V}^{m}_{\Omega_e} = mes\left(\Omega_e\right) \Phi_{\Omega_e} S^{m}_{\Omega_e} - \sum_{i \in I^{m,out}_{\Omega_e}} V^{m}_{\Gamma_i} . \tag{2}$$

Здесь $mes(\Omega_e)$ – объем конечного элемента Ω_e; Φ_{Ω_e} – пористость; $I^{m,out}_{\Omega_e}$ – множество номеров граней конечного элемента Ω_e, через которые объем фазы m вытекает из элемента Ω_e.

Новые значения температуры смеси $\hat{T}^{mix}_{\Omega_e}$ и температуры матрицы-породы $\hat{T}^{base}_{\Omega_e}$ после теплообмена между ними с коэффициентом β находятся из решения системы уравнений

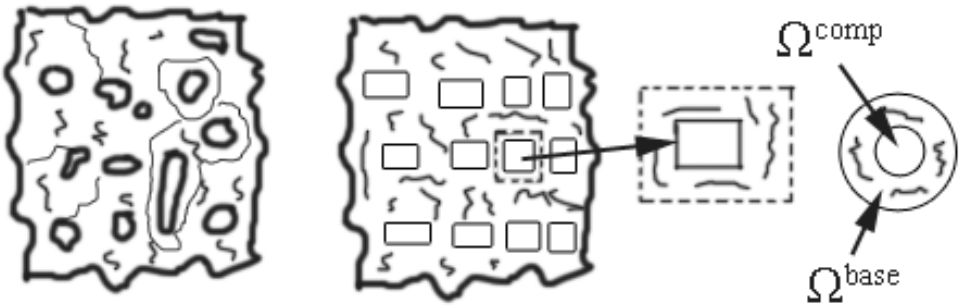
$$\begin{cases} \dfrac{c^{mix}_{\Omega_e} \rho^{mix}_{\Omega_e} \Phi_{\Omega_e}}{\Delta t}\left(\hat{T}^{mix}_{\Omega_e} - \tilde{T}^{mix}_{\Omega_e} \right) = f^{\Delta Q}_{\Omega_e} - \beta\left(\hat{T}^{mix}_{\Omega_e} - \hat{T}^{base}_{\Omega_e} \right), \\ \dfrac{c^{base}_{\Omega_e} \rho^{base}_{\Omega_e} \left(1 - \Phi_{\Omega_e}\right)}{\Delta t}\left(\hat{T}^{base}_{\Omega_e} - T^{base}_{\Omega_e} \right) = \beta\left(\hat{T}^{mix}_{\Omega_e} - \hat{T}^{base}_{\Omega_e} \right), \end{cases} \tag{3}$$

где $f_{\Omega_e}^{\Delta Q}$ – количество теплоты, выделившейся (поглотившейся) в конечном элементе Ω_e за единицу времени в единице объема; $c_{\Omega_e}^{mix}$, $\rho_{\Omega_e}^{mix}$ – эффективные теплоемкости и плотности смеси.

Более подробно вычислительная схема расчета температурного поля описана в работе [13].

Коэффициент теплообмена β между матрицей-породой и фильтрующейся смесью может быть определен экспериментально (на образцах керна) и оценен теоретически, например, следующим образом.

При некоторых упрощениях можно считать, что при фильтрации смеси через породу ее флюиды движутся по каналам различного сечения, показанным на рис. 1, *а*.



а *б* *в* *г*

Рис. 1. Фрагмент матрицы-породы с каналами, по которым движется фильтрующаяся смесь

Fig. 1. Fragment of a rock matrix with channels through which the mixture flows

В самом простом случае можно принять, что каналы имеют примерно одинаковый характерный размер и расположены регулярно, как это показано на рис. 1, *б*. Тогда из условий симметрии теплообмен между флюидами движущейся смеси и матрицей-породой можно изучать в небольшом фрагменте, выделенном на рис. 1, *в*. На границах этого небольшого фрагмента в соответствии с условиями симметрии задана адиабата (нулевой тепловой поток). При этом размер выделенного фрагмента определяется исходя из того, что отношение площади канала к площади всего фрагмента должно быть равно пористости Ф, т. е.

$$\pi r_f^2 \Big/ \pi r_b^2 = \Phi , \tag{4}$$

где r_f – радиус канала; r_b – размер фрагмента.

Процесс теплообмена для фрагмента породы, изображенного на рис. 1, *в*, будет очень незначительно отличаться от процесса теплообмена в осесимметричной области, показанной на рис. 1, *г*, если площади сечений матрицы-породы и каналов в этих областях (изображенных на рис. 1, *в–г*) совпадают.

Таким образом, температурное поле, по которому будет оцениваться коэффициент теплообмена β, можно изучить с помощью решения следующей начально-краевой задачи:

$$-\mathrm{div}\left(\lambda \mathrm{gradT}\right)+\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t}+\rho c\left(\vec{\upsilon}\mathrm{gradT}\right)=f^{\Delta Q}, \tag{5}$$

$$T\big|_{\Gamma^1}=T^{\Gamma}, \tag{6}$$

$$T\big|_{t=0}=T^{0}, \tag{7}$$

где $T=T(r,\ z,\ t)$ – распределение температуры в матрице-породе (при $r \geq r_f$) и в текущей по каналу смеси (при $r \leq r_f$); $\lambda,\ \rho,\ c_p$ – соответственно коэффициенты теплопроводности, плотности и теплоемкости (матрицы-породы (при $r \geq r_f$) и смеси (при $r < r_f$)); $\vec{\upsilon}$ – скорость движения смеси в канале; $f^{\Delta Q}(r)$ – плотность источников тепла внутри фильтрующейся смеси (т. е. $f^{\Delta Q}(r) \equiv 0$ при $r > r_f$); Γ^1 – объединение тех границ расчетной области, где задана температура T^{Γ} смеси флюидов, поступающей в канал. В начальный момент времени температура среды равна T^0. Для аппроксимации по времени используется выражение

$$-\mathrm{div}\,(\lambda \mathrm{grad}\,T^{j})+\rho c_p \frac{T^{j}-T^{j-1}}{\Delta t}+\rho c(\vec{\upsilon}\ \mathrm{grad}\,T^{j})=f^{\Delta Q}, \tag{8}$$

где T^{j}, T^{j-1} – температура в моменты времени $t=t_j$ и $t=t_{j-1}$ соответственно.

Уравнение (8) с краевым условием (6) решается методом конечных элементов.

По значениям $T(r,\ z,\ t)$ на любом временном интервале длительностью Δt может быть определено приращение тепловой энергии ΔH в матрице-породе

$$\Delta H=\int\limits_{\Omega^{base}} \rho c_p \Delta T d\Omega, \tag{9}$$

где ΔT – приращение температуры в матрице-породе за интервал времени Δt.

Также вычисляются среднеинтегральные значения температуры породы T^{base} и смеси T^{comp}, соответствующие середине временного интервала t_{mid}, по формуле

$$T^{comp}=\int\limits_{\Omega^{comp}} T^{t_{mid}} d\Omega, \qquad T^{base}=\int\limits_{\Omega^{base}} T^{t_{mid}} d\Omega, \tag{10}$$

где Ω^{base}, Ω^{comp} – подобласти расчетной области, которые занимают матрица-порода и канал со смесью флюидов соответственно.

Значение коэффициента β может быть получено из соотношения

$$\beta = \frac{\Delta H}{(\Delta t\, mes(\Omega^{base})(T^{comp} - T^{base}))}. \qquad (11)$$

Очевидно, значение β зависит как от выбранного характерного размера канала и пористости Ф, так и от значений коэффициентов λ, ρ и C в породе и в смеси, от скорости течения смеси $\vec{\upsilon}$ и от источников внутри смеси $f^{\Delta Q}$. Оценка последних трех величин может быть получена в процессе решения соответствующей «большой» задачи фильтрации. Для практического исследования может быть взята либо некоторая осредненная по выбранным значениям перечисленных выше параметров оценка β, либо значение β по данным, получаемым при решении конкретной задачи многофазной фильтрации. В последнем случае предполагается параллельное решение задачи фильтрации и краевой задачи (5)–(6), причем задача (5)–(6) параллельно решается для каждого конечного элемента.

2. ЧИСЛЕННЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Было проведено исследование по нахождению значений коэффициента теплообмена, необходимого для моделирования теплового процесса, в соответствии с представленной вычислительной схемой. Для этого был проведен ряд вычислительных экспериментов для различных значений размеров канала, пористости, начальных температур и тепловых свойств породы и смеси флюидов в канале.

В результате исследования было получено, что наиболее сильное влияние на скорость теплообмена оказывает размер канала. С его ростом увеличивается область породы (так как должно выполняться соотношение (4)) и, соответственно, время, требуемое для достижения равновесной температуры.

Во всех расчетах, результаты которых приведены в данном разделе, тепловые свойства фаз и породы взяты из четвертой задачи проекта SPE (Society of Petroleum Engineers – Общество инженеров-нефтяников) [14]. Начальные температуры среды и закачиваемой смеси выбраны близкими к заданным в [14]. Так, температура среды равна 50 °С, а температура закачиваемой смеси – 230 °С.

В табл. 1 показаны результаты для различных значений радиуса канала. Размеры каналов в пористой среде варьируются в диапазоне 10…100 мкм [15].

Таблица 1

Table 1

Зависимость коэффициента теплообмена β от размера канала

The dependence of the heat transfer coefficient on the size of the channel

Радиус канала, мкм	β, Дж/(м^3·с·°С)
1	$2.23\cdot10^{12}$
10	$2.21\cdot10^{10}$
100	$2.19\cdot10^{8}$
1000	$2.15\cdot10^{6}$

Как видно из значений, представленных в табл. 1, коэффициент β, вычисленный по формуле (11), уменьшается на два порядка с увеличением радиуса каналов на порядок. Также отметим, что полученные значения β достаточно большие, что говорит о высокой скорости теплообмена между смесью флюидов в канале и породой.

На рис. 2 показаны распределения температурного поля в расчетной области в различные моменты времени для канала радиусом 100 мкм. Пунктирной линией показана граница между каналом, заполненным смесью флюидов, и породой.

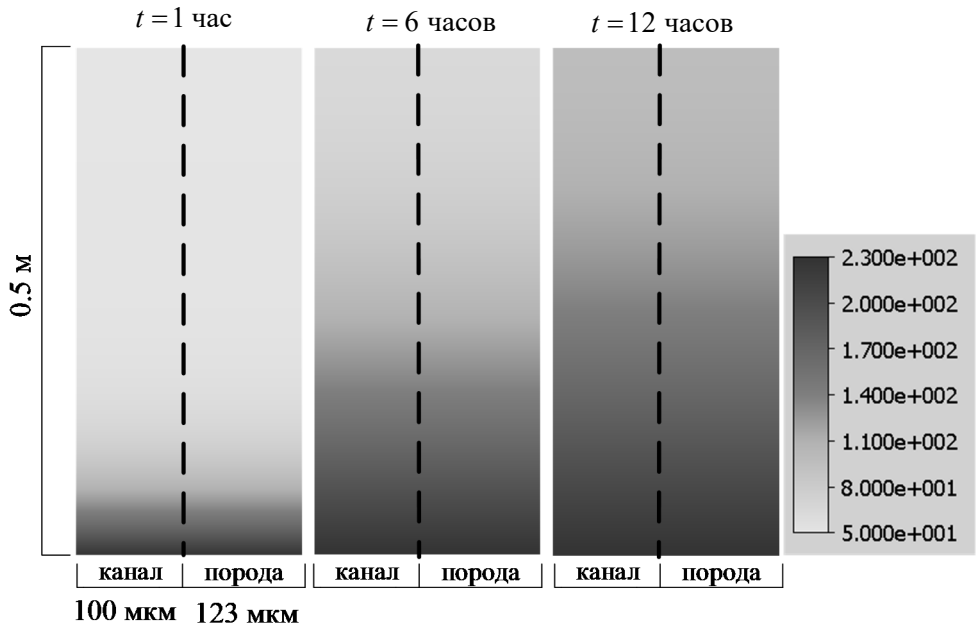


Рис. 2. Распределение температуры в расчетной области в различные моменты времени

Fig. 2. Temperature distribution in the computational domain at different times

Как видно из представленных распределений, значения температуры в канале и породе визуально совпадают. На рис. 3 показаны графики температуры вблизи нижней границы расчетной области для каналов размером 10 и 100 мкм в начале моделируемого процесса (в моменты времени: 1 секунда, 10 секунд, 1 минута, 5 минут).

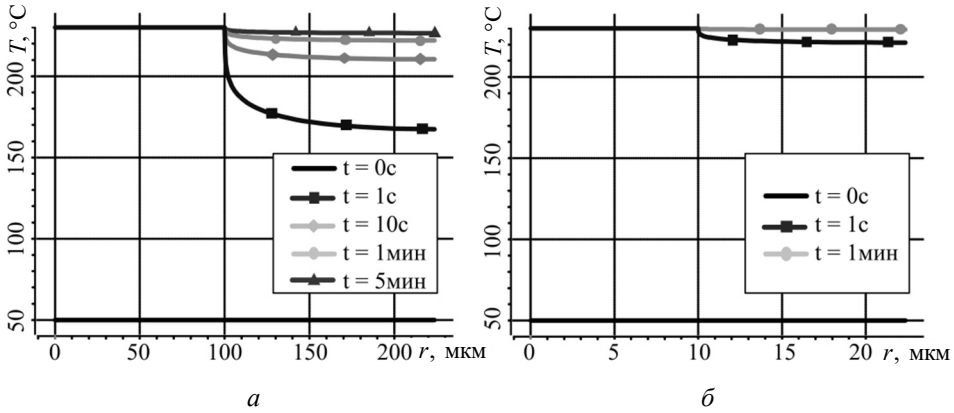


Рис. 3. Графики температуры вблизи нижней границы расчетной области в различные моменты времени для канала размером 100 мкм (*а*) и 10 мкм (*б*)

Fig. 3. Curves of the temperature near the lower boundary of the computational domain at different times for a channel with a size of 100 μm (*а*) and 10 μm (*б*)

Теперь покажем влияние значений пористости и теплопроводности породы на скорость теплообмена. Значения теплопроводности варьировались от 1 до 5 Вт/(м·°С) в соответствии с данными, представленными в работе [16]. В табл. 2 приведены полученные значения коэффициентов теплообмена для канала размером 100 мкм.

Таблица 2

Table 2

Значения коэффициента теплообмена для различных значений пористости и теплопроводности породы

Values of the heat transfer coefficient for various values of porosity and thermal conductivity of the rock

Пористость	β , Дж/(м^3·с·°С)		
	λ = 1 Вт/(м·°С)	λ = 3 Вт/(м·°С)	λ = 5 Вт/(м·°С)
0.05	$1.4\cdot10^7$	$3.8\cdot10^7$	$6.6\cdot10^7$
0.2	$8.5\cdot10^7$	$2.2\cdot10^8$	$4.5\cdot10^8$
0.4	$2.1\cdot10^8$	$5.2\cdot10^8$	$1.3\cdot10^9$

Как видно из представленных значений, коэффициент β изменяется в 2–6 раз при изменении пористости и теплопроводности. Пористость более существенно влияет на полученные значения β. Тем не менее даже при

маленьких значениях пористости и теплопроводности значение β остается большим.

Изменение плотности, теплоемкости породы и флюидов, а также скорости течения в канале в меньшей степени влияет на скорость теплообмена и значения коэффициента теплообмена β (не более чем в 2 раза). Были проведены расчеты, в которых значение плотности флюидов в канале изменялось от 10 до 1000 кг/м^3, удельной теплоемкости – от 1600 до 4200 Дж/(кг·°С), что соответствует различному фазовому составу в канале при трехфазной фильтрации (вода – нефть – пар). Объемная теплоемкость породы изменялась в диапазоне значений от 1500 до 4000 кДж/(м^3·°С), скорость течения – от 10^{-4} до 10^{-9} м/с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что хотя коэффициент теплообмена может существенно изменяться при различных конфигурациях свойств среды и флюидов, порода нагревается очень быстро по сравнению с масштабами временных шагов, используемых при моделировании процессов нефтедобычи (сутки и месяцы). Таким образом, для моделирования тепловых процессов при решении задач нефтедобычи в большинстве случаев можно считать процесс теплообмена мгновенным и полагать температуры смеси и породы равными. Отсутствие информации о микроструктуре среды мало повлияет на точность моделирования теплового процесса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Шмаль Г.И.* Проблемы при разработке трудноизвлекаемых запасов нефти в России и пути их решения // Георесурсы. – 2016. – Т. 18, № 4, ч. 1. – С. 256–260.

2. *Мишенин М.В.* Динамика добычи нефти из трудноизвлекаемых запасов в России // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2021. – Т. 2, № 4. – С. 294–301.

3. *Kokal S., Al-Kaabi A.* Enhanced oil recovery: challenges and opportunities // World Petroleum Council: Official Publication. – WPC, 2010.– P. 64–69.

4. Thermal enhanced oil recovery in deep heavy oil carbonates: Experimental and numerical study on a hot water injection performance / A. Askarova, A. Turakhanov, S. Markovic, E. Popov, K. Maksakov, G. Usachev, V. Karpov, A. Cheremisin // Journal of Petroleum Science and Engineering. – 2020. – Vol. 194. – DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107456.

5. A comprehensive review of thermal enhanced oil recovery: Techniques evaluation / E.M.A. Mokheimer, M. Hamdy, Z. Abubakar, M.R. Shakeel, M.A. Habib, M. Mahmoud // Journal of Energy Resources Technology. – 2019. – Vol. 141, N 3. – P. 030801. – DOI: 10.1115/1.4041096.

6. Economics of steam generation for thermal enhanced oil recovery / M. Chaar, M. Venetos, J. Dargin, D. Palmer // Oil and Gas Facilities. – 2015. – Vol. 4, N 6. – P. 42–50.

7. Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using non-conforming hexahedral meshes / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, D.V. Vagin, D.S. Kiselev, Y.I. Koshkina // Journal of Applied Geophysics. – 2020. – Vol. 172. – P. 103911. – DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103911.

8. Finite-element solution to multidimensional multisource electromagnetic problems in the frequency domain using non-conforming meshes / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, P.A. Domnikov, Y.I. Koshkina, D.V. Vagin // Geophysical Journal International. – 2018. – Vol. 212 (3). – P. 2159–2193. – DOI: 10.1093/gji/ggx530.

9. 3D modeling of thermo-mechanical behavior of composite-made nose caps of hypersonic vehicles / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, D.V. Vagin, T.B. Epanchintseva, P.A. Domnikov, K.V. Dundukova, V.K. Belov // Applied Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 99. – P. 1152–1164. – DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.159.

10. Flow balancing in FEM modelling of multi-phase flow in porous media / M.G. Persova, Y.G. Soloveichik, A.M. Grif, I.I. Patrushev // 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE). – IEEE, 2018. – P. 205–211. – DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545457.

11. *Персова М.Г., Соловейчик Ю.Г., Гриф А.М.* Балансировка потоков на неконформных конечноэлементных сетках при моделировании многофазной фильтрации // Программная инженерия. – 2021. – Т. 12, № 9. – С. 450–458.

12. A method of FE modeling multiphase compressible flow in hydrocarbon reservoirs / Y.G. Soloveichik, M.G. Persova, A.M. Grif, A.S. Ovchinnikova, I.I. Patrushev, D.V. Vagin, D.S. Kiselev // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. Elsevier. – 2022. – Vol. 390. – P. 114468.

13. *Овчинникова А.С.* Вычислительная схема для расчета температурного поля при решении задач нефтедобычи // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 4 (84). – С. 37–48. – DOI: 10.17212/2782-2001-2021-4-37-48.

14. *Aziz K., Ramesh A.B., Woo P.T.* Fourth SPE comparative solution project: comparison of steam injection simulators // Journal of Petroleum Technology. – 1987. – Vol. 39 (12). – P. 1576–1584. – DOI: 10.2118/13510-PA.

15. *Иванов В.А., Храмова В.Г., Дияров Д.О.* Структура порового пространства коллекторов нефти и газа. – М.: Недра, 1974. – 96 с.

16. *Новиков С.В.* Тепловые свойства терригенных коллекторов и насыщающих флюидов: дис. … д-ра физ.-мат. наук. – М., 2009. – 115 с.

Овчинникова Анастасия Сергеевна, ассистент кафедры прикладной математики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование процессов неизотермической многофазной фильтрации. Является автором 17 научных работ. E-mail: ovchinnikova.2014@stud.nstu.ru

Персова Марина Геннадьевна, доктор технических наук, профессор, заведующая научно-исследовательской лабораторией моделирования и обработки данных наукоемких технологий Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – конечноэлементное моделирование и наукоемкое программное обеспечение для моделирования и сопровождения технологий. Является автором более 200 научных работ. E-mail: persova@ami.nstu.ru

Леонович Дарьяна Александровна, магистрант Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – математическое моделирование процессов неизотермической многофазной фильтрации. Является автором одной публикации. E-mail: leonovich.2018@stud.nstu.ru

Ovchinnikova Anastasia S., an assistant lecturer at the Department of Applied Mathematics, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on mathematical modeling of non-isothermal multiphase flow in porous media. She is the author of 17 scientific papers. E-mail: ovchinnikova.2014@stud.nstu.ru

Persova Marina G., Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Laboratory of Modeling and Data Processing of High Technologies (LMDPHT), Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on finite element modeling and knowledge-intensive software for modeling and supporting technologies. She is the author of more than 200 scientific papers. E-mail: persova@ami.nstu.ru

Leonovich Daryana A., an undergraduate student, Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on mathematical modeling of non-isothermal multiphase flow in porous media. She is the author of 1 scientific paper. E-mail: leonovich.2018@stud.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-89-100

Approach to the determination of the heat transfer coefficient between rock and fluid mixture for modeling non-isothermal multiphase flow[*]

A.S. OVCHINNIKOVA [a], *M.G. PERSOVA* [b], *D.A. LEONOVICH* [c]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *ovchinnikova.2014@stud.nstu.ru* [b] *persova@ami.nstu.ru* [c] *leonovich.2018@stud.nstu.ru*

Abstract

The paper presents an approach to calculation of the coefficient determining the rate of heat transfer between a fluid mixture in oil reservoir and a matrix-rock. This coefficient is necessary for further joint modeling of hydrodynamic and thermal processes that occur in the field reservoir during its development using, for example, thermal methods for enhanced oil recovery. To model the processes of a non-isothermal multiphase flow, an approach based on implicit pressure calculation using the finite element method and explicit calculation of phase saturations is used. The approach to determining the heat transfer coefficient is based on solving the thermal problem in an area corresponding to a channel of a porous medium and a part of the matrix-rock around it. In this case, a fluid mixture with a known temperature value, different from the initial temperature in the channel and matrix-rock, enters the channel at a given rate. A two-dimensional problem is solved in an axisymmetric formulation by the finite element method.

Numerical experiments to determine the heat transfer coefficient were carried out on models for various values of the channel size, porosity, initial temperatures of the medium, temperature of the mixture entering the channel, thermal properties of the fluid mixture and rock. As a result of the study, it was found that the channel size and porosity have the most significant effect on the value of the heat transfer coefficient, since these characteristics determine the volume of the matrix-rock, which should "warm up / cool down" when the temperature of the fluid mixture in the channel changes. Also, the coefficient values obtained were quite large, since the heat exchange between the rock and the mixture in the channel occurs in minutes, which practically corresponds to instantaneous heat transfer when it comes to modeling field development processes, where time steps are days and months.

Keywords: mathematical modeling, non-isothermal multiphase flow, heat transfer between rock and fluid mixture, microstructure of a porous medium, heat transfer coefficient, numerical modeling, finite element method, oil field development

REFERENCES

1. Shmal G.I. Problemy pri razrabotke trudnoizvlekaemykh zapasov nefti v Rossii i puti ikh resheniya [The problem of developing oil difficult to recover in Russia and solution approaches]. *Georesursy=Georesources*, 2016, vol. 18, no. 4, pt. 1, pp. 256–260.

2. Mishenin M.V. Dinamika dobychi nefti iz trudnoizvlekaemykh zapasov v Rossii [Dynamics of oil production from hard reserves in Russia]. *Interekspo Geo-Sibir'=Interexpo Geo-Siberia*, 2021, vol. 2, no. 4, pp. 294–301.

3. Kokal S., Al-Kaabi A. Enhanced oil recovery: challenges and opportunities. *World Petroleum Council: Official Publication*. WPC, 2010, pp. 64–69.

4. Askarova A., Turakhanov A., Markovic S., Popov E., Maksakov K., Usachev G., Karpov V., Cheremisin A. Thermal enhanced oil recovery in deep heavy oil carbonates: Experimental and numerical study on a hot water injection performance. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, vol. 194. DOI: 10.1016/j.petrol.2020.107456.

[*] *Received 10 May 2022.*

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. FSUN-2020-0012)

5. Mokheimer E.M.A., Hamdy M., Abubakar Z., Shakeel M.R., Habib M.A., Mahmoud M. A comprehensive review of thermal enhanced oil recovery: Techniques evaluation. *Journal of Energy Resources Technology*, 2019, vol. 141, no. 3 p. 030801. DOI: 10.1115/1.4041096.

6. Chaar M., Venetos M., Dargin J., Palmer D. Economics of steam generation for thermal enhanced oil recovery. *Oil and Gas Facilities*, 2015, vol. 4, no. 6, pp. 42–50.

7. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Vagin D.V., Kiselev D.S., Koshkina Y.I. Finite element solution to 3-D airborne time-domain electromagnetic problems in complex geological media using nonconforming hexahedral meshes. *Journal of Applied Geophysics*, 2020, vol. 172, p. 103911. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2019.103911.

8. Soloveichik Y.G., Persova M.G., Domnikov P.A., Koshkina Y.I., Vagin D.V. Finite-element solution to multidimensional multisource electromagnetic problems in the frequency domain using nonconforming meshes. *Geophysical Journal International*, 2018, vol. 212 (3), pp. 2159–2193. DOI: 10.1093/gji/ggx530.

9. Soloveichik Y.G., Persova M.G., Vagin D.V., Epanchintseva T.B., Domnikov P.A., Dundukova K.V., Belov V.K. 3D modeling of thermo-mechanical behavior of composite-made nose caps of hypersonic vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 2016, vol. 99, pp. 1152–1164. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.01.159.

10. Persova M.G., Soloveichik Y.G., Grif A.M., Patrushev I.I. Flow balancing in FEM modelling of multi-phase flow in porous media. *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*. IEEE, 2018, pp. 205–211. DOI: 10.1109/APEIE.2018.8545457.

11. Persova M.G., Soloveichik Yu.G., Grif A.M. Balansirovka potokov na nekonformnykh konechnoelementnykh setkakh pri modelirovanii mnogofaznoi fil'tratsii [Flow balancing on nonconformal finite element meshes in multiphase flow simulation]. *Programmnaya inzheneriya = Software Engineering*, 2021, vol. 12, no. 9, pp. 450–458.

12. Soloveichik Y.G., Persova M.G., Grif A.M., Ovchinnikova A.S., Patrushev I.I., Vagin D.V., Kiselev D.S. A method of FE modeling multiphase compressible flow in hydrocarbon reservoirs. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2022, vol. 390, p. 114468.

13. Ovchinnikova A.S. Vychislitel'naya skhema dlya rascheta temperaturnogo polya pri reshenii zadach neftedobychi [A computational scheme for calculating the temperature field when oil production problems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 4 (84), pp. 37–48. DOI: 10.17212/2782-2001-2021-4-37-48.

14. Aziz K., Ramesh A.B., Woo P.T. Fourth SPE comparative solution project: comparison of steam injection simulators. *Journal of Petroleum Technology*, 1987, vol. 39 (12), pp. 1576–1584. DOI: 10.2118/13510-PA.

15. Ivanov V.A., Khramova V.G., Diyarov D.O. *Struktura porovogo prostranstva kollektorov nefti i gaza* [The structure of the pore space of oil and gas reservoirs]. Moscow, Nedra Publ., 1974. 96 p.

16. Novikov S.V. *Teplovye svoistva terrigennykh kollektorov i nasyshchayushchikh flyuidov*. Diss. Dokt. fiz.-mat. nauk [Thermal properties of terrigenous reservoirs and saturating fluids. Dr. phys. and math. sci. diss.]. Moscow, 2009. 115 p.

Для цитирования:

Овчинникова А.С., Персова М.Г., Леонович Д.А. Подход к определению коэффициента теплообмена между породой и смесью флюидов при моделировании процессов неизотермической многофазной фильтрации // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 4 (88). – С. 89–100. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-89-100.

For citation:

Ovchinnikova A.S., Persova M.G., Leonovich D.A. Podkhod k opredeleniyu koeffitsienta teploobmena mezhdu porodoi i smes'yu flyuidov pri modelirovanii protsessov neizotermicheskoi mnogofaznoi fil'tratsii [Approach to the determination of the heat transfer coefficient between rock and fluid mixture for modeling non-isothermal multiphase flow]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 4 (88), pp. 89–100. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-89-100.

Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телевещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). В 2021 году был переименован в «Системы анализа и обработки данных». Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Системы анализа и обработки данных» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), *ранее* 05.13.18;

2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки), *ранее* 05.11.07;

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), *ранее* 05.11.16;

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки), *ранее* 05.11.17;

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации (технические науки), *ранее* 05.13.01;

2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки), *ранее* 05.13.11.

Разделы журнала: информационные технологии и телекоммуникации; компьютерные науки и информатика; электроника, фотоника, приборостроение и связь.

Рекомендуемый объем статьи 10–16 страниц. Статьи объемом, не превышающим 8 страниц, могут быть размещены в разделе «Краткие сообщения». Возможна публикация дискуссионного материала в разделе «Дискуссии». В информационном разделе возможно размещение сообщений о состоявшихся и планируемых конференциях, семинарах и симпозиумах, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Website: http://journals.nstu.ru/vestnik

Условия приема статей

В редакцию журнала представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.

2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора, ORCID) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», подготовленное в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, один экземпляр.

4. Лицензионный договор, заполненный и подписанный, отправляется со всем пакетом документов; сканированный заполненный договор записывается на диск.

5. Электронная версия статьи, контактной информации, описания статьи для базы данных РИНЦ и сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригинала **– А4**. Шрифт **– Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3 верхнее поле – 4,0

правое поле – 3,3 нижнее поле – 3,9.

текстовое поле 22 × 14,4

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов, с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см, межстрочный интервал с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение**, **Постановка задачи**, **Методы анализа**, **Основной результат**, **Выводы** или **Заключение**), набираются прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис*. и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в описании не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку упоминания их в тексте. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные подписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблицы по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте набираются курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0C. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы – курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha .$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул указывать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \qquad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются вверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: Файл / Параметры страницы / Разметка; установить **разные четные и нечетные** и **первая отличается**.

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8, номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы пустая строка размером 10. Порядковый номер с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий; e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском языках**.

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК, и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте http://journal.nstu.ru/vestnik.