



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2025. Т. 33, № 2

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Вестник Самарского Государственного Технического Университета

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Издается с августа 1993 г.

Выходит 4 раза в год

Серия

«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2025. Том 33. № 2

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Главный редактор Ю.Э. Плешивцева (д.т.н., проф.)

Отв. секретарь серии О.С. Афанасьева (к.т.н.)

Редакционная коллегия:

А.М. Абакумов (д.т.н., проф.)

В.И. Батищев (д.т.н., проф.)

С.Ю. Боровик (д.т.н., проф.)

Ю.В. Зубков (д.т.н., проф.)

Л.С. Казаринов (д.т.н., проф.)

Ю.Б. Казаков (д.т.н., проф.)

О.С. Колосов (д.т.н., проф.)

П.К. Кузнецов (д.т.н., проф.)

В.И. Лачин (д.т.н., проф.)

М.Ю. Лившиц (д.т.н., проф.)

С.П. Орлов (д.т.н., проф.)

Л.Д. Певзнер (д.т.н., проф.)

Э.Я. Рапопорт (д.т.н., проф.)

А.В. Стариков (д.т.н., проф.)

Е. Вааке (проф., Германия)

S. Luri (проф., Италия)

B. Nасke (проф., Германия)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2025. Том 33. № 2)

Учредитель – ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»
443100, Самарская область, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Редактор Г.В. Загребина
Компьютерная верстка О.С. Афанасьева

Свидетельство о регистрации
ПИ №ФС 77-64449 от 31.12.2015.
Федеральная служба по надзору
в сфере связи информационных
технологий и массовых
коммуникаций

Адрес редакции и издателя:
ФГБОУ ВО «Самарский
государственный
технический университет»
443100, Самарская область,
г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

Телефон: (846) 337 04 43
E-mail: vest_teh@samgtu.ru
Факс: (846) 278 44 40

Подписано в печать 04.08.25
Выход в свет 18.08.25

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 22,79 п.л.
Уч.-изд. л. 22,79 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 35/25
Заказ № 289

Отпечатано в типографии Самарского
государственного технического университета
Адрес типографии:
443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244.
Корпус 8

Журнал включен в Российский индекс научного цитирования (РИНЦ).

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук по следующим группам научных специальностей: 2.3 – Информационные технологии и коммуникации; 2.2 – Электроника, фотоника, приборостроение и связь; 2.4 – Энергетика и электротехника. Полнотекстовый доступ к статьям журнала осуществляется на сайте научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU (<http://elibrary.ru>) и на сайте <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

Подписной индекс в каталоге «Урал-Пресс» 18106
ISSN 1991-8542

© Авторы, 2025
© Самарский государственный
технический университет, 2025

Цена свободная

ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

Vestnik of Samara State Technical University

SCIENTIFIC JOURNAL

Published since August 1993

Four Issues a Year

Technical Sciences Series

2025. Vol. 33. Issue 2

Founder – Samara State Technical University

Editor-in-Chief Y.E. Pleshivtseva (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Execute Secretary O.S. Afanaseva (PhD Techn.)

Editorial board

A.M. Abakumov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E. Baake (Prof. Leibniz University of Hannover, Germany)

V.I. Batishchev (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S.Y. Borovik (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M. Forzan (Prof., University of Padua, Italy)

L.S. Kazarinov (Dr. Techn. Sci.)

Yu.B. Kazakov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

O.S. Kolosov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

P.K. Kuznetsov P. K. (Dr. Techn. Sci., Prof.)

V.I. Lachin (Dr. Techn. Sci., Prof.)

M.Y. Livshits (Dr. Techn. Sci., Prof.)

S. Lupi (Prof., University of Padua, Italy)

B. Nacke (Prof., Leibniz University of Hannover, Germany)

S.P. Orlov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

L.D. Pevzner (Dr. Techn. Sci., Prof.)

E.Y. Rapoport (Dr. Techn. Sci., Prof.)

A.V. Starikov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Yu.V. Zubkov (Dr. Techn. Sci., Prof.)

Edited by G. V . Z a g r e b i n a
Compiled and typeset by O . S . A f a n a s e v a

The Editorial Board Address:

Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Phone: +7(846) 337 04 43

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Printed at the Samara State Technical University Press

The journal is included in the Russian Science Citation Index.

The journal is included in VINITI (<http://www.viniti.ru>) abstracts databases.

The full-text electronic version of journal is hosted by the web-site of scientific electronic library eLIBRARY.RU
and by the site SamGTU (<http://vestnik-teh.samgtu.ru>)
and by the site <https://journals.eco-vector.com/1991-8542/>

The subscription index in Ural-Press catalogue 18106

ISSN 1991-8542

СОДЕРЖАНИЕ

Информационные технологии и коммуникации

<i>Казаринов А.В., Корнилов Я.Ю.</i> Оценка эффективности технологии пиролиза метана в системе поддержки принятия решений	7
<i>Скобелев П.О., Галузин А.А.</i> Экспериментальные исследования моделирования развития сельскохозяйственных культур в цифровом двойнике посевов растений.....	28

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

<i>Бородулин Б.Б., Лившиц М.Ю.</i> Автоматическая компенсация термодинамических помех в информационно-измерительных системах космических аппаратов	48
<i>Голиков А.В., Попов В.С., Панкратова Е.В.</i> Математическая модель теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа с учетом квадратурной намотки волокна	63
<i>Сайфулин М.Ж.</i> Использование двухканальной обработки данных для разделения совмещенных хроматографических сигналов.....	79

Энергетика и электротехника

<i>Благин Е.В., Угланов Д.А., Кузнецов Е.П., Галкина Н.В., Кудинов И.В.</i> Повышение эффективности контура регазификации, работающего по двухкаскадному циклу Брайтона, для криогенной системы хранения энергии.....	94
<i>Зубков Ю.В., Абакумов А.М., Абакумов О.А.</i> Оптимизация алгоритмов комбинированного управления электроприводами установок охлаждения природного газа с учетом дискретности управляющего воздействия	109

CONTENTS

Information Technologies and Communications

<i>Kazarinov A.V., Kornilov Ya.Yu.</i> Evaluation of the Efficiency of Methane Pyrolysis Technology Within a Decision Support System	25
<i>Skobelev P.O., Galuzin A.A.</i> Experimental Studies of Modelling the Development of Agricultural Crops in a Digital Twin of Plant Crops	45

Electronics, Photonics, Instrumentation and Telecommunications

<i>Borodulin B.B., Livshits M.Yu.</i> Automatic Compensation of Thermodeformation Interferences in Information and Measurement Systems of Spacecraft	61
<i>Golikov A.V., Popov V.S., Pankratova E.V.</i> Mathematical Model of Thermal Drift of Fiber Optic Gyroscope Taking into Account Quadrupole Spooling of Fiber	76
<i>Sayfulin M.Z.</i> Using Dual-Channel Data Processing for Separation of Overlapped Chromatographic Signals.....	92

Power Engineering and Electrical Engineering

<i>Blagin E.V., Uglanov D.A., Kuznetsova E.P., Galkina N.V., Kudinov I.V.</i> Improving the Efficiency of a Regasification Circuit Operating on a Two-stage Brayton Cycle for Cryogenic Energy Storage Systems	107
<i>Zubkov Yu.V., Abakumov A.M., Abakumov O.A.</i> Algorithms Optimization for Combined Natural Gas Cooling Units Control of Electric Drives Taking into Account the Discreteness of Control Effect	121

Информационные технологии и коммуникации

УДК 662.767

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ПИРОЛИЗА МЕТАНА В СИСТЕМЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ

А.В. Казаринов, Я.Ю. Корнилов¹

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

Email: artemrus987@gmail.com, yaroslav260801@gmail.com

Аннотация. Настоящая статья посвящена разработке концепции и алгоритма функционирования системы поддержки принятия решений (СППР), предназначенной для комплексного анализа и определения направления совершенствования процесса пиролиза метана. Авторами предложена модульная архитектура СППР, ключевым элементом которой является блок многофакторного анализа на основе модели суперэффективности метода DEA, предназначенный для оценки и ранжирования различных технологических режимов процесса пиролиза метана. Использование моделей DEA-метода позволяет не только идентифицировать эффективные режимы, но и выявлять среди них лучшие, обладающие наибольшим потенциалом применения за счет технологической устойчивости.

В работе представлен анализ влияния технологических параметров на степень конверсии и производительность водорода в процессе пиролиза метана, а также продемонстрировано использование предложенного подхода для ранжирования эффективных режимов и формирования обоснованных рекомендаций по их дальнейшей оптимизации. Разработанная СППР может служить действенным инструментом повышения технологической и экономической эффективности процесса пиролиза метана, что способствует его промышленному внедрению и укреплению конкурентоспособности в качестве экологически ориентированного метода производства водорода. Представленные результаты вносят вклад в развитие методологии управления сложными технологическими объектами.

Ключевые слова: производство водорода, декарбонизация, каталитический пиролиз, СППР, Data Envelopment Analysis, эффективность.



© Автор(ы), 2025

¹ Артём Витальевич Казаринов, аспирант кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Ярослав Юрьевич Корнилов, магистр кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема No FSSE-2024-0014) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Введение

Мировой переход к низкоуглеродной экономике требует развития технологий производства чистого водорода, который рассматривается как перспективный энергоноситель в долгосрочной стратегии энергоснабжения. Современное производство водорода (~90 млн т), на 95 % зависящее от ископаемого сырья, генерирует около 830 млн т CO₂ ежегодно. По данным Международного энергетического агентства (МЭА), к 2050 году производство водорода может вырасти в 6 раз, что делает разработку низкоуглеродных методов его получения критически важной задачей [1–3].

Одним из перспективных методов генерации водорода является пиролиз метана – термическое разложение природного газа на водород и твердый углерод (C), что исключает выбросы CO₂. Этот процесс получения «бирюзового» водорода объединяет экономические преимущества традиционной технологии производства водорода и экологические характеристики безуглеродных процессов. Образующийся твердый углерод является товарным продуктом, повышающим рентабельность технологии [4].

Несмотря на имеющийся существенный потенциал технологии пиролиза, она находится на опытно-промышленной стадии разработки. Ее внедрение требует оптимизации множества взаимосвязанных параметров (характеристик реактора, состава катализатора, температуры, расхода сырья и т. п.), что подчеркивается вовлеченностью в исследования крупных промышленных компаний, таких как «Газпром», BASF, Wintershall Dea, Linde и др., а также научно-исследовательских организаций [5].

Исследование, управление и оптимизация сложных технологических процессов требует применения систем поддержки принятия решений (СППР). СППР представляют собой сложные информационно-аналитические инструменты, предназначенные для повышения эффективности и надежности управления в условиях неопределенности основных параметров и их варьирования в ходе процесса. Эти системы играют важную роль в водородной энергетике, где множество факторов и параметров требуют постоянного мониторинга и оптимизации [6]. К основным функциям СППР относят:

- мониторинг и сбор данных;
- анализ и диагностику;
- прогнозирование;
- оптимизацию параметров процесса;
- поддержку принятия решений;
- формирование отчетности и визуализацию;
- организацию обратной связи и обучение системы.

Цель настоящей статьи состоит в разработке концепции СППР для оценки эффективности процесса пиролиза метана на основе применения метода анализа среды функционирования (Data Envelopment Analysis, DEA) для проведения сравнительной оценки различных технологических режимов пиролиза метана и обоснования выбора оптимальных параметров для промышленного внедрения.

Основные технологии производства водорода

Существуют различные технологии производства водорода, каждая из которых имеет свои преимущества, недостатки, ограничения в применении и уровень развития. В настоящее время основную часть в производстве водорода занимают процессы, основанные на использовании ископаемого топлива, одновременно с

чем возрастает внимание к экологически безопасным и возобновляемым технологиям [7]. Ниже рассмотрены ключевые методы получения водорода и их текущее состояние.

Паровой риформинг метана (SMR) является наиболее распространенным промышленным методом получения водорода на данный момент. Процесс включает взаимодействие метана с водяным паром в условиях контакта с катализатором при температуре 800–1000 °С и давлении 2–4 МПа с образованием водорода и оксидов углерода (CO и CO₂), согласно реакциям:



SMR позволяет получать относительно недорогой водород, однако сопровождается прямыми выбросами CO₂ [8]. Для снижения эмиссий углекислого газа разрабатываются и внедряются технологии улавливания, использования и хранения CO₂ (CCUS), что приводит к значительному увеличению себестоимости процесса. Таким образом, основным недостатком SMR остаются значительные выбросы CO₂.

Газификация угля представляет собой процесс превращения угля в синтез-газ при высокой температуре, из которого впоследствии выделяется водород. Этот способ широко используется в странах с дешевым углем, особенно в Китае. Несмотря на это, в глобальном масштабе он применяется в меньших объемах, чем паровой риформинг метана (SMR), и считается одним из самых «грязных» по выбросам CO₂. По оценкам, около 18–20 % мирового водорода производится из угля, при этом в Китае газификация угля может составлять до половины объемов производства водорода. Технологии улавливания углекислого газа (CCS) могут снижать выбросы, но их экономическая эффективность пока ограничена.

Электролиз воды основан на расщеплении молекул воды на водород и кислород под действием электрического тока, что позволяет получать водород высокой степени чистоты. При использовании электроэнергии, вырабатываемой из возобновляемых источников (ВИЭ), данный процесс становится практически безуглеродным, что формирует основу для производства так называемого «зеленого» водорода. Энергозатраты на разложение воды составляют около 286 кДж/моль H₂, что делает электролиз значительно более энергоемким по сравнению с методами на основе ископаемого топлива, такими как паровой риформинг [8]. Вследствие этого себестоимость водорода, получаемого электролизом, на текущем этапе значительно превышает стоимость водорода из традиционных источников. По данным МЭА, на электролиз приходится лишь около 4 % мирового производства водорода [1–3], однако ожидается рост этой доли благодаря развитию ВИЭ, совершенствованию технологий и снижению стоимости электролизеров.

Альтернативные методы включают частичное окисление метана, пиролиз биомассы, фотохимические и биологические процессы, переработку отходов, побочное извлечение водорода из технологических газов, а также пиролиз метана, который рассматривается в качестве одного из перспективных направлений. Указанные технологии находятся на различных стадиях – от лабораторных исследований до пилотных промышленных испытаний и в настоящее время формируют лишь незначительную долю в общемировой структуре производства водорода.

Таким образом, несмотря на доминирование технологий, базирующихся на использовании ископаемого сырья, расширение доли низкоуглеродного водорода и переход к климатически нейтральным схемам его производства остаются приоритетными задачами мировой энергетической стратегии.

Технология процесса пиролиза метана

Пиролиз метана рассматривается в качестве одного из перспективных направлений получения низкоуглеродного водорода. В результате процесса пиролиза из метана образуется водород и твердый углерод:



В настоящее время данная технология не получила широкого промышленного распространения. Ключевым преимуществом пиролиза является отсутствие прямых выбросов CO_2 , поскольку углерод, содержащийся в метане, выделяется в твердой фазе. Благодаря этому отпадает необходимость в дорогостоящих системах улавливания и хранения CO_2 (технология CCUS), применяемых для процессов парового риформинга (SMR) и газификации.

По углеродному следу пиролиз метана приближается к «зеленому» водороду, несмотря на использование ископаемого сырья – природного газа. Дополнительным преимуществом является значительно более низкая энергоемкость процесса по сравнению с электролизом: в идеальных условиях требуется около 37,5 кДж на получение 1 моль H_2 . Это объясняется возможностью эффективного использования избыточной возобновляемой или ядерной энергии для нагрева реактора, особенно в условиях безуглеродных энергетических систем будущего.

Важным преимуществом пиролиза является ценный побочный продукт – твердый углерод, который может использоваться в промышленности. При высоком качестве углерода его реализация может частично компенсировать издержки на производство водорода [9]. При наличии устойчивого рынка сбыта углерода пиролиз может конкурировать по себестоимости с традиционным паровым риформингом с улавливанием CO_2 [10]. Кроме того, пиролиз хорошо интегрируется в существующую газовую инфраструктуру: природный газ может транспортироваться по трубопроводам до распределительных установок, где непосредственно на месте производится водород без выбросов углекислого газа [9]. Такой подход позволяет эффективно использовать имеющиеся активы газовой отрасли для постепенного перехода к водородной экономике.

С учетом вышеуказанных факторов пиролиз метана представляет собой перспективную технологию производства водорода благодаря экологическим и потенциально экономическим преимуществам [10]. Он способен обеспечить низкоуглеродный водород для трудно декарбонизируемых отраслей с использованием доступного сырья – природного газа [11]. Это делает пиролиз привлекательной альтернативой в переходный период на пути к климатической нейтральности. Производство водорода с помощью пиролиза метана соответствует российским и глобальным направлениям развития водородной энергетики [12–15].

Однако для полного раскрытия потенциала пиролизного способа генерации водорода требуется его дальнейшее технологическое развитие [16–19]. В частности, возникает необходимость в разработке эффективной системы поддержки принятия решений (СППР), способной комплексно анализировать различные режимы пиролиза и обосновывать выбор оптимальных параметров с учетом техно-

логической эффективности и экономических затрат. Различные варианты реализации процесса пиролиза метана могут значительно отличаться по ряду технологических характеристик, что требует системного подхода к их оценке и выбору.

Алгоритм функционирования СППР

Логике функционирования СППР определяет разработанный авторами алгоритм, представленный на рис. 1. Структура алгоритма формируется совокупностью компонентов, каждый из которых реализует строго определенные функции в процессах обработки данных и формирования управленческих решений и рекомендаций. В данном разделе рассматриваются основные элементы алгоритма, их назначение и взаимосвязь, обеспечивающие эффективную работу системы.

Блок сбора и подготовки данных играет ключевую роль в системе поддержки принятия решений (СППР) при управлении процессом пиролиза. Основная задача данного блока заключается в сборе, верификации, анализе и структурировании информации, необходимой для выбора оптимального технологического режима, повышения эффективности работы реактора и обеспечения стабильности процесса.

Данный блок формирует исходную информационную базу, которая служит основой для функционирования остальных компонентов алгоритма, снижая уровень неопределенности при принятии управленческих решений. К основным функциям блока относятся:

- сбор информации из различных источников;
- фильтрация и верификация данных;
- подготовка данных для дальнейшей обработки.

После прохождения процедур верификации структурированные данные о составе исходного сырья и параметрах процесса передаются в блок выбора технологических решений.

Блок экспериментальных данных обеспечивает сбор и обработку информации, получаемой в результате лабораторных исследований и промышленных испытаний. Такие данные используются для верификации технологических гипотез, оптимизации параметров процесса пиролиза, оценки устойчивости катализаторов к деградации и выбора наиболее эффективных режимов работы реактора.

Основная цель блока – обеспечить СППР актуальными данными, позволяющими учитывать реальные условия эксплуатации, корректировать теоретические расчеты и адаптировать технологию к нестандартным ситуациям. Информация, поступающая в данный блок, является результатом лабораторных исследований, промышленных тестов и физико-химического анализа.

Блок базы данных (БД) обеспечивает хранение, структурирование и предоставление информации, необходимой для анализа, выбора стратегий управления, настройки параметров и контроля функционирования реактора. Данный блок представляет собой централизованную базу данных, включающую исторические, теоретические и экспериментальные сведения, которые используются алгоритмом СППР для прогнозирования и корректировки условий технологического процесса.

Основные функции БД заключаются в хранении данных и управлении ими (в блок БД собирается и структурируется информация), обновлении и расширении БД (новые данные добавляются после каждого запуска процесса, а историческая информация корректируется с учетом новых экспериментов); устаревшие или ошибочные данные удаляются или заменяются актуальными.

Блок выбора технологии каталитического пиролиза предназначен для определения наиболее целесообразного метода переработки исходного сырья на основе данных, поступающих из ранее описанных блоков. Основные функции блока:

- анализ исходных данных с целью формирования различных сценариев реализации процесса, каждый из которых соответствует заданным условиям и целевым показателям;
- предоставление технологических альтернатив, включающих несколько вариантов реализации процесса пиролиза метана, с учетом их преимуществ и ограничений;
- оценка экономической эффективности посредством анализа затрат на реализацию каждого варианта, включая стоимость сырья, энергопотребление, расход катализаторов и вспомогательных материалов, что позволяет исключить наименее выгодные сценарии и сосредоточиться на технологиях, обеспечивающих максимальную производительность при минимальных издержках.

Определение цели управления непосредственно влияет на выбор технологии, параметров процесса и методов очистки конечных продуктов.

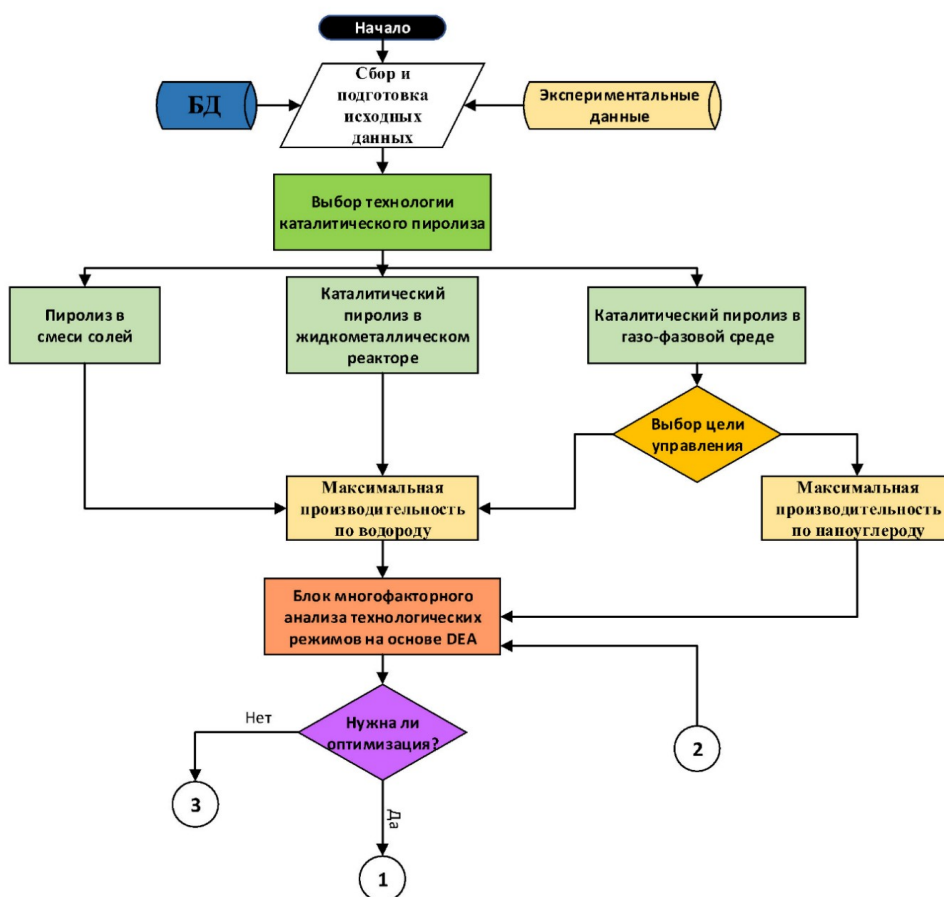


Рис. 1. Алгоритм функционирования СППР

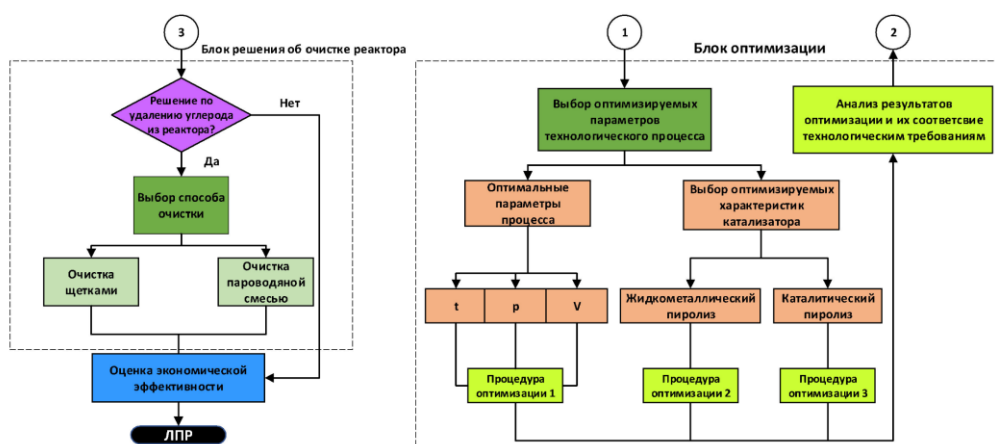


Рис. 1. Алгоритм функционирования СППР (продолжение)

Блок выбора цели управления предназначен для задания целевых ориентиров, которых следует достичь в рамках технологического процесса, что формирует направление работы последующих модулей системы. Выбор цели управления непосредственно влияет на выбор технологии, параметров процесса и способов очистки продуктов. Одной из основных функций блока является определение целей управления, в качестве которых могут рассматриваться:

- максимизация производительности по целевому продукту (водороду либо углеродным материалам высокой добавленной стоимости);
- минимизация удельных эксплуатационных затрат (энергопотребления, расхода сырья);
- оптимизация по комплексному технико-экономическому критерию.

Выбор конкретного критерия формирует вектор оптимизации и предопределяет характер рекомендаций, генерируемых СППР.

Блок многофакторного анализа технологических режимов с использованием метода анализа среды функционирования (DEA) обеспечивает комплексную оценку эффективности процесса пиролиза метана. Данный метод применяется для сравнительной оценки множества альтернативных технологических решений на основе совокупности параметров, характеризующих их работу. Использование метода DEA позволяет выявить эффективные технологические сценарии, определить потенциал повышения результативности менее эффективных вариантов, а также обосновать выбор оптимальных решений с позиций ресурсосбережения, экологической устойчивости и экономической целесообразности.

Метод DEA базируется на решении задач линейного программирования, что обеспечивает получение относительных количественных оценок эффективности анализируемых объектов. Применение данного подхода дает возможность осуществлять многофакторный сравнительный анализ сложных технологических процессов, характеризующихся широким спектром разнородных количественных показателей, без необходимости априорного задания весовых коэффициентов, что делает его особенно востребованным в задачах оптимизации режимов пиролиза метана.

Блок оптимизации выполняет функцию анализа текущих параметров процесса и определения необходимости их последующей оптимизации для достиже-

ния поставленных целей управления. Решения, принимаемые на данном этапе, существенно влияют на работу всей системы, поскольку задают выбор режима оптимизации, направления корректировки параметров и инициируют процедуры их оптимизации.

К основным функциям блока оптимизации относятся:

- анализ текущих параметров процесса и проверка их соответствия установленным целевым функциям;
- сравнение фактических значений параметров с оптимальными или нормативными значениями, а также оценка степени их отклонения от заданных показателей;
- принятие решения о необходимости оптимизации на основании анализа отклонений и оценки эффективности с точки зрения ресурсных затрат и инициализация процедур оптимизации.

Необходимо отдельно отметить, что предусмотренный в рамках функционирования блока вызов процедур оптимизации различных параметров процесса, основанный на результатах многофакторного анализа, позволяет повышать эффективность работы технологической системы. Оптимизационные подходы реализуются как на этапе выявления наилучших сценариев, так и при последующей корректировке параметров для достижения заданных целевых показателей.

Блок очистки реактора от углеродных отложений предназначен для анализа состояния реактора и формирования сигналов о необходимости удаления углеродных отложений, которые могут накапливаться на стенках реактора, поверхности катализатора или в жидкометаллической среде. Подобные отложения приводят к снижению эффективности процесса и могут вызывать загрязнение системы. Перед принятием решения о проведении очистки в данном блоке осуществляется сбор и анализ данных о степени коксообразования и состоянии катализатора, включая информацию, получаемую на основе показаний газоанализатора. Если на основе проведенного анализа установлена необходимость удаления углерода, система формирует рекомендации по выбору методов очистки, предлагая механические или химические подходы, каждый из которых обладает своими технологическими преимуществами и ограничениями. Таким образом, блок формирует рекомендации по своевременному вмешательству в технологический процесс, предоставляя обоснованный выбор способа очистки в зависимости от характера отложений и состояния оборудования.

Блок оценки экономической эффективности отвечает за проведение анализа финансовой целесообразности выбранной технологии и режимов работы процесса. Основная задача данного блока заключается в оценке степени экономической эффективности конкретного способа реализации технологии пиролиза исходя из соотношения затрат и прогнозируемой прибыли, а также в предоставлении данных для принятия окончательного решения лицом, принимающим решение (ЛПР), относительно продолжения или корректировки технологического режима.

Перед проведением расчетов в блок поступает информация, собранная на предыдущих этапах алгоритма. На основе этих данных осуществляется вычисление показателей затрат на сырье, энергоресурсы, катализаторы и процедуры очистки, а также сопоставление их с ожидаемой выручкой от реализации целевых продуктов: водорода и углеродных материалов с высокой добавленной стоимостью. После расчетов проводится анализ полученных результатов. Если процесс демонстрирует достаточную экономическую эффективность, то система пе-

реходит к завершающему этапу работы. В случае выявления неэффективности предлагаются варианты повторного расчета или корректировки параметров. Итоговая экономическая оценка служит основанием для ЛПП о признании выбранного режима экономически эффективным, его оперативной корректировке или возврате к предыдущим блокам алгоритма с целью поиска более выгодной технологической альтернативы.

Блок многофакторного анализа на основе DEA-метода

Блок многофакторного анализа является ключевым компонентом разработанной СППР, предназначенным для оценки относительной эффективности различных технологических режимов или конфигураций процесса пиролиза метана. В качестве основного инструмента анализа в данном блоке используется метод анализа среды функционирования (англ. Data Envelopment Analysis – DEA).

DEA-метод. Согласно DEA-методу, оценка эффективности f одномерного объекта сравнения, представляющего DMU (с англ. Decision Making Unit – единица принятия решения) с одним входом X и одним выходом Y , может быть найдена как отношение положительного результата функционирования объекта Y к затраченному на достижение этого результата ресурсу X [20]:

$$f = \frac{Y}{X}. \quad (4)$$

Оценка эффективности f одномерных производственных объектов сравнения, рассчитываемая на основе выражения (4), принимает исключительно положительные значения в интервале от 0 до 1. Метод DEA позволяет распространить соотношение (4) на случай многомерных объектов, что позволяет формировать сравнительные показатели эффективности DMU, характеризующихся вектором входных параметров X и вектором выходных параметров Y , путем сопоставления достигнутых результатов с затраченными на это ресурсами [21]. Рассмотрим произвольный многомерный объект сравнения, который имеет m входов и k выходов, как представлено на рис. 2.

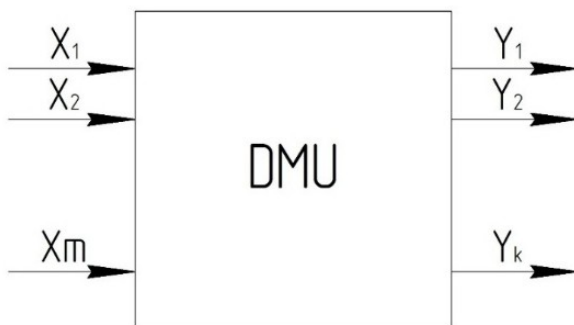


Рис. 2. Многомерный объект сравнения

В качестве входных параметров $X_1, X_2, \dots, X_m$ рассматриваются разнообразные задействованные в осуществлении производственно-технологического процесса ресурсы. Они могут характеризовать материальные, технологические, информационные, трудовые, сырьевые, капитальные и другие ресурсы. Входные параметры подбираются так, чтобы уменьшение каждого из них увеличивало

показатель суммарной эффективности f . Повышение затрат приводит к снижению эффективности анализируемых объектов сравнения, поэтому для них всегда выполняется условие

$$\frac{\partial f(X_1, X_2, \dots, X_m)}{\partial X_l} < 0, \quad l = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

В качестве выходных параметров $Y_1, Y_2, \dots, Y_k$ можно принять различные показатели, которые характеризуют разнообразные аспекты результатов деятельности: производственно-технологические (объем и качество конечной продукции, надежность, долговечность), экономические (прибыль, доход, рентабельность), рыночные (емкость рынка, число связей с контрагентами), управленческие (устойчивость, управляемость), экологические (чистота производств) и другие. Выходные параметры могут иметь существенно отличающиеся между собой значения, быть несвязанными и несопоставимыми, разнородными по смыслу и единицам измерения.

Выходные параметры выбираются таким образом, чтобы каждый из них отражал положительный вклад в общий показатель эффективности f . При этом необходимо, чтобы выходные параметры имели численные значения и увеличение любого из Y_i приводило к росту совокупного показателя эффективности f :

$$\frac{\partial f(Y_1, Y_2, \dots, Y_k)}{\partial Y_i} > 0, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (6)$$

В соответствии с моделью CCR метода DEA численное значение показателя эффективности f для каждого из N объектов определяется путем максимизации f на множестве значений весовых коэффициентов u, v , принадлежащих области определения G . Задача определения для j -го объекта сравнения оценки обобщенного показателя сравнительной эффективности f_j и соответствующих весовых коэффициентов u_{ij} и v_{lj} формулируется следующим образом:

$$f_j = \frac{u_{1j} \cdot Y_{1j} + u_{2j} \cdot Y_{2j} + u_{3j} \cdot Y_{3j} + \dots + u_{kj} \cdot Y_{kj}}{v_{1j} \cdot X_{1j} + v_{2j} \cdot X_{2j} + v_{3j} \cdot X_{3j} + \dots + v_{mj} \cdot X_{mj}} \rightarrow \max_{u_{ij}, v_{lj} \in G} \quad (7)$$

при наличии ограничений:

$$\frac{u_{1j} \cdot Y_{1j} + u_{2j} \cdot Y_{2j} + \dots + u_{kj} \cdot Y_{kj}}{v_{1j} \cdot X_{1j} + v_{2j} \cdot X_{2j} + \dots + v_{mj} \cdot X_{mj}} \leq 1, \quad \forall \left(j = \overline{1, N}; i = \overline{1, k}; l = \overline{1, m}; \right. \\ \left. u_{ij} > 0; v_{lj} > 0 \right), \quad (8)$$

где u_{ij} и v_{lj} – весовые коэффициенты, характеризующие относительный вклад каждого из выходных и входных параметров в общий показатель эффективности.

Система соотношений (7) и (8) представляет собой N задач математического программирования (ЗМП), решение которых позволяет вычислить относительные показатели эффективности f_j для каждого из N объектов сравнения в виде численных оценок, ранжированных на единичном интервале $[0, 1]$, а также определить соответствующие весовые коэффициенты u_{ij} и v_{lj} ($i = 1, 2, \dots, k, l = 1, 2, \dots, m$) в функционале (7) [20–22].

Модель Super-efficiency (суперэффективности, сокращенно SE) применяется в случаях, когда несколько сравниваемых объектов находятся на границе эффективности, т. е. получают оценки эффективности $f_n = 1$, и требуется определить наилучший объект сравнения в анализируемой группе. Для этого применяется подход, основанный на модели SE DEA-метода, суть которого

заключается в исключении из ограничений (8) эффективных объектов с оценкой, равной единице.

Формулировка ЗМП на основе модели SE для получения сравнительных оценок эффективности объектов аналогична базовой CCR модели, однако в данном случае задача определения эффективности объектов сравнения сводится к максимизации показателя эффективности при исключении из рассмотрения указанных выше ограничений:

$$S_j = \frac{\bar{u}_{1j}Y_{1j} + \bar{u}_{2j}Y_{2j} + \dots + \bar{u}_{kj}Y_{kj}}{\bar{v}_{1j}X_{1j} + \bar{v}_{2j}X_{2j} + \dots + \bar{v}_{mj}X_{mj}} \rightarrow \max_{(\bar{u}_{ij}, \bar{v}_{lj}) \in \bar{G}_j}; \quad (9)$$

$$\frac{\bar{u}_{1j}Y_{1j} + \bar{u}_{2j}Y_{2j} + \dots + \bar{u}_{kj}Y_{kj}}{\bar{v}_{1j}X_{1j} + \bar{v}_{2j}X_{2j} + \dots + \bar{v}_{mj}X_{mj}} \leq 1, \quad \forall \left(\begin{array}{l} j = \overline{1, N}; \quad j \neq n; \quad i = \overline{1, k}; \\ l = \overline{1, m}; \quad \bar{u}_{ij} > 0; \quad \bar{v}_{lj} > 0 \end{array} \right). \quad (10)$$

Результатом решения ЗМП (9) и (10) являются сравнительные оценки, принадлежащие интервалу $[0, \infty)$. При этом объект сравнения, получивший максимальную оценку эффективности, может считаться наилучшим в группе сравнения при заданных условиях. Неэффективные по базовой модели CCR объекты с оценкой менее 1 сохраняют свои сравнительные оценки и в модели SE [23].

Обоснование использования DEA-метода в СППР. Ключевым преимуществом метода DEA является отсутствие необходимости заранее задавать функциональную зависимость между входами и выходами. Наиболее эффективным оказывается применение DEA-метода в задачах, в которых зависимость обобщенного критерия эффективности от частных показателей или параметров либо неизвестна, либо носит слишком сложный или нелинейный характер.

DEA-модели позволяют использовать одновременно множество входных и выходных параметров, выраженных в различных единицах измерения, без необходимости их предварительного нормирования или агрегирования. При этом оценка эффективности формируется на основе сравнения с «лучшими вариантами», то есть с наиболее эффективными DMU, которые формируют эффективную границу.

DEA-метод также характеризуется высокой степенью наглядности и интерпретируемости, что делает его удобным, эффективным и универсальным инструментом для комплексной количественной оценки эффективности в тех случаях, когда объекты исследования [24]:

- работают в идентичных условиях;
- потребляют множество различных ресурсов;
- производят несколько различных результатов;
- имеют слабую или неизвестную зависимость между входами и выходами.

Задачи блока многофакторного анализа. Основная задача данного расчетного блока СППР, основанного на решении ЗМП, сформулированных в соответствии с моделями DEA-метода, заключается в проведении сравнительной оценки относительной технической эффективности различных технологических режимов или экспериментальных условий (DMU) реализации процесса пиролиза метана. Это позволяет системе предоставлять пользователю обоснованные рекомендации и технологические решения.

Для иллюстрации функциональных возможностей СППР рассмотрим следующую формализацию задачи сравнения. На основе экспериментальных данных, где каждый замер, характеризующийся уникальными значениями входных и выходных параметров, трактуется как отдельная единица принятия решений (DMU), расчетный модуль DEA, интегрированный в состав СППР, должен реализовать следующие функции:

- оценить относительную эффективность каждого DMU и выполнить их ранжирование по степени эффективности;
- идентифицировать наиболее эффективные DMU, которые могут быть использованы в качестве ориентиров для наименее эффективных объектов;
- используя модель суперэффективности, выявить лидирующие DMU среди наиболее эффективных вариантов;
- для неэффективных DMU определить величину отклонения от эталонных показателей и обозначить потенциальные направления оптимизации;
- рассчитать целевые значения входных и выходных параметров, на основе которых формируются конкретные рекомендации по корректировке режимов функционирования процесса.

Выполнение перечисленных функций в составе СППР обеспечивает не только автоматизированную классификацию экспериментальных или промышленных условий по их относительной эффективности, но и формирование для пользователя научно обоснованных рекомендаций, направленных на потенциальную оптимизацию процесса пиролиза метана с целью повышения его производительности и снижения ресурсоемкости. Таким образом, результаты сравнительной количественной оценки, осуществляемой расчетным модулем на основе DEA-анализа, формируют информационную основу для поддержки принятия управленческих решений, касающихся выбора наиболее перспективных технологических режимов.

Реализация расчетного модуля блока многофакторного анализа. Для реализации расчетного блока СППР, основанного на методе DEA, используются данные, полученные в ходе серии лабораторных экспериментов по пиролизу метана. Блок оперирует актуальными данными, поступающими из блока сбора и подготовки исходных данных.

Каждый замер в течение серии экспериментов характеризуется набором технологических данных. Совокупность таких замеров формирует исходный массив данных, представленных в виде табл. 1, где строки соответствуют отдельным DMU, а столбцы – измеренным значениям технологических параметров.

На основе представленных данных формируется набор входных (затрачиваемые ресурсы) и выходных (результаты процесса) параметров, отвечающих условиям (5), (6) при формировании оценки эффективности. Этот этап является важнейшим этапом DEA-анализа. Для процесса пиролиза метана в зависимости от конкретной цели анализа могут быть выбраны параметры, представленные в табл. 2.

На основе представленных данных формулируется задача математического программирования, лежащая в основе метода DEA. Имеющиеся данные позволяют сформулировать задачу многофакторного анализа влияния технологических параметров процессов пиролиза метана на показатели эффективности процесса пиролиза метана как ЗМП. Входные и выходные параметры представлены на рис. 3.

Таблица 1

Экспериментальные данные для блока сбора и подготовки данных

Состав и вес катализатора	№ замера	Температура в зоне реакции, °С	Давление в зоне реакции, атм.	Расход метана, л/ч	Время эксп., мин	CH ₄ , %	H ₂ , %	Конверсия CH ₄ , %
82 Ni/8 Cu/10 Al ₂ O ₃ , 100 мг	1	650	3	10	0	85.1	15,01	14,09
	2	650	3	10	15	86.2	15,05	13,08
	3	650	3	10	30	85.9	15,07	14,1
...	...	...	...	...	...	...	...	...
90 Ni/10 Al ₂ O ₃ , 100 мг	544	750	3	10	120	53,7	43,3	46,3
	545	750	3	10	135	37,4	58,8	62,6
	546	750	3	10	150	37,8	58,3	62,2

Таблица 2

Формирование набора входных и выходных параметров для DEA-анализа

№	Наименование параметра	Обозначение / единица измерения	Тип параметра	Обозначение параметра
1	Температура в реакционной зоне	°С	Вход	X1
2	Давление в реакционной зоне	атм	Вход	X2
3	Расход метана	л/ч	Вход	X3
4	Время эксперимента	мин	Вход	X4
5	Цена катализатора	руб/кг	Вход	X5
6	Масса катализатора	г	Вход	X6
7	Конверсия CH ₄	%	Выход	Y1
8	Выход H ₂ на 1 г катализатора	(л/ч)/г	Выход	Y2



Рис. 3. Многофакторный анализ процесса пиролиза метана

После того как блок многофакторного анализа СППР выполнил DEA-анализ, система представляет пользователю результаты в наглядном виде и сопровождает их интерпретацией. На рис. 4 представлены оценки эффективности, полученные на основе решения ЗМП (9), (10).



Рис. 4. Пример получения оценок эффективности

После получения оценок эффективности система поддержки принятия решений (СППР) приступает к выполнению комплекса действий, направленных на их последующий анализ и выработку рекомендаций для принятия решений.

Ранжирование режимов по эффективности. После расчета DEA-оценок в блоке многофакторного анализа СППР формируется ранжированный список экспериментальных режимов (DMU). Наивысший уровень эффективности продемонстрировал DMU184, для которого значение оценки по модели SE составляет 1,73. Это означает, что данный режим является наиболее эффективным среди анализируемых объектов и классифицируется системой как оптимальный.

Следующим по уровню эффективности является DMU149 с оценкой 1,33, что дает основание рассматривать его как высокоэффективный. DMU 184 и 149 сохраняются в системе как эталонные, их входные и выходные параметры (X1-X5, Y1-Y2) используются в качестве ориентиров для последующих сравнений, расчетов и рекомендаций. Результаты сравнительного анализа показывают, что оба режима демонстрируют высокий уровень эффективности, однако при режиме DMU184 достигаются лучшие показатели при меньшем времени реакции, что может быть обусловлено более высокой активностью применяемого катализатора. Это позволяет сформировать обоснованные предпосылки для выделения предпочтительного типа катализатора и оптимальных технологических условий, которые могут быть использованы как при масштабировании процесса, так и при разработке стандартных технологических регламентов.

Анализ неэффективных режимов и формирование рекомендаций по их совершенствованию. Для DMU, характеризующихся низкими значениями показателей эффективности, осуществляется анализ степени отклонения от эталонной эффективной границы. Например, режим DMU68 получил оценку 0,09, что значительно ниже границы эффективности. Даже после оптимизации вероятность достичь границы эффективности остается крайне низкой, поэтому пользователю

рекомендуется исключить режим из дальнейшего рассмотрения. В подобных случаях система классифицирует данный технологический режим как неэффективный и формирует рекомендации по пересмотру ключевых параметров процесса, включая выбор катализатора и условий проведения реакции. Для повышения эффективности DMU68 система предлагает ориентироваться на технологические показатели режимов DMU149 и DMU184, а также рассматривает возможность замены используемого катализатора. При выявлении устойчиво низких показателей эффективности для всех DMU, связанных с определенным видом катализатора, алгоритм расчетного блока формирует соответствующее предупреждение, акцентируя внимание пользователя на данном аспекте. Окончательное решение относительно корректирующих действий принимается пользователем СППР.

СППР также рассчитывает целевые значения входных параметров для повышения эффективности недостаточно результативных режимов. Например, если текущая температура процесса (X_1) составляет 550 °С, система может рекомендовать ее увеличение до $X'_1 = 630$ °С, ориентируясь на значение температуры в эталонных режимах, при условии сохранения остальных параметров на неизменном уровне, если они уже соответствуют целевым значениям.

В другом случае, например для DMU23 с оценкой 0,85, потенциал повышения эффективности составляет около 15 %, что указывает на высокую близость к границе эффективности и техническую реализуемость предложенных мер по совершенствованию режима.

Сравнительный анализ технологий. При наличии в базе данных других типов пиролиза метана (например, плазменного пиролиза или пиролиза в расплавах солей), СППР может выполнять сравнительный анализ технологий при условии сопоставимости входных и выходных параметров. Расчетный блок DEA формирует обобщенные оценки и позволяет пользователю определить, какая из технологий демонстрирует более высокую эффективность в рамках установленных критериев оценки эффективности.

Визуализация результатов и взаимодействие с ЛПР. Результаты анализа, выполняемого расчетным модулем, могут быть представлены в виде таблиц, графиков распределения значений эффективности или в другом виде, например в виде диаграмм с отображением минимальных, максимальных и средних оценок и т. д. СППР предоставляет пользователю интерактивный интерфейс, позволяющий выбирать конкретные DMU для детального просмотра их характеристик, проводить сопоставление параметров с эталонными режимами, моделировать сценарии изменения технологических условий и получать рекомендации по оптимизации процессов.

Формирование рекомендаций и направлений для дальнейших исследований. Анализ параметров наиболее эффективных режимов, выполняемый СППР, позволяет выявить ключевые сочетания факторов, влияющих на результат, например повышенные температуры при умеренном расходе метана, оптимальное соотношение массы катализатора и времени реакции или более низкие температуры, обеспечивающие длительную эффективную работу катализатора, как показано в работе [25].

При использовании СППР для планирования экспериментов система способна выявить области параметров, для которых граница эффективности еще не достигнута или которые недостаточно охвачены в текущей выборке. Это создает

предпосылки для целенаправленного планирования новых серий экспериментов, ориентированных на достижение максимальной эффективности.

Расчетный блок СППР, реализующий метод DEA, не только обеспечивает количественную оценку эффективности, но и формирует конкретные, интерпретируемые и практически применимые рекомендации. В рамках функционирования системы пользователь получает возможность определить:

- какие текущие режимы работы являются наиболее эффективными;
- какова степень неэффективности альтернативных режимов относительно эталонных показателей;
- за счет каких изменений каких входных параметров можно повысить эффективность;
- какие технологические режимы служат ориентиром для оптимизации;
- какие варианты реализации технологии пиролиза демонстрируют более высокую эффективность;
- какой тип катализатора является предпочтительным для достижения целевых показателей.

Таким образом, применение метода DEA, реализованного в составе СППР, позволяет получить научное обоснование для принятия технических решений, направленных на повышение эффективности и устойчивости процессов пиролиза метана.

Выводы

Проведенное исследование посвящено разработке алгоритма СППР для анализа и оптимизации сложного, многофакторного процесса пиролиза метана – перспективной технологии производства низкоуглеродного водорода и ценного углерода.

В ходе проведенного исследования обоснована актуальность разработки системы поддержки принятия решений (СППР) для решения задач оптимизации процесса пиролиза метана в условиях глобального энергетического перехода и усиливающихся требований к декарбонизации промышленности. Показано, что высокая степень сложности данного процесса, обусловленная значительным числом управляемых и возмущающих параметров, а также необходимостью нахождения технологических компромиссов, предопределяет целесообразность применения специализированных интеллектуальных инструментов поддержки принятия решений.

В рамках работы определены ключевые технологические параметры, оказывающие существенное влияние на эффективность протекания процесса пиролиза. Разработана концепция СППР, включающая совокупность функциональных блоков, подробно описаны задачи каждого из них и логика их взаимосвязи. В качестве методологической основы расчетного модуля блока многофакторного анализа обоснован выбор метода DEA, обладающего существенными преимуществами для сравнительной оценки группы объектов.

Описано применение модели суперэффективности DEA-метода для формулировки ЗМП с целью анализа относительной эффективности экспериментальных технологических режимов, полученных в лабораторных условиях. Показано, что использование данного подхода позволяет не только выявлять неэффективные режимы и формировать целевые значения параметров для их последующей корректировки, но и осуществлять ранжирование эффективных решений, выде-

ля тем самым наиболее результативные режимы для последующего тиражирования и масштабирования.

Разработанная СППР, которая может быть использована как в научных исследованиях, так и на этапах опытно-промышленной эксплуатации, представляет универсальный инструмент многофакторного анализа, способный значительно повысить технологическую и экономическую эффективность процесса пиролиза метана, способствуя его интеграции в структуру перспективной водородной энергетики.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2024. Paris, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.
2. Казаринов А.В., Деревянов М.Ю., Плишивцева 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. EDN: AQOBSX.
3. Казаринов А.В., Деревянов М.Ю., Плишивцева Ю.Э. Анализ развития низкоуглеродных технологий по производству водорода // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2023. № 2. С. 45–56.
4. Hofbauer P. et al. Methane Pyrolysis in a Liquid Metal Bubble Column Reactor for CO₂-Free Production of Hydrogen // Energies. 2023. Vol. 16, № 20. P. 7058. DOI: 10.3390/en16207058. EDN: PPPJO.
5. Газпром. Чистый водород из природного газа. 2020. URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/reports/2020/pure-hydrogen>.
6. Блюмин С.Л., Шуйкова И.А. Модели и методы принятия решений в условиях неопределенности. Липецк: ЛГТУ, 2001. 210 с.
7. Tenti E., Morales R. et al. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. Irena, 2018. 76 p.
8. Ghosh A., Balsara V. Hydrogen production using advanced reactors by steam methane reforming: A review // Frontiers in Thermal Engineering. 2023. Vol. 3. P. 112–125. DOI: 10.3389/ftther.2023.1143987. EDN: KOQFYW.
9. Hosseini S., Farsi M., et al. Methane pyrolysis for hydrogen production: Navigating the path to a net zero future // Energy & Environmental Science. 2025. Vol. 18. P. 45–67.
10. Upadhyay G., Kim H.-M. et al. Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Hydrogen Production Processes: Turquoise Hydrogen vs. Steam Methane Reforming // Energies. 2022. Vol. 15, № 22. P. 8679. DOI: 10.3390/en15228679. EDN: CYHWWJ.
11. Кудинов И.В., Косарева Е.А., Долгих В.Д. и др. Получение водорода методом термokatалитического разложения метана: современные достижения (обзор) // Нефтехимия. 2025. Т. 65. С. 10–34. DOI: 10.1134/S0965544124080176. EDN: GXENHA.
12. Правительство Российской Федерации. Концепция развития водородной энергетики в Российской Федерации. М., 2021. 32 с.
13. Правительство Российской Федерации. Распоряжение от 09.06.2020 № 1523-р «Об утверждении Энергетической стратегии Российской Федерации на период до 2035 года». М., 2024.
14. Vivanco-Martín B., Iranzo A. Analysis of the European Strategy for Hydrogen: A Comprehensive Review // Energies. 2023. Vol. 16, № 9. P. 3866. DOI: 10.3390/en16093866. EDN: EMADGS.
15. U.S. Department of Energy. U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap. Washington, 2023. 89 p.
16. Кудинов И.В., Великанова Ю.В., Ненашев М.В. и др. Пиролиз метана в расплавленных средах для получения водорода: обзор современных достижений // Нефтехимия. 2023. Т. 63, № 5. С. 627–639. DOI: 10.31857/S0028242123050015. EDN: SBYGPE.
17. Preston J., Liu L. et al. Solid carbon co-products from hydrogen production by methane pyrolysis: Current understandings and recent progress // Carbon. 2023. Vol. 210. P. 45–60.
18. Dolgikh V., Pashin A. Experimental research of the process of methane pyrolysis in a layer of liquid tin aiming to get hydrogen // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2022. Vol. 1070. P. 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/1070/1/012017. EDN: VKHVWV.

19. *Kudinov I.V., Pimenov A.A. et al.* A theoretical and experimental study on hydrodynamics, heat exchange and diffusion during methane pyrolysis in a layer of molten tin // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, № 12. P. 8765–8778. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.138. EDN: BPAKJI.
20. *Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.* Measuring the efficiency of decision making units // *European Journal of Operational Research*. 1978. Vol. 2, № 6. P. 429–444. DOI: 10.1016/0377-2217(78)90138-8.
21. *Charnes A., Cooper W.W., Lewin A.Y., Seiford L.M.* *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications*. Dordrecht: Springer, 1994. 513 p.
22. *Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W.* Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis // *Management Science*. 1984. Vol. 30, № 9. P. 1078–1092. DOI: 10.1287/mnsc.30.9.1078.
23. *Chen Y., Du J.* Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis // *Data Envelopment Analysis: International Series in Operations Research & Management Science* / Ed. J. Zhu. Boston: Springer, 2015. Vol. 221. P. 381–414. DOI: 10.1007/978-1-4899-7553-9_14.
24. *Pleshivtseva Y., Rapoport E., Nacke B. et al.* Design and control of electrotechnological systems: A multi-objective optimization approach // *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2019. Vol. 39, № 1. P. 239–247. DOI: 10.1108/COMPEL-11-2019-0454. EDN: UYETTQ.
25. *Казаринов А.В.* Сравнительный анализ эффективности технологии каталитического пиролиза метана для производства водорода на основе DEA метода // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2024. Т. 32. № 3. С. 46–62. DOI: 10.14498/tech.2024.3.4.

Статья поступила в редакцию 09.07.2025

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF METHANE PYROLYSIS TECHNOLOGY WITHIN A DECISION SUPPORT SYSTEM

A.V. Kazarinov, Ya.Yu. Kornilov¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: artemrus987@gmail.com, yaroslav260801@gmail.com

Abstract. *This paper presents the development of a concept and operating algorithm for a decision support system (DSS) designed for comprehensive analysis and identification of directions for improving the methane pyrolysis process. The authors propose a modular DSS architecture whose key element is a multifactor-analysis module based on the super-efficiency Data Envelopment Analysis (DEA) model. This module evaluates and ranks various technological operating modes of methane pyrolysis. Applying DEA models enables the identification of efficient operating modes and, crucially, the pinpointing of those with the greatest potential for practical deployment owing to their technological robustness. The study analyzes the influence of technological parameters on methane-conversion degree and hydrogen productivity in the pyrolysis process, and demonstrates how the proposed approach can rank efficient modes and generate well-grounded recommendations for their further optimization. The developed DSS can serve as an effective tool for enhancing the technological and economic efficiency of methane pyrolysis, facilitating its industrial adoption and strengthening its competitiveness as an environmentally oriented hydrogen-production method. The results contribute to the advancement of methodologies for managing complex technological systems.*

Keywords: *hydrogen production; decarbonization; catalytic pyrolysis; decision support system; Data Envelopment Analysis; efficiency.*

REFERENCES

1. International Energy Agency (IEA). Global Hydrogen Review 2024. Paris, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2024>.
2. Kazarinov A.V., Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E. Klassifikatsiya i analiz lokalizatsii proektov po proizvodstvu vodoroda [Classification and Analysis of the Localization of Hydrogen-Production Projects] // Sistemy analiza i obrabotki dannyh. 2022. № 4(88). P. 31–48. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-4-31-48. (In Russian)
3. Kazarinov A.V., Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E. Analiz razvitiya nizkouglerodnykh tekhnologiy po proizvodstvu vodoroda [Analysis of the Development of Low-Carbon Technologies for Hydrogen Production] // Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki. 2023. № 2. P. 45–56. (In Russian)



© The Author(s), 2025

¹ Artyom V. Kazarinov, Postgraduate Student, Dept. of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.

Yaroslav Yu. Kornilov, Master, Dept. of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.

This work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (Project No. FSSE-2024-0014) as part of the state assignment of Samara State Technical University.

4. Hofbauer P. et al. Methane Pyrolysis in a Liquid Metal Bubble Column Reactor for CO₂-Free Production of Hydrogen // *Energies*. 2023. Vol. 16, № 20. P. 7058. DOI: 10.3390/en16207058.
5. Gazprom. Chistyj vodorod iz prirodnogo gaza [Clean Hydrogen from Natural Gas]. 2020. URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/reports/2020/pure-hydrogen>. (In Russian)
6. Blyumin S.L., Shuikova I.A. Modeli i metody prinyatiya reshenij v usloviyah neopredelennosti [Models and Methods of Decision-Making under Uncertainty]. Lipecck: LGTU, 2001. 210 p. (In Russian)
7. Tenti E., Morales R. et al. Hydrogen from renewable power: Technology outlook for the energy transition. Irena, 2018. 76 p.
8. Ghosh A., Balsara V. Hydrogen production using advanced reactors by steam methane reforming: A review // *Frontiers in Thermal Engineering*. 2023. Vol. 3. P. 112–125. DOI: 10.3389/fther.2023.1143987.
9. Hosseini S., Farsi M., et al. Methane pyrolysis for hydrogen production: Navigating the path to a net zero future // *Energy & Environmental Science*. 2025. Vol. 18. P. 45–67.
10. Upadhyay G., Kim H.-M. et al. Assessment of Greenhouse Gas Emissions from Hydrogen Production Processes: Turquoise Hydrogen vs. Steam Methane Reforming // *Energies*. 2022. Vol. 15, № 22. P. 8679. DOI: 10.3390/en15228679.
11. Kudinov I.V., Kosareva E.A., Dolgikh V.D. et al. Hydrogen Production by Thermocatalytic Decomposition of Methane: Current Achievements (Review) // *Petroleum Chemistry* 65. 2025. P. 10–34. DOI: 10.1134/S0965544124080176.
12. Pravitelstvo Rossijskoj Federacii. Konceptiya razvitiya vodorodnoj energetiki v Rossijskoj Federacii [Concept for the Development of Hydrogen Energy in the Russian Federation. Government of the Russian Federation]. M., 2021. 32 p. (In Russian)
13. Pravitelstvo Rossijskoj Federacii. Rasporyazhenie ot 09.06.2020 № 1523-r «Ob utverzhenii Energeticheskoy strategii Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda» [Government of the Russian Federation. Directive No. 1523-r of 9 June 2020 “On Approving the Energy Strategy of the Russian Federation up to 2035”]. M., 2024. (In Russian)
14. Vivanco-Martin B., Iranzo A. Analysis of the European Strategy for Hydrogen: A Comprehensive Review // *Energies*. 2023. Vol. 16, № 9. P. 3866. DOI: 10.3390/en16093866. EDN: EMADGS.
15. U.S. Department of Energy. U.S. National Clean Hydrogen Strategy and Roadmap. Washington, 2023. 89 p.
16. Kudinov I.V., Velikanova Yu.V., Nenashev M. V. et al. Methane Pyrolysis in Molten Media for Hydrogen Production: A Review. *Petroleum Chemistry*. 63(5). 2023. P. 627–639. DOI: 10.31857/S0028242123050015.
17. Preston J., Liu L. et al. Solid carbon co-products from hydrogen production by methane pyrolysis: Current understandings and recent progress // *Carbon*. 2023. Vol. 210. P. 45–60.
18. Dolgikh V., Pashin A. Experimental research of the process of methane pyrolysis in a layer of liquid tin aiming to get hydrogen // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2022. Vol. 1070. P. 012017. DOI: 10.1088/1755-1315/1070/1/012017.
19. Kudinov I.V., Pimenov A.A. et al. A theoretical and experimental study on hydrodynamics, heat exchange and diffusion during methane pyrolysis in a layer of molten tin // *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021. Vol. 46, № 12. P. 8765–8778. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.138.
20. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units // *European Journal of Operational Research*. 1978. Vol. 2, № 6. P. 429–444. DOI: 10.1016/0377-2217(78)90138-8.
21. Charnes A., Cooper W.W., Lewin A.Y., Seiford L.M. *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications*. Dordrecht: Springer, 1994. 513 p.
22. Banker R.D., Charnes A., Cooper W.W. Some models for estimating technical and scale inefficiencies in Data Envelopment Analysis // *Management Science*. 1984. Vol. 30, № 9. P. 1078–1092. DOI: 10.1287/mnsc.30.9.1078.
23. Chen Y., Du J. Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis // *Data Envelopment Analysis: International Series in Operations Research & Management Science* / Ed. J. Zhu. Boston: Springer, 2015. Vol. 221. P. 381–414. DOI: 10.1007/978-1-4899-7553-9_14.
24. Pleshivtseva Y., Rapoport E., Nacke B. et al. Design and control of electrotechnological systems: A multi-objective optimization approach // *The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. 2019. Vol. 39, № 1. P. 239–247. DOI: 10.1108/COMPEL-11-2019-0454.

25. *Kazarinov A.V.* Sravnitelnyj analiz effektivnosti tekhnologii kataliticheskogo piroliza metana dlya proizvodstva vodoroda na osnove DEA metoda [Comparative Efficiency Analysis of Catalytic Methane-Pyrolysis Technology for Hydrogen Production Using the DEA Method] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauk». 2024. V. 32. № 3. P. 46–62. DOI: 10.14498/tech.2024.3.4. (In Russian)

Original article submitted 09.07.2025

УДК 631.5:004.94

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАЗВИТИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ КУЛЬТУР В ЦИФРОВОМ ДВОЙНИКЕ ПОСЕВОВ РАСТЕНИЙ

П.О. Скобелев¹, А.А. Галузин²

¹ Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва
Россия, 443086, г. Самара, Московское ш., 34

E-mail: petr.skobelev@gmail.com, alekseygaluzin@mail.ru

Аннотация. Предложен метод расчета выходных параметров сельскохозяйственной культуры в цифровом двойнике посевов растений в зависимости от погодных условий и ресурсных ограничений среды. Цифровой двойник растений – моделирующая система, синхронизируемая с результатами наблюдений, которая позволяет задавать параметры сорта и внешней среды и получать план роста и развития растения и прогноз урожайности. В основе метода лежит модель «трубок» входных и выходных параметров стадий роста и развития растений – диапазонов важных для выживания растений значений основных факторов окружающей среды для каждого сорта растения. Эти диапазоны условно делятся на три категории: оптимальные, при которых растение демонстрирует наилучшие показатели развития; рекомендуемые, обеспечивающие стабильный рост без значительных стрессов; и критические, при выходе за пределы которых возможны необратимые нарушения в физиологических процессах растения, включая его гибель. Предлагаемый метод расчетов на основе имеющихся данных о погодных условиях и доступных ресурсах позволяет связать входные и выходные параметры текущей стадии и передать полученные результаты для расчета следующей стадии, чтобы выстроить итоговый кусочно-линейный план роста и развития растения и дать прогноз урожайности и других параметров растения. В рамках эксперимента рассматривается сорт культуры «Озимая пшеница», рост и развитие которого моделируются при различных сценариях изменения погодных условий. Результаты сопоставляются с фактическими результатами натурного эксперимента в реальных условиях на полях СамНЦ РАН. В качестве параметров рассматриваются урожайность и некоторые параметры растений, в частности их высота. Обсуждаются полученные результаты, дается оценка выявленным расхождениям по различным сценариям, формулируются выводы о применимости предлагаемого метода для практического использования и предлагаются направления дальнейших исследований и разработок.

Ключевые слова: точное земледелие, цифровой двойник, развитие растений, озимая пшеница, виртуальная модель, моделирование.



© Автор(ы), 2025

¹ Петр Олегович Скобелев, доктор технических наук, профессор кафедры информатики и вычислительной техники.

² Алексей Андреевич Галузин, магистрант.

Введение

Эффективное управление растениеводством в рамках точного земледелия ставит целью повышение урожайности, снижение затрат и минимизацию вреда для окружающей среды.

Одной из ключевых культур для Российской Федерации является пшеница [1]. Масса собранной озимой пшеницы в Самарской области за период с 2013 по 2023 годы составляла от 606 до 1374,4 тыс. т, в т.ч.: в 2017 году – 1321,4 тыс. т, в 2018 году – 880,5 тыс. т, в 2019 году – 709,1 тыс. т, в 2020 году – 1633,6 тыс. т¹. Приведенные сведения показывают значительные изменения массы собранного зерна в зависимости в т. ч. от погодных условий.

Однако прогнозирование урожайности остается сложной задачей для агрономов и фермеров из-за ограниченной доступности надежных математических моделей, которые точно отражают физиологи растений и взаимодействие с окружающей средой. Многие сорта сельскохозяйственных (с/х) растений являются искусственно созданными и постоянно обновляются. Это не позволяет собрать большие объемы данных и провести статистически значимую обработку данных в различных условиях, чтобы построить точные и достоверные модели. Большой вклад в процессы роста и развития растений вносят технологии агрономической обработки семян, растений и почвы полей, отчасти компенсирующие неблагоприятные факторы внешней среды.

Кроме неопределенности и колебаний погодных условий, трудности прогнозирования роста и развития с/х культур являются следствием недостаточности агрометеорологических наблюдений сети гидрометеостанций на производственных посевах [2]. Обычно на практике применяют анализ данных дистанционного зондирования Земли [3]. Анализ этих данных в ряде случаев является достаточным для мониторинга (и отчасти прогнозирования) роста и развития посевов на больших территориях, но для управления хозяйствами необходимы более точные модели роста и развития растений, позволяющие вести достоверное прогнозирование и рассчитывать влияние факторов внешней среды на выходные параметры растений.

Традиционные математические модели, статистические методы и существующие информационные технологии предоставляют агрономам и фермерам лишь ограниченную поддержку в принятии обоснованных решений. Становится актуальной задача разработки новых подходов, которые можно на практике легко и быстро адаптировать к климату региона, сортам выращиваемых растений, особенностям полей каждого хозяйства и т. д. Методы и средства моделирования и прогнозирования развития с/х культур должны способствовать повышению эффективности использования доступных ресурсов, поддерживать подходы точного земледелия, иметь низкую стоимость, быть удобными и простыми на практике.

Важной особенностью разрабатываемых методов и средств моделирования посевов растений должна стать адаптивность, позволяющая гибко перестраивать планы роста и развития растений и оценивать изменения их параметров при возникновении любых погодных событий или проведении агротехнических мероприятий.

¹ Территориальный орган Федеральной службы государственной статистики по Самарской области. <https://63.rosstat.gov.ru/agriculture>.

Постановка задачи

Предлагаемый подход заключается в разработке цифровых двойников (ЦД) посевов растений (ЦДПР), которые являются цифровыми моделями реального посева, позволяющими прогнозировать его состояние на разных стадиях развития растения в компьютерной среде по определенному агрономами ряду важнейших параметров, характеризующих растение на каждой стадии [4].

Требуется разработать метод расчета длительности стадий роста и развития посевов растений, а для каждой стадии – метод расчета значений выходных параметров в зависимости от значений входных параметров, которые показывают состояние окружающей среды и растения. Так как каждая с/х культура индивидуальна, разные культуры имеют разный состав входных и выходных параметров на разных стадиях, поэтому разрабатываемый метод должен предполагать гибкие изменения состава, типов и числа входных и выходных параметров.

По условиям задачи для каждого сорта с/х культуры задан процесс роста и развития посевов растения на стадиях, состоящий из списка стадий $\text{Process} = \{\text{stage}_i\}$, $i = \overline{1, L}$, где L – количество стадий, или фаз¹. Для каждой фазы задан пополняемый список входных и выходных параметров, а также параметр длительности фазы.

Для каждой стадии вводятся: $\text{In}_i = \{\text{in}_{ij}\}$, $j = \overline{1, K}$, где K – количество влияющих факторов для i -й стадии развития с/х культуры. $\text{Out}_i = \{\text{out}_{ik}\}$, $k = \overline{1, M}$, где M – количество выходных параметров для i -ой стадии развития с/х культуры.

Выходные значения одной стадии могут являться входными для следующей:

$$\text{In}_{i+1} \subset \text{Out}_i.$$

В данной работе в качестве сквозного примера рассмотрены стадии роста и развития с/х культуры «озимая пшеница», которые представлены в [5]. Целью разработки является создание модели растения и метода расчетов, которые могли бы применяться для любых злаковых растений.

Анализ актуальных методов

Для решения задачи прогнозирования роста и развития растения могут быть использованы математические модели.

В статье [6] описана «интегральная» математическая модель роста культурных растений, которая показывает рост органов растения. Так, например, для картофеля запаздывание роста клубней примерно равно двойному запаздыванию роста листьев. Такая модель способна определить особенности роста урожая. В статье [7] описана модель роста растения в часовом масштабе времени. Данная модель может описывать процесс изменения показателя для оценки неизвестных параметров в суточном интервале времени в среднем для совокупности растений на выбранном участке поля или в экспериментальной установке. Так же в [8] и [9] представлены математические модели прогнозирования урожайности.

Таким образом, разработанные математические модели имеют большой потенциал для улучшения эффективности и устойчивости сельскохозяйственного производства. Несмотря на это, существует необходимость в разработке новых методов адаптации алгоритмов под различные условия и культуры.

¹ Термины «фаза» и «стадия» развития в рамках настоящей статьи являются синонимами.

Также ЦД обладают значительным потенциалом для более точного и детализированного моделирования различных процессов, что делает их перспективным направлением в научных и инженерных исследованиях [10]. Технология цифровых двойников активно развивается, обеспечивая новые возможности для анализа, прогнозирования и оптимизации как технических, так и биологических систем. ЦД могут использоваться как в промышленности, что представлено в работе [11], так и в сложных органических объектах [12]. Особый интерес представляют разработки в области использования цифровых двойников в сельском хозяйстве [13–15].

В [16] представлен ЦД в с/х производстве. Путем создания начальной цифровой среды для киберфизической системы агрономы могут лучше представлять состояние своих посевов и целесообразность использования различного оборудования и удобрений. ЦД может представлять собой инструмент для оптимизации производительности как соотношения между производством и потреблением ресурсов [17]. ЦД можно рассматривать как новую фазу интеллектуального развития и управления данными в садоводстве и в сельском хозяйстве в целом [18–20].

Метод расчета параметров посева

На каждой фазе развития на растения влияют факторы окружающей среды. Значения таких факторов на определенных фазах развития растения являются входными параметрами модели. Правила принятия решений для планирования переходов между состояниями стадий также индивидуальны для каждого сорта культуры.

На основе экспертных знаний агрономов выделены составы и значения входных и выходных параметров на разных фазах развития растения x_{ijk} и составлены трубки входных параметров. Трубкой параметров называются диапазоны изменения значений каждого фактора, влияющего на развитие растения. Наилучшие возможные значения параметров роста и развития растения на каждой фазе считаются оптимальными значениями.

На рис. 1 показан пример трубки входного параметра x и выходного параметра y , состоящей из четырех точек: критического минимума x_{cr1}^{ijk} , рекомендованного минимума x_{opt1}^{ijk} , рекомендованного максимума x_{opt2}^{ijk} , критического максимума x_{cr2}^{ijk} входного параметра для каждой фазы и соответствующих им значений прироста выходных параметров Δy_{cr1}^{ijk} , y_{opt1}^{ijk} , y_{opt2}^{ijk} , Δy_{cr2}^{ijk} .

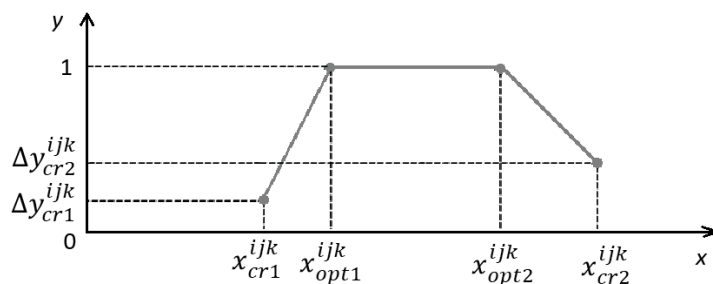


Рис. 1. Пример трубки входного параметра x и выходного параметра y

Модель состоит из набора фаз развития растения, которые включают набор трубок входных параметров. На основе описанной модели разработан метод расчета выходных параметров растения по фазам.

Перед расчетом значений выходных параметров необходимо определить длительность фаз растения – от этого зависит, какие дни относят к одной фазе, а какие к другой, так как влияние окружающей среды на растение на разных фазах его развития разнится. Базовая длительность рассчитывается по правилу суммы активных температур:

$$\text{duration}_{basei} = \sum_{j=1}^{\text{duration}_{\max}} d_j ,$$

$$d_j = \begin{cases} 1, & \text{если } t_{\min} < t_j < t_{\max} \text{ и } t_{act(j-1)} + t_j < t_{act}, \\ 0, & \text{иначе,} \end{cases}$$

где t_{act} – сумма активных температур; $t_{act(j-1)}$ – сумма активных температур за $j-1$ дней.

На базовую длительность фазы растения влияет предыдущее растение, росшее на месте растения модели, и входные параметры на фазе. Приращение (дельта) длительности i -ой фазы для k -го входного параметра находится следующим образом:

$$\Delta\text{duration}_{ik} = \begin{cases} \frac{(x_{ijk} - x_{cr1}^{ijk})(\Delta y_{opt1}^{ijk} - \Delta y_{cr1}^{ijk})}{x_{opt1}^{ijk} - x_{cr1}^{ijk}} + \Delta y_{cr1}^{ijk}, & \text{если } x_{cr1}^{ijk} \leq x_{ijk} < x_{opt1}^{ijk}, \\ \frac{(x_{ijk} - x_{opt1}^{ijk})(\Delta y_{opt2}^{ijk} - \Delta y_{opt1}^{ijk})}{x_{opt2}^{ijk} - x_{opt1}^{ijk}} + \Delta y_{opt1}^{ijk}, & \text{если } x_{opt1}^{ijk} \leq x_{ijk} < x_{opt2}^{ijk}, \\ \frac{(x_{ijk} - x_{opt2}^{ijk})(\Delta y_{cr2}^{ijk} - \Delta y_{opt2}^{ijk})}{x_{cr1}^{ijk} - x_{opt2}^{ijk}} + \Delta y_{opt2}^{ijk}, & \text{если } x_{opt2}^{ijk} \leq x_{ijk} < x_{cr2}^{ijk}, \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Формула расчета итоговой дельты i -й фазы развития растения:

$$\text{duration}_i = \text{duration}_{basei} + \Delta\text{duration}_{ppi} + \frac{1}{k} \sum_{y=1}^k \Delta\text{duration}_{ik} .$$

Итоговая длительность должна быть между минимальной и максимальной длительностями:

$$\text{duration}_i = \begin{cases} \text{duration}_{\min}, & \text{если } \text{duration}_i < \text{duration}_{\min}, \\ \text{duration}_{\max}, & \text{если } \text{duration}_i > \text{duration}_{\max}, \\ \text{duration}_i, & \text{иначе.} \end{cases}$$

Формула трубки параметров k -го выходного параметра на i -й стадии для l -го входного параметра на q -том интервале состояния растения:

$$\text{tube}_{ik}^l = \left\{ \text{tubeItem}_{ik}^{lq} \right\}, \quad l = \overline{1, L}, \quad q = \overline{1, Q},$$

где L – количество входных параметров, влияющих на k -й выходной параметр на i -й стадии; Q – количество интервалов в трубке.

$$\text{tubeItem}_{ik}^{lq} = \left\{ \text{tubeBorder}_{ik}^{lq}, \text{tubeBorder}_{ik}^{l(q+1)}, \text{deltaOutValue}_{ik}^{lq} \right\},$$

$$\text{deltaOutValue}_{ik}^{lq} = \left\{ \text{deltaOutValue}_{ik}^{lqp} \right\}, \quad p = \overline{1, P},$$

где P – количество интервалов длительности влияния.

Итоговое значение дельты выходного параметра для данной фазы есть сумма изменений этого параметра на интервалах непрерывного входа в интервал трубки. Прирост выходных параметров в пределах одного интервала трубки равен:

$$\Delta \text{out}_{is} = \frac{\text{deltaOutValue}_{ik}^{lq}}{\text{stageDuration}_i} \cdot \text{intervalDuration}_{is}; \quad \Delta \text{out}_i = \sum \Delta \text{out}_{is}.$$

Алгоритм начинается с ввода значений входных параметров для всех фаз исходя из длительности фазы. На каждой фазе для каждого выходного параметра введенное значение сравнивается с соответствующей трубкой для этого входного параметра. Если значение превышает критические пределы трубки, растение погибает. Если нет, то происходит расчет дельты выходного параметра. Далее происходит расчет среднего значения дельты выходного параметра по всем входным параметрам. Затем вычисляется окончательное значение выходного параметра как сумма среднего значения выходного параметра и значения из предыдущей фазы. Полученные значения выходных параметров растения для каждой фазы добавляются в список.

Программное обеспечение ЦДПР

Описанный метод реализован в программном обеспечении, которое выполняет расчет выходных параметров растения, расчет длительности фаз роста и развития растения и создание файла таблицы с этими данными. Система разработана на языке Java 17 с использованием фреймворка Spring с использованием таких технологий, как Jackson Databind, Web Servlet, JUnit, а также на языке JavaScript с использованием фреймворка Vue.js, и функционирует под управлением операционных систем Windows 10 и выше.

Программное обеспечение содержит веб-интерфейс (рис. 2), позволяющий задать входные данные (температура воздуха, запас питательной влаги, относительная влажность воздуха и др.) и представить результаты вычислений (масса растения, урожайность, количество листьев и др.). Для стадий развития представлена диаграмма их длительностей, где отмечено их сокращение или увеличение относительно базовых значений и другие особенности для лучшего понимания пользователем результатов.

В самом верху пользовательского интерфейса представлены поля ввода, в которые пользователь должен ввести данные о посеве.

В поле «Загрузка таблицы со значениями входных параметров для расчета развития растения» необходимо выбрать файл таблицы формата xls, содержащий данные окружающей среды за весь период вегетации растения. Первый столбец содержит дату и время, в которые были взяты показания, и имеет формат {дд.мм.гггг чч:мм}. Седьмая строка содержит названия входных параметров, которые должны совпадать с названиями из модели. Значения температуры должны быть представлены за весь период развития растения.

В поле «Ввод даты посева» необходимо выбрать дату, в которую были посеяны семена растения.

В поле «Выбор названия предыдущего растения из списка» необходимо выбрать из выпадающего списка название предыдущего растения, росшего на поле, или выбрать отсутствие предшественника.

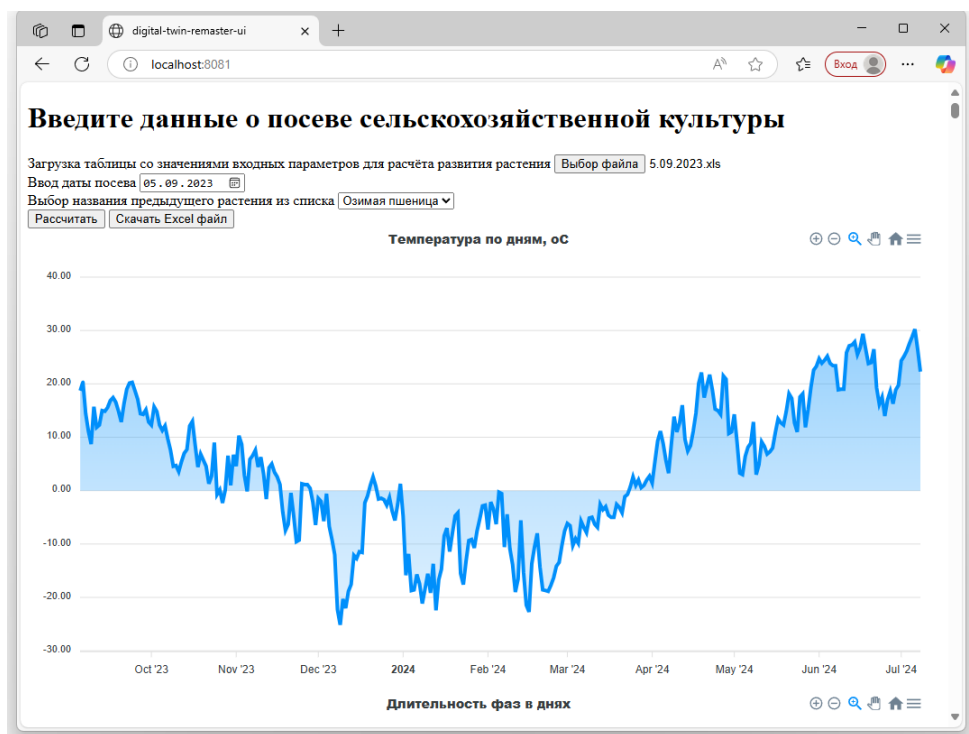


Рис. 2. Веб-интерфейс программы с диаграммой длительностей фаз

После нажатия на кнопку «Рассчитать» эти данные отправятся на сервер, после чего из полученных результатов построятся графики температуры, длительности, входных и выходных параметров.

На графике «Температура по дням» изображаются среднесуточные значения температуры за весь период вегетации растения, что позволяет пользователю ясно видеть колебания температуры, такие как резкое потепление или резкое похолодание, а также периоды жары и заморозков.

На рис. 3 изображен пример графика длительности фаз развития растения. На графике синим обозначена базовая длительность. Красным указана положительная «дельта длительности», то есть увеличение длительности фазы. Зеленым указана отрицательная «дельта длительности», то есть уменьшение длительности фазы.

Для каждого входного параметра представляется график, где отображаются значения трубки (см. пример на рис. 4). Зеленым обозначается оптимальное развитие растения. Для нормального развития растений значения входных параметров должны попадать в желтый диапазон, обозначающий рекомендуемые значения. При превышении рекомендуемых значений прогноз состояния урожая ухудшается. Если значения входных параметров превышают критические пределы, обозначенные красным цветом, то растение погибает.

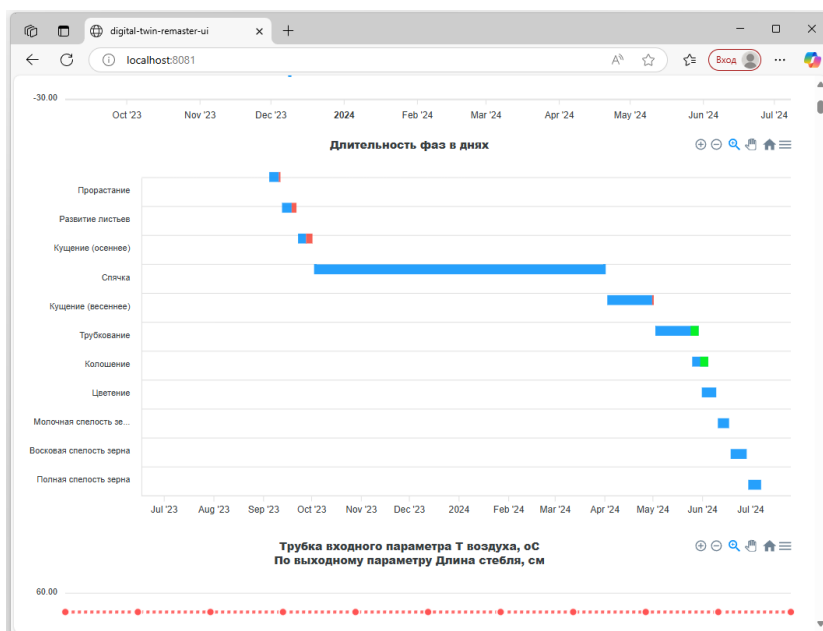


Рис. 3. График длительности фаз в днях

Пример графика выходного параметра представлен на рис. 5.

После расчета можно нажать на кнопку «Скачать Excel файл», и будет скачан файл с выходными значениями растения на фазах.



Рис. 4. Трубки входного параметра «температура воздуха» по выходному параметру «длина стебля»

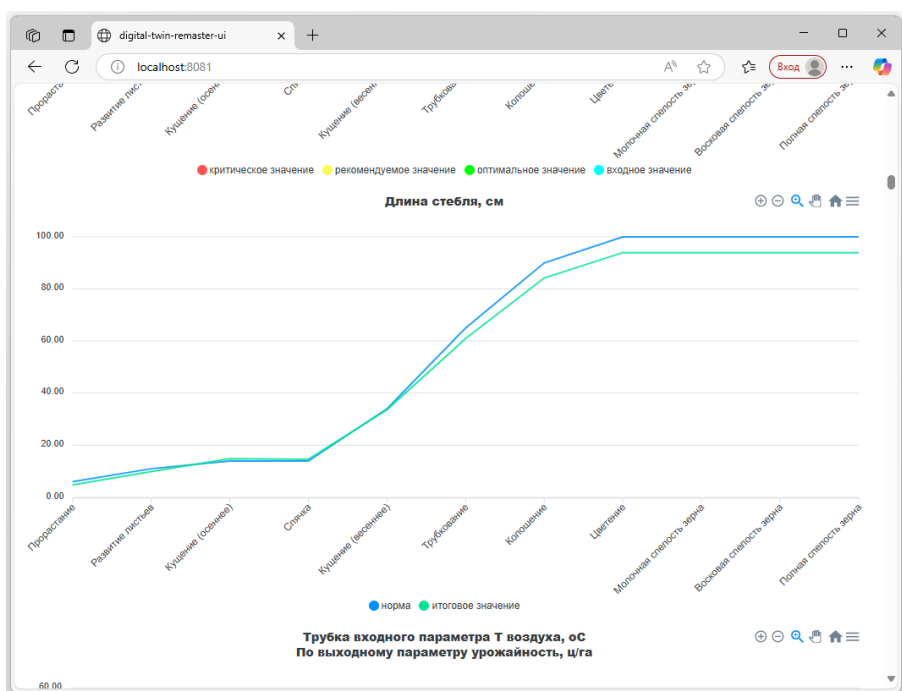


Рис. 5. График длины стебля

На рис. 6 представлена диаграмма, иллюстрирующая основные классы разрабатываемой системы.

Центральное место занимает класс «Модель», который отвечает за описание биологических процессов, связанных с ростом и развитием растения. Данный класс содержит список фаз развития растения, каждая из которых характеризуется уникальным номером, наименованием, перечнем выходных параметров и продолжительностью, выраженной в условных единицах. Каждый выходной параметр в рамках отдельной фазы связан с определенным набором входных параметров, оказывающих на него влияние. Эти взаимосвязи формализуются через трубки.

Классы, представленные в нижней части диаграммы, отражают структуру онтологии, которая загружается в систему в виде JSON-файла. Каждый такой файл содержит модель растения, относящуюся к конкретному сорту. Структура файла включает в себя последовательность фаз роста и развития, каждая из которых описана с учетом сортовых особенностей растения. Таким образом, количество фаз, их наименования, а также перечень входных и выходных параметров могут существенно различаться в зависимости от конкретного сорта. Для каждого сорта определяются собственные наборы параметров и логика их взаимодействия, что обеспечивает высокую степень гибкости и адаптивности системы при моделировании различных биологических объектов. Такая архитектура позволяет формировать точные и персонализированные цифровые модели, пригодные для анализа, прогнозирования и принятия решений в аграрной сфере.

В табл. 1 приведено описание основных классов.

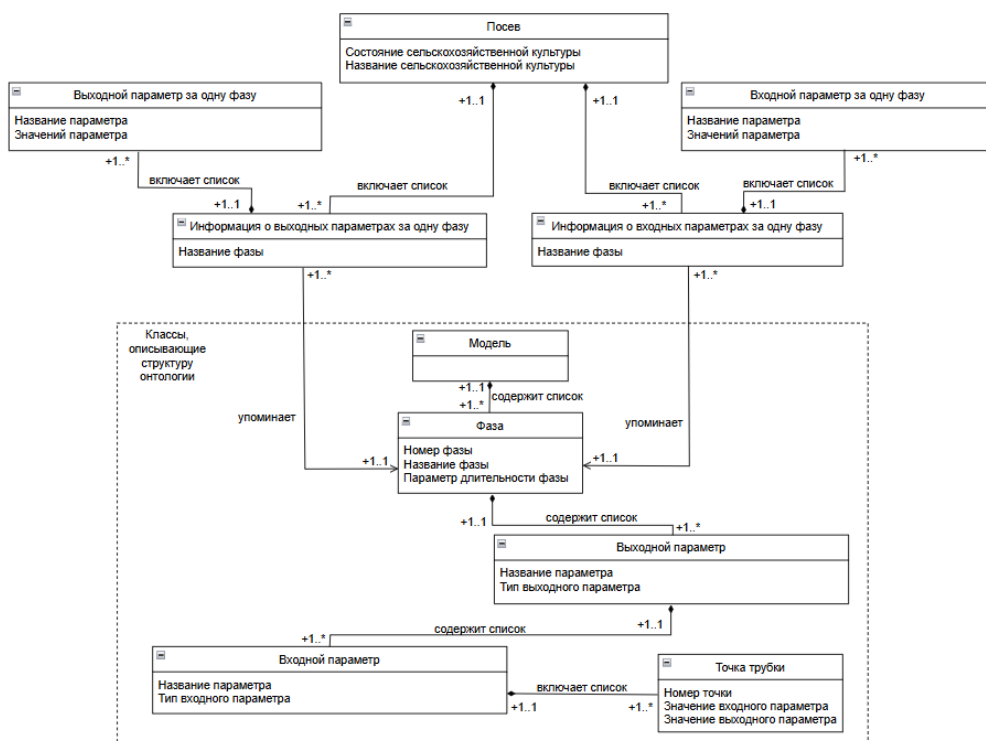


Рис. 6. Диаграмма основных классов системы

Таблица 1

Описание основных классов системы

Название класса	Назначение
Модель	Содержит список фаз развития растения
Фаза	Содержит сведения о фазе развития растения, в том числе список выходных параметров растения
Выходной параметр	Содержит сведения о выходном параметре растения, в том числе список входных параметров растения
Входной параметр	Содержит сведения о входном параметре растения, в том числе список значений трубки входного параметра и линейную функцию
Трубка	Содержит значение входного параметра и значение зависящего от него выходного параметра
Линейная функция	Содержит список точек трубки и метод получения значения выходного параметра растения, зависящие от входных параметров, введенных пользователем
Растение	Содержит список выходных и входных параметров

На рис. 7 представлена структурная схема системы.

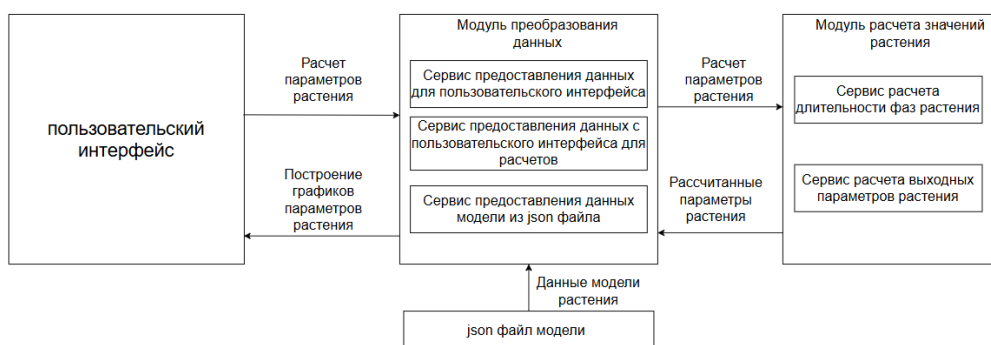


Рис. 7. Структурная схема системы

Разрабатываемая система состоит из следующих частей:

- 1) пользовательский интерфейс;
- 2) модуль преобразования данных, в состав которого входят:
 - сервис предоставления данных для пользовательского интерфейса;
 - сервис предоставления данных с пользовательского интерфейса для расчетов;
 - сервис предоставления данных модели из json файла;
- 3) модуль расчета значений растения:
 - сервис расчета длительности фаз растения;
 - сервис расчета выходных параметров растения.

Результаты моделирования

Для оценки качества и эффективности ЦДПР проведена проверка на здравый смысл: когда изменяются входные параметры среды и погоды по событиям – измеряется результат, т. е. план роста и развития посевов растений и прогноз урожайности, который должен в целом соответствовать требованиям, заложенным селекционерами в сорт.

Для моделирования использовались трубки входных параметров для культуры «озимая пшеница», полученные из лаборатории «Цифровые двойники растений СамНЦ РАН». Данные о фактическом состоянии погоды на тестовых полях на сезон были взяты из открытых источников¹. Для всех сценариев датой посева была взята фактическая дата посева с/х культуры «озимая пшеница» на полях Безенчукского района Самарской области. Также для всех сценариев было выбрано отсутствие растения-предшественника, росшего до этого на поле. В качестве выходных параметров рассмотрены высота растения и урожайность.

На основе созданного прототипа ЦДПР проведены эксперименты по моделированию событий при высокой температуре, низкой температуре, высокой влажности, низкой влажности, недостатке некоторых питательных веществ, а именно недостатке нитратов, недостатке оксида фосфора, недостатке оксида калия.

При сценарии фактических условий фактор «Температура воздуха» на всех стадиях колебался в границах рекомендуемого минимума и рекомендуемого максимума, остальные влияющие факторы также оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста. Значение высоты растения на момент сбо-

¹ Данные о погоде. <https://tp5.ru/>.

ра урожая составило 95,5 см при оптимальном значении 100 см, а значение урожайности – 79,34 ц/га при оптимальном 80 ц/га. Значения при сценарии фактических условий близки к норме, так как входные значения окружающей среды были в рекомендованных границах.

Результаты моделирования сценариев избытка и недостаточности влаги. Была смоделирована высокая и низкая влажность воздуха и разные запасы питательной влаги на разной глубине в почве. На рис. 8–9 приведены результаты значений выходных параметров. При сценарии высокой влажности фактор «Относительная влажность воздуха» и фактор «Запас питательной влаги» на разной глубине на всех стадиях были выше своих оптимальных значений, но не выходили за рекомендованные границы; остальные влияющие факторы также оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста. При сценарии низкой влажности фактор «Относительная влажность воздуха» и фактор «Запас питательной влаги» на разной глубине на всех стадиях были ниже своих оптимальных значений; остальные влияющие факторы также оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста.

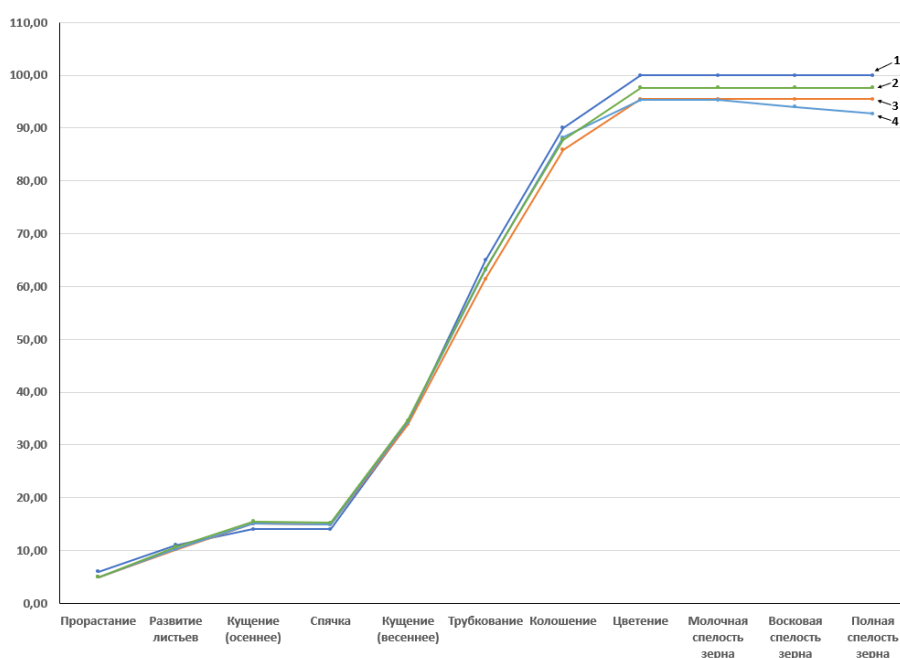


Рис. 8. Высота растения при высокой влажности для сценариев:

1 – оптимальные значения; 2 – значения при высокой влажности; 3 – значения при фактических условиях; 4 – значения при низкой влажности

Значения при сценарии высокой влажности, который моделирует ситуацию осадков и высокой влажности почвы, близки к оптимальным и фактическим значениям, так как с/х культура «озимая пшеница» растет в период с осени до лета следующего года, что показывает приспособленность данной культуры к осенним и зимним осадкам. Значения, полученные при сценарии низкой влажности, оказались ниже значений при фактических условиях, что подтверждается зависимостью данной культуры от влажности окружающей среды.

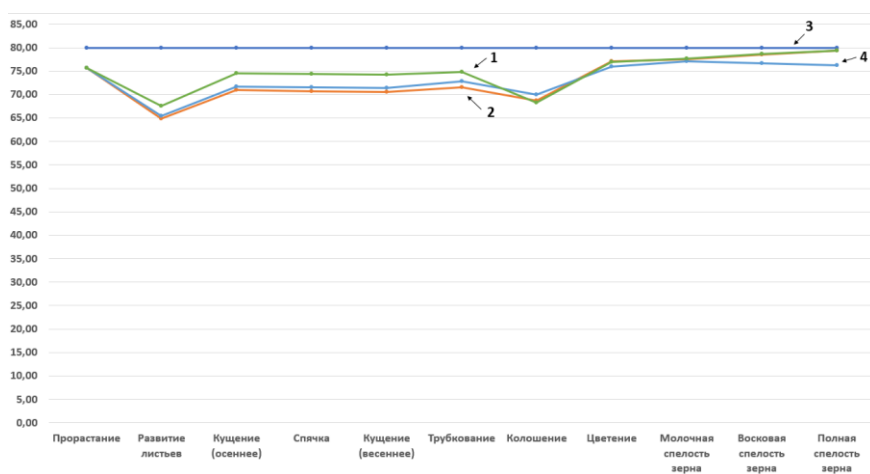


Рис. 9. Урожайность при высокой влажности для сценариев:
 1 – значения при высокой влажности; 2 – значения при фактических условиях;
 3 – оптимальные значения; 4 – значения при низкой влажности

Результаты моделирования сценариев высокой и низкой температуры.

Были смоделированы высокие и низкие температуры воздуха. На рис. 10–11 приведены значения выходных параметров. При сценарии высокой температуры фактор «Температура воздуха» на всех стадиях был выше своих оптимальных значений, остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста. При сценарии низкой температуры фактор «Температура воздуха» на всех стадиях был ниже своих оптимальных значений, остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста.

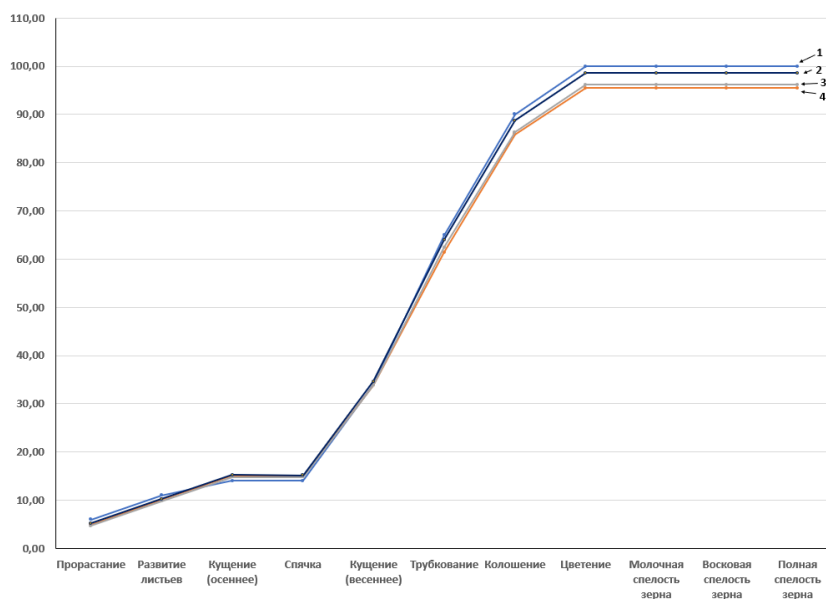


Рис. 10. Высота растения при высокой температуре для сценариев:
 1 – оптимальные значения; 2 – значения при низкой температуре; 3 – значения при высокой температуре; 4 – значения при фактических условиях

Значения при сценарии низкой температуры, который моделирует ситуацию похолодания, близки к оптимальным и фактическим значениям или выше них, так как с/х культура «озимая пшеница» растет в период низкой температуры, что показывает большую приспособленность данной культуры к таким сценариям. Значения, полученные при сценарии высокой температуры, оказались близки или ниже значений при фактических условиях, что подтверждается периодом вегетации данной культуры.

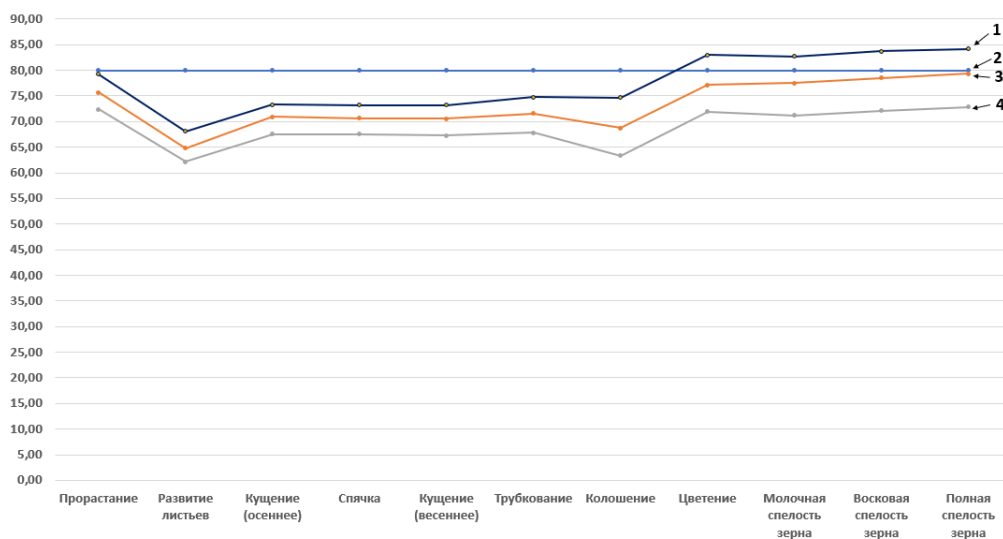


Рис. 11. Урожайность при высокой температуре для сценариев: 1 – значения при низкой температуре; 2 – оптимальные значения; 3 – значения при фактических условиях; 4 – значения при высокой температуре

Результаты моделирования сценариев недостатка некоторых питательных веществ. Смоделированы сценарии недостатка нитратов в почве, недостатка оксида фосфора в почве, недостатка оксида калия в почве. В табл. 2–3 приведены значения выходных параметров. При сценарии недостатка нитратов фактор «Запасы нитратов в слое, 0–30 см» на всех стадиях был ниже своих оптимальных значений, остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста. При сценарии недостатка оксида фосфора фактор «Запасы оксида фосфора в слое, 0–30 см» на всех стадиях был ниже своих оптимальных значений, остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста. При сценарии недостатка оксида калия фактор «Запасы оксида калия в слое, 0–30 см» на всех стадиях был ниже своих оптимальных значений, остальные влияющие факторы оставались в рамках рекомендуемых значений на всех фазах роста.

Значения при сценариях недостатка нитратов, недостатка оксида фосфора и недостатка оксида калия близки к оптимальным и фактическим значениям или выше них, что объясняется нахождением растения в стрессовых условиях, при которых некоторые параметры растения могут выше оптимальных значений.

Проведенные исследования показали, что разработанная модель адекватно реагирует на важные события и соответствует натурным данным. Это позволяет считать ее пригодной для практического применения агрономами и дальнейшего развития.

Таблица 2

Значения выходных параметров «Высота растения»

Название фазы	Значения выходного параметра «Высота растения», см				
	Оптимум	Фактические значения	Недостаток нитратов	Недостаток оксида фосфора	Недостаток оксида калия
Прорастание	6,00	4,96	5,21	5,21	5,21
Развитие листьев	11,00	10,12	10,29	10,29	10,29
Кущение (осеннее)	14,00	15,10	15,30	15,26	15,26
Спячка	14,00	14,88	15,08	15,04	15,04
Кущение (весеннее)	34,00	33,84	34,04	34,00	34,00
Трубкавание	65,00	61,44	61,83	61,66	61,66
Колошение	90,00	85,90	86,29	86,12	86,12
Цветение	100,00	95,50	95,90	95,72	95,72
Молочная спелость зерна	100,00	95,50	95,90	95,72	95,72
Восковая спелость зерна	100,00	95,50	95,90	95,72	95,72
Полная спелость зерна	100,00	95,50	95,90	95,72	95,72

Таблица 3

Значения выходных параметров «Урожайность»

Название фазы	Значения выходного параметра «Урожайность», ц/га				
	Оптимум	Фактические значения	Недостаток нитратов	Недостаток оксида фосфора	Недостаток оксида калия
Прорастание	80,00	75,68	75,93	75,93	75,93
Развитие листьев	80,00	64,81	68,81	68,81	68,81
Кущение (осеннее)	80,00	70,91	74,95	74,91	74,91
Спячка	80,00	70,69	74,72	74,69	74,69
Кущение (весеннее)	80,00	70,56	74,60	74,56	74,56
Трубкавание	80,00	71,53	75,46	75,39	75,39
Колошение	80,00	68,74	72,39	72,31	72,31
Цветение	80,00	77,14	80,81	80,71	80,71
Молочная спелость зерна	80,00	77,56	81,22	81,13	81,13
Восковая спелость зерна	80,00	78,54	81,92	81,83	81,83
Полная спелость зерна	80,00	79,34	82,62	82,48	82,48

Заключение

В работе предложен метод расчета параметров состояний растений, который может дополнять методы, основанные на нейронных сетях, и другие подходы.

В разработанном методе используется понятие «трубки» – диапазоны оптимальных и критических для выживания растений значений основных факторов, которые характеризуют фазы роста и развития растения и влияние входных параметров каждого интервала на выходные параметры растения. Разработанный метод был реализован в программном обеспечении, которое выполняет расчет выходных параметров растения, расчет длительности фаз роста и развития растения и создание файла таблицы с этими данными. Результаты моделирования на примере культуры «озимая пшеница» и сравнение процессов роста и развития при различных сценариях изменения окружающей среды показывают применимость такого подхода для моделирования процесса развития растений. Рассчитанные значения выходного параметра «Высота растения» при различных сценариях изменения окружающей среды были ниже оптимального значения. Значения выходного параметра «Урожайность» при различных сценариях были ниже, выше и равны оптимальному значению.

Такие результаты показывают сложность задачи моделирования процесса развития растения, зависящего от многих факторов.

Дальнейшие исследования предполагается направить на развитие и совершенствование метода расчета стадий и прогнозирования урожая, расширение базы знаний о сортах растений и разработку системы рекомендаций для фермеров, позволяющих оценивать возможные потери и выбирать методы и средства их снижения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Фомин О.С., Зюкин Д.А., Беляев С.А., Репринцева Е.В.* Экономическая и географическая специфика осуществления экспорта российской пшеницы // Международный сельскохозяйственный журнал. 2023. № 2. С. 138–142. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_2_138. EDN: WCNJAO.
2. *Страшина А.И., Тарасова Л.Л., Богомолова Н.А., Максименкова Т.А., Береза О.В.* Прогнозирование урожайности зерновых и зернобобовых культур в центральных черноземных областях на основе комплексирования наземных и спутниковых данных // Труды гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2015. № 353. С. 128–153.
3. *Раменская Е.В., Ермаков В.В., Кузнецов М.П.* Методы классификации гиперспектральных изображений при экологическом мониторинге // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18, № 4–5. С. 990–992.
4. *Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S., Larukhin V., Novichkov D., Skobelev P., Zhilyaev A.* Autonomous digital twin of enterprise: Method and toolset for knowledge-based multi-agent adaptive management of tasks and resources in real time // Mathematics. 2022. Vol. 10, № 10. P. 1662–1689. DOI: 10.3390/math10101662. EDN: YKEBYK.
5. *Шевченко С.Н., Корчагин В.А., Горянин О.И.* Современные технологии возделывания озимой пшеницы в Средневолжском регионе // Земледелие. 2009. № 5. С. 40–41.
6. *Чечулин В.Л.* О простых математических моделях роста культурных растений // Вестник Пермского университета. Серия: Математика. Механика. Информатика. 2018. № 1 (40). С. 46–50. DOI: 10.17072/1993-0550-2018-1-46-50. EDN: XMHXVB.
7. *Михайленко И.М.* Математическое моделирование роста растений на основе экспериментальных данных // Сельскохозяйственная биология. 2007. № 1. С. 103–111.
8. *Буховец А.Г., Семин Е.А., Бирючинская Т.Я., Горелова М.В.* Математические модели прогнозирования урожайности зерновых культур // Перспективы развития национальных агропродовольственных систем в условиях ВТО. 2014. С. 262.
9. *Саденова М.А., Храпов С.С., Бейсекенов Н.А.* Математическое моделирование прогноза урожайности сельскохозяйственных культур на основе данных полевого мониторинга и дистанционного зондирования // Математическая физика и компьютерное моделирование. 2023. Т. 26, № 3. С. 56–75. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2023.3.5. EDN: XDMENM.

10. *Сосфенов Д.А.* Цифровой двойник: история возникновения и перспективы развития // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2023. № 4. С. 35–43. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-4-35. EDN: FKIQOC.
11. *Царев М.В., Андреев Ю.С.* Цифровые двойники в промышленности: история развития, классификация, технологии, сценарии использования // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64, № 7. С. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. EDN: QOKQJW.
12. *Крамм М.Н., Безбородова О.Е., Бодин О.Н., Светлов А.В.* Цифровой двойник сердца // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2021. № 1(35). С. 73–84. DOI: 10.21685/2307-5538-2021-1-9. EDN: BXMIJY.
13. *Purcell W., Neubauer T.* Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review // Smart Agricultural Technology. 2023. Vol. 3. P. 100094. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100094. EDN: BCBRHX.
14. *García R., Aguilar J., Toro M., Pinto A., Rodríguez P.* A systematic literature review on the use of machine learning in precision livestock farming // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 179. P. 105826. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105826. EDN: YCUFBG.
15. *Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S.* Digital twins in smart farming // Agricultural Systems. 2021. Vol. 189. P. 103046. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046. EDN: AVNZCL.
16. *Alves R.G., Souza G., Maia R.F., Tran A.L.H., Kamiński C., Soininen J.P., Aquino P.T., Lima F.* A Digital Twin for Smart Farming // 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). 2019. P. 1–4.
17. *Chaux J.D., Sanchez-Londono D., Barbieri G.* A Digital Twin Architecture to Optimize Productivity within Controlled Environment Agriculture // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, № 19. P. 8875. DOI: 10.3390/app11198875. EDN: TGOLFU.
18. *Ariesen-Verschuur N., Verdouw C., Tekinerdogan B.* Digital Twins in greenhouse horticulture: A review // Computers and Electronics in Agriculture. 2022. Vol. 199. P. 107183. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107183. EDN: CGGQCE.
19. *Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I.N.* Introducing digital twins to agriculture // Computers and Electronics in Agriculture. 2021. Vol. 184. P. 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942. EDN: EOMLEN.
20. *Jans-Singh M., Leeming K., Choudhary R., Girolami M.* Digital twin of an urban-integrated hydroponic farm // Data-Centric Engineering. 2020. Vol. 1. P. 20. DOI: 10.1017/dce.2020.21. EDN: OGKLFS.

Статья поступила в редакцию 03.07.2025

EXPERIMENTAL STUDIES OF MODELLING THE DEVELOPMENT OF AGRICULTURAL CROPS IN A DIGITAL TWIN OF PLANT CROPS

P.O. Skobelev¹, A.A. Galuzin²

¹Samara State Technical University

244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

²Samara National Research University

34, Moskovskoe sh., Samara, 443086, Russian Federation

E-mail: petr.skobelev@gmail.com, alekseygaluzin@mail.ru

Abstract. A method is proposed for calculating the output parameters of an agricultural crop in a digital twin of plant crops depending on weather conditions and resource constraints of the environment. The method is based on a model of "tubes" of input and output parameters of plant growth and development stages - ranges of values of the main environmental factors for each plant variety that are important for plant survival. These ranges are conventionally divided into three categories: optimal, in which the plant demonstrates the best development indicators; recommended, ensuring stable growth without significant stress; and critical, beyond which irreversible disturbances in the physiological processes of the plant are possible, including its death. The proposed calculation method based on the available data on weather conditions and available resources makes it possible to link the input and output parameters of the current stage and transfer the obtained results for calculating the next stage in order to build a final piecewise linear plan for plant growth and development and to forecast the yield and other plant parameters. The experiment provides an example of the proposed method for the agricultural crop "Winter wheat" under the actual scenario and alternative climate scenarios that model changes in weather conditions, and a comparison of the results of these scenarios with the values under actual conditions. The modeling results made it possible to estimate the sensitivity of the yield and plant height of winter wheat to various weather deviations. An assessment is made of the discrepancies identified for various scenarios, the results obtained are discussed, conclusions are formulated regarding the applicability of the proposed method for practical use in agricultural modeling, and directions for further research and development are presented.

Keywords: precision farming, digital twin, plant development, winter wheat, virtual model, modeling.

REFERENCES

1. Fomin O.S., Zyukin D.A., Belyaev S.A., Reprinceva E.V. Ekonomicheskaya i geograficheskaya specifikatsiya osushchestvleniya eksporta rossijskoj pshenicy [Economic and geographical specifics of Russian wheat export] // Mezhdunarodnyj selskohozyajstvennyj zhurnal. 2023. № 2. P. 138–142. DOI: 10.55186/25876740_2023_66_2_138. (In Russian)
2. Strashnaya A.I., Tarasova L.L., Bogomolova N.A., Maksimenkova T.A., Bereza O.V. Prognozirovaniye urozhajnosti zernovykh i zernobobovykh kul'tur v central'nykh chernozemnykh oblastyakh



© The Author(s), 2025

¹Pyotr O. Skobelev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Dept. of Computer Science and Computer Engineering.

²Aleksey A. Galuzin, Master.

- na osnove kompleksirovaniya nazemnyh i sputnikovyh dannyh [Forecasting the yield of grain and leguminous crops in the central black earth regions based on the integration of ground-based and satellite data] // Trudy gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federacii. 2015. № 353. P. 128–153. (In Russian)
3. *Ramenskaya E.V., Ermakov V.V., Kuznecov M.P.* Metody klassifikacii giperspektral'nyh izobrazhenij pri ekologicheskom monitoringe [Methods for classifying hyperspectral images in environmental monitoring] // Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2016. V. 18, № 4–5. P. 990–992. (In Russian)
 4. *Galuzin V., Galitskaya A., Grachev S., Larukhin V., Novichkov D., Skobelev P., Zhilyaev A.* Autonomous digital twin of enterprise: Method and toolset for knowledge-based multi-agent adaptive management of tasks and resources in real time // Mathematics. 2022. Vol. 10, № 10. P. 1662–1689. DOI: 10.3390/math10101662.
 5. *Shevchenko S.N., Korchagin V.A., Goryanin O.I.* Sovremennye tekhnologii vozdeleyvaniya ozimoi pshenicy v Srednevolzhskom regione [Modern technologies for cultivating winter wheat in the Middle Volga region] // Zemledelie. 2009. № 5. P. 40–41. (In Russian)
 6. *Chechulin V.L.* O prostykh matematicheskikh modelyakh rosta kul'turnykh rastenij // Vestnik Permskogo universiteta [On simple mathematical models of cultivated plant growth // Bulletin of Perm University]. Seriya: Matematika. Mekhanika. Informatika. 2018. № 1(40). P. 46–50. DOI: 10.17072/1993-0550-2018-1-46-50. (In Russian)
 7. *Mihajlenko I.M.* Matematicheskoe modelirovanie rosta rastenij na osnove eksperimentalnyh dannyh [Mathematical modeling of plant growth based on experimental data] // Selsko-hozyajstvennaya biologiya. 2007. № 1. P. 103–111. (In Russian)
 8. *Buhovec A.G., Semin E.A., Biryuchinskaya T.Ya., Gorelova M.V.* Matematicheskie modeli prognozirovaniya urozhajnosti zernovykh kultur [Mathematical models for forecasting the yield of grain crops. Prospects for the development of national agro-food systems in the WTO] // Perspektivy razvitiya nacionalnykh agroproduktivnykh sistem v usloviyakh VTO. 2014. P. 262. (In Russian)
 9. *Sadenova M.A., Hrapov S.S., Bejsekenov N.A.* Matematicheskoe modelirovanie prognoza urozhajnosti selskohozyajstvennykh kultur na osnove dannyh polevogo monitoringa i distancionnogo zondirovaniya [Mathematical modeling of agricultural crops productivity forecast based on field monitoring and remote sensing data] // Matematicheskaya fizika i kompyuternoe modelirovanie. 2023. V. 26, № 3. P. 56–75. DOI: 10.15688/mpcm.jvolsu.2023.3.5. (In Russian)
 10. *Sosfenov D.A.* Cifrovoj dvojniki: istoriya vozniknoveniya i perspektivy razvitiya [Digital Twin: History of Origin and Development Prospects] // Intellekt. Innovacii. Investicii. 2023. № 4. P. 35–43. DOI: 10.25198/2077-7175-2023-4-35. (In Russian)
 11. *Carev M.V., Andreev Yu.S.* Cifrovye dvojniki v promyshlennosti: istoriya razvitiya, klassifikaciya, tekhnologii, scenariy ispolzovaniya [Digital twins in industry: history of development, classification, technologies, use scenarios] // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Priborostroenie. 2021. V. 64, № 7. P. 517–531. DOI: 10.17586/0021-3454-2021-64-7-517-531. (In Russian)
 12. *Kramm M.N., Bezborodova O.E., Bodin O.N., Svetlov A.V.* Cifrovoj dvojniki serdca [Digital twin of the heart] // Izmerenie. Monitoring. Upravlenie. Kontrol. 2021. № 1(35). P. 73–84. DOI: 10.21685/2307-5538-2021-1-9. (In Russian)
 13. *Purcell W., Neubauer T.* Digital Twins in Agriculture: A State-of-the-art review // Smart Agricultural Technology. 2023. Vol. 3. P. 100094. DOI: 10.1016/j.atech.2022.100094. EDN: BCBHRX.
 14. *García R., Aguilar J., Toro M., Pinto A., Rodríguez P.* A systematic literature review on the use of machine learning in precision livestock farming // Computers and Electronics in Agriculture. 2020. Vol. 179. P. 105826. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105826. EDN: YCUFBG.
 15. *Verdouw C., Tekinerdogan B., Beulens A., Wolfert S.* Digital twins in smart farming // Agricultural Systems. 2021. Vol. 189. P. 103046. DOI: 10.1016/j.agsy.2020.103046.
 16. *Alves R.G., Souza G., Maia R.F., Tran A.L.H., Kamiński C., Soininen J.P., Aquino P.T., Lima F.* A Digital Twin for Smart Farming // 2019 IEEE Global Humanitarian Technology Conference (GHTC). 2019. P. 1–4.
 17. *Chaux J.D., Sanchez-Londono D., Barbieri G.* A Digital Twin Architecture to Optimize Productivity within Controlled Environment Agriculture // Applied Sciences. 2021. Vol. 11, № 19. P. 8875. DOI: 10.3390/app11198875.

18. *Ariesen-Verschuur N., Verdouw C., Tekinerdogan B.* Digital Twins in greenhouse horticulture: A review // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2022. Vol. 199. P. 107183. DOI: 10.1016/j.compag.2022.107183.
19. *Pylianidis C., Osinga S., Athanasiadis I.N.* Introducing digital twins to agriculture // *Computers and Electronics in Agriculture*. 2021. Vol. 184. P. 105942. DOI: 10.1016/j.compag.2020.105942.
20. *Jans-Singh M., Leeming K., Choudhary R., Girolami M.* Digital twin of an urban-integrated hydroponic farm // *Data-Centric Engineering*. 2020. Vol. 1. P. 20. DOI: 10.1017/dce.2020.21.

Original article submitted 03.07.2025

Электроника, фотоника, приборостроение и связь

УДК 621.317.7:629.78

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННЫХ ПОМЕХ В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ

Б.Б. Бородулин, М.Ю. Лившиц¹

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

E-mail: borodulinbb@gmail.com, mikhaillivshits@gmail.com

Аннотация. Эффективность работы информационно-измерительных систем космических аппаратов, и в первую очередь оптических систем, зависит от температурных деформаций несущей конструкции, на которой они размещены. Небольшие угловые термодформационные смещения оптических осей, вызванные неравномерностью температурного поля несущей конструкции, приводят к существенным линейным отклонениям точек измерения из-за удаленности объектов измерения от орбиты космического аппарата. В статье рассматриваются динамические характеристики систем автоматической стабилизации температурного поля несущей конструкции малого космического аппарата при воздействии на него внешних и внутренних возмущений, характерных для этого типа объектов.

Ключевые слова: космические аппараты, автоматическое управление, измерительные системы, температурное поле, передаточная функция, функция Грина, термодформационные погрешности.

Введение

Рассматривается малый орбитальный космический аппарат (КА), на несущей конструкции (НК) которого размещена информационно-измерительная система (ИИС), содержащая тепловыделяющую аппаратуру, включающую оптические приборы. На рис. 1 схематично представлены фрагменты отсека КА, который включает в себя следующие элементы:

- внешний защитный кожух с многослойной изоляцией;
- несущая конструкция;



© Автор(ы), 2025

¹ Борис Борисович Бородулин, кандидат технических наук, доцент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов. Михаил Юрьевич Лившиц, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

– ИИС, содержащая тепловыделяющую информационно-измерительную аппаратуру, включающую пассивные и активные оптические системы (ОС) – зеркала, фотоаппаратуру, линзы.

Значительную долю в общей измерительной информации составляет информация, полученная от оптических компонентов ИИС. Оптические системы КА широко используются в различных областях, например в сельскохозяйственном, природоохранном и экологическом мониторинге.

Для проведения измерений в защитном кожухе имеются люки, которые открываются и закрываются в ходе работы ОС. При открытии люков НК нагревается солнечными лучами (прямыми или отраженными) или охлаждается космическим пространством. Это вместе с локальными тепловыделениями ИИС вызывает термодетформацию НК и с учетом расстояния КА от объекта измерений является источником значительной погрешности ОС. Так, например, угловое смещение оптической оси на 1 градус вызывает линейное смещение изображения точки съемки относительно оригинала на поверхности Земли более чем на 8,7 км при высоте орбиты КА 500 км.

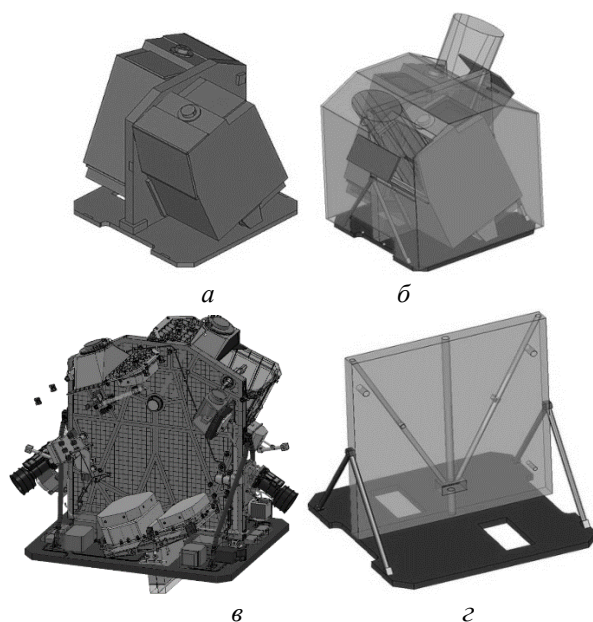


Рис. 1. Общий вид отсека космического аппарата:
а – отсек в сборе; *б* – размещение аппаратуры в КА;
в – размещение ИИС на НК; *г* – НК в сборе

С целью уменьшения погрешности показаний ОС ИИС разработана система автоматической термоградиентной стабилизации (СТГС) температуры НК КА [1]. СТГС состоит из локальных автономных систем автоматического управления (САУ) температурой в контрольной точке НК (рис. 2) с помощью управляемых теплоисточников (УИТ).

Исполнительный элемент УИТ представляет собой теплорассеивающую подложку размером 30×10 мм, на которую крепятся пленочные электронагреватели размером 20×20 мм и термодатчики размером 5×5 мм. Коэффициент пе-

редачки термодатчика входит в передаточную функцию объекта управления $W_{oy}(p)$.

Система управления температурным полем

Принцип управления температурным полем иллюстрируется структурной схемой САУ (рис. 2). Каждая локальная САУ представляет собой следящую систему, замкнутую по отклонению управляемой температуры, например для k -ой точки НК – T_k . График $U_k(\tau)$ изменения температуры задания каждой k -й локальной САУ задается управляющим модулем бортового компьютера по специальному алгоритму [2], учитывающему изменение градиента температурного поля НК в ходе эксплуатации ИИС КА. На рис. 3 показано расположение элементов УИТ на НК. Количество и место установки элементов УИТ выбрано таким образом (по 32 шт. на двух сторонах НК), чтобы наилучшим образом обеспечивать равномерное распределение температур по объему НК в заданном диапазоне [7, 8, 10, 12, 19].

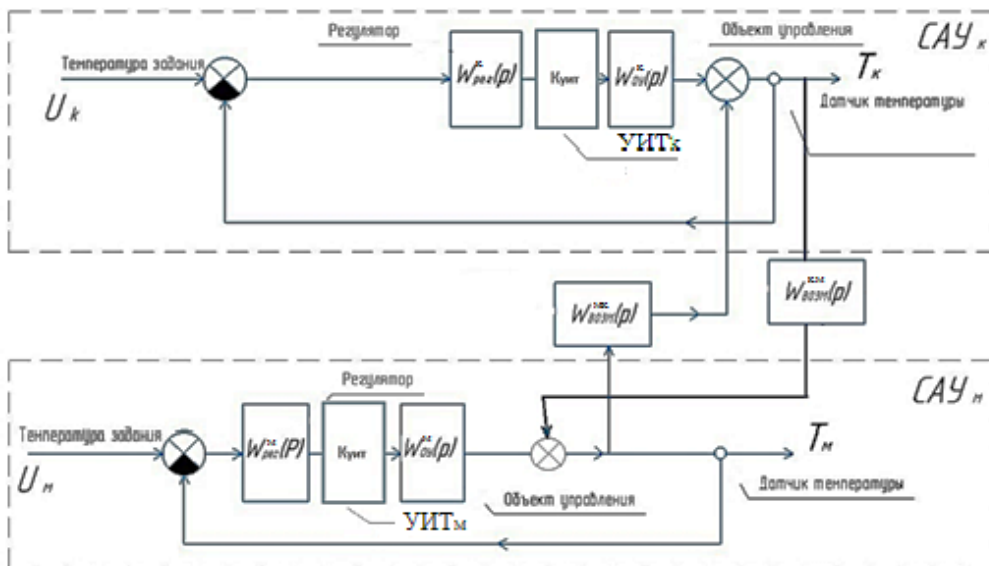


Рис. 2. Фрагмент структурной схемы стабилизации температурного поля

Математическая модель объекта управления

Математическую модель ОУ, содержащую однородное параболическое уравнение и неоднородные краевые условия, для удобства дальнейшего использования при синтезе и анализе САУ с помощью аппарата передаточных функций целесообразно представить в отклонениях $\Theta(x, y, z, \tau) = T(x, y, z, \tau) - T_0$ температурного поля $T(x, y, z, \tau)$ в НК от начального значения в форме неоднородного уравнения теплопроводности [2–4]

$$\frac{\partial \Theta(x, y, z, \tau)}{\partial \tau} - a \left[\frac{\partial^2 \Theta(x, y, z, \tau)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Theta(x, y, z, \tau)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Theta(x, y, z, \tau)}{\partial z^2} \right] = \omega(x, y, z, \tau) \quad (1)$$

и однородных краевых условий

$$\left. \frac{\partial \Theta(x, y, z, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial \Theta(x, y, z, \tau)}{\partial y} \right|_{y=0} = \left. \frac{\partial \Theta(x, y, z, \tau)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \quad (2)$$

$$\Theta|_{\tau=0} = 0 \quad (3)$$

со стандартизирующей функцией:

$$\begin{aligned} \omega(x, y, z, \tau) = & Q_{X_1}(y, z, \tau) \delta(x) + Q_{X_2}(y, z, \tau) \delta(x - R_1) + \\ & + Q_{Y_1}(x, z, \tau) \delta(y) + Q_{Y_2}(x, z, \tau) \delta(y - R_2) + \\ & + Q_{Z_1}(x, y, \tau) \delta(z) + Q_{Z_2}(x, y, \tau) \delta(z - R_3). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $Q_{X_1}(y, z, \tau)$, $Q_{X_2}(y, z, \tau)$, $Q_{Y_1}(x, z, \tau)$, $Q_{Y_2}(x, z, \tau)$, $Q_{Z_1}(x, y, \tau)$, $Q_{Z_2}(x, y, \tau)$ – обобщенные тепловые потоки на соответствующие грани НК, $\delta(*)$ – дельта-функция Дирака.

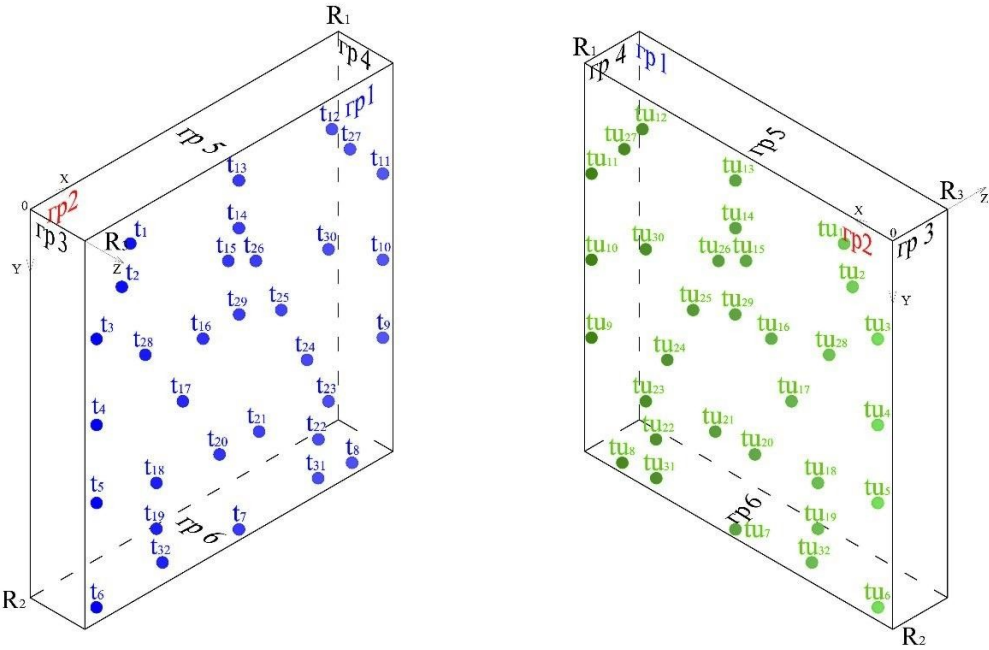


Рис. 3. Расположение элементов УИТ на НК

В составе обобщенных потоков $Q_{Z_1}(x, y, \tau)$, $Q_{Z_2}(x, y, \tau)$ в качестве компонент содержатся тепловые потоки $q_{ti}(\tau)$ и $q_{tui}(\tau)$, $i = \overline{1, N}$ $N = 32$ соответствующих УИТ_i, размещенных симметрично на противоположных гранях $z = 0$ и $z = R_3$ НК.

Эти потоки представляют собой дискретно распределенные управляющие воздействия, причем для каждой i -й контрольной точки, совмещенной с i -м УИТ, остальные j -е потоки q_j j -х УИТ, $j \neq i$ являются возмущениями.

В силу того, что для рассматриваемой математической модели объекта управления управляющие воздействия и возмущения представляют собой потоки тепла на гранях НК, т. е. формируют граничные условия 2-го рода, температур-

ное поле рассматриваемой краевой задачи представляется суммой температурных полей соответствующих одномерных пластин:

$$\Theta(x, y, z, \tau) = \Theta_x^{(2)}(x, \tau) + \Theta_y^{(2)}(y, \tau) + \Theta_z^{(2)}(z, \tau). \quad (5)$$

Здесь $\Theta_x^{(2)}(x, \tau)$, $\Theta_y^{(2)}(y, \tau)$, $\Theta_z^{(2)}(z, \tau)$ – решение трех одномерных задач:

$$\frac{\partial \Theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \Theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial x^2} = 0, \quad \tau > 0, \quad x \in (0, R_1); \quad (6)$$

$$\Theta_x^{(2)}(x, \tau) \Big|_{\tau=0} = 0, \quad x \in [0, R_1]; \quad (7)$$

$$\lambda \frac{\partial \Theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=0} = Q_{x1}(\tau) \Big|_{x=0, q_{x1}=0}, \quad \tau \geq 0; \quad (8)$$

$$\lambda \frac{\partial \Theta_x^{(2)}(x, \tau)}{\partial x} \Big|_{x=R_1} = Q_{x2}(\tau) \Big|_{x=R_2, q_{x2}=0}, \quad \tau \geq 0; \quad (9)$$

$$\frac{\partial \Theta_y^{(2)}(y, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \Theta_y^{(2)}(y, \tau)}{\partial y^2} = 0, \quad \tau > 0, \quad y \in (0, R_2); \quad (10)$$

$$\Theta_y^{(2)}(y, \tau) \Big|_{\tau=0} = 0, \quad y \in [0, R_2]; \quad (11)$$

$$\lambda \frac{\partial \Theta_y^{(2)}(y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=0} = Q_{y1}(\tau) \Big|_{y=0, q_{y1}=0}, \quad \tau \geq 0; \quad (12)$$

$$\lambda \frac{\partial \Theta_y^{(2)}(y, \tau)}{\partial y} \Big|_{y=R_2} = Q_{y2}(\tau) \Big|_{y=R_2, q_{y2}=0}, \quad \tau \geq 0; \quad (13)$$

$$\frac{\partial \Theta_z^{(2)}(z, \tau)}{\partial \tau} - a \frac{\partial^2 \Theta_z^{(2)}(z, \tau)}{\partial z^2} = 0, \quad \tau > 0, \quad z \in (0, R_3); \quad (14)$$

$$\Theta_z^{(2)}(z, \tau) \Big|_{\tau=0} = 0, \quad z \in [0, R_3]; \quad (15)$$

$$\lambda \frac{\partial \Theta_z^{(2)}(z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=0} = Q_{z1}(\tau) \Big|_{z=0, q_{z1}=0}, \quad \tau \geq 0; \quad (16)$$

$$\lambda \frac{\partial \Theta_z^{(2)}(z, \tau)}{\partial z} \Big|_{z=R_3} = Q_{z2}(\tau) \Big|_{z=R_3, q_{z2}=0}, \quad \tau \geq 0. \quad (17)$$

Передаточную функцию для каждой из компонент $\Theta_x^{(2)}(x, \tau)$, $\Theta_y^{(2)}(y, \tau)$, $\Theta_z^{(2)}(z, \tau)$ в (5) можно получить, используя преобразование Лапласа функций Грина для вспомогательных краевых задач (6)–(17), предполагая управляющими и возмущающими воздействиями соответствующие тепловые потоки, источниками которых являются УИТ, тепловыделяющая аппаратура ИИС, прямые и от-

раженные потоки тепла через открытые люки кожуха. Функции Грина для каждой из одномерных краевых задач (6)–(17) имеют вид [3, 4]:

$$G_n(x, \xi_x, \tau - t) = \sum_{n=0}^{\infty} G_n^{(\tau)}(\mu_n, \tau - t) \varphi_n(\mu_n, x) \varphi_n(\mu_n, \xi_x); \quad (18)$$

$$G_m(y, \xi_y, \tau - t) = \sum_{m=0}^{\infty} G_m^{(\tau)}(\psi_m, \tau - t) \varphi_m(\psi_m, y) \varphi_m(\psi_m, \xi_y); \quad (19)$$

$$G_\chi(z, \xi_z, \tau - t) = \sum_{\chi=0}^{\infty} G_\chi^{(\tau)}(\gamma_\chi, \tau - t) \varphi_\chi(\gamma_\chi, z) \varphi_\chi(\gamma_\chi, \xi_z). \quad (20)$$

Здесь μ_n , ψ_m , γ_χ – собственные числа, полученные решением соответствующей задачи Штурма – Лиувилля каждой краевой задачи (6)–(17) для граничных условий 2-го рода. Трансформанта Лапласа функций Грина (18)–(20) примет следующий вид:

$$\begin{aligned} G_x(x, p) &= a\lambda^{-1} \left(W_x^{(2)}(x, \xi_x, p) \right) = (c\rho R_1)^{-1} \times \\ &\times \left\{ \frac{1}{p} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cos\left(\pi n \frac{x}{R_1}\right) R_1^2 (a\pi^2 n^2)^{-1} \left[R_1^2 (a\pi^2 n^2)^{-1} p + 1 \right]^{-1} \right\}; \\ G_y(y, p) &= a\lambda^{-1} \left(W_y^{(2)}(y, \xi_y, p) \right) = (c\rho R_2)^{-1} \times \\ &\times \left\{ \frac{1}{p} + 2 \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \cos\left(\pi m \frac{y}{R_2}\right) R_2^2 (a\pi^2 m^2)^{-1} \left[R_2^2 (a\pi^2 m^2)^{-1} p + 1 \right]^{-1} \right\} \quad (21) \\ G_z(z, p) &= a\lambda^{-1} \left(W_z^{(2)}(z, \xi_z, p) \right) = (c\rho R_3)^{-1} \times \\ &\times \left\{ \frac{1}{p} + 2 \sum_{\chi=1}^{\infty} (-1)^\chi \cos\left(\pi \chi \frac{z}{R_3}\right) R_3^2 (a\pi^2 \chi^2)^{-1} \left[R_3^2 (a\pi^2 \chi^2)^{-1} p + 1 \right]^{-1} \right\} \end{aligned}$$

Тогда с учетом (5) рассматриваемый объект управления с распределенными параметрами допускает структурное представление по каждой координате x , y , z в виде параллельного соединения интегрирующего звена и бесконечного числа типовых апериодических звеньев и для любых двух точек $N(x, y, z)$ и $M(\xi_x, \xi_y, \xi_z)$ имеет передаточную функцию $W(x, \xi_x, y, \xi_y, z, \xi_z, p) = \frac{\Theta(p)}{Q_z(p)}$, если рассматривать все компоненты $Q_z(p)$, кроме $q_{ii}(\tau)$ и $q_{lui}(\tau)$, в качестве неконтролируемых возмущений [13–15, 17, 18]:

$$\begin{aligned} W(M, N, p) &= \frac{1}{cpR_1} \left[\frac{1}{p} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K_{x, \xi_x}}{T_{xn} p + 1} \right] + \frac{1}{cpR_2} \left[\frac{1}{p} + \sum_{m=1}^{\infty} \frac{K_{y, \xi_y}}{T_{ym} p + 1} \right] + \\ &+ \frac{1}{cpR_3} \left[\frac{1}{p} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{K_{z, \xi_z}}{T_{zk} p + 1} \right]. \quad (22) \end{aligned}$$

Ограничивая бесконечные ряды в (22) тремя первыми членами $N=3$, $M=3$, $K=3$, получим структурное представление объекта управления [4].

На рис. 4 коэффициенты

$$k_n(x, \xi_x, p) = 2 \frac{\cos\left(\pi n \frac{x}{R_1}\right) \cos\left(\pi n \frac{\xi_x}{R_1}\right) R_1^2}{a \pi^2 n^2}, \quad n = \overline{1, N};$$

$$k_m(y, \xi_y, p) = 2 \frac{\cos\left(\pi m \frac{y}{R_2}\right) \cos\left(\pi m \frac{\xi_y}{R_2}\right) R_2^2}{a \pi^2 m^2}, \quad m = \overline{1, M};$$

$$k_\chi(z, \xi_z, p) = 2 \frac{\cos\left(\pi \chi \frac{z}{R_3}\right) \cos\left(\pi \chi \frac{\xi_z}{R_3}\right) R_3^2}{a \pi^2 \chi^2}, \quad \chi = \overline{1, K}$$

и постоянные времени

$$T_{xn} = \frac{R_1^2}{a \pi n^2}; \quad T_{ym} = \frac{R_2^2}{a \pi m^2}; \quad T_{zk} = \frac{R_3^2}{a \pi k^2}$$

определяются согласно (21), (22), $a = \frac{\lambda}{cp}$.

Очевидно, в силу наличия в передаточной функции объекта управления $W_{oy}(p)$ интегрирующего звена $\frac{1}{p}$ (22) объект управления $W_{oy}(p)$ и соответственно передаточная функция разомкнутой каждой локальной САУ $W_{pc}(p) = W_{pez}(p) K_{yum} W_{oy}(p)$ имеют первый порядок астатизма даже в случае выбора пропорционального регулятора $W_{pez}(p) = K_{pez}$. Однако динамический характер возмущений соседних локальных САУ (например, m -й САУ_М на САУ_К), которые проходят через астатическое звено $W_{возм}^{MK}(p)$, имеющее такую же структуру, как и $W_{oy}(p)$ (рис. 5), а также сложный динамический характер других возмущений от тепловыделяющей аппаратуры требуют для удовлетворительной работы САУ как минимум второго порядка астатизма $W_{pc}(p)$. Поэтому в качестве регулятора целесообразно использовать пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор или пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор (ПИД).

Моделирование реакции САУ на динамические возмущения

В условиях существенных допущений приближенные значения коэффициентов динамических ошибок для медленно меняющихся возмущений получены в ряде работ [1, 5-6, 9, 11, 16] путем разложения в ряд Маклорена передаточной функции соответствующей ошибки. Однако допущения в определении этих коэффициентов и сложность передаточных функций, их высокий порядок делают погрешность в определении этих коэффициентов недопустимо большой. Поэтому для расчета параметров регулятора САУ и анализа ее статических и динамических свойств использован раздел Simulink программного пакета Matlab. На рис. 5 представлена схема моделирования САУ температурой одной из точек контроля для определения настроек ПИ-регулятора K_p^{III} и T_p^{III} в линейной об-

ласти работы САУ в программной среде Matlab в разделе Simulink. Модель каждой k -й САУ по управлению и по возмущению согласно структурным схемам (см. рис. 2, 4) имеет вид, представленный на рис. 5.

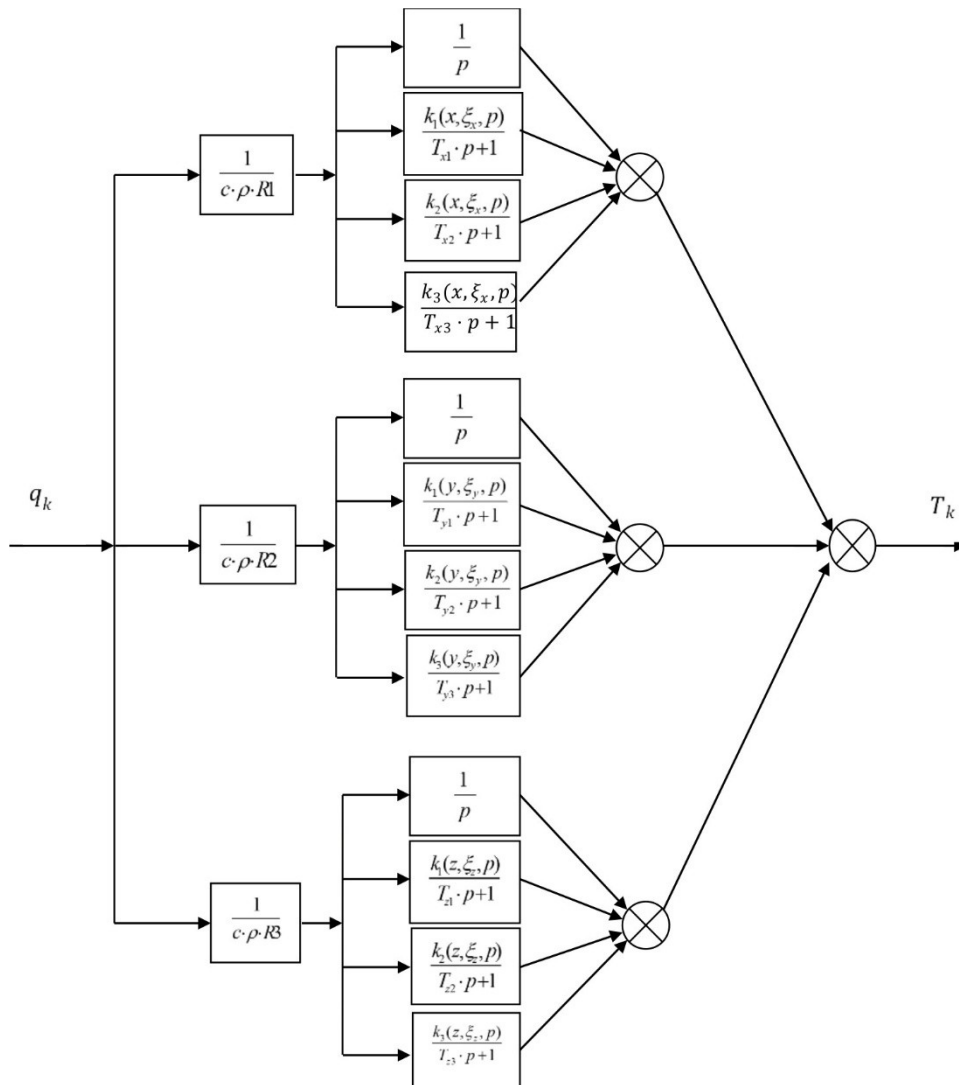


Рис. 4. Структурное представление объекта управления $N = 3$, $M = 3$, $K = 3$

С помощью коэффициента ν_{spec} корректируется скорость изменения входного сигнала, а с помощью $\nu_{возм}$ — сигнала возмущения.

Настройка параметров регулятора $W_{reg}^{ПИ}$ производится с помощью программного модуля Simulink системы Matlab из условия удовлетворения заданным показателям качества САУ: перегулирование $\sigma \leq 30\%$, степень затухания $\psi \geq 97\%$, невязка температуры за заданное время τ_k регулирования $\Delta T|_{\tau=\tau_k} \leq 4$ °К. При этом необходимо обеспечить в установившемся режиме ра-

На рис. 6 представлены результаты моделирования переходного процесса в САУ по возмущению: а) при единичном ступенчатом входном сигнале УИТ $t1\Theta_{upr}=1(\tau)$; б) при линейно нарастающем входном сигнале УИТ $t1$ со скоро-

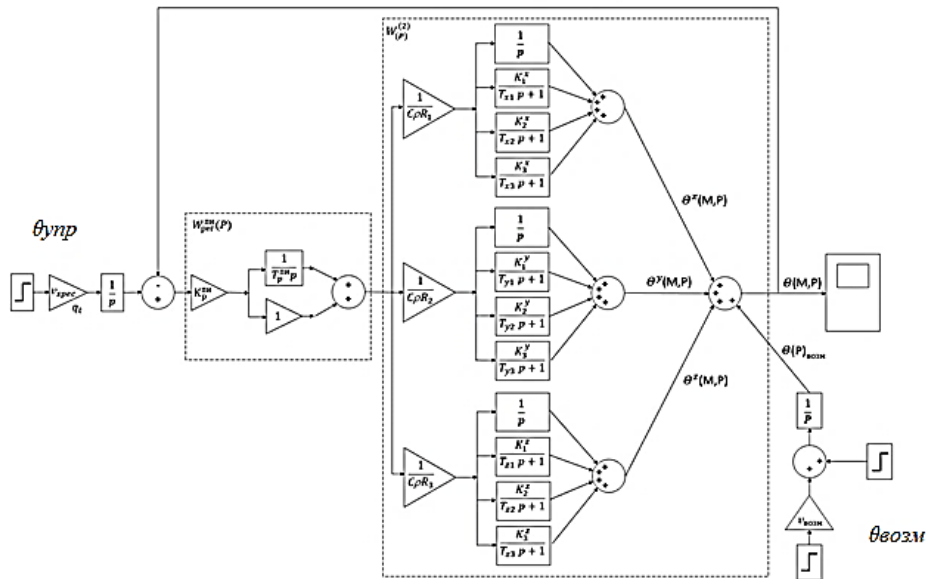
$$\text{стью } \frac{\partial \Theta_{upr}}{\partial \tau} \doteq 1 \text{ K/c.}$$


Рис. 5. Расчетная схема моделирования локальной САУ с ПИ-регулятором

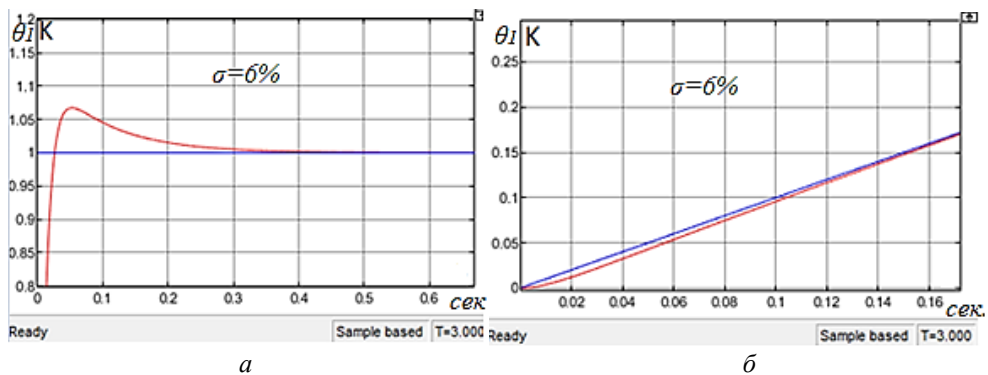


Рис. 6. Результаты моделирования переходного процесса в САУ по возмущению: *a* – переходный процесс по возмущению в точке 1; *б* – реакция САУ с ПИ-регулятором на возмущение при линейно нарастающем сигнале управления в точке 1

Параметры ПИ-регулятора определены в программе Simulink $K_p^{ПИ} = 5.3$, $T_p^{ПИ} = 52.6$.

Для сравнения на рис. 7 представлены результаты моделирования переходного процесса в САУ с ПИД-регулятором: а) при единичном ступенчатом входном сигнале $\Theta_{upr} = 1(\tau)$; б) при линейно нарастающем входном сигнале $\frac{\partial \Theta_{upr}}{\partial \tau} = 1 \text{ К/с}$.

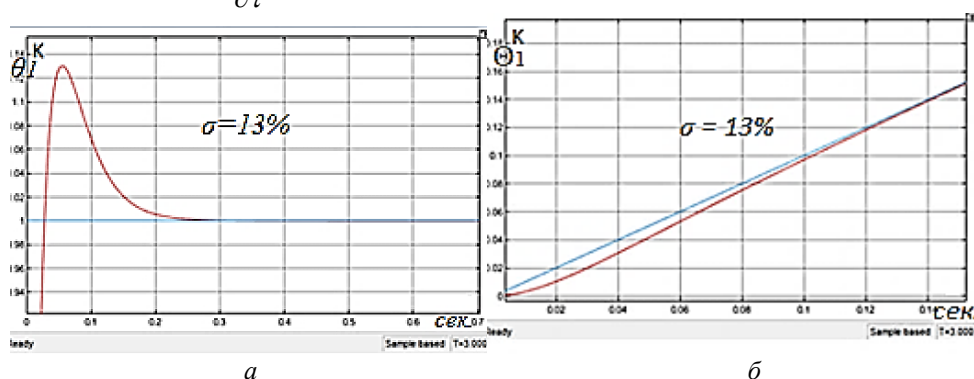


Рис. 7. Результаты моделирования переходного процесса в САУ по возмущению с ПИД-регулятором: а – переходный процесс по возмущению в точке 1; б – реакция САУ с ПИД-регулятором на возмущение при линейно нарастающем сигнале управления в точке 1

Параметры ПИД-регулятора: $K_p^{ПИ} = 3.8$, $T_D^{ПИД} = 0.0001$, $K_\Phi = 4.05$, $T_U^{ПИД} = 66.7$.

На рис. 8 представлены реакции САУ на возмущение с увеличенной скоростью сигнала управления до 2К/с.

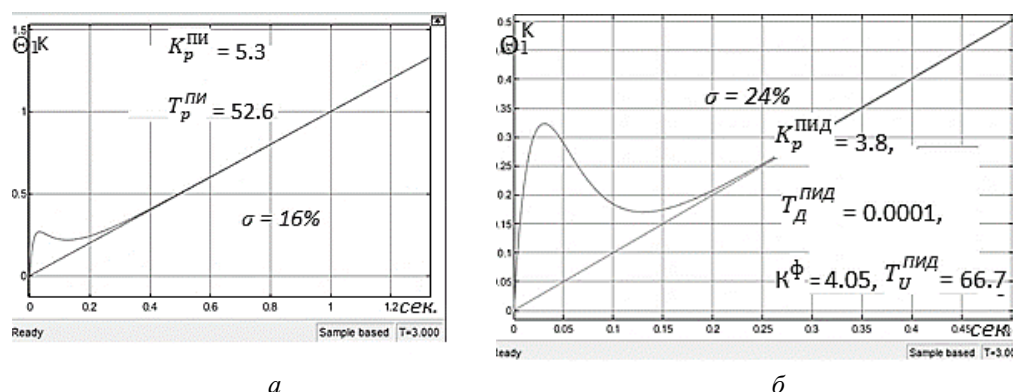
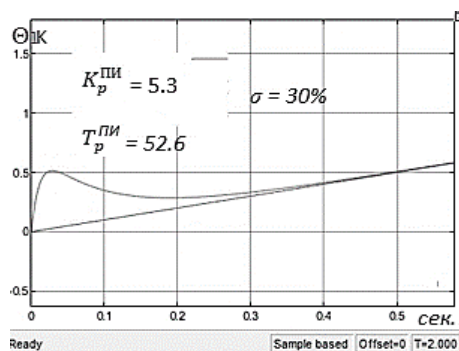
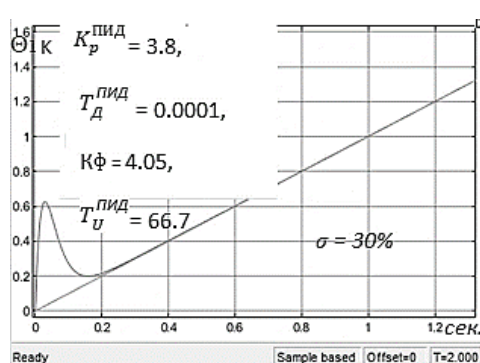


Рис. 8. Реакции САУ на возмущение с увеличенной скоростью сигнала управления до 2К/с: а – реакция САУ на возмущение с ПИ-регулятором; б – реакция САУ на возмущение с ПИД-регулятором

На рис. 9 представлена реакция САУ на возмущение с ПИ и ПИД регулятором со скоростью изменения входного сигнала 5 К/с.



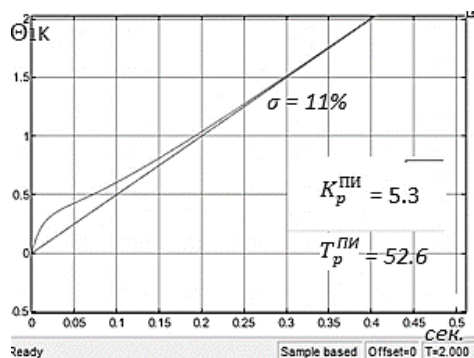
a



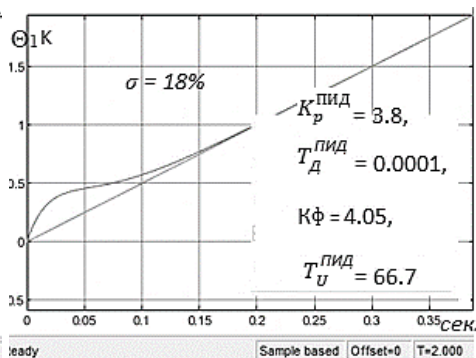
б

Рис. 9. Реакция на возмущение: *a* – САУ с ПИ-регулятором; *б* – САУ с ПИД-регулятором

На рис. 10 представлена реакция САУ на возмущение при скорости изменения входного сигнала 10 К/с.



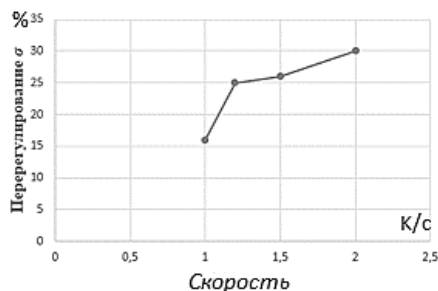
a



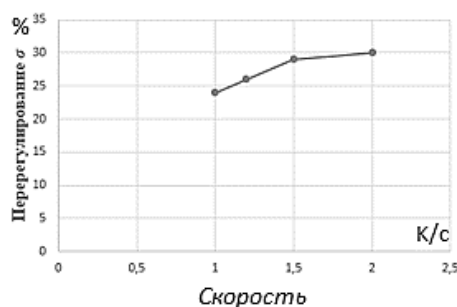
б

Рис. 10. Реакция САУ с ПИ-регулятором по возмущению: *a* – САУ с ПИ-регулятором; *б* – САУ с ПИД-регулятором

На рис. 11 представлены графики зависимости перерегулирования σ от скорости изменения сигнала возмущения $\Theta(p)_{\text{возм}}$.



a



б

Рис. 11. Зависимость перерегулирования σ от скорости изменения сигнала возмущения $\Theta(p)_{\text{возм}}$: *a* – САУ с ПИ-регулятором; *б* – САУ с ПИД-регулятором

Заключение

В ходе моделирования выявлены зависимости качественных показателей системы автоматического управления температурным полем несущей конструкции космического аппарата от характерных динамических возмущений. Полученные результаты позволяют планировать управление работой информационно-измерительной системы и не проводить оптические измерения до достижения установившихся процессов при стабилизации температурного поля несущей конструкции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лившиц М.Ю., Бородулин Б.Б., Ненашев А.В., Савельева Ю.О. Автоматическая компенсация термодформаций несущих конструкций киберфизических информационно-измерительных систем // Математические методы в технологиях и технике. 2021. № 3. С. 51-54. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_3_51. EDN: YSKYHD.
2. Borodulin B.B., Livshits M.Yu., Korshikov S.E. Optimization of Temperature Distributions in Critical Cross-sections of Load-bearing Structures of Measurement Optical Systems of Autonomous Objects // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 92. P. 01053.
3. Бутковский А.Г. Теория оптимального управления системами с распределенными параметрами. М.: Наука, 1965. 476 с.
4. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами: учеб. пособие. М.: Высш. шк., 2003. 299 с.
5. Бородулин Б.Б. Алгоритм автоматической компенсации термодформаций теплонагруженных несущих конструкций // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29, № 4 (72). С. 6–19. DOI: 10.14498/tech.2021.4.1. EDN: RCGUW1.
6. Лившиц М.Ю., Деревянов М.Ю., Давыдов А.Н., Копытин С.А. Стабилизация температурного поля несущих конструкций автономных объектов // Труды девятой Всероссийской научной конференции с международным участием «Математическое моделирование и краевые задачи». 2013. Ч. 2. С. 47–51.
7. Li L., Wang X., Zhang L. Thermal Effects for Optical System and Design of an Analysis Program // Journal of Beijing Institute of Technology. 2000. Vol. 20, № 1. P. 112–114.
8. Клебанов Я.М., Карсаков А.В., Хонина С.Н. и др. Компенсация аберраций волнового фронта в телескопах космических аппаратов с регулировкой температурного поля телескопа // Компьютерная оптика. 2017. Т. 41, № 1. С. 30–36. DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-1-30-36. EDN: XXMBAP.
9. Топчиев Ю.И. Атлас для проектирования систем автоматического регулирования: учеб. пособие для вузов. М.: Машиностроение, 1989. 751 с.
10. Di Loreto M., Damak S., Eberard D., Brun X. Approximation of linear distributed parameter systems by delay systems // Automatica. 2016. P. 162–168. DOI: 10.1016/j.automatica.2016.01.065. EDN: YCQGKO.
11. Gogol I.V., Remizova O.A., Syrovashin V.V., Fokin A.L. Robust Autonomous Control of a Multiply Connected Technological Object with Input Delays // Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control. 2021. Vol. 338. DOI: 10.1007/978-3-030-66077-2_7. EDN: ROSTTS.
12. Алифанов О.М. Идентификация процессов теплообмена летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1979. 216 с.
13. Григолюк Э.И., Кузнецов В.К. Исследование теплообмена космических аппаратов // Исследования по теории пластин и оболочек. 1970. Вып. 6–7. С. 76–89.
14. Авдеевский В.С., Галицкий Б.М., Глебов Г.А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике: учебник для авиационных специальностей вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1992. 528 с.
15. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1984. 247 с.
16. Nenarokomov A.V., Vikulov A.G., Kraynova I.V., Kuznetsov V.E., Voroshko P.A., Kotyakhov A.A. Heat transfer mathematical model of satellite based on thermal tests and inverse problems technique // ESA Conference. Braunschweig, Germany, 2014. ESA SP-727.

17. Викулов А. Г., Кузнецов В. Е. Валидация тепловой модели составной части космического аппарата // Сборник трудов V Международного межотраслевого молодежного научно-технического форума «Молодежь и будущее авиации и космонавтики-2013». 2013.
18. Деменков Н.П., Микрин Е.А. Управление в технических системах: учебник. М.: МГТУ им. Баумана, 2017. 456 с.
19. Цаплин С.В., Большчев С.А., Мишагин Б.С., Шеманев Д.В. Экспериментальные исследования макета оптико-телескопического комплекса космического аппарата при воздействии тепловых факторов космического пространства в лабораторных условиях // Вестник СамГУ. Естественная серия. 2014. № 7 (118). С. 134–144.

Статья поступила в редакцию 26.06.2025

AUTOMATIC COMPENSATION OF THERMODEFORMATION INTERFERENCES IN INFORMATION AND MEASUREMENT SYSTEMS OF SPACECRAFT

B.B. Borodulin, M.Yu. Livshits¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: borodulinbb@gmail.com, mikhaillivshits@gmail.com

Abstract. *The efficiency of the operation of information-measuring systems of spacecraft, and primarily optical systems, depends on the thermal deformations of the supporting structure on which they are placed. Small angular thermo-deformation displacements of the optical axes, caused by the non-uniformity of the temperature field of the supporting structure, lead to significant linear deviations of the measurement points due to the distance of the measurement objects from the spacecraft's orbit. The article discusses the dynamic characteristics of the automatic temperature field stabilization systems of the supporting structure of a small spacecraft under the influence of external and internal disturbances typical for objects of this type.*

Keywords: *spacecraft, automatic control, measuring systems, temperature field, transfer function, Green function, thermal deformation errors.*

REFERENCES

1. Livshic M.Yu., Borodulin B.B., Nenashev A.V., Saveleva Yu.O. Avtomaticheskaya kompensaciya termodeformacij nesushchih konstrukcij kiberfizicheskikh informacionno-izmeritel'nyh system [Automatic Compensation of Thermal Deformations of Load-Bearing Structures of Cyber-Physical Information-Measuring Systems] // Matematicheskie metody v tekhnologiyah i tekhnike. 2021. № 3. P. 51–54. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2021_3_51. (In Russian)
2. Borodulin B.B., Livshits M.Yu., Korshikov S.E. Optimization of Temperature Distributions in Critical Cross-sections of Load-bearing Structures of Measurement Optical Systems of Autonomous Objects // MATEC Web of Conferences. 2017. Vol. 92. P. 01053.
3. Butkovskij A.G. Teoriya optimalnogo upravleniya sistemami s raspredelennymi parametrami [Theory of Optimal Control of Systems with Distributed Parameters]. M.: Nauka, 1965. 476 p. (In Russian)
4. Rapoport E.Ya. Strukturnoe modelirovanie obektov i sistem upravleniya s raspredelennymi parametrami: ucheb. posobie [Structural Modeling of Objects and Control Systems with Distributed Parameters]. M.: Vyssh. shk., 2003. 299 p. (In Russian)
5. Borodulin B.B. Algoritm avtomaticheskoy kompensacii termodeformacij teplonagruzhennyh nesushchih konstrukcij [Algorithm for Automatic Compensation of Thermal Deformations of Heat-Loaded Load-Bearing Structures] // Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2021. V. 29, № 4 (72). P. 6–19. DOI: 10.14498/tech.2021.4.1. (In Russian)
6. Livshic M.Yu., Derevyanov M.Yu., Davydov A.N., Kopytin S.A. Stabilizaciya temperaturnogo polya nesushchih konstrukcij avtonomnyh obektov [Temperature Field Stabilization of Load-



© The Author(s), 2025

¹ Boris B. Borodulin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.
Mikhail Yuryevich Livshits (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Head of the Department of Management and System Analysis of Thermal Power and Sociotechnical Complexes.

- Bearing Structures of Autonomous Objects Temperature Field Stabilization of Load-Bearing Structures of Autonomous Objects] // Trudy devyatoj Vserossijskoj nauchnoj konferencii s mezhdunarodnym uchastiem «Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi». 2013. № 2. P. 47–51. (In Russian)
7. *Li L., Wang X., Zhang L.* Thermal Effects for Optical System and Design of an Analysis Program // Journal of Beijing Institute of Technology. 2000. Vol. 20, № 1. P. 112–114.
 8. *Klebanov Ya.M., Karsakov A.V., Honina S.N. i dr.* Kompensaciya aberracij volnovogo fronta v teleskopah kosmicheskikh apparatov s regulirovkoj temperaturnogo polya teleskopa [Wave-front Aberration Compensation in Spacecraft Telescopes with Telescope Temperature Field Control] // Kompyuternaya optika. 2017. V. 41, № 1. P. 30–36. DOI: 10.18287/0134-2452-2017-41-1-30-36. (In Russian)
 9. *Topcheev Yu.I.* Atlas dlya proektirovaniya sistem avtomaticheskogo regulirovaniya: ucheb. posobie dlya vtuzov [Atlas for Designing Automatic Control Systems: Textbook for Technical Universities]. M.: Mashinostroenie, 1989. 751 p. (In Russian)
 10. *Di Loreto M., Damak S., Eberard D., Brun X.* Approximation of linear distributed parameter systems by delay systems // Automatica. 2016. P. 162–168. DOI: 10.1016/j.automatica.2016.01.065.
 11. *Gogol I.V., Remizova O.A., Syrovashin V.V., Fokin A.L.* Robust Autonomous Control of a Multiply Connected Technological Object with Input Delays // Cyber-Physical Systems: Modelling and Intelligent Control. 2021. Vol. 338. DOI: 10.1007/978-3-030-66077-2_7.
 12. *Alifanov O.M.* Identifikaciya processov teploobmena letatelnyh apparatov [Identification of Heat Exchange Processes of Aircraft]. M.: Mashinostroenie, 1979. 216 p. (In Russian)
 13. *Grigolyuk E.I., Kuznecov V.K.* Issledovanie teploobmena kosmicheskikh apparatov [Heat Exchange Research of Spacecraft] // Issledovaniya po teorii plastin i obolochek. 1970. Vyp. 6–7. P. 76–89. (In Russian)
 14. *Avduevskij V.S., Galicejskij B.M., Glebov G.A. i dr.* Osnovy teploperedachi v aviacionnoj i raketno-kosmicheskoy tekhnike: uchebnik dlya aviacionnyh specialnostej vuzov [Fundamentals of Heat Transfer in Aviation and Rocket-Space Technology]. 2-e izd., pererab. i dop. M.: Mashinostroenie, 1992. 528 p. (In Russian)
 15. *Dulnev G.N.* Teplo- i massoobmen v radioelektronnoj apparature: uchebnik dlya vuzov [Heat and Mass Transfer in Radioelectronic Equipment]. M.: Vysshaya shkola, 1984. 247 p. (In Russian)
 16. *Nenarokomov A.V., Vikulov A.G., Kraynova I.V., Kuznetsov V.E., Voroshko P.A., Kotyakhov A.A.* Heat transfer mathematical model of satellite based on thermal tests and inverse problems technique // ESA Conference. Braunschweig, Germany, 2014. ESA SP-727.
 17. *Vikulov A.G., Kuznecov V.E.* Validaciya teplovoj modeli sostavnoj chasti kosmicheskogo aparata [Validation of Thermal Model of Spacecraft Component] // Sbornik trudov V Mezhdunarodnogo mezhotraslevogo molodezhnogo nauch-no-tekhnicheskogo foruma «Molodezh' i budushchee aviatsii i kosmonavtiki-2013». 2013. (In Russian)
 18. *Demcenkov N.P., Mikrin E.A.* Upravlenie v tekhnicheskikh sistemah: uchebnik [Control in Technical Systems]. M.: MGTU im. Bauman, 2017. 456 p. (In Russian)
 19. *Caplin S.V., Bolychev S.A., Mishagin B.S., Shemanaev D.V.* Eksperimentalnye issledovaniya maketa optiko-teleskopicheskogo kompleksa kosmicheskogo apparata pri vozdeystvii teplovyh faktorov kosmicheskogo prostranstva v laboratornyh usloviyah [Experimental Studies of the Prototype of the Optical-Telescopic Complex of the Spacecraft under the Influence of Thermal Factors of Outer Space in Laboratory Conditions] // Vestnik SamGU. Estestvennonauchnaya seriya. 2014. № 7 (118). P. 134–144. (In Russian)

Original article submitted 26.06.2025

УДК 629.7.054

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕПЛОВОГО ДРЕЙФА
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА С УЧЕТОМ
КВАДРУПОЛЬНОЙ НАМОТКИ ВОЛОКНА****А.В. Голиков¹, В.С. Попов^{1,2}, Е.В. Панкратова¹**

¹Институт проблем точной механики и управления
Российской академии наук – обособленное структурное подразделение
Федерального исследовательского центра «Саратовский научный центр РАН»
Россия, 410028, г. Саратов, ул. Рабочая, 24
²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.
Россия, г. Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77

E-mail: golikov@iptmuran.ru, vic_p@bk.ru, pankratova@iptmuran.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы разработки математической модели теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа (ВОГ), обусловленного термооптическим эффектом, которая учитывает особенности квадрупольной намотки волокна на катушку. Указанные приборы находят широкое применение в системах стабилизации, ориентации и управления движением авиакосмической и наземной техники. Основной задачей при достижении поставленной цели было разделение нестационарной функции температуры на временную составляющую и пространственную функцию, характеризующую распределение температуры вдоль нити волокна для квадрупольного способа намотки при радиальном температурном градиенте. При разработке модели в качестве исходного принято допущение, что массив нитей волокна на катушке рассматривается как периодическая сплошная структура – последовательные слои с одинаковыми теплофизическими характеристиками. Это позволяет учитывать только радиальные температурные градиенты и полагать, что температура в каждый момент времени в соответствующем слое волокна на катушке распределена равномерно. В исследовании дано обоснование корректности предложенного подхода при построении модели теплового дрейфа путем моделирования температуры в каждом слое волоконной бухты с использованием метода элементарных балансов. Моделирование выполнено в специально разработанном программном обеспечении, в котором реализованы функции графического вывода результатов расчета. На базе проведенных вычислительных экспери-



© Автор(ы), 2025

Алексей Викторович Голиков, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории анализа и синтеза динамических систем в прецизионной механике.

Виктор Сергеевич Попов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры прикладной математики и системного анализа, главный научный сотрудник лаборатории анализа и синтеза динамических систем в прецизионной механике.

Елена Владимировна Панкратова, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории анализа и синтеза динамических систем в прецизионной механике.

Работа выполнена при финансовой поддержке в рамках темы государственного задания Министерства образования и науки РФ №125020501400-6.

ментов обосновано, что в реальных условиях эксплуатации ВОГ при сравнительно невысокой скорости изменения температуры окружающей среды закон изменения температуры в волоконной бухте в радиальном направлении может быть принят линейным. Определена функция пространственного распределения температурного поля вдоль нити оптического волокна. С использованием данной функции реализован алгоритм ее применения для построения графика распределения температуры в волоконной бухте катушки с заданными геометрическими параметрами, близкими к реальным. Приведен пример вычисления теплового дрейфа прибора при заданных параметрах оптоволоконной катушки и геометрических параметрах катушки, согласующихся с параметрами приборов, используемых на практике. Предложенная модель для расчета теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа расширяет и дополняет возможности метода элементарных балансов, благодаря чему возможно реализовать простой и эффективный алгоритм расчета нестационарных температурных полей и теплового дрейфа практически любого волоконно-оптического гироскопа типовой конструкции без привлечения дорогостоящих программных продуктов. Разработанная модель позволит разработчикам систем автоматического управления движением объектов реализовывать эффективные алгоритмы для калибровки и коррекции теплового дрейфа ВОГ.

Ключевые слова: волоконно-оптический гироскоп, эффект Саньяка, чувствительный элемент, тепловой дрейф, математическая модель, температурные погрешности, квадрупольная намотка, термооптический эффект.

Введение

Датчики первичной инерциальной информации, или гироскопические датчики, – это одни из основных элементов систем управления, стабилизации и навигации подвижных объектов. Существует несколько разновидностей таких датчиков – поплавковые, роторные динамически настраиваемые, электростатические, волновые твердотельные, волоконно-оптические, микромеханические гироскопы и акселерометры, которые различаются принципом действия и классом точности [1–4].

В настоящей работе рассматривается волоконно-оптический гироскоп (ВОГ), представляющий собой оптико-электронный прибор и служащий для измерения абсолютной относительно инерциального пространства угловой скорости, принцип действия которого основан на известном эффекте Саньяка. Одними из достоинств ВОГ являются отсутствие механических частей, высокая надежность, точность и сравнительно невысокая стоимость. Чувствительным элементом является цилиндрическая катушка с намотанным на нее оптическим волокном. ВОГ широко применяется в системах ориентации и управления широкого класса подвижных объектов наземного и космического (невесомость, вакуум) применения. Кроме того, ВОГ используются в том числе на буровом оборудовании или инклинометрах [5–7] и др.

Одной из основных проблем при разработке ВОГ по-прежнему является борьба с температурными погрешностями, которые характерны для такого типа датчиков [5–10]. В настоящее время успешно применяются пассивные и активные способы борьбы [11–20 и др.] с температурными воздействиями, такие как алгоритмическая термокомпенсация, специальные способы намотки волокна, тепловое шунтирование элементов, усовершенствования катушки и др. Касательно специальных способов намотки волокна известны различные способы, среди которых наиболее распространенным является квадрупольный способ [1, 2, 6, 7, 21].

Не последнее место в разработке способов повышения точности ВОГ занимают исследования, направленные на создание математических моделей нестационарных температурных полей и температурных погрешностей, которые на этапе проектирования и испытания ВОГ помогают оценить влияние конструктивных особенностей ВОГ на его точность и чувствительность к температурным воздействиям.

В настоящее время существует достаточно большое количество работ, в том числе и авторов настоящей статьи, посвященных математическому моделированию температурных полей и температурного дрейфа ВОГ [10–16, 20–28].

Целью данной работы является разработка математической модели теплового дрейфа ВОГ, обусловленного термооптическим эффектом, учитывающей квадрупольный способ намотки волокна на катушку.

Основной задачей при достижении поставленной цели является определение функции, характеризующей распределение температуры вдоль нити волокна для квадрупольного способа намотки при радиальном температурном градиенте.

Математическая модель теплового дрейфа ВОГ, обусловленного термооптическим эффектом

Как было отмечено выше, наиболее распространенным способом намотки волокна на катушку является квадрупольный способ. Цель такой намотки – минимизация погрешности ВОГ в результате температурного воздействия. Суть состоит в том, чтобы обеспечить такое расположение витков волокна на катушке, при котором равноудаленные от середины участки волокна прилегают друг к другу, обеспечивая тем самым минимизацию погрешности. На рис. 1 показана схема классической квадрупольной намотки [2, 7, 21].

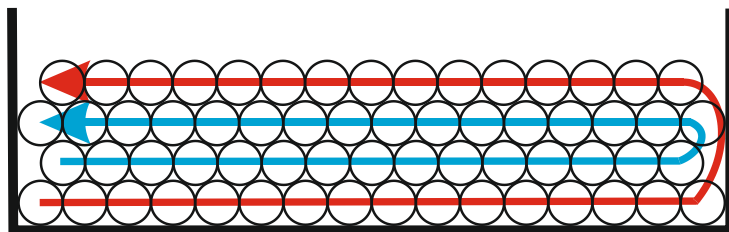


Рис. 1. Квадрупольная намотка волокна

Угловая скорость теплового дрейфа ВОГ, обусловленного термооптическим эффектом (эффект Шупе, далее по тексту тепловой дрейф), определяется известным интегралом [5–8]:

$$\Omega_T = \frac{1}{4NS_B} \int_0^L \left(\frac{dn_1}{dT} + n_1 \alpha_T \right) n_1 (2l - L) \frac{\partial T(t, l)}{\partial t} dl, \quad (1)$$

где N – количество витков на катушке; S_B – площадь одного витка; n_l – температурозависимый показатель преломления сердечника волокна; α_T – температурный коэффициент линейного расширения; L – длина волокна.

Нестационарное температурное поле в (1) является функцией двух переменных: времени t и координаты l по длине волокна $[0, L]$.

Показатель преломления является функцией температуры:

$$n_1 = n_{10} + h_T T(t, l), \quad (2)$$

где n_{10} – номинальное значение показателя преломления; h_T – температурный коэффициент показателя преломления.

Известно [9], что наибольший вклад в тепловой дрейф ВОГ, обусловленный термооптическим эффектом, дают радиальные температурные градиенты в катушке (рис. 2). Именно на минимизацию радиальных градиентов направлен квадрупольный способ намотки волокна.

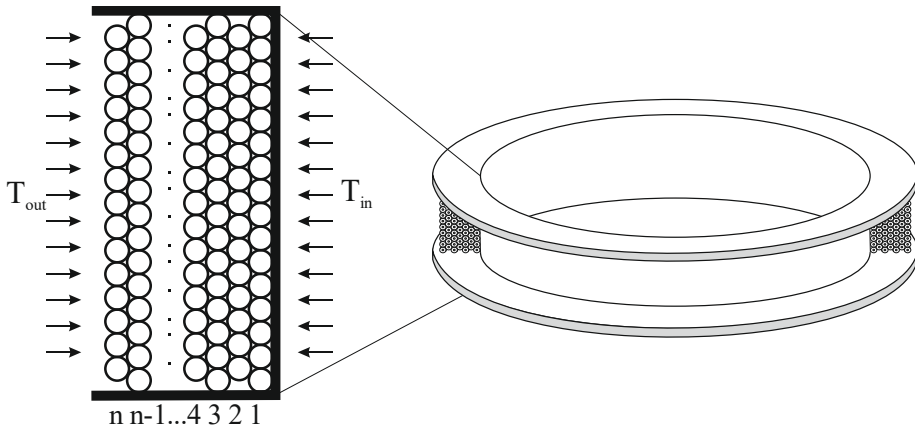


Рис. 2. Схематическое изображение поперечного среза катушки с волокном. Снизу обозначен номер слоя волокна

Положим, что температуры на внутренней (T_{in}) и внешней стороне (T_{out}) волоконной бухты являются функциями времени:

$$\begin{aligned} T_{out} &= f_{out}(t); \\ T_{in} &= f_{in}(t). \end{aligned} \quad (3)$$

Далее положим, что в радиальном направлении катушки температура изменяется линейно. В общем случае это, конечно, может не соответствовать действительности, но в рассматриваемом случае для реальных условий эксплуатации и типовых конструкций катушки это утверждение обоснованно. Покажем это на простом примере.

Массив нитей волокна на катушке представляет собой периодическую структуру, образованную слоями волокна с одинаковыми геометрическими размерами и теплофизическими характеристиками. Увеличением радиуса на диаметр волокна и, соответственно, площади слоя можно пренебречь, т. к. эта величина много меньше радиуса катушки.

Рассчитаем температуры в каждом слое волоконной бухты, используя метод балансов [9]. Для этого представим массив волокна в виде n слоев, каждый из которых является отдельным «элементарным объемом» с одинаковыми теплофизическими параметрами – массой, теплоемкостью и эквивалентной теплопроводностью (рис. 3).



Рис. 3. Тепловая модель волоконной бухты

Система дифференциальных уравнений тепловых балансов для такой упрощенной модели с учетом (3) имеет вид [9]:

$$\begin{aligned} c\dot{T}_1 &= -q(T_1 - T_2) - q(T_1 - f_{in}(t)); \\ c\dot{T}_2 &= -q(T_2 - T_1) - q(T_2 - T_3); \\ &\dots\dots\dots \\ c\dot{T}_{n-1} &= -q(T_{n-1} - T_{n-2}) - q(T_{n-1} - T_n); \\ c\dot{T}_n &= -q(T_n - T_{n-1}) - q(T_n - f_{out}(t)), \end{aligned} \quad (4)$$

где n – число слоев волокна; q – эквивалентный коэффициент теплопроводимости одного слоя; c – теплоемкость; T_i – температура i -го слоя.

Решим систему (4) для катушки с размерами, близкими к реальным: диаметр $D=100$ мм и высота $h=10$ мм. Также для расчетов параметров волокна будем использовать кварцевое одномодовое волокно марки РМ40-810, которое применяется в ВОГ. Диаметр такого волокна равен 80 мкм. Рассчитанные значения теплоемкости и эквивалентной теплопроводимости для принятой конфигурации катушки для каждого слоя волокна имеют значения $q \approx 4$ Вт/°С, $c \approx 0.318$ Дж/°С.

В реальном ВОГ функции температур (3) качественно повторяют закон изменения температуры окружающей среды. Например, для гармонического закона функции температур (3) отличаются от него значениями амплитуды и фазы. Это подтверждено многократными расчетами на моделях реальных ВОГ [9, 16, 23, 25 и др.].

Исходя из этих рассуждений для примера примем гармонический закон изменения температур на внутренней и внешней стороне катушки:

$$\begin{aligned} T_{out} &= f_{out}(t) = 20 + 40 \sin(0.00116t); \\ T_{in} &= f_{in}(t) = 20 + 40 \sin(0.00116t + \pi / 4). \end{aligned}$$

Для наглядности фазовый сдвиг принят равным $\pi/4$ (в модели реального ВОГ он много меньше), а частота соответствует периоду колебаний в 90 мин. Такой период соответствует минимальному времени облета спутником Земли на низких орбитах. Численное решение системы (4) для $n=20$, выполненное в специально разработанном программном обеспечении, в котором реализованы функции графического вывода результатов расчета, представлено на рис. 4.

Как можно видеть из приведенной диаграммы и графиков на рис. 4, температура в слоях волоконной бухты распределена линейно в радиальном направлении. Вычислительные эксперименты на базе системы (4) для других законов изменения температур (например, нагрева с постоянной скоростью) показывают сходные результаты.

На основании изложенного будем полагать, что в реальных условиях эксплуатации ВОГ при сравнительно невысокой скорости изменения температуры окружающей среды температура в волоконной бухте в радиальном направлении изменяется по линейному закону. Тогда с учетом изложенного функцию нестационарной температуры в волоконной бухте можно записать в виде

$$T(t, l) = \frac{T_n(t) - T_1(t)}{n} f(l) + T_1(t), \quad (5)$$

где $f(l)$ – функция, отражающая распределение температуры вдоль нити волокна; n – число слоев волокна на катушке.

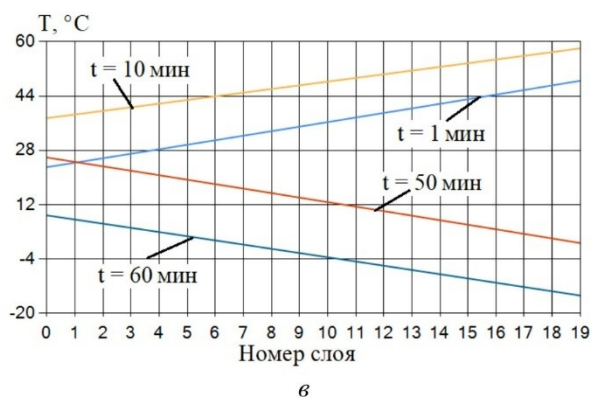
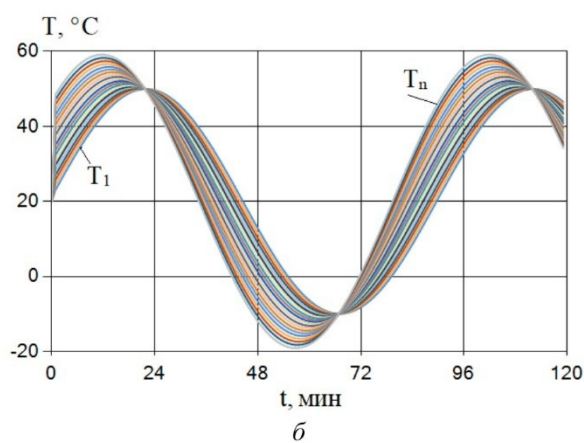
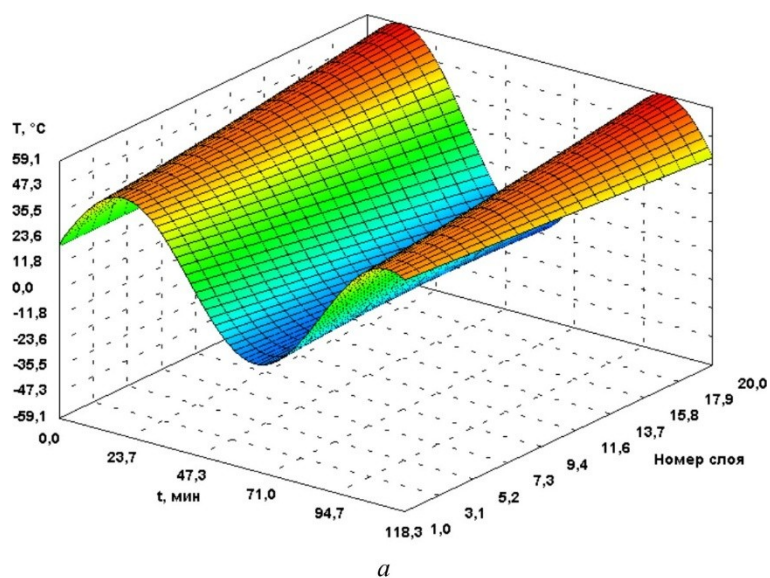


Рис. 4. Диаграмма изменения температур слоев во времени (*a*), температуры слоев волокна (*б*); графики температур в радиальном направлении в некоторые фиксированные моменты времени (*в*)

Таким образом, для вычисления интеграла (1) необходимо определить функцию $f(l)$ с учетом квадрупольного способа намотки волокна. При этом температуры на внешней и внутренней стороне катушки либо задаются известной функцией, либо вычисляются путем решения нестационарной задачи теплопроводности.

Обозначим длину участка волокна в одном слое за l_c :

$$l_c = 2\pi Rm, \quad (6)$$

где m – число витков в одном слое на катушке, которое определяется как отношение ширины бухты катушки к толщине волокна; R – радиус катушки.

Для определения функции $f(l)$ представим графически, как выглядит распределение температуры при радиальном перепаде по длине волокна при квадрупольной намотке. Поскольку мы рассматриваем радиальные температурные градиенты, температура на участке волокна, принадлежащего одному слою, будет близка к постоянной в силу существенно большей площади теплового контакта в радиальном направлении по сравнению с вертикальным. Тогда распределение температур вдоль нити волокна схематично будет выглядеть, как показано на рис. 5.

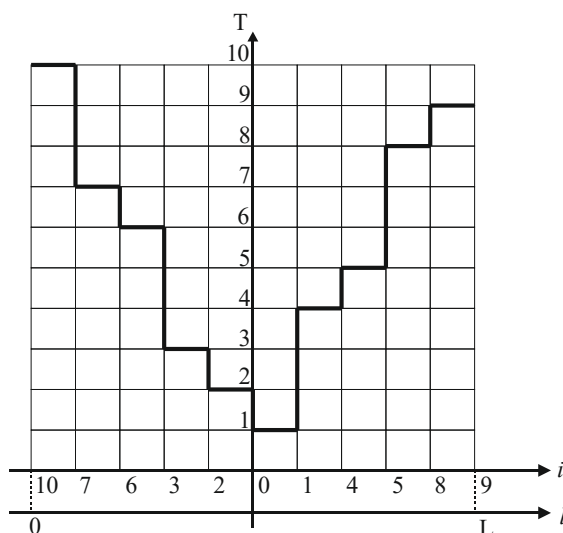


Рис. 5. Иллюстрация распределения радиального перепада температуры вдоль волокна при квадрупольной намотке

Здесь на графике i – номер слоя; l – координата по нити волокна; T – некоторая условная температура.

Таким образом, задача сводится к определению зависимости номера слоя i от координаты l , которая и определяет функцию $f(l)$. В общем случае для квадрупольной намотки эту зависимость можно определить следующей формулой:

$$f(l) = i = \begin{cases} \left\lfloor \frac{\left(\frac{L}{2} - l_c - l\right)}{l_c} \right\rfloor + 2 \left\lfloor \frac{\left(\frac{L}{2} + l_c - l\right)}{2l_c} \right\rfloor & \text{при } 0 \leq l < \frac{L}{2}; \\ \left\lfloor \frac{\left(l - \frac{L}{2}\right)}{l_c} \right\rfloor + 2 \left\lfloor \frac{\left(l - \frac{L}{2}\right)}{2l_c} \right\rfloor & \text{при } \frac{L}{2} \leq l \leq L. \end{cases} \quad (7)$$

Квадратными скобками здесь обозначена целая часть от вычисленного значения заключенного в них выражения.

Используя полученную формулу, можно построить распределение температуры по длине нити волокна в некоторый фиксированный момент времени для катушки с волокном произвольных размеров.

Построим график распределения температуры в волоконной бухте некоторой абстрактной катушки с теми же параметрами, что были приняты для вычисления системы (4). Тогда при данной геометрии и длине волокна в 1 км число слоев волокна $n = 24$, число витков в одном слое $m = 125$ и длина участка волокна в одном слое $l_c \approx 40$ м.

Пусть в некоторый момент времени $T_n = 25^\circ\text{C}$ и $T_1 = 20^\circ\text{C}$. Тогда с учетом (5), применяя формулу (7), построим график температур вдоль волокна (рис. 6).

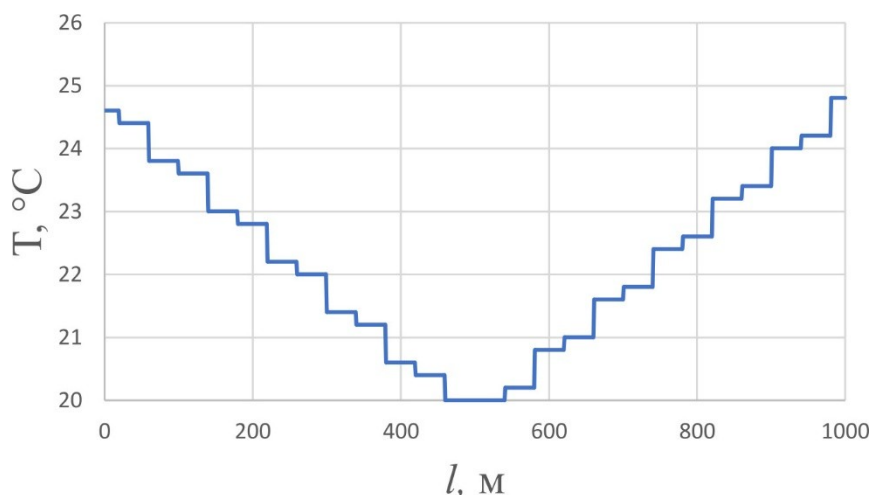


Рис. 6. Распределение радиального перепада температуры вдоль волокна при квадрупольной намотке

Полученный график иллюстрирует распределение температуры вдоль нити волокна при температурном градиенте в радиальном направлении для конкретных параметров катушки и оптического волокна.

Обозначим разницу температур на внешней и внутренней стороне волоконной бухты в (5):

$$\Delta T_R(t) = T_n(t) - T_1(t).$$

Преобразуем интеграл (1) с учетом (2), (5), пренебрегая членами второго порядка малости:

$$\Omega_T = \frac{(h_T + n_{10}\alpha_T)n_{10}}{4NS_B} \Delta \dot{T}_R(t) \int_0^L (2l - L) f(l) dl \quad (8)$$

Входящие в (8) параметры для одномодового волокна обычно имеют следующие значения [5, 21]:

$$h_T = 10^{-5} \text{ 1/}^\circ\text{C}; \alpha_T = 5 \cdot 10^{-7} \text{ 1/}^\circ\text{C}; n_{10} = 1.45.$$

Тогда с учетом числовых значений параметров волокна и геометрии катушки получим выражение для теплового дрейфа:

$$\Omega_T = 6.5 \cdot 10^{-9} \Delta \dot{T}_R(t) \int_0^L (2l - L) f(l) dl. \quad (9)$$

Численное интегрирование (9) методом трапеций с шагом $\Delta l = 0.5$ м с учетом принятых геометрических параметров катушки дает следующий результат:

$$\Omega_T \approx 0.00004 \Delta \dot{T}_R(t) \text{ c}^{-1}. \quad (10)$$

Как можно видеть из полученного выражения, при радиальном температурном перепаде тепловой дрейф ВОГ, обусловленный термооптическим эффектом, прямо пропорционален скорости его изменения. Например, при нагреве ВОГ с постоянной скоростью через какое-то время от начала нагрева в результате переходных процессов $\Delta T_R(t)$ установится в постоянное значение и дрейф будет нулевым. Это утверждение подтверждается результатами расчетов других авторов. Например, в [21], показано, что при постоянном нагреве термооптическая составляющая дрейфа имеет небольшой всплеск в начале разогрева и по мере выравнивания температур стремится к нулю, а основной вклад в тепловой дрейф вносит упругооптический эффект.

Таким образом, мы получили математическую модель составляющей теплового дрейфа ВОГ, обусловленного термооптическим эффектом, которая дополняет модель теплового дрейфа прибора учетом особенностей квадрупольной намотки волокна, геометрических параметров катушки и оптического волокна.

Управление тепловым дрейфом ВОГ

Рассмотрим возможное применение полученной модели в одной из задач управления тепловым дрейфом ВОГ путем применения алгоритмической компенсации. Суть ее в следующем.

В блок управления ВОГ закладываются основные формулы и алгоритмы построенной математической модели теплового дрейфа. Поскольку рассматриваются радиальные градиенты температур в чувствительной катушке ВОГ, значения температуры снимаются с термодатчиков, расположенных максимально близко к ее внешней и внутренней поверхностям, вычисляется величина теплового дрейфа по формулам математической модели для конкретной конструкции ВОГ и подается на вход регулятора, компенсируя «уход» прибора.

Для примера используем упрощенную модель – будем идеализировать ВОГ в виде двух «элементарных объемов», соответствующих внутренней и наружной поверхностям катушки с волоконной бухтой, с эквивалентными теплофизическими характеристиками. Будем также предполагать, что на внутренней и наружной поверхностях катушки установлены идеальные термодатчики, измеряющие «внутреннюю» T_1 и «наружную» T_2 температуры в зоне волоконной бухты.

Уравнения тепловых балансов такой системы имеют вид:

$$\begin{aligned} c\dot{T}_1 + q(T_1 - T_2) + q_c(T_1 - T_{in}) &= 0, \\ c\dot{T}_2 + q(T_2 - T_1) + q_c(T_2 - T_{out}) &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

где c – эффективные теплоемкости; q, q_c – теплопроводимости; T_{in}, T_{out} – «внутренняя» и «наружная» температуры окружающей среды.

Угловую скорость дрейфа в соответствии с полученным выражением (8) представим в виде

$$\Omega_T = A \cdot \Delta\dot{T}_R, \quad (12)$$

где $A = \frac{(h_T + n_{10}\alpha_T)n_{10}}{4NS_B} \int_0^L (2l - L)f(l)dl$, $\Delta\dot{T}_R(t) = \dot{T}_n(t) - \dot{T}_l(t)$.

При этом коэффициент A вычисляется для конкретной конструкции ВОГ и параметров применяемого оптического волокна.

В соответствии с (12) угловая скорость дрейфа в приборе запишется как

$$\Omega_T^{\Pi} = A \cdot \Delta\dot{T}_R^{\Pi}.$$

Положим для определенности, что используется пропорциональный закон регулирования. Сформируем сигнал по двум термодатчикам, расположенным в радиальном направлении в зоне волоконной бухты:

$$\Omega_T = k \cdot A \cdot \Delta\dot{T}_R,$$

где k – коэффициент усиления.

Это угловая скорость теплового дрейфа, определяемая по полученной математической модели.

Образую разность

$$\Delta\Omega_T = \Omega_T^{\Pi} - \Omega_T = A(\Delta\dot{T}_R^{\Pi} - k\Delta\dot{T}_R).$$

Далее определим коэффициент усиления k , минимизирующий $\Delta\Omega_T$.

Решение системы уравнений тепловых балансов (11) при нулевых начальных условиях в рассматриваемом случае примет вид

$$\Delta T_R = T_1 - T_2 = \frac{q_c \Delta T_c}{2q + q_c} \left(1 - e^{-\frac{2q + q_c}{c} t} \right), \quad \Delta\dot{T}_R = \frac{q_c \Delta T_c}{c} e^{-\frac{2q + q_c}{c} t},$$

где $\Delta T_c = T_{in} - T_{out}$.

Пусть температурный перепад и его производная по времени в реальном приборе имеют вид

$$\Delta T_R^{\Pi} = \Delta T_R^0 (1 - e^{-\gamma t}), \quad \Delta\dot{T}_R^{\Pi} = \Delta T_R^0 \gamma e^{-\gamma t}.$$

Тогда

$$\Delta\Omega_T = A \left(\Delta T_R^0 \gamma e^{-\gamma t} - k \frac{q_c \Delta T_c}{c} e^{-\frac{2q + q_c}{c} t} \right).$$

Отсюда видно, что если постоянные времени реального прибора и модели совпадают, т. е. $\gamma = (2q + q_c)/c$, то можно добиться «идеальной» компенсации:

$$\Delta\Omega_T = 0, \text{ при } k = \frac{\Delta T_R^0}{\Delta T_c} \cdot \frac{2q + q_c}{q_c}.$$

Отметим, что для реальных конструкций такая идеализация будет ограничена в силу погрешностей термодатчиков, затруднительности их произвольного размещения, погрешностей при дифференцировании сигналов, допущений, принятых для математической модели температурного дрейфа, однако применение

предлагаемого алгоритма управления совместно с предварительной калибровкой прибора позволит обеспечить поддержание его теплового дрейфа на минимальном уровне в процессе эксплуатации.

Заключение. В работе была построена математическая модель теплового дрейфа ВОГ, обусловленного термооптическим эффектом, учитывающая особенности квадрупольной намотки волокна, для произвольных геометрических параметров катушки и оптического волокна. Построенная модель адаптирована для радиальных градиентов температуры, которые дают наибольший вклад в тепловой дрейф.

Расчет теплового дрейфа с помощью полученной модели для некоторого произвольно выбранного волоконного контура ВОГ хорошо согласуется с результатами расчетов других авторов, например с работой пермских разработчиков ВОГ [21], использующих САПР на основе методов конечно-элементного моделирования.

Кроме того, полученная модель вносит уточнение и дополнение в работу [9], в которой дана обобщенная математическая модель теплового дрейфа ВОГ для различной пространственной конфигурации теплового поля, но имеющая недостаток – она не учитывает особенности намотки волокна на катушку и ее геометрические размеры.

Авторами накоплен большой опыт применения модифицированного метода «элементарных» балансов [9, 16, 22–25 и др.] для решения задач анализа нестационарных температурных полей различных многокомпонентных приборов, устройств и отдельных датчиков. Предложенная модель для расчета теплового дрейфа ВОГ расширяет и дополняет возможности метода «элементарных» балансов. В комплексе эти методики позволяют в процессе расчета нестационарных температурных полей оценить тепловой дрейф практически любого ВОГ типовой конструкции благодаря возможности реализовать простой и эффективный алгоритм расчета, не требующий привлечения дорогостоящих программных продуктов.

Показан пример возможного управления тепловым дрейфом ВОГ путем применения алгоритмической компенсации с использованием полученной математической модели.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лукьянов Д.П., Распопов В.Я., Филатов Ю.В. Прикладная теория гироскопов. Санкт-Петербург: Концерн «Центральный научно-исследовательский институт «Электроприбор»», 2015. 316 с. EDN VXEZMJ.
2. Волков Н.В. Теория и практика гироскопических устройств. Нижний Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2019. 151 с.
3. Распопов В.Я., Лихошерст В.В. Датчик угловых скоростей на базе волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором для систем ориентации, стабилизации и навигации // Мехатроника, автоматизация, управление. 2021. Т. 22. № 7. С. 374–382. DOI: 10.17587/mau.22.374-382. EDN: HJFZLY.
4. Распопов В.Я., Шведов А.П. Резервная бесплатформенная система ориентации на отечественных микромеханических инерциальных датчиках // Мехатроника, автоматизация, управление. 2017. Т. 18. № 10. С. 699–705. DOI: 10.17587/mau.18.699-705. EDN: ZMNQSF.
5. Шереметьев А.Г. Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987. 152 с.
6. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope. Boston: Artech House, 2014. 343 p.
7. Окоци Т., Окамото К. и др. Волоконно-оптические датчики. Л.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.

8. *Shupe D.M.* Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer // *Appl. Optics*. 1980. Vol. 19. No. 5. P. 654–655. DOI: 10.1364/AO.19.000654.
9. *Джашиитов В.Э., Панкратов В.М.* Датчики, приборы и системы авиакосмического и морского приборостроения в условиях тепловых воздействий. СПб: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2005. 404 с.
10. *Schadt F., Mohr F.* Error signal formation in FOGs through thermal and elasto-optical environment influence on the sensing coil // *Proc. Inertial Sensors and Systems*. 2011. P. 2.1–2.13.
11. *Novikov R.L., Egorov D.A., Neforosnyi S.T.* Influence of Methods for Fixing a Frameless Fiber Coil on Temperature Dependence of the FOG Output Signal // *Gyroscopy Navig.* 2024. No. 15. P. 305–313. DOI: 10.1134/S2075108725700026. EDN: WRHSAE.
12. *Hong W., Hu X., Zang Z., Zhang P., Lou S., Huang B., Li Y., Zhang M.* Accurate measurement and enhancement of fiber coil symmetry // *Appl. Opt.* 2023. Vol. 62. P. E109–E118. DOI: 10.1364/ao.483537. EDN: PEMMXP.
13. *Pillon J. et al.* Moisture-Induced Bias Drift in a Fiber-Optic Gyroscope // *Journal of Lightwave Technology*. 2025. P. 1–11. DOI: 10.1109/JLT.2025.3557251.
14. *Meng Li, Xuyou Li, Dan Xu, Haoyu Li.* Performance analysis of the fiber coils combining hybrid polarization-maintaining fiber designs and symmetrical winding patterns // *Opt. Express*. 2023. Vol. 31. P. 22424–22443.
15. *Ling W., Li X., Yang H., Liu P., Xu Z., Wei Y.* Reduction of the Shupe effect in interferometric fiber optic gyroscopes: The double cylinder wound coil // *Optics Communications*. 2016. Vol. 370. P. 62–67. DOI: 10.1016/j.optcom.2016.02.064. EDN: WVUOZR.
16. *Джашиитов В.Э., Панкратов В.М.* Применение метода элементарных балансов для анализа и синтеза системы терморегулирования на модулях Пельтье для БИНС на ВОГ // *Гироскопия и навигация*. 2013. № 2(81). С. 84–103.
17. *Драницына Е.В., Егоров Д.А., Унтилов А.А., Дейнека Г.Б., Шарков И.А., Дейнека И.Г.* Снижение влияния изменения температуры на выходной сигнал волоконно-оптического гироскопа // *Гироскопия и навигация*. 2012. № 4 (79). С. 10–20.
18. *Колеватов А.П., Николаев С.Г., Андреев А.Г., Ермаков В.С., Кель О.Л., Шевцов Д.И.* Волоконно-оптический гироскоп бесплатформенных инерциальных систем навигационного класса. Разработка, термокомпенсация, испытания // *Гироскопия и навигация*. 2010. № 3. С. 49–60.
19. *Курбатов А.М., Курбатов Р.А.* Пути повышения точности волоконно-оптических гироскопов // *Гироскопия и навигация*. 2012. № 1. С. 102–121.
20. *Вахрамеев Е.И., Галягин К.С., Ивонин А.С., Ошивалов М.А.* Прогноз и коррекция теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2013. Т. 56. № 5. С. 79–84.
21. *Есипенко И.А., Лыков Д.А.* Численный расчет и экспериментальная верификация фиктивной угловой скорости волоконно-оптического гироскопа при нестационарном температурном воздействии на его контур // *Вычислительная механика сплошных сред*. 2017. Т. 10. № 3. С. 313–323. DOI: 10.7242/1999-6691/2017.10.3.24. EDN: ZHZVJH.
22. *Голиков А.В., Панкратов В.М., Панкратова Е.В.* Применение пассивных способов уменьшения температурных перепадов в волоконно-оптическом гироскопе на основе использования наноматериалов // *Гироскопия и навигация*. 2016. № 2(93). С. 33–40. DOI: 10.1134/S2075108716040039. EDN: TZJMMU.
23. *Джашиитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Николаев С.Г., Колеватов А.П., Плотников А.Д., Коффер К.В.* Иерархические тепловые модели бесплатформенной инерциальной навигационной системы на волоконно-оптических гироскопах // *Гироскопия и навигация*. 2013. № 1(80). С. 49–63. DOI: 10.1134/S2075108714030031. EDN: QYUEBJ.
24. *Джашиитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В., Николаев С.Г., Колеватов А.П., Плотников А.Д., Коффер К.В.* Температурная калибровка бесплатформенной инерциальной навигационной системы по сигналам распределенных термодатчиков // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2013. № 7(148). С. 62–68.
25. *Джашиитов В.Э., Панкратов В.М., Голиков А.В.* Активное управление температурными полями бесплатформенной инерциальной навигационной системы с волоконно-оптическими датчиками // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2014. № 1 (154). С. 67–72.
26. *Джашиитов В.Э., Панкратов В.М., Барулина М.А.* Математические модели термоупругого напряженно-деформированного состояния и погрешности масштабного коэффициента волоконно-оптического гироскопического датчика // *Проблемы машиностроения и надежности машин*. 2013. № 2. С. 43–52.

27. *Shen C., Chen X.* Analysis and modeling for fiber-optic gyroscope scale factor based on environment temperature // *Applied Optics*. 2012. Vol. 51. No. 14. P. 2541–2547.
28. *Громов Д.С., Шарков А.В.* Тепловые режимы гироскопических приборов на базе волоконно-оптических гироскопов // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2013. Т. 56. № 1. С. 62–67.

Статья поступила в редакцию 03.06.2025

MATHEMATICAL MODEL OF THERMAL DRIFT OF FIBER OPTIC GYROSCOPE TAKING INTO ACCOUNT QUADRUPOLE SPOOLING OF FIBER

A.V. Golikov¹, V.S. Popov^{1,2}, E.V. Pankratova¹

¹ Institute for Precision Mechanics and Control Problems
of the Russian Academy of Sciences

A separate structural unit of the Federal Research Center
"Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences"

24, Rabochaya St., Saratov, 410028, Russian Federation

² Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

77, Politeknicheskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

E-mail: golikov@iptmuran.ru, vic_p@bk.ru, pankratova@iptmuran.ru

Abstract. *The paper considers the development of a mathematical model of the thermal drift of a fiber-optic gyroscope (FOG) due to the thermo-optic effect, which takes into account the features of quadrupole spooling of fiber on the coil. These devices are widely used in stabilization, orientation and motion control systems of aerospace and ground techniques. The main task in achieving this goal was to separate the non-stationary temperature function into a temporal component and a spatial one – the function characterizing the temperature distribution along the fiber filament for the quadrupole spooling of fiber at radial temperature gradient. When developing the model, the initial allowing is to consider the array of fiber filaments on the spool as a periodic continuous structure - successive layers with the same thermophysical characteristics. This allows taking into account only radial temperature gradients and assuming that the temperature at each moment of time in the corresponding fiber layer on the spool is uniformly distributed. The study provides justification of the correctness of the proposed approach in constructing the thermal drift model by simulating the temperature in each layer of the fiber coil using the method of elementary balances. Modeling was performed in specially developed software, in which the functions of graphical output of calculation results are implemented. Based on computational experiments, it is substantiated that in real conditions of FOG operation at a relatively low rate of change in ambient temperature, the law of temperature change in the fiber coil in the radial direction can be assumed as linear. The function of the spatial distribution of the temperature field along the fiber filament is determined. Using this function, an algorithm of its application for plotting the temperature distribution in a fiber coil with given geometric parameters close to the real one is implemented. An example of calculating the thermal drift of the device for specified parameters of the fiber and geometric parameters of the coil, closed to the parameters of devices used in*



© The Author(s), 2025

¹Alexey V. Golikov (Ph.D. (Techn.)), Leading Researcher, Lab. of Analysis and Synthesis of Dynamic Systems in Precision Mechanics.

^{1,2}Viktor S. Popov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Professor, Dept. of Applied Mathematics and Systems Analysis Department, Chief Researcher, Lab. of Analysis and Synthesis of Dynamic Systems in Precision Mechanics.

Elena V. Pankratova (Ph.D. (Techn.)), Senior Researcher, Lab. of Analysis and Synthesis of Dynamic Systems in Precision Mechanics.

This work was supported by the theme of the state task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation no. 125020501400-6.

practice, is given. The proposed model for calculating the thermal drift of a fiber-optic gyroscope extends and complements the capabilities of the method of elementary balances, which makes it possible to implement a simple and effective algorithm for calculating non-stationary temperature fields and thermal drift of almost any fiber-optic gyroscope of typical design. The developed model will allow developers of automatic object motion control systems to realize effective algorithms for calibration and correction of thermal drift of a fiber optic gyroscope.

Keywords: fiber-optic gyroscope, Sagnac effect, sensing element, thermal drift, mathematical model, temperature errors, quadrupole spooling, thermo-optic effect.

REFERENCES

1. Lukyanov D.P., Raspopov V.Ya., Filatov Yu.V. Prikladnaya teoriya giroskopov [Applied Theory of Gyroscopes]. Sankt-Peterburg: Koncern «Centralnyj nauchno-issledovatel'skij institut «Elektropribor»», 2015. 316 p. (In Russian)
2. Volkov N.V. Teoriya i praktika giroskopicheskikh ustrojstv [Theory and Practice of Gyroscopic Devices]. Nizhnij Novgorod: Nizhegorod. gos. tekhn. un-t im. R.E. Alekseeva, 2019. 151 p. (In Russian)
3. Raspopov V.YA., Lihosherst V.V. Datchik uglovyyh skorostey na baze volnovogo tverdotelnogo giroskopa s metallicheskim rezonatorom dlya sistem orientacii, stabilizacii i navigacii [Angular Rate Sensor Based on a Wave Solid-State Gyroscope with a Metal Resonator for Orientation, Stabilization, and Navigation Systems] // Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2021. V. 22. № 7. P. 374–382. DOI: 10.17587/mau.22.374-382. (In Russian)
4. Raspopov V.Ya., Shvedov A.P. Rezervnaya besplatformennaya sistema orientacii na otechestvennykh mikromekhanicheskikh inercial'nykh datchikah [Backup Strapdown Orientation System Based on Domestic MEMS Inertial Sensors] // Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie. 2017. T. 18. № 10. P. 699–705. DOI: 10.17587/mau.18.699-705. (In Russian)
5. Sheremetev A.G. Volokonnyj opticheskij giroskop [Fiber-Optic Gyroscope]. M.: Radio i svyaz, 1987. 152 p. (In Russian)
6. Lefevre H.C. The Fiber-Optic Gyroscope. Boston: Artech House, 2014. 343 p.
7. Okosi T., Okamoto K. i dr. Volokonno-opticheskie datchiki [Fiber-Optic Senso]. L.: Energoatomizdat, 1991. 256 p. (In Russian)
8. Shupe D.M. Thermally induced nonreciprocity in the fiber-optic interferometer // Appl. Optics. 1980. Vol. 19. No. 5. P. 654–655. DOI: 10.1364/AO.19.000654.
9. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. Datchiki, pribory i sistemy aviakosmicheskogo i morskogo priborostroeniya v usloviyah teplovykh vozdeystvij [Sensors, Devices, and Systems for Aerospace and Marine Instrumentation Under Thermal Effects]. SPb: GNCRFCNII «Elektropribor», 2005. 404 p. (In Russian)
10. Schadt F., Mohr F. Error signal formation in FOGs through thermal and elasto-optical environment influence on the sensing coil // Proc. Inertial Sensors and Systems. 2011. P. 2.1–2.13.
11. Novikov R.L., Egorov D.A., Neforosnyi S.T. Influence of Methods for Fixing a Frameless Fiber Coil on Temperature Dependence of the FOG Output Signal // Gyroscopy Navig. 2024. No. 15. P. 305–313. DOI: 10.1134/S2075108725700026.
12. Hong W., Hu X., Zang Z., Zhang P., Lou S., Huang B., Li Y., Zhang M. Accurate measurement and enhancement of fiber coil symmetry // Appl. Opt. 2023. Vol. 62. P. E109-E118. DOI: 10.1364/ao.483537.
13. Pillon J. et al. Moisture-Induced Bias Drift in a Fiber-Optic Gyroscope // Journal of Lightwave Technology. 2025. P. 1–11. DOI: 10.1109/JLT.2025.3557251.
14. Meng Li, Xuyou Li, Dan Xu, Haoyu Li. Performance analysis of the fiber coils combining hybrid polarization-maintaining fiber designs and symmetrical winding patterns // Opt. Express. 2023. Vol. 31. P. 22424–22443.
15. Ling W., Li X., Yang H., Liu P., Xu Z., Wei Y. Reduction of the Shupe effect in interferometric fiber optic gyroscopes: The double cylinder wound coil // Optics Communications. 2016. Vol. 370. P. 62–67. DOI: 10.1016/j.optcom.2016.02.064.
16. Dzhashitov V.E., Pankratov V.M. Primenenie metoda elementarnykh balansov dlya analiza i sinteza sistemy termoregulirovaniya na modulyah Pelte dlya BINS na VOG [Application of the Elementary Balances Method for Analysis and Synthesis of a Thermoregulation System

- Based on Peltier Modules for FOG-Based SINS] // *Giroskopiya i navigaciya*. 2013. № 2(81). P. 84–103. (In Russian)
17. *Dranicyna E.V., Egorov D.A., Untilov A.A., Dejneka G.B., Sharkov I.A., Dejneka I.G.* Snizhenie vliyaniya izmeneniya temperatury na vyhodnoj signal volokonno-opticheskogo giroskopa [Reducing the Influence of Temperature Variations on the Output Signal of a Fiber-Optic Gyroscope] // *Giroskopiya i navigaciya*. 2012. № 4 (79). P. 10–20. (In Russian)
 18. *Kolevatov A.P., Nikolaev S.G., Andreev A.G., Ermakov V.S., Kel O.L., Shevcov D.I.* Volokonno-opticheskij giroskop besplatformennyh inercial'nyh sistem navigacionnogo klassa. Razrabotka, termokompensaciya, ispytaniya [Fiber-Optic Gyroscope for Strapdown Inertial Navigation Systems of Navigation Grade. Development, Thermal Compensation, Testing] // *Giroskopiya i navigaciya*. 2010. № 3. P. 49–60. (In Russian)
 19. *Kurbatov A.M., Kurbatov R.A.* Puti povysheniya tochnosti volokonno-opticheskikh giroskopov [Ways to Improve the Accuracy of Fiber-Optic Gyroscopes] // *Giroskopiya i navigaciya*. 2012. № 1. P. 102–121. (In Russian)
 20. *Vahrameev E.I., Galyagin K.S., Ivonin A.S., Oshivalov M.A.* Prognoz i korrekciya teplovogo dreyfa volokonno-opticheskogo giroskopa [Prediction and Correction of Thermal Drift in Fiber-Optic Gyroscopes] // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2013. V. 56. № 5. P. 79–84. (In Russian)
 21. *Esipenko I.A., Lykov D.A.* Chislennyj raschet i eksperimentalnaya verifikaciya fiktivnoj uglovoj skorosti volokonno-opticheskogo giroskopa pri nestacionarnom temperaturnom vozdejstvii na ego kontur [Numerical Calculation and Experimental Verification of the Fictitious Angular Rate of a Fiber-Optic Gyroscope Under Nonstationary Thermal Effects on Its Loop] // *Vychislitel'naya mekhanika sploshnyh sred*. 2017. V. 10. № 3. P. 313–323. DOI: 10.7242/1999-6691/2017.10.3.24. (In Russian)
 22. *Golikov A.V., Pankratov V.M., Pankratova E.V.* Primenenie passivnyh sposobov umensheniya temperaturnykh perepadov v volokonno-opticheskom giroskope na osnove ispolzovaniya nanomaterialov [Application of Passive Methods for Reducing Temperature Gradients in Fiber-Optic Gyroscopes Using Nanomaterials] // *Giroskopiya i navigaciya*. 2016. № 2(93). P. 33–40. DOI: 10.1134/S2075108716040039. (In Russian)
 23. *Dzhashitov V.E., Pankratov V.M., Golikov A.V., Nikolaev S.G., Kolevatov A.P., Plotnikov A.D., Koffer K.V.* Ierarhicheskie teplovyje modeli besplatformennoj inercialnoj navigacionnoj sistemy na volokonno-opticheskikh giroskopah [Hierarchical Thermal Models of a Strapdown Inertial Navigation System Based on Fiber-Optic Gyroscopes] // *Giroskopiya i navigaciya*. 2013. № 1(80). P. 49–63. DOI: 10.1134/S2075108714030031. (In Russian)
 24. *Dzhashitov V.E., Pankratov V.M., Golikov A.V., Nikolaev S.G., Kolevatov A.P., Plotnikov A.D., Koffer K.V.* Temperaturnaya kalibrovka besplatformennoj inercial'noj navigacionnoj sistemy po signalam raspredelennyh termodatchikov [Thermal Calibration of a Strapdown Inertial Navigation System Using Signals from Distributed Temperature Sensors] // *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*. 2013. № 7(148). P. 62–68. (In Russian)
 25. *Dzhashitov V.E., Pankratov V.M., Golikov A.V.* Aktivnoe upravlenie temperaturnymi polyami besplatformennoj inercialnoj navigacionnoj sistemy s volokonno-opticheskimi datchikami [Active Control of Thermal Fields in a Strapdown Inertial Navigation System with Fiber-Optic Sensors] // *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie*. 2014. № 1 (154). P. 67–72. (In Russian)
 26. *Dzhashitov V.E., Pankratov V.M., Barulina M.A.* Matematicheskie modeli termo-uprugogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i pogreshnosti masshtabnogo koefitsienta volokonno-opticheskogo giroskopicheskogo datchika [Mathematical Models of Thermoelastic Stress-Strain State and Scale Factor Error in a Fiber-Optic Gyroscopic Sensor] // *Problemy mashino-stroeniya i nadezhnosti mashin*. 2013. № 2. P. 43–52. (In Russian)
 27. *Shen C., Chen X.* Analysis and modeling for fiber-optic gyroscope scale factor based on environment temperature // *Applied Optics*. 2012. Vol. 51. No. 14. P. 2541–2547.
 28. *Gromov D.S., Sharkov A.V.* Teplovyje rezhimy giroskopicheskikh priborov na baze volokonno-opticheskikh giroskopov [Thermal Regimes of Gyroscopic Devices Based on Fiber-Optic Gyroscopes] // *Izv. vuzov. Priborostroenie*. 2013. V. 56. № 1. P. 62–67. (In Russian)

Original article submitted 03.06.2025

УДК 681.391:543/545

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДВУХКАНАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ СОВМЕЩЕННЫХ ХРОМАТОГРАФИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

М.Ж. Сайфулин¹

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

E-mail: sayfulinmarsel@yandex.ru

Аннотация. Решается задача разделения совмещенных хроматографических сигналов с использованием двухдетекторного хроматографа. Технология обработки хроматографических сигналов, традиционно применяемая в хроматографических системах, предусматривает использование хроматографа с одним детектором. Для обработки хроматографической информации используется многоканальная обработка данных, когда процесс разделения в колонке фиксируется несколькими детекторами. В случае двухдетекторной хроматографической информационно-измерительной системы (ИИС) это два неселективных детектора с разной чувствительностью к анализируемым компонентам пробы. Это позволяет реализовать принципиально новый подход к разделению совмещенных сигналов.

В основе разделения лежат специальные математические преобразования совмещенных сигналов двух детекторов хроматографа. Находят отношение сигнала первого детектора к сигналу второго детектора и наоборот, отношение сигнала второго детектора к сигналу первого детектора. В результате получают значения некоторых коэффициентов как функции времени. С использованием этих коэффициентов получены соотношения, позволяющие восстановить неразделенные компоненты сигналов соответственно первого и второго детекторов. Предложенный метод разделения может быть использован в случае пиков симметричной и несимметричной формы. Представлены примеры восстановления пиков для различных значений степени разрешения.

Для получения сглаженных значений восстановленных пиков при разделении сигналов в условиях помех использована стандартная процедура MATLAB: циклического усреднения на коротком интервале. Для сохранения ширины восстановленных пиков в алгоритме разделения в условиях помех предложено отношение сигналов детекторов аппроксимировать функцией тангенса гиперболического. Приведены примеры, демонстрирующие эффективность сглаживания.

Ключевые слова: хроматография, количественный анализ, степень разрешения, наложенные пики, двухканальная обработка, разделение сигналов, помеха, хроматографическая ИИС.



© Автор(ы), 2025

¹ Марсель Жаудатович Сайфулин, аспирант кафедры информационно-измерительной техники.

Введение

Аналитическое приборостроение – область измерительной техники для исследования состава и свойств веществ.

Важнейший аналитический метод – хроматография [1, 2]. В настоящее время хроматография является одним из наиболее перспективных методов анализа. Она широко применяется в различных отраслях промышленности и научных исследованиях для анализа смесей газообразных, жидких и твердых веществ.

Технология обработки данных, обычно используемая в хроматографических системах, предусматривает использование в качестве первичного преобразователя ИИС хроматографа с одним детектором (один измерительный канал) [3–6].

Для разделения, идентификации и количественного определения отдельных компонентов анализируемых смесей применяют также гибридные методы [7–10], которые представляют собой комбинацию двух или более аналитических методов. Некоторые из самых популярных гибридных аналитических методов – это газовая хроматография, масс-спектрометрия (ГХ-МС), жидкостная хроматография – масс-спектрометрия (ЖХ-МС), газовая хроматография – инфракрасная спектроскопия (ГХ-ИК), жидкостная хроматография – ядерная магнитно-резонансная спектроскопия (ЖХ-ЯМР). Они сочетают достоинства хроматографии для разделения компонентов смесей с многомерным детектированием для идентификации компонентов по их спектру. Однако высокая стоимость оборудования и сложность реализации гибридных методов ограничивают их применение.

В данной работе для обработки хроматографической информации используется технология многоканальной обработки данных, когда один и тот же процесс разделения анализируемой смеси в колонке хроматографа фиксируется несколькими различными детекторами и таким образом осуществляется многоканальное детектирование, что позволяет получить дополнительную информацию о качественном и количественном составе пробы.

В случае двухдетекторной хроматографической ИИС это два неселективных детектора с разной чувствительностью к анализируемым компонентам пробы. Это позволяет за счет двухканальной обработки данных реализовать принципиально новый подход к разделению совмещенных сигналов без использования математических моделей хроматографических пиков.

Метод разделения совмещенных хроматографических сигналов без использования математических моделей пиков

В основе разделения лежат специальные математические преобразования совмещенных сигналов двух детекторов хроматографа с разной чувствительностью к компонентам пробы. Для системы с двумя детекторами такие сигналы отображены на рис. 1.

Для двухдетекторной системы, используемой для разделения двухкомпонентной смеси, выходной сигнал первого детектора

$$Y_1 = Y_1^A + Y_1^B \quad (1)$$

делится на выходной сигнал второго детектора

$$Y_2 = Y_2^A + Y_2^B, \quad (2)$$

где A , B – обозначения соответственно первого и второго компонента анализируемой смеси.

В результате получаем значения коэффициента

$$R_{1,2} = \frac{Y_1}{Y_2} \quad (3)$$

как функции времени (рис. 2, а).

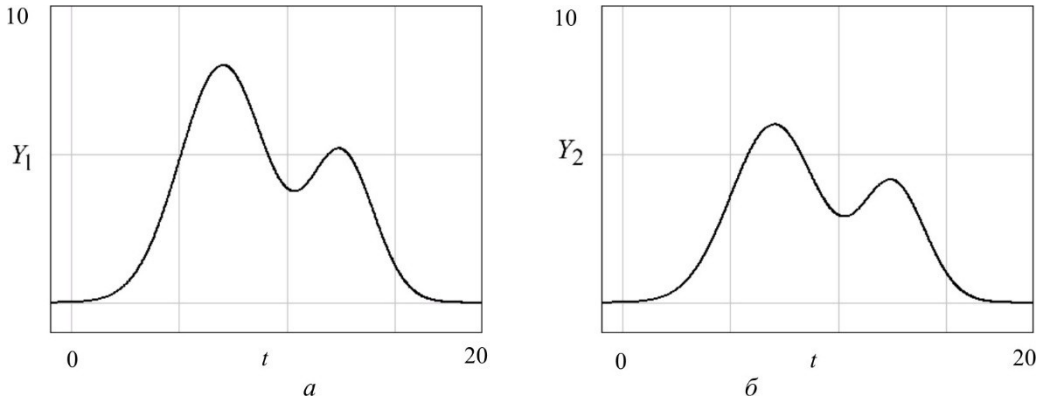


Рис. 1. Выходные сигналы детекторов двухдетекторного хроматографа:
а – сигнал первого детектора; б – сигнал второго детектора

С учетом соотношений (1) и (2)

$$R_{1,2} = \frac{R_{1,2}^A Y_2^A + R_{1,2}^B Y_2^B}{Y_2^A + Y_2^B}, \quad (4)$$

где $R_{1,2}^A = \frac{Y_1^A}{Y_2^A}$; $R_{1,2}^B = \frac{Y_1^B}{Y_2^B}$.

Для восстановления компонента Y_2^B из суммарного сигнала (2) преобразуем соотношение (4) к виду

$$R_{1,2} = \frac{R_{1,2}^A + R_{1,2}^B \frac{Y_2^B}{Y_2^A}}{1 + \frac{Y_2^B}{Y_2^A}}. \quad (5)$$

С учетом обозначения

$$X_B = \frac{Y_2^B}{Y_2^A} \quad (6)$$

соотношение (5) приобретает вид

$$R_{1,2} = \frac{R_{1,2}^A + R_{1,2}^B X_B}{1 + X_B}, \quad (7)$$

из которого находим X_B

$$X_B = \frac{R_{1,2}^A - R_{1,2}}{R_{1,2} - R_{1,2}^B}. \quad (8)$$

Согласно соотношениям (6) и (2)

$$Y_2^B = X_B Y_2^A, \quad (9)$$

$$Y_2^A = Y_2 - Y_2^B. \quad (10)$$

С учетом (8)–(10) восстановленные значения компонента Y_2^B находятся из решения уравнения

$$Y_2^B = \frac{R_{1,2}^A - R_{1,2}}{R_{1,2} - R_{1,2}^B} (Y_2 - Y_2^B).$$

После преобразований окончательно получаем:

$$Y_2^B = \frac{R_{1,2}^A - R_{1,2}}{R_{1,2} - R_{1,2}^B} Y_2. \quad (11)$$

По аналогии первый компонент Y_2^A второго детектора определяется из соотношения

$$Y_2^A = \frac{R_{1,2}^B - R_{1,2}}{R_{1,2} - R_{1,2}^A} Y_2. \quad (12)$$

Для получения численных значений Y_2^A и Y_2^B необходимо знать коэффициенты отношений $R_{1,2}^A$, $R_{1,2}^B$, которые находятся из графика $R_{1,2}$ отношения сигналов Y_1 к Y_2 (см. рис. 2, а).

Заметим, что при расчете компонентов Y_1^A и Y_1^B в формулах (11), (12) Y_2 заменяется на Y_1 , а для вычисления $R_{1,2}$ берется отношение Y_2 / Y_1 . Другими словами, просто в алгоритме вычисления меняется порядок первого и второго детекторов.

Разделение выходных сигналов с двумя совмещенными пиками для первого и второго детекторов представлено соответственно на рис. 2 и 3.

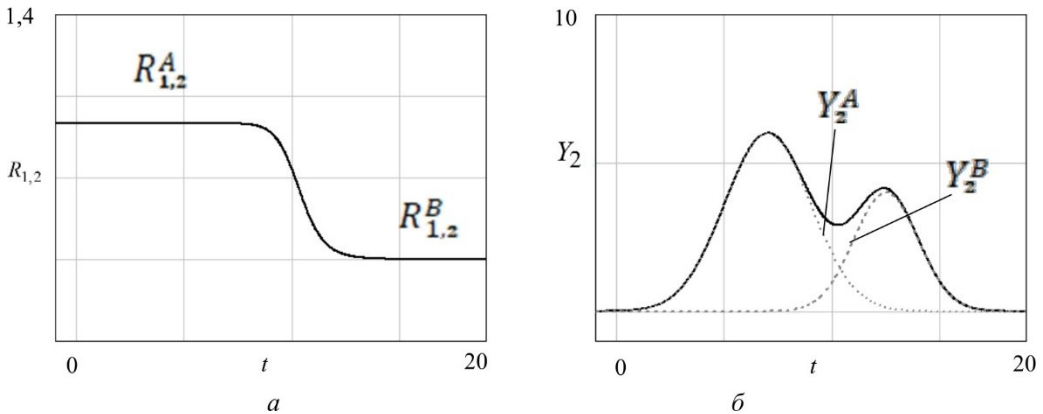


Рис. 2. Разделение сигналов второго детектора: а – отношение сигналов Y_1 к Y_2 ; б – исходный сигнал и разделенные компоненты Y_2^A , Y_2^B

Разделение хроматографических сигналов с пиками несимметричной формы

Смоделируем хроматографический сигнал, состоящий из двух совмещенных несимметричных пиков.

В качестве математической модели пика $y(t)$ используем комбинированную функцию, предложенную А.В. Бочкаревым [11]:

$$y(t) = \begin{cases} Ae^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\beta^2}}, & t \leq \mu; \\ A\gamma e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\beta^2}} + A(1-\gamma)e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2(\chi\beta)^2}}, & t > \mu, \end{cases} \quad (13)$$

где A – амплитуда пика; μ – положение вершины пика; β – среднеквадратичная ширина переднего фронта пика; χ – параметр настройки ширины заднего фронта пика ($1 \leq \chi < \infty$); γ – параметр настройки высоты фрагментов заднего фронта пика ($0 \leq \gamma \leq 1$).

При $\gamma = 1$ хроматографический пик будет симметричным и описывается гауссовой кривой (рис. 3).

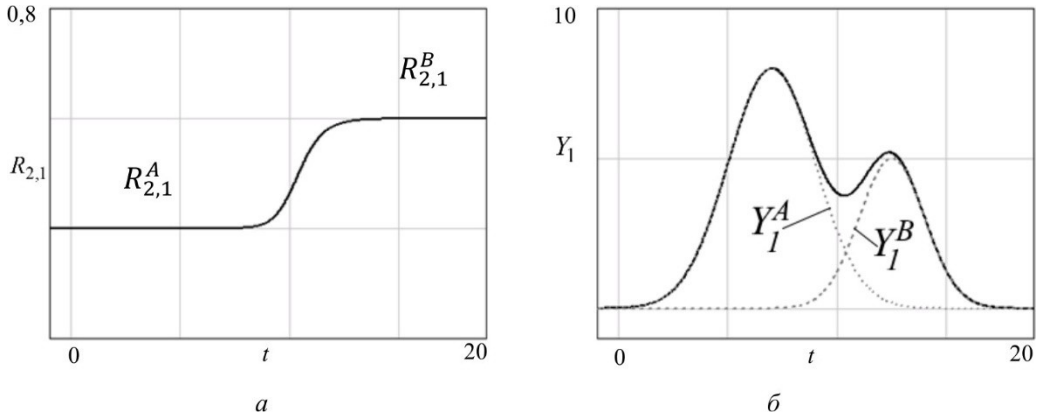


Рис. 3. Разделение сигналов первого детектора: a – отношение сигналов Y_2 к Y_1 ; b – исходный сигнал и разделенные компоненты Y_1^A , Y_1^B

Площадь пика определяется соотношением

$$S = \sqrt{\frac{\pi}{2}} A \beta [1 + \gamma + (1 - \gamma) \chi]. \quad (14)$$

Хроматографический сигнал с совмещенными пиками несимметричной формы представим в виде

$$y(t) = \sum_{k=1}^M y_k(t) = \sum_{k=1}^M \begin{cases} A_k e^{-\frac{(t-\mu_k)^2}{2\beta_k^2}}, & t \leq \mu_k; \\ A_k \gamma_k e^{-\frac{(t-\mu_k)^2}{2\beta_k^2}} + A_k (1-\gamma_k) e^{-\frac{(t-\mu_k)^2}{2(\chi_k \beta_k)^2}}, & t > \mu_k. \end{cases} \quad (15)$$

Здесь M – число компонент; параметры A_k , μ_k , β_k соответственно: амплитуда, положение вершины, среднеквадратичная ширина передних фронтов пиков; γ_k , χ_k – параметры настройки задних фронтов соответствующих компонентов, где $k = 1, \dots, M$.

Разрешение совмещенных хроматографических пиков согласно [12] определяется выражением

$$W = \frac{2(\mu_2 - \mu_1)}{w_1 + w_2}, \quad (16)$$

где μ_2, μ_1 – времена удерживания пиков; w_1, w_2 – ширина соответственно первого и второго пиков в их основании.

Для хроматографических пиков, описываемых комбинированной функцией (15), значения w_1, w_2 можно принять равными $w_1 = 2(\beta_1 + \chi_1\beta_1)$ и $w_2 = 2(\beta_2 + \chi_2\beta_2)$. Тогда (16) приобретает вид

$$W = \frac{\mu_2 - \mu_1}{\beta_1(1 + \chi_1) + \beta_2(1 + \chi_2)}. \quad (17)$$

Пусть $M = 2$, тогда сигнал состоит из двух пиков. Значения параметров $A_k, \mu_k, \beta_k, \gamma_k, \chi_k$ первого ($k = 1$) и второго ($k = 2$) пиков для формирования сигнала первого детектора с совмещенными пиками представлены в табл. 1.

Для второго пика значения сигнала были вычислены для различных значений μ_2 (остальные параметры $A_2, \beta_2, \gamma_2, \chi_2$ оставались неизменными). Это позволяет смоделировать сигнал с совмещенными пиками различной степени разрешения. Степень разрешения между пиками оценивалась согласно формуле (17). Чем больше разрешение, тем меньше перекрываются пики, тем лучше и отчетливее разделение и, соответственно, выше точность при количественном анализе. Значения W для конкретных примеров указаны в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров моделируемого сигнала первого детектора

	Первый компонент	Второй компонент					
A	8	6					
μ	10	22	24	26	28	30	32
β	4	4.2					
γ	0.1	0.4					
χ	2	2					
W		0.51	0.56	0.65	0.73	0.81	0.89

Для второго детектора значения амплитуд первого и второго пиков равны соответственно 6 и 4, остальные параметры совпадают с данными табл. 1.

Исходные сигналы, используемые в дальнейшей обработке, показаны на рис. 4, а на рис. 5 отображено отношение этих сигналов $R_{1,2}(t)$.

Восстановленные компоненты сигнала второго детектора $y_2(t)$ в результате двухканальной обработки данных при разрешении $W = 0.65$ и $W = 0.51$ представлены соответственно на рис. 6 и 7.

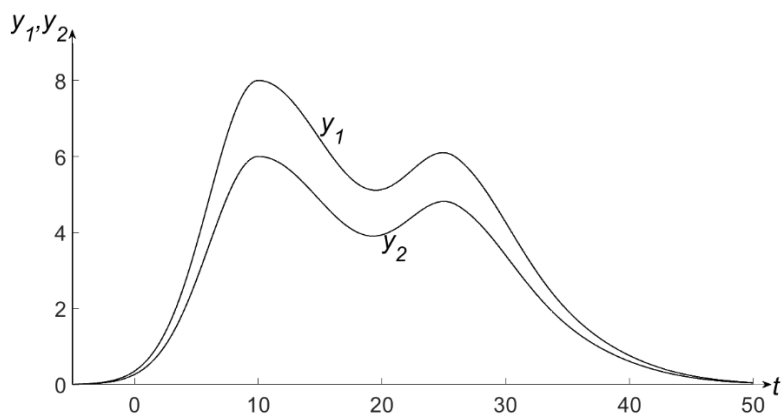


Рис. 4. Исходные сигналы первого и второго детекторов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ при разрешении $W = 0.65$

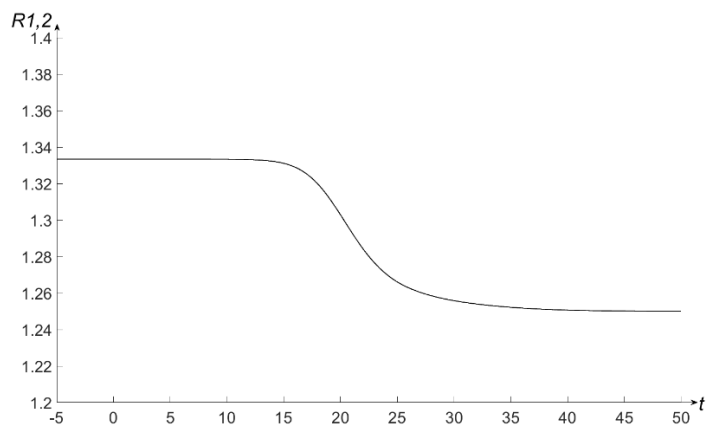


Рис. 5. Отношение сигналов $y_1(t)/y_2(t)$ при разрешении $W = 0.65$

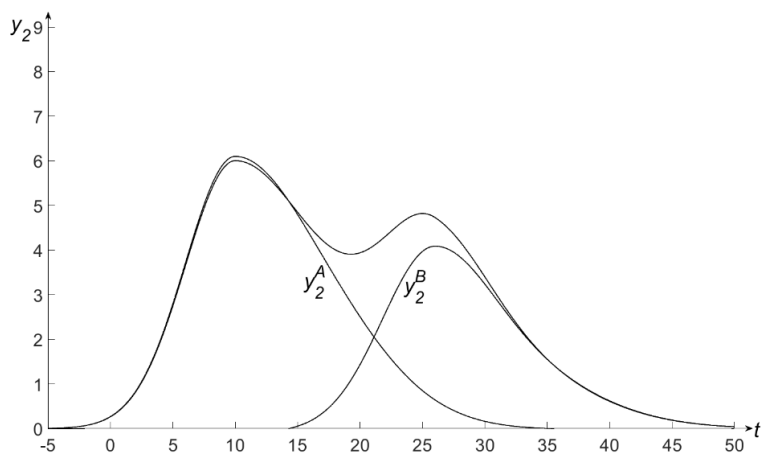


Рис. 6. Восстановленные компоненты сигнала второго детектора $y_2^A(t)$ и $y_2^B(t)$ при разрешении $W = 0.65$

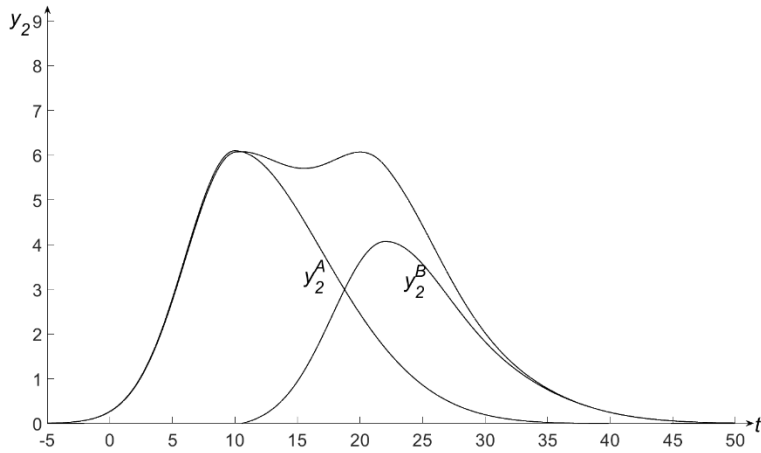


Рис. 7. Восстановленные компоненты сигнала второго детектора $y_2^A(t)$ и $y_2^B(t)$ при разрешении $W = 0.51$

Разделение хроматографических сигналов в условиях помех

Выходной сигнал $\tilde{y}_1(t)$ первого детектора с учетом накладываемой на него помехи может быть представлен в виде

$$\tilde{y}_1(t) = y_1(t) + n_1(t),$$

где $y_1(t)$ – полезная составляющая сигнала, несущая информацию об анализируемых компонентах смеси; $n_1(t)$ – высокочастотная помеха, распределенная по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией помехи $\sigma_{n_1}^2$ (σ_{n_1} – СКО помехи):

$$n_1(t) \sim N(0, \sigma_{n_1}^2).$$

По аналогии выходной сигнал $\tilde{y}_2(t)$ второго детектора:

$$\tilde{y}_2(t) = y_2(t) + n_2(t).$$

Здесь $y_2(t)$ – полезная составляющая второго детектора, $n_2(t)$ – высокочастотная помеха:

$$n_2(t) \sim N(0, \sigma_{n_2}^2).$$

Для генерирования помехи была использована программа *randn* MATLAB. Заданные значения СКО помехи: $\sigma_{n_1} = 0.02$, $\sigma_{n_2} = 0.02$.

Для конкретного примера выходные сигналы детекторов с наложенной помехой представлены на рис. 8.

Восстановление компонентов совмещенных сигналов требует в соответствии с (4) вычисления отношения сигналов $R_{1,2}$. В условиях помех значение этого коэффициента как функции времени определяется по формуле

$$\tilde{R}_{1,2}(t) = \frac{\tilde{y}_1(t)}{\tilde{y}_2(t)}.$$

Характер изменения этого отношения для представленного примера показан на рис. 9.

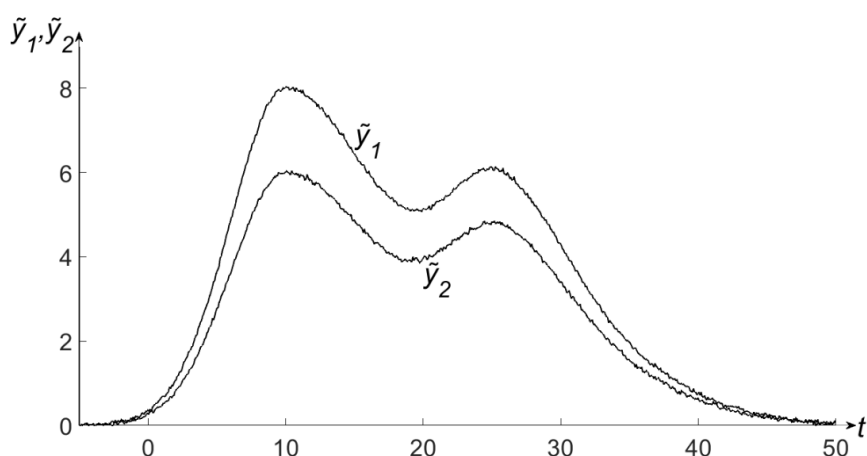


Рис. 8. Выходной сигнал первого детектора $\tilde{y}_1(t)$ с наложенной помехой $n_1(t)$: $\sigma_{n_1} = 0.02$; $W = 0.65$; выходной сигнал второго детектора $\tilde{y}_2(t)$ наложенной помехой $n_2(t)$: $\sigma_{n_2} = 0.02$; $W = 0.65$

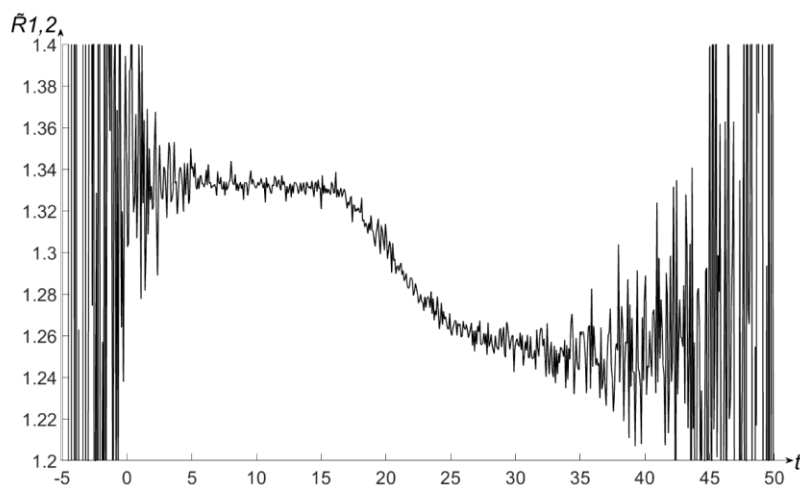


Рис. 9. Отношение зашумленного сигнала $\tilde{y}_1(t)$ к сигналу $\tilde{y}_2(t)$

Для нахождения восстановленных значений компонентов $\tilde{Y}_2^B$ и $\tilde{Y}_2^A$ воспользуемся соотношениями (12) и (13), где в качестве выходного сигнала Y_2 берется $\tilde{Y}_2$, а отношение $R_{1,2}$ заменяется на оценку $\tilde{R}_{1,2}$.

Результаты вычисления представлены на рис. 10.

На графике видно возрастание помехи на восстановленных сигналах $\tilde{y}_2^B(t)$ и $\tilde{y}_2^A(t)$ по сравнению с исходной хроматограммой $y_2(t)$ (см. рис. 8).

Для получения сглаженных значений восстановленных сигналов можно воспользоваться стандартной процедурой MATLAB: циклическое усреднение отсчетов на коротком интервале (5 отсчетов на цикл). Эта процедура дает хорошие результаты сглаживания, но приводит к увеличению ширины пиков. Результат сглаживания показан на рис. 11.

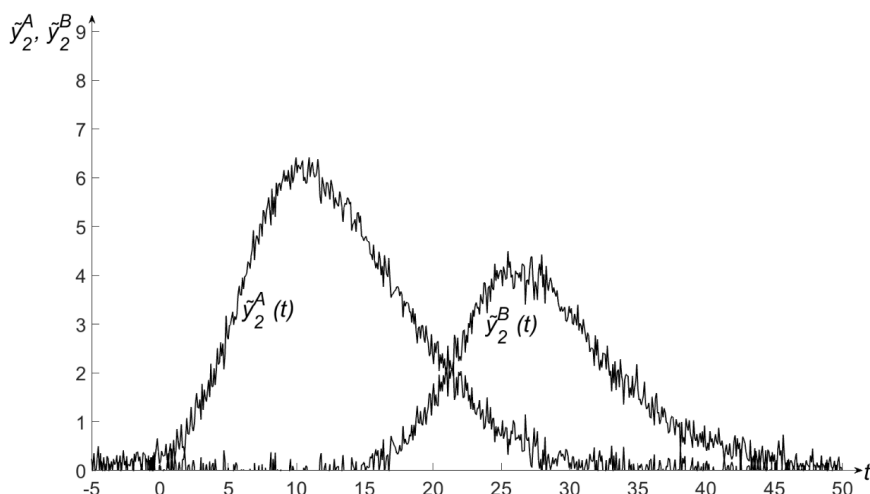


Рис. 10. Восстановленные компоненты сигнала $\tilde{y}_2^A(t)$ и $\tilde{y}_2^B(t)$

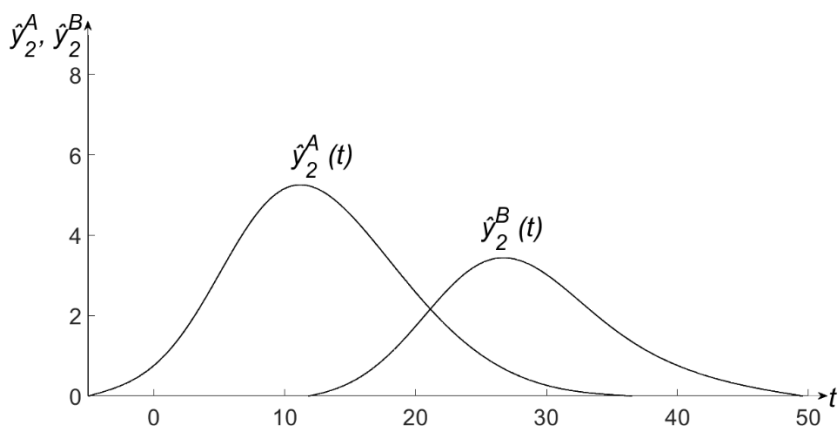


Рис. 11. Сглаженные значения выходного сигнала $\tilde{y}_2^A$ и $\tilde{y}_2^B$

Более интересный результат дает подход, основанный на аппроксимации отношения $\tilde{R}_{1,2}$ некоторой аналитической зависимостью. Анализ характера изменения $\tilde{R}_{1,2}$ во времени позволяет в качестве такой зависимости выбрать функцию тангенс гиперболический [13] в виде

$$f(t) = \frac{pe^{\alpha_i(t-t_0)}}{e^{\alpha_i(t-t_0)} + e^{-\alpha_i(t-t_0)}} + b,$$

где α_i – параметр формы, $i=1,2$; $\alpha_i = \alpha_1$ при $t \leq t_0$, $\alpha_i = \alpha_2$ при $t > t_0$ (для симметричных хроматографических пиков $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$); t_0 – положение центра координат функции; p – параметр размаха высоты; b – параметр сдвига по оси ординат.

Для нахождения параметров настройки p , α , t_0 , b используется метод наименьших квадратов [14]. Критерии оптимальности:

$$\theta = \sum_{i=1}^n [\tilde{R}_{1,2}(t_i) - f(t_i)]^2 \rightarrow \min ,$$

где n – число отсчетов в области локализации пиков.

В результате минимизации этого критерия находятся оценки $\hat{p}$, $\hat{\alpha}$, $\hat{t}_0$, $\hat{b}$. Для конкретного примера, представленного на рис. 9, значения оценок этих параметров равны ($\hat{p} = -0.08$, $\hat{\alpha}_1 = 0.22$, $\hat{\alpha}_2 = 0.22$, $\hat{t}_0 = 21$, $\hat{b} = 1.335$), а график оценки $\hat{R}_{1,2}$ представлен на рис. 12.

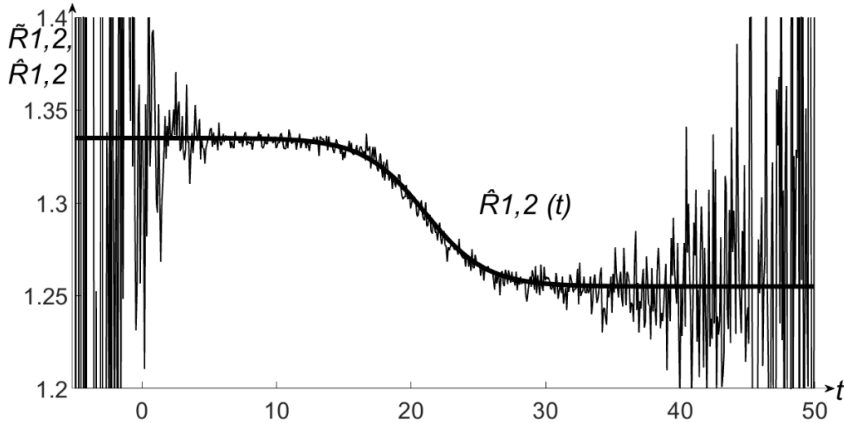


Рис. 12. Аппроксимация отношения зашумленных сигналов $\tilde{R}_{1,2}(t)$ функцией тангенса гиперболического $\hat{R}_{1,2}(t)$

Восстановленные компоненты сигнала $\hat{y}_2^A$ и $\hat{y}_2^B$, полученные с использованием аппроксимации отношения зашумленных сигналов детекторов функцией тангенса гиперболического, показаны на рис. 13.

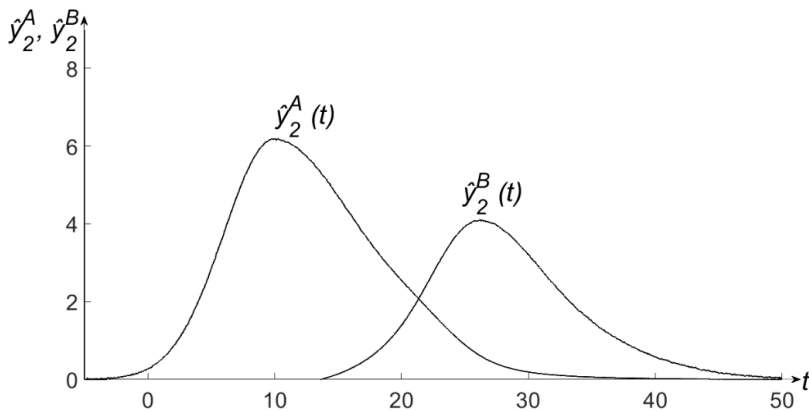


Рис. 13. Восстановленные компоненты сигнала $\hat{y}_2^A$ и $\hat{y}_2^B$

Благодаря использованию представленных алгоритмов восстановления компонентов неразрешенных сигналов удастся построить эффективные алгоритмы обработки данных, поступающих по нескольким каналам.

Погрешности оценок площадей восстановленных пиков, полученных на основе разработанного метода, представлены в табл. 2. Площади пиков вычислялись численным интегрированием по методу трапеций [15] (программа *trapz* MATLAB). Алгоритм разделения обеспечивает относительную погрешность оценки площади пика не выше 1.75 % при заданных значениях степени разрешения.

Таблица 2

Погрешности оценок площадей восстановленных пиков*

Вид хроматограммы	Пик в группе	Rs	Площадь истинная	Разраб. метод	Абс. погр.	Отн. погр., %
Без помехи	1	0.51	87.23	87.31	0.08	0.09
	2		54.74	54.54	0.2	0.34
	1	0.65	87.23	87.31	0.08	0.09
	2		54.74	54.63	0.11	0.2
Зашумленные со сглаживанием	1	0.65	87.23	87.91	0.68	0.77
	2		54.74	54.28	0.94	1.71
Использование тангенса гиперболического	1	0.65	87.23	87.9	0.67	0.76
	2		54.74	53.79	0.95	1.73

*Площади пиков приведены в условных безразмерных единицах.

Таким образом, для получения результатов качественного и количественного анализа в случае совмещенных сигналов рекомендуется использовать информативные параметры пиков, восстановленных с использованием двухканальной обработки данных.

Заключение

На основе двухканальной обработки данных разработан метод разделения совмещенных хроматографических сигналов, не требующий использования математических моделей хроматографических пиков.

Показано, что предложенный метод разделения хроматографических сигналов может быть использован в случае пиков несимметричной формы. Представлены примеры восстановленных пиков хроматографического сигнала для различных значений степени разрешения.

Проведено исследование предложенного метода разделения хроматографических сигналов в условиях помех. Для получения сглаженных значений восстановленных пиков использована стандартная процедура MATLAB: циклическое усреднение отсчетов на коротком интервале. Эта процедура дает хорошие результаты, но приводит к увеличению ширины пиков.

Предложен алгоритм разделения сигналов в условиях помех, основанный на аппроксимации отношения сигналов детекторов функцией тангенса гиперболического. Это позволяет сохранить ширину восстановленных пиков. Приводятся примеры.

Практическая значимость разработанного метода обработки хроматографических сигналов определяется перспективой использования двухканальной обработки данных для анализа широкого спектра веществ в условиях недостаточного разрешения выходных сигналов.

Материал статьи подготовлен на основе ВКР Сайфулин М.Ж. Двухдетекторная хроматографическая информационно-измерительная система: магистерская диссертация 12.04.01 / М.Ж. Сайфулин. Самар. гос. техн. ун-т, Самара, 2023. 81 с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сакодынский К.И., Бражников В.В., Волков С.А., Зельвенский В.Ю. Приборы для хроматографии. М.: Машиностроение, 1987. 261 с.
2. Гиошон Ж., Гнийемен К. Количественная газовая хроматография для лабораторных анализов и промышленного контроля: В 2-х частях. Ч. I. Пер. с англ. М.: Мир, 1991. 582 с.
3. Русинов Л.А. Автоматизация аналитических систем определения состава и качества веществ. Л.: Химия, 1984. 158 с.
4. Русинов А.Л., Гуревич А.Л. Алгоритмическое обеспечение информационно-измерительных систем с аналитическими приборами // Измерения, контроль, автоматизация. 1982. № 3. С. 9–16.
5. Кюлик Э.А., Кальюранд М.Р., Козль Э.Н. Применение ЭВМ в газовой хроматографии. М.: Наука, 1979. 127 с.
6. Силис Я.Я., Кофман А.М., Розенблит А.Б. Первичная обработка хроматограмм и спектров на ЭВМ. Рига: Зинатне, 1980. 127 с.
7. Керасик Ф., Клемент Р. Введение в хромато-масс-спектрометрию. М.: Мир, 1993. 236 с.
8. Смит А. Прикладная ИК-спектрометрия. М.: Мир, 1982. 328 с.
9. Манойлов В.В., Новиков Л.В. Оценка параметров масс-спектрометрического пика в дублете // Научное приборостроение. 2012. Т. 22, № 3. С. 30–35. EDN: PBHSPN.
10. Отто М. Современные методы аналитической химии (в 2-х томах). Т. II. Пер. с нем. под ред. А.В. Гармаша. М.: Техносфера, 2004. 288 с.
11. Бочкарев А.В. Повышение точности количественного хроматографического анализа с помощью новой модели пика // Автоматизация в промышленности. 2022. № 7. С. 36–41. DOI: 10.25728/avtprom.2022.07.11. EDN: EPPYCW.
12. Felinger A. Data Analysis and Signal Processing in Chromatography. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science B.V., 1998. 413 p.
13. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. М.: Наука, 1981. 720 с.
14. Трубников С.В., Порошин Б.В. Вычислительная математика: учеб. пособие. Брянск: БГТУ, 2005. 396 с. EDN: QJQACV.
15. Misra S., Wahab M., Patel D. The utility of statistical moments in chromatography using trapezoidal and Simpson's rules of peak integration // Journal of Separation Science. 2019. Vol. 42. DOI: 10.1002/jssc.201801131. EDN: REVVNH.

Статья поступила в редакцию 28.05.2025

USING DUAL-CHANNEL DATA PROCESSING FOR SEPARATION OF OVERLAPPED CHROMATOGRAPHIC SIGNALS

M.Z. Sayfulin¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: sayfulinmarsel@yandex.ru

Abstract. *This article addresses the problem of separating overlapped chromatographic signals using a dual-detector chromatograph. Traditional chromatographic signal processing technology typically employs a single-detector chromatograph. The proposed approach utilizes multi-channel data processing, where the separation process in the column is recorded by multiple detectors. In the case of a dual-detector chromatographic information-measuring system (IMS), two non-selective detectors with different sensitivities to the sample components are used. This enables a fundamentally new approach to separating overlapped signals.*

The separation is based on special mathematical transformations of the overlapped signals from the two chromatographic detectors. The ratio of the first detector's signal to the second detector's signal (and vice versa) is calculated, yielding certain coefficients as functions of time. Using these coefficients, relationships are derived to reconstruct the unresolved components of the signals from the first and second detectors, respectively. The proposed separation method can be applied to both symmetric and asymmetric peaks. Examples of peak reconstruction for various resolution values are presented.

To obtain smoothed values of the reconstructed peaks during signal separation in noisy conditions, a standard MATLAB procedure of cyclic averaging over a short interval is employed. To preserve the width of the reconstructed peaks in the separation algorithm under noisy conditions, it is proposed to approximate the ratio of the detector signals using a hyperbolic tangent function. Examples demonstrating the effectiveness of smoothing are provided.

Keywords: *chromatography, quantitative analysis, resolution, overlapped peaks, dual-channel processing, signal separation, noise, chromatographic IMS.*

REFERENCES

1. Sakodyskiy K.I., Brazhnikov V.V., Volkov S.A., Zelvenskiy V.Yu. Pribory dlya hromatografii [Chromatography instruments]. M.: Mashinostroenie, 1987. 261 p. (In Russian)
2. Gioshon Zh., Gnijemen K. Kolichestvennaya gazovaya hromatografiya dlya laboratornykh analizov i promyshlennogo kontrolya [Quantitative gas chromatography for laboratory analysis and industrial control]: V 2-h chastyah. Ch. I. Per. s angl. M.: Mir, 1991. 582 p. (In Russian)
3. Rusinov L.A. Avtomatizatsiya analiticheskikh sistem opredeleniya sostava i kachestva veshchestv [Automation of analytical systems for substance composition and quality determination]. L.: Himiya, 1984. 158 p. (In Russian)
4. Rusinov A.L., Gurevich A.L. Algoritmicheskoe obespechenie informacionno-izmeritel'nykh sistem s analiticheskimi priborami [Algorithmic support for information-measurement systems]



© The Author(s), 2025

¹ Marsel Zh. Sayfulin, Postgraduate Student, Dept. of Information and Measurement Technology.

- with analytical instruments] // *Izmereniya, kontrol', avtomatizatsiya*. 1982. № 3. P. 9–16. (In Russian)
5. *Kyullik E.A., Kalyurand M.R., Koel E.N.* *Primenenie EVM v gazovoj hromatografii* [Computer applications in gas chromatography]. M.: Nauka, 1979. 127 p. (In Russian)
 6. *Silis Ya.Ya., Kofman A.M., Rozenblit A.B.* *Pervichnaya obrabotka hromatogramm i spektrov na EVM* [Primary processing of chromatograms and spectra using computers]. Riga: Zinatne, 1980. 127 p. (In Russian)
 7. *Kerasik F., Klement R.* *Vvedenie v hromato-mass-spektrometriyu* [Introduction to chromatography-mass spectrometry]. M.: Mir, 1993. 236 p. (In Russian)
 8. *Smit A.* *Prikladnaya IK-spektrometriya* [Applied IR spectroscopy]. M.: Mir, 1982. 328 p. (In Russian)
 9. *Manojlov V.V., Novikov L.V.* *Ocenka parametrov mass-spektrometriceskogo pika v dublete* [Evaluation of mass-spectrometric peak parameters in doublets] // *Nauchnoe priborostroenie*. 2012. V. 22, № 3. P. 30–35. (In Russian)
 10. *Otto M.* *Sovremennye metody analiticheskoy himii (v 2-h tomah)* [Modern methods of analytical chemistry]. V. II. Per. s nem. pod red. A.V. Garmasha. M.: Tekhnosfera, 2004. 288 p. (In Russian)
 11. *Bochkarev A.V.* *Povyshenie tochnosti kolichestvennogo hromatograficheskogo analiza s pomoshchyu novoy modeli pika* [Improving accuracy of quantitative chromatographic analysis using a new peak model] // *Avtomatizatsiya v promyshlennosti*. 2022. № 7. P. 36–41. DOI: 10.25728/avtprom.2022.07.11. (In Russian)
 12. *Felinger A.* *Data Analysis and Signal Processing in Chromatography*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science B.V., 1998. 413 p.
 13. *Bronshtejn I.N., Semendyaev K.A.* *Spravochnik po matematike* [Handbook of mathematics]. M.: Nauka, 1981. 720 p. (In Russian)
 14. *Trubnikov S.V., Poroshin B.V.* *Vychislitel'naya matematika: ucheb. posobie* [Computational mathematics]. Bryansk: BGTU, 2005. 396 p. (In Russian)
 15. *Misra S., Wahab M., Patel D.* *The utility of statistical moments in chromatography using trapezoidal and Simpson's rules of peak integration* // *Journal of Separation Science*. 2019. Vol. 42. DOI: 10.1002/jssc.201801131.

Original article submitted 28.05.2025

Энергетика и электротехника

УДК 621.78

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОНТУРА РЕГАЗИФИКАЦИИ, РАБОТАЮЩЕГО ПО ДВУХКАСКАДНОМУ ЦИКЛУ БРАЙТОНА, ДЛЯ КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЫ ХРАНЕНИЯ ЭНЕРГИИ

Е.В. Благин¹, Д.А. Угланов¹, Е.П. Кузнецова¹, Н.В. Галкина¹, И.В. Кудинов²

¹ Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва
Россия, 443086, г. Самара, Московское шоссе, 244

² Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: blagin.ev@ssau.ru, uglanov.da@ssau.ru, Lange.elizaveta@yandex.ru, galkina.nv@ssau.ru, igor-kudinov@bk.ru

Аннотация. В настоящее время вопрос компенсации неравномерности нагрузки на энергосети является одним из ключевых направлений развития энергетической отрасли. Одним из решений этой проблемы является применение криогенной системы хранения энергии, которая позволяет хранить энергию в виде сжиженного газа. Основным недостатком такой системы является относительно низкий коэффициент аккумулирования, и в данной работе предлагается повысить его за счет использования двухкаскадного цикла Брайтона в составе контура регазификации. В результате технико-экономического анализа был получен фронт парето-эффективных конфигураций контура, определены рабочие тела для верхнего и нижнего каскадов, найдена рентабельность установок.

Ключевые слова: контур регазификации, двухкаскадный цикл Брайтона, повышение эффективности контура.

Введение

Согласно сценарию развития мировой энергетики до 2050 года (рис. 1), по данным РЭА Минэнерго России [1] современное развитие технологий ведет к постоянному росту потребления энергии. В условиях современного развития



© Автор(ы), 2025

¹ Евгений Валерьевич Благин, кандидат технических наук, доцент кафедры тепло-техники и тепловых двигателей.

¹ Дмитрий Александрович Угланов, доктор технических наук, профессор кафедры теплотехники и тепловых двигателей.

¹ Елизавета Павловна Кузнецова, студент.

¹ Наталья Викторовна Галкина, старший преподаватель кафедры инженерной графики.

² Игорь Васильевич Кудинов, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой физики.

Результаты работы получены при финансовой поддержке Минобрнауки России (проект № FSSS-2024-0017)

энергетики одной из ключевых задач становится обеспечение стабильности энергосистем и энергетических комплексов на основе возобновляемых источников энергии, подверженных колебаниям из-за непостоянства солнечной и ветровой генерации. Традиционные методы хранения энергии, такие как литий-ионные аккумуляторы и гидроаккумулирующие станции, сталкиваются с ограничениями, включая географическую зависимость, дефицит ресурсов и проблемы утилизации. Это стимулирует поиск инновационных решений, способных обеспечить масштабируемость, высокий КПД и экологичность. Одним из перспективных направлений являются криогенные системы хранения энергии (КСХЭ), использующие сжиженные газы (например, воздух или азот) в качестве энергоносителя.

Криогенный энергетический комплекс позволяет получать температуры, которые могут быть недостижимы при использовании традиционных энергетических установок, и таким образом расширить возможности научных исследований и промышленных процессов [2].

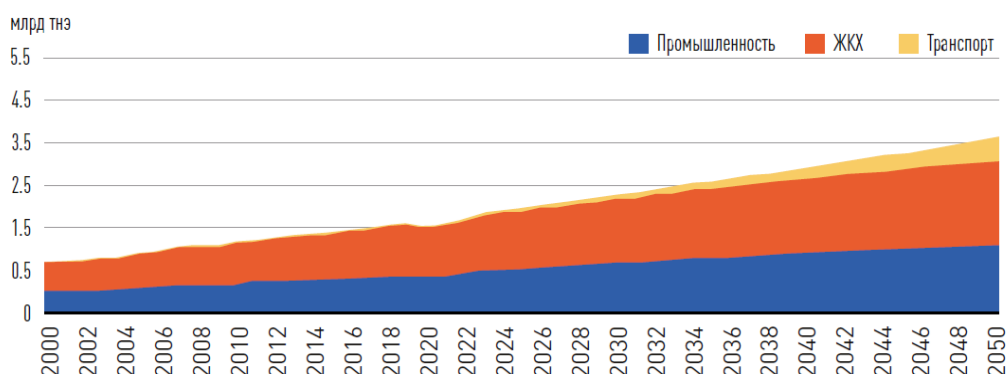


Рис. 1. Динамика конечного потребления электроэнергии

Принцип работы КСХЭ основан на запасании энергии посредством сжижения газа при низких температурах (около -196°C для азота) с последующим восстановлением энергии через регазификацию и расширение рабочего тела в турбине. Однако эффективность таких систем во многом зависит от термодинамического цикла, применяемого на этапе регазификации. В последние годы внимание исследователей привлекло использование цикла Брайтона [3, 4], традиционно применяемого в газотурбинных установках, для повышения эффективности процесса преобразования энергии. В отличие от цикла Ренкина [5, 6], который доминирует в классических КСХЭ, цикл Брайтона позволяет эффективнее использовать тепловую энергию окружающей среды и остаточное тепло, интегрируя компрессоры и турбины в замкнутый контур. Это открывает возможности для повышения КПД системы за счет улучшенного управления фазовыми переходами и минимизации потерь.

Современные достижения в области материаловедения (например, криогенно-стойкие сплавы) и технологий теплообмена способствуют преодолению исторических ограничений КСХЭ, таких как сложности управления экстремальными температурами и высокая стоимость инфраструктуры. Внедрение цикла Брайтона в контуры регазификации не только повышает энергоэффективность, но и расширяет потенциал интеграции КСХЭ в гибридные энергосистемы, включая

комбинацию с ВИЭ и промышленными объектами, выделяющими низкопотенциальную энергию (например, теплота вторичных источников энергии).

В данной статье анализируются конструктивные особенности криогенных систем хранения энергии с регазификацией на основе цикла Брайтона, оценивается их термодинамическая эффективность и практическая применимость. Рассматриваются ключевые аспекты проектирования, в частности тепловых потоков, управления фазовыми переходами и адаптации компонентов цикла Брайтона к криогенным условиям. Особое внимание уделено потенциалу таких систем в контексте декарбонизации энергетики и их роли в обеспечении гибкости современных интеллектуальных энергосистем. Результаты исследования демонстрируют, что интеграция цикла Брайтона в КСХЭ может стать значимым шагом в развитии устойчивых и экономически viable технологий хранения энергии.

Существует объективная потребность реализации идеи использования низкопотенциального тепла криогенных продуктов и установок, основанных на утилизации части ранее затраченной на ожижение газа энергии. Благодаря криогенным температурам воздуха в сжиженном состоянии цикл получения электроэнергии может осуществляться за счет широко доступных источников теплоты при температуре окружающей среды и выше. Это не только устраняет необходимость в сжигании углеводородного топлива, связанном с образованием выбросов вредных веществ, но также позволяет рекуперировать теплоту низкотемпературных потоков, например отводимого тепла.

Криогенные системы аккумулирования энергии на воздухе в сжиженном состоянии могут быть использованы с любыми гибридными энергетическими установками: солнечными, ветровыми, геотермальными, биогазовыми – для балансировки энергосистемы и сокращения выбросов вредных веществ. Кроме того, они могут быть интегрированы в существующие промышленные газовые энергоустановки.

Криогенный аккумулятор представляет собой систему накопления энергии, которая состоит из ожижителя газа, емкости для хранения криопродукта и контура регазификации. Впервые концепция использования емкости с криогенной заправкой [7] была предложена в [8]. Рабочий процесс криогенной системы аккумулирования энергии сжатия воздуха в компрессоре состоит из трех основных циклов: цикла зарядки, цикла накопления и цикла разрядки.

Производство электроэнергии является традиционным и эффективным методом использования холодной энергии.

Выбор правильного цикла для более эффективного использования энергии связан с качеством источника тепла цикла. Исследования показали, что цикл Ренкина наиболее подходит при низком качестве источника, в то время как цикл Брайтона подходит при утилизации среднего или высококачественного источника тепла [9].

Схема системы регазификации, работающей по двухкаскадному циклу Брайтона

На рис. 2 представлена схема системы регазификации, рабочим веществом которой является сжатый воздух в компрессоре. Принцип работы данной силовой установки аналогичен принципу работы установки, работающей по закрытому циклу Брайтона. Различия заключаются в том, что тепло к рабочему телу, которое охлаждается сжатием воздуха в компрессоре, подводится не из окружающей среды, а от другого рабочего тела, которое, в свою очередь, осуществляет

закрытый цикл Брайтона и уже к которому подводится тепло от окружающей среды.

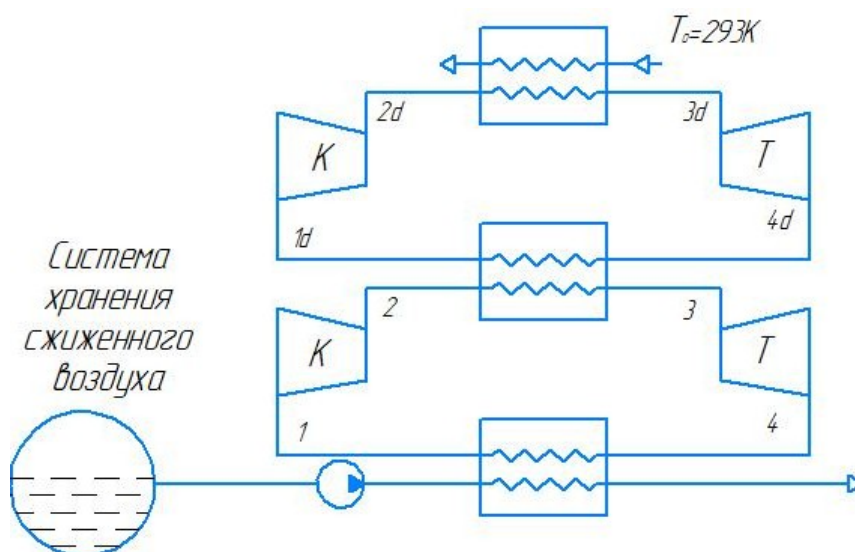


Рис. 2. Схема системы регазификации, работающей по каскадному циклу Брайтона

Криогенная силовая установка (рис. 3) совершает работу по каскадному циклу, нижний каскад и верхний каскады которого осуществляют закрытый цикл Брайтона. Применение каскадной схемы позволяет реализовывать большую часть процессов в двухфазной области рабочих тел, что, в свою очередь, позволяет уменьшить потери необратимости и повысить энергетическую эффективность установок.

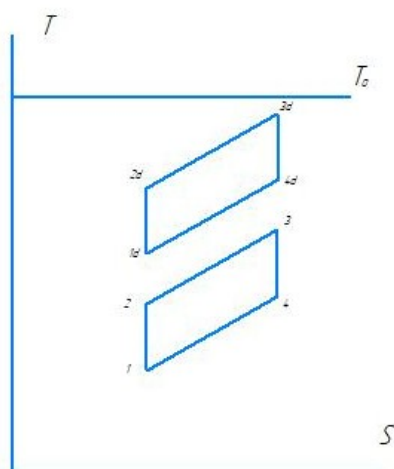


Рис. 3. Изображение процессов смешанного каскадного цикла Ренкина – Брайтона на T-S диаграмме

Процессы закрытого цикла Брайтона:

- адиабатный процесс (1–2) показывает процесс сжатия воздуха в компрессоре;
- участок (2–3) соответствует изобарному процессу подвода тепловой энергии в теплообменном аппарате;
- адиабатный процесс (3–4) соответствует расширению газа в турбине;
- изобарный процесс (4–1) соответствует процессу отвода теплоты и конденсации рабочего тела.

Аналогичные процессы происходят во втором каскаде:

- адиабатный процесс (1d–2d) показывает процесс сжатия воздуха в компрессоре;
- участок (2d–3d) соответствует изобарному процессу подвода тепловой энергии в теплообменном аппарате;
- адиабатный процесс (3d–4d) соответствует расширению газа в турбине;
- изобарный процесс (4d–1d) соответствует процессу отвода теплоты и конденсации рабочего тела.

Исходные данные и алгоритм расчета параметров рабочего процесса

Исходные данные для термодинамического расчета представлены в таблице.

Исходные данные

Рабочее вещество	G , кг/с	T_{liq_air} , К	T_0 , К	n_{pump}	n_{turb}	$dp1$	$dp2$	dT	T_3 , К
Воздух	1	77	293	0,92	0,89	1...10	1...50	1	150...200

Расчет нижнего каскада. Температура в точке 1 находится по сумме параметров температуры кипения жидкого азота T_{liq_air} и минимального установленного температурного напора dT :

$$T_1 = T_{liq_air} + dT = 79 \text{ К.}$$

Давление в точке 1 определяется из следующих соображений.

С помощью справочных данных находятся термодинамические параметры, используемые для расчета цикла Брайтона: энтальпия в точке 1 h_1 , энтропия s_1 , плотность ρ_1 .

Давление в точке 2:

$$p_2 = p_1 + dp * 100000.$$

Энтропия в точке 2 равна энтропии в точке 1: $s_{2s} = s_1$.

Энтальпию в точке 2s найдем по значению энтропии s_2 и p_2 :

$$h_{2s} = f(p_2, s_{2s}).$$

Данное значение энтальпии соответствует идеальному (изоэнтропному) процессу сжатия. В действительности процесс проходит с небольшим увеличением энтропии, которое характеризуется относительным КПД компрессора:

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_k}.$$

Итоговую температуру в точке 2 можно определить по давлению p_2 и энтальпии h_2 .

Давление в точке 3 будет равно давлению в точке 2, а давление в точке 4 будет равно давлению в точке 1, так как все они находятся на соответствующих линиях изобарного процесса:

$$p_3 = p_2, \quad p_4 = p_1.$$

Температуру T_2 найдем по справочным данным, воспользуясь найденными ранее параметрами энтальпии h_2 и давления p_2 .

Аналогичным образом будут найдены энтальпия в точке 3 h_3 и энтропия s_3 по известным параметрам температуры T_3 и давления p_3 .

Работа турбины в идеальном случае осуществляется по изэнтропийному процессу, тогда $s_3 = s_{4s}$.

Энтальпию в точке 4 найдем по значению энтропии s_{4s} и p_4 :

$$h_{4s} = f(p_4, s_{4s}).$$

Энтальпия h_4 с учетом влияния коэффициента полезного действия турбины будет найдена по следующей формуле:

$$h_4 = h_3 - (h_3 - h_{4s}) * \eta_{турб}.$$

Температура T_4 в точке 4 с учетом влияния неидеального процесса расширения в турбине будет найдена по найденным ранее параметрам давления и энтальпии.

Расчет верхнего каскада. Температуру в точке 3d, соответствующей максимальному нагреву газа, найдем как разность между температурой окружающей среды T_0 и минимальным установленным температурным напором dT :

$$T_{3d} = T_0 - dT = 292 \text{ К}.$$

Определение температуры в точке 1d находится по сумме параметров температуры кипения рабочего тела нижнего каскада и минимального установленного температурного напора dT :

$$T_{1d} = T_2 + dT.$$

Давление в точке 1d принимаем равным 100 000 Па.

Давление в точке 2:

$$p_2 = p_1 + dP * 100000.$$

Энтропия в точке 2 равна энтропии в точке 1: $s_{2s} = s_1$.

Энтальпию в точке 2s найдем по значению энтропии s_2 и p_2 :

$$h_{2s} = f(p_2, s_{2s}).$$

Данное значение энтальпии соответствует идеальному (изэнтропному) процессу сжатия. В действительности процесс проходит с небольшим увеличением энтропии, которое характеризуется относительным КПД компрессора:

$$h_2 = h_1 + \frac{h_{2s} - h_1}{\eta_k}$$

Итоговую температуру в точке 2 можно определить по давлению p_2 и энтальпии h_2 .

Давление в точке 3d будет равно давлению в точке 2d, а давление в точке 4d будет равно давлению в точке 1d, так как все они находятся на соответствующих линиях изобарного процесса:

$$p_{3d} = p_{2d}; p_{4d} = p_{1d}.$$

Температуру T_{2d} найдем по справочным данным, воспользуясь найденными ранее параметрами энтальпии h_{2d} и давления p_{2d} . Аналогичным образом будут найдены энтальпия в точке 3d h_{3d} и энтропия s_{3d} по известным параметрам температуры T_{3d} и давления p_{3d} .

Работа турбины в идеальном случае осуществляется по изоэнтروпийному процессу, тогда $s_{3d} = s_{4id}$.

Энтальпия h_{4d} с учетом влияния коэффициента полезного действия турбины будет найдена по следующей формуле:

$$h_{4d} = h_{3d} - (h_3 - h_{4s}) * n_{urb}.$$

Температура в точке 4d с учетом влияния неидеального процесса расширения в турбине будет найдена по найденным ранее параметрам давления и энтальпии.

Расход рабочего тела верхнего каскада можно найти из уравнения массового баланса испарителя-конденсатора:

$$G_2 = G_1 \cdot \frac{h_3 - h_2}{h_{4d} - h_{1d}}.$$

Мощность турбины и насоса будут найдены по следующим формулам:

$$W_{t1} = G_1 * (h_4 - h_5);$$

$$W_{t2} = G_2 * (h_{3d} - h_{4d});$$

$$W_{c1} = G_1 * (h_2 - h_1);$$

$$W_{c2} = G_2 * (h_{2d} - h_{1d}).$$

Мощность цикла определим как разницу между работой, вырабатываемой турбиной и потребляемой насосом:

$$N = W_{t1} + W_{t2} - W_{c1} - W_{c2}.$$

Технико-экономическое обоснование выбора схемы оценки стоимости компонентов энергетической установки

Рассмотрим теплообменник, в котором происходит подвод тепла к рабочему телу нижнего каскада от рабочего тела верхнего каскада.

Теплота, подводимая на участке (2 – 3), соответствует нагреву рабочего тела:

$$Q_{11} = G_1 * (h_3 - h_2).$$

На следующем этапе расчета требуется определить коэффициенты теплопередачи в теплообменном аппарате. В данном расчете не рассчитываются непосредственно теплообменные аппараты, используемые в криогенной силовой установке. Коэффициент теплопередачи для жидкости находится в диапазоне значений $500...4500 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, в данном расчете для жидкости условно примем его

равным $1000 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, для воздушной среды он находится в диапазоне $50 \dots 270 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, условно примем его равным $200 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Участок нагрева газа (2–3):

$$K_1 = 200 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Среднетемпературный напор по участкам найден по следующим формулам:

$$dT_1 = \frac{(T_{1d} - T_2) - (T_{4d} - T_3)}{\ln \left(\frac{T_{1d} - T_2}{T_{4d} - T_3} \right)}.$$

Необходимая площадь наружной поверхности теплообмена на участках определяется по формуле

$$F_1 = \frac{Q_1}{K_1 \cdot dT_1}.$$

Рассмотрим участок (4–1), отвод теплоты в теплообменном аппарате от газообразного воздуха с последующим его ожижением.

Формулы расчета параметров теплоты, теплопередачи, среднетемпературного логарифмического напора и площади теплообмена для охладителя рабочего тела аналогичны формулам расчета процесса (2–3):

$$Q_2 = G * (h_4 - h_1).$$

Участок охлаждения газа до начальной температуры (4 –1):

$$K_2 = 200 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Среднетемпературный напор:

$$dT_2 = \frac{(T_4 - T_{liq_air}) - (T_1 - T_{liq_air})}{\ln \left(\frac{T_4 - T_{liq_air}}{T_1 - T_{liq_air}} \right)}.$$

Площадь теплообмена найдем по формуле

$$F_2 = \frac{Q_2}{K_2 \cdot dT_2}.$$

Рассмотрим участок теплообменника, в котором к рабочему телу верхнего каскада подводится тепло от окружающего воздуха.

Теплота, подводимая на участке (2d–3d), будет равна

$$Q_{1d} = G_2 * (h_{3d} - h_{2d}).$$

На следующем этапе расчета требуется определить коэффициенты теплопередачи в теплообменном аппарате. В данном расчете не рассчитываются непосредственно теплообменные аппараты, используемые в криогенной силовой установке. Коэффициент теплопередачи для жидкости находится в диапазоне значений $500 \dots 4500 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, в данном расчете для жидкости условно примем его равным $1000 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, для воздушной среды он находится в диапазоне $50 \dots 270 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$, условно примем его равным $200 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$.

Участок нагрева газа (2–3):

$$K_{1d} = 200 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Среднетемпературный напор по участкам найден по следующим формулам:

$$dT_{1d} = \frac{(T_0 - T_{4d}) - (T_0 - T_{2d})}{\ln\left(\frac{T_0 - T_{4d}}{T_0 - T_{2d}}\right)}.$$

Необходимая площадь наружной поверхности теплообмена на участках определяется по формуле

$$F_3 = \frac{Q_{11d}}{K_{11}d \cdot dT_{11d}}.$$

Зависимость стоимости оборудования от расчетных значений определена по модели Ozen, предложенной в [10].

Стоимость «горячего» и «холодного» теплообменных аппаратов:

$$ZTO_1 = (2143 + F_1^{0,514}) * 1000;$$

$$ZTO_2 = (2143 + F_2^{0,514}) * 1000;$$

$$ZTO_3 = (2143 + F_3^{0,514}) * 1000.$$

Стоимость насоса и турбины будут определены по формулам ниже:

$$ZN_1 = 1120 * W_{p1}^{0,8};$$

$$ZN_2 = 1120 * W_{p2}^{0,8};$$

$$ZT_1 = 6000 * W_{t1}^{0,7};$$

$$ZT_2 = 6000 * W_{t2}^{0,7}.$$

Общая стоимость криогенной установки:

$$Z = ZTO_1 + ZTO_2 + ZTO_3 + ZN_1 + ZN_2 + ZT_1 + ZT_2.$$

Термический КПД двухкаскадного цикла Ренкина:

$$\eta_t = \frac{N}{G_2 * (h_{5d} - h_{2d})}.$$

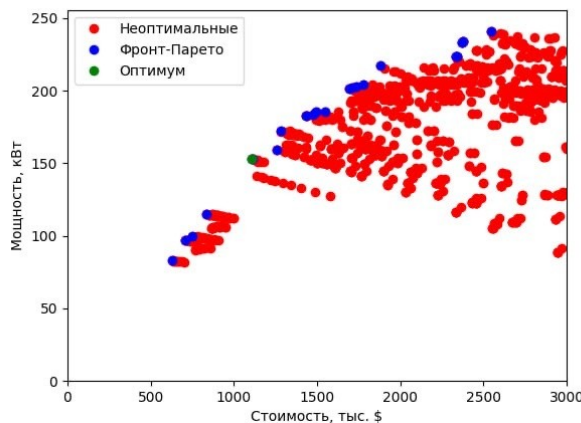


Рис. 4. Распределение совокупности полученных значений мощности и стоимости в результате расчета в программно-аналитическом комплексе и распределение данных значений по эффективности Парето для двойного цикла Брайтона

Из рис. 4 видно, что установка с наименьшей стоимостью (порядка 650 тыс. \$) вырабатывает около 80 кВт, а наиболее рентабельной установкой является установка стоимостью порядка 1000 тыс. \$ и вырабатывающая мощность около 140 кВт.

Анализ популяции фронта Парето. При анализе популяции фронта Парето особый интерес представляет тип рабочего тела, которое циркулирует в парето-эффективных конфигурациях контура.

Фронт Парето с указанием рабочих тел нижнего и верхнего каскадов представлен на рис. 5, 6.

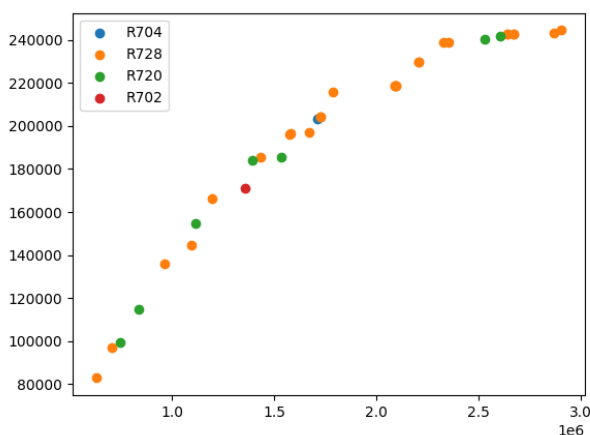


Рис. 5. Фронт Парето с указанием рабочих тел нижнего каскада

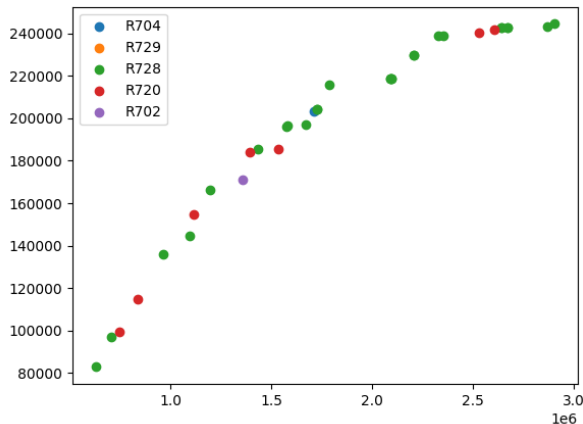


Рис. 6. Фронт Парето с указанием рабочих тел верхнего каскада

Из анализа рис. 5 и 6 можно сделать вывод, что подавляющее большинство парето-эффективных установок используют в качестве рабочего тела как верхнего, так и нижнего каскадов азот или неон при небольшом присутствии установок, работающих на водороде и гелии. Анализ общего количества установок представлен на рис. 7 и 8.

Из диаграммы видно, что наиболее часто представленным рабочим телом верхнего и нижнего каскада является азот.

Как было указано выше, величина срока окупаемости будет пропорциональна отношению стоимости установки к ее мощности. Аналогичным образом мож-

но оценить рентабельность установки, которая, в свою очередь, будет пропорциональна отношению мощности к стоимости. В таком случае установка, у которой это отношение будет максимальным, и будет наиболее рентабельной. Анализ рентабельности установок по данному отношению представлен на рис. 9–10.

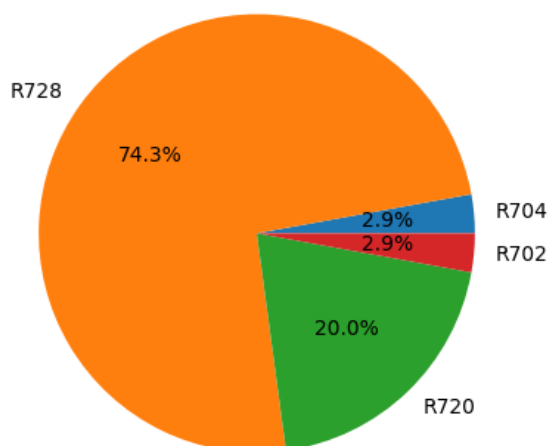


Рис. 7. Соотношение парето-эффективных конфигураций по рабочим телам нижнего каскада

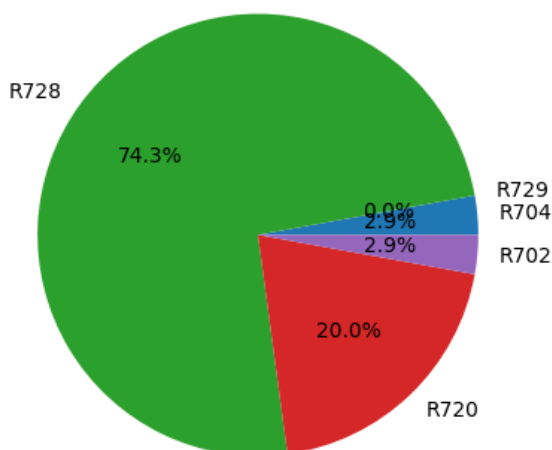


Рис. 8. Соотношение парето-эффективных конфигураций по рабочим телам верхнего каскада

Результаты анализа

Анализ рентабельности показывает, что наиболее эффективными установками являются установки, работающие на азоте R728 и неоне R720 в качестве рабочего тела нижнего каскада и азоте (R728) в качестве рабочего тела верхнего каскада. При этом конфигурацией с наибольшей рентабельностью является конфигурация, использующая в качестве рабочего тела нижнего каскада азот с повышением давления в компрессоре в 2 раза, использующая в качестве рабочего тела верхнего каскада водород (R702) с повышением давления в компрессоре в 4

раза с минимальным температурным напором в теплообменниках 1 К и с температурой T_2 нижнего каскада, равной 190 К.

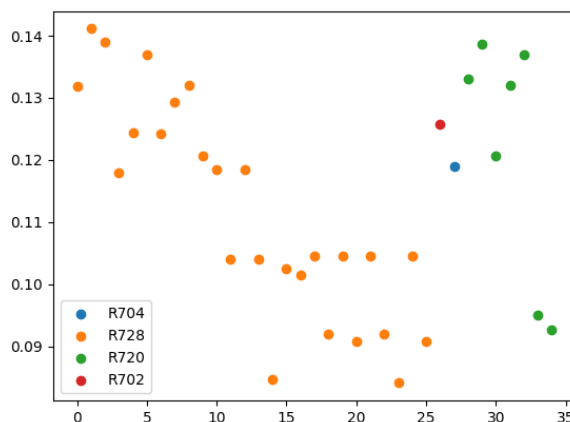


Рис. 9. Рентабельность установок в зависимости от типа рабочего тела нижнего каскада

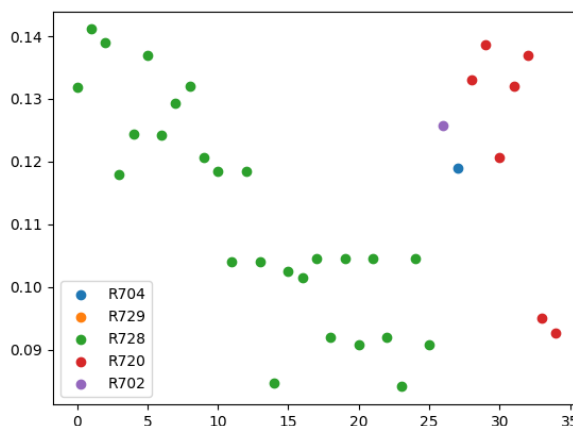


Рис. 10. Рентабельность установок в зависимости от типа рабочего тела верхнего каскада

Закключение

В результате исследования был проведен расчет повышения эффективности установки, работающей по двухкаскадному циклу Брайтона.

На основании полученных данных был построен фронт Парето, отображающий распределение совокупности полученных значений по параметрам мощности и стоимости.

При проведении анализа было выявлено, что наиболее эффективными будут являться установки, работающие на азоте R728 и неоне R720 в качестве рабочего тела нижнего каскада и азоте (R728) в качестве рабочего тела верхнего каскада.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. РЭА Минэнерго России. Сценарии развития мировой энергетики до 2050 года. М., 2024. С. 17.

2. *Zhang L.* Effectiveness-NTU Methods for Heat and Mass Transfer Processes // *Conjugate Heat and Mass Transfer in Heat Mass Exchanger Ducts*. 2013. P. 309–334. DOI: 10.1016/B978-0-12-407782-9.00011-3.
3. *Ireneusz S.* Thermodynamical analysis of a mirror gas turbine cycle for LNG cryogenic exergy recovery // *Energy*. 2025. V. 324. P. 135718. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135718.
4. *Mohamed S.* Assessment of a sustainable multigeneration system integrating supercritical CO₂ Brayton cycle and LNG regasification: Thermodynamic and exergoeconomic evaluation // *Case Studies in Thermal Engineering*. 2024. V. 56. P. 104205. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104205. EDN: YYSNKB.
5. *Bhalchandra S.* Enhancing energy efficiency: Design and simulation of air fractionation unit integrated through LNG cold energy and two-stage organic Rankine cycles // *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2025. V. 103. P. 2018–2038. DOI: 10.1002/cjce.25482. EDN: YDJORT.
6. *Roberto B.* A novel system based on a series of ORCs to recover cryogenic energy from the LNG regasification process for power and freshwater production // *Journal of Cleaner Production*. 2024. V. 469. P. 143172. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143172. EDN: QHPDEN.
7. *Довгялло А.И., Лукачев С.В., Романов И.Г., Россеев Н.И., Цыбизов Ю.И.* Топливный баллон: пат. 2163699 Рос. Федерация: МПК F17C9/02. № 99114577/06; заявл. 02.07.1999; опубл. 27.02.2001. 7 с.
8. *Довгялло А.И., Угланов Д.А., Цапкова А.Б., Шиманов А.А.* Низкотемпературная энергетическая установка на основе емкости с криогенной заправкой // *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2014. № 6. С. 354–363. DOI: 10.7463/0614.0716978. EDN: STARGJ.
9. *Угланов Д.А., Филинова А.С.* Выбор оптимального способа накопления и хранения электроэнергии // *Проблемы и перспективы развития двигателестроения: сб. докл. Междунар. науч.-техн. конф. В 2 т. Самара, 23–25 июня 2021 г. Т. 2. Самара: Самарский университет, 2021. С. 223–224. EDN: QNDQYK.*
10. *Özen D., Koçak B.* Advanced exergy and exergo-economic analyses of a novel combined power system using the cold energy of liquefied natural gas // *Energy*. 2022. V. 248. P. 123531. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123531. EDN: JRPROO.

Статья поступила в редакцию 02.06.2025

IMPROVING THE EFFICIENCY OF A REGASIFICATION CIRCUIT OPERATING ON A TWO-STAGE BRAYTON CYCLE FOR CRYOGENIC ENERGY STORAGE SYSTEMS

E.V. Blagin¹, D.A. Uglov¹, E.P. Kuznetsova¹, N.V. Galkina¹, I.V. Kudinov²

¹ Samara National Research University named after Academician S.P. Korolev
244, Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation

² Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: blagin.ev@ssau.ru, uglov.da@ssau.ru, Lange.elizaveta@yandex.ru, galkina.nv@ssau.ru, igor-kudinov@bk.ru

Abstract. *Currently, the issue of compensating for uneven loads on power grids is one of the key directions in the development of the energy sector. One solution to this problem is the use of cryogenic energy storage systems, which allow energy to be stored in the form of liquefied gas. The main drawback of such systems is their relatively low storage coefficient, and this paper proposes to improve it by using a two-stage Brayton cycle in the regasification circuit. As a result of technical and economic analysis, a Pareto-efficient frontier of circuit configurations was obtained, working fluids for the upper and lower stages were determined, and the profitability of the installations was established.*

Keywords: *regasification circuit, two-stage Brayton cycle, circuit efficiency improvement.*

REFERENCES

1. REA Minenergo Rossii. Scenarii razvitiya mirovoj energetiki do 2050 goda [Russian Energy Agency of the Ministry of Energy of the Russian Federation]. M., 2024. P. 17. (In Russian)
2. Zhang L. Effectiveness-NTU Methods for Heat and Mass Transfer Processes // Conjugate Heat and Mass Transfer in Heat Mass Exchanger Ducts. 2013. P. 309–334. DOI: 10.1016/B978-0-12-407782-9.00011-3.
3. Ireneusz S. Thermodynamical analysis of a mirror gas turbine cycle for LNG cryogenic energy recovery // Energy. 2025. V. 324. P. 135718. DOI: 10.1016/j.energy.2025.135718.
4. Mohamed S. Assessment of a sustainable multigeneration system integrating supercritical CO₂ Brayton cycle and LNG regasification: Thermodynamic and exergoeconomic evaluation // Case Studies in Thermal Engineering. 2024. V. 56. P. 104205. DOI: 10.1016/j.csite.2024.104205.
5. Bhalchandra S. Enhancing energy efficiency: Design and simulation of air fractionation unit integrated through LNG cold energy and two-stage organic Rankine cycles // The Canadian Journal of Chemical Engineering. 2025. V. 103. P. 2018–2038. DOI: 10.1002/cjce.25482.



© The Author(s), 2025

¹ Evgeny V. Blagin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor, Dept. of Thermal Engineering and Heat Engines.

¹ Dmitry A. Uglov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Dept. of Thermal Engineering and Heat Engines.

¹ Elizaveta P. Kuznetsova, Student.

¹ Natalia V. Galkina, Senior Lecturer, Dept. of Engineering Graphics.

² Igor V. Kudinov, (Dr. Sci. (Techn.)), Professor, Head of Physics Department.

This research was funded by the Russian Ministry of Science and Higher Education, Project No. FSSS-2024-0017.

6. *Roberto B.* A novel system based on a series of ORCs to recover cryogenic energy from the LNG regasification process for power and freshwater production // *Journal of Cleaner Production*. 2024. V. 469. P. 143172. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143172.
7. *Dovgyallo A.I., Lukachev S.V., Romanov I.G., Rosseev N.I., Cybizov Yu.I.* Toplivnyj ballon: pat. 2163699 Ros. Federaciya: MPK F17C9/02. № 99114577/06 [Fuel Tank: Patent 2163699 Russian Federation: IPC F17C9/02. No. 99114577/06]; zayavl. 02.07.1999; opubl. 27.02.2001. 7 p. (In Russian)
8. *Dovgyallo A.I., Uglanov D.A., Capkova A.B., Shimanov A.A.* Nizkotemperaturnaya energeticheskaya ustanovka na osnove emkosti s kriogennoj zapravkoj [Low-Temperature Power Plant Based on a Cryogenically-Fueled Vessel] // *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie MGTU im. N.E. Bauman*. 2014. № 6. P. 354–363. DOI: 10.7463/0614.0716978. (In Russian)
9. *Uglanov D.A., Filinova A.S.* Vybor optimalnogo sposoba nakopleniya i hraneniya elektroenergii [Selection of the Optimal Method for Accumulation and Storage of Electrical Energy] // *Problemy i perspektivy razvitiya dvigatelestroeniya: sb. dokl. Mezhdunar. nauch.-tekh. konf. V 2 t. Samara, 23–25 iyunya 2021 g. V. 2. Samara: Samarskij universitet, 2021. P. 223–224. (In Russian)*
10. *Özen D., Koçak B.* Advanced exergy and exergo-economic analyses of a novel combined power system using the cold energy of liquefied natural gas // *Energy*. 2022. V. 248. P. 123531. DOI: 10.1016/j.energy.2022.123531.

Original article submitted 02.06.2025

УДК 621.3

**ОПТИМИЗАЦИЯ АЛГОРИТМОВ КОМБИНИРОВАННОГО
УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ УСТАНОВОК
ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА С УЧЕТОМ
ДИСКРЕТНОСТИ УПРАВЛЯЮЩЕГО ВОЗДЕЙСТВИЯ****Ю.В. Зубков, А.М. Абакумов, О.А. Абакумов¹**

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

E-mail: zub577@mail.ru, abakumov-am@yandex.ru, abakumovoleg1@gmail.com

Аннотация. Отмечены проблемы электромагнитной совместимости элементов электротехнического комплекса компрессорных станций магистральных газопроводов, возникающие при использовании частотно-регулируемого привода вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения природного газа. Обоснована целесообразность использования систем комбинированного управления, в которых аппараты воздушного охлаждения, входящие в состав установки охлаждения газа, разделены на две группы: с частотным и дискретным регулированием скорости вентиляторов. Обсуждается вопрос оптимизации алгоритмов управления электроприводами комбинированной системы по критерию мощности на валу вентиляторов. Разработан алгоритм оптимального взаимосвязанного управления скоростью вентиляторов и количеством включенных двигателей вентиляторов соответствующей групп аппаратов воздушного охлаждения, учитывающий дискретность управляющего воздействия. Дана оценка экономии мощности на валу вентиляторов при замене дискретного управления на комбинированное с использованием разработанного алгоритма управления. Предложено для реализации оптимального алгоритма использовать систему автоматического управления, замкнутую по температуре газа на выходе установки охлаждения. Проведен сравнительный анализ энергетических показателей процесса охлаждения и точности поддержания температуры при использовании разработанного алгоритма оптимального управления и алгоритма, не учитывающего дискретности управляющего воздействия. Показано, что использование последнего при относительно небольшом количестве аппаратов воздушного охлаждения может приводить к недопустимой погрешности стабилизации температуры на выходе установки охлаждения. Рассмотрена возможность использования упрощенных вариантов алгоритмов управления. На примере установки охлаждения, содержащей четыре двухвентиляторных аппарата воздушного охлаждения и работающей в условиях существенно неравномерной нагрузки, пока-



© Автор(ы), 2025

¹ Юрий Валентинович Зубков, доктор технических наук, заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий.

Александр Михайлович Абакумов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электромеханики и автомобильного электрооборудования.

Олег Александрович Абакумов, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

заны преимущества использования комбинированной системы управления, обеспечивающей существенный энергосберегающий эффект.

Ключевые слова: установки охлаждения природного газа, электропривод аппаратов воздушного охлаждения, комбинированные системы, алгоритмы управления.

Введение

На компрессорных станциях магистральных газопроводов природный газ после компримирования охлаждают до заданной температуры. Охлаждение природного газа позволяет снизить затраты энергии на работу газоперекачивающих агрегатов в газотранспортной системе, повысить ее пропускную способность и надежность работы [1–6].

Для охлаждения природного газа на компрессорных станциях используются установки охлаждения газа (УОГ). Типовые УОГ содержат параллельно включенные аппараты воздушного охлаждения (АВО), основными элементами которых являются теплообменник и вентиляторы с электроприводом, подающие наружный воздух на теплообменник.

Электроприводы АВО на компрессорных станциях с газотурбинным приводом центробежных нагнетателей потребляют более 60 % электроэнергии, расходуемой на производственные нужды [4, 7–9], что определяет актуальность проблемы повышения энергоэффективности технологического процесса охлаждения газа.

Установка охлаждения должна обеспечивать снижение температуры компримированного газа до заданного θ_r значения в условиях изменения температуры наружного воздуха, температуры газа после компримирования, расхода газа и других менее значимых возмущающих воздействий.

Температура газа на выходе УОГ определяется температурой компримированного газа θ_{inp} на входе и температурным перепадом $\Delta\Theta$, создаваемым установкой охлаждения:

$$\theta_{out} = \theta_{inp} - \Delta\Theta.$$

В условиях действия возмущений для поддержания заданного значения температуры на выходе УОГ θ_r необходимо управлять температурным перепадом, обеспечивая его требуемое значение:

$$\Delta\theta_r = \theta_{inp} - \theta_r.$$

Широко используемый дискретный способ управления температурным перепадом, реализуемый включением/отключением электродвигателей вентиляторов, обладает существенными недостатками. Он имеет низкие показатели энергоэффективности, не обеспечивает высокой точности поддержания температуры вследствие дискретности управляющего воздействия, частые затяжные пуски двигателей могут приводить к их перегреву и негативно влияют на питающую сеть.

Указанные недостатки в значительной мере устраняются при использовании непрерывного (частотного) управления скоростью вентиляторов на базе частотно-регулируемого привода (ЧРП). Для достижения высокой точности стабилизации требуемого значения температуры на выходе УОГ используют системы автоматического управления, замкнутые по температуре газа на выходе УОГ. Применение таких систем обеспечивает значительный энергосберегающий эффект [7–12].

Системы частотного регулирования, как показывают результаты теоретических и экспериментальных исследований [13–15], имеют существенный недостаток: при оснащении большого количества двигателей АВО преобразователями частоты возникают проблемы электромагнитной совместимости элементов электротехнического комплекса компрессорной станции, особенно в случае, когда электроснабжение комплекса осуществляется от источника ограниченной мощности – электростанции собственных нужд. Различные способы решения проблемы электромагнитной совместимости [15] связаны с существенными финансовыми затратами.

Для снижения негативного влияния ЧРП установки охлаждения на питающую сеть предложено использование систем комбинированного управления [16]. В системах комбинированного управления электродвигатели одной группы АВО оснащаются ЧРП, а для второй группы АВО используется дискретное регулирование.

Задача оптимизации алгоритмов управления электроприводами вентиляторов комбинированной системы управления в стационарных режимах рассмотрена в [16]. В [17–19] разработаны оптимальные алгоритмы управления, учитывающие нелинейность распределения температуры по длине теплообменника АВО и отличие их индивидуальных энергетических и тепловых характеристик, а также обсуждаются вопросы оценки снижения потребления электроэнергии при замене дискретного управления на комбинированное. В указанных работах при решении задачи оптимизации предполагается, что УОГ содержит достаточно большое количество АВО (более 10...12), что позволяет пренебречь дискретностью изменения управляющего воздействия в виде количества включенных двигателей вентиляторов и рассматривать это воздействие как непрерывную переменную.

В статье рассмотрена задача оптимизации алгоритмов управления электроприводами АВО комбинированной системы в стационарных режимах с учетом дискретности переменных, что актуально для УОГ с относительно небольшим количеством АВО, а также проведен анализ энергетических показателей комбинированного управления по сравнению с дискретным.

Энергетические показатели дискретного и комбинированного управления

Примем следующие допущения: охлаждаемый газ равномерно распределяется по параллельно включенным АВО, энергетические и тепловые характеристики АВО идентичны, нелинейностью изменения температуры газа по длине теплообменника можно пренебречь.

Введем обозначения: N – общее количество двухвентиляторных АВО в составе УОГ; N_f – количество АВО с ЧРП вентиляторов; $N_d = (N - N_f)$ – количество АВО с дискретным регулированием скорости вентиляторов; относительное количество АВО с ЧРП вентиляторов

$$\alpha = \frac{N_f}{N}, \quad 0 < \alpha < 1;$$

относительное количество АВО с дискретно-регулируемыми приводами

$$\frac{N - N_f}{N} = 1 - \alpha.$$

Дискретное управление. Количество АВО с дискретным регулированием скорости вентиляторов $N_d = N$. Температурный перепад $\Delta\Theta_d$ на УОГ пропорционален количеству d_d включенных двигателей вентиляторов [7, 8, 16–19]. Общее количество двигателей вентиляторов двухвентиляторных АВО равно $2N$. Используем относительные единицы (о. е.). Для обеспечения требуемого температурного перепада $\Delta\theta_d = \Delta\theta_r$ необходимое относительное количество включенных двигателей вентиляторов

$$\beta_d = \Delta\Theta_r^*; \Delta\Theta_r^* = \Delta\Theta_d^*; 0 \leq \Delta\Theta_r^* \leq 1, \quad (1)$$

где $\beta_d = \frac{d_d}{2N}$ – относительное количество включенных двигателей вентиляторов;

$\Delta\Theta_d^* = \frac{\Delta\Theta_d}{\Delta\Theta_{nom}}$; $\Delta\Theta_r^* = \frac{\Delta\Theta_r}{\Delta\Theta_{nom}}$ – относительные значения температурных перепадов; $\Delta\Theta_{nom}$ – температурный перепад на УОГ при работе всех вентиляторов с номинальной скоростью n_{nom} .

Включение каждого двигателя вентилятора создает на выходе УОГ дополнительный относительный температурный перепад

$$\Delta\Theta_{d1}^* = \frac{1}{2N} \text{ о.е.} \quad (2)$$

Суммарная мощность на валу вентиляторов P_d определяется количеством включенных двигателей и зависит от требуемого температурного перепада:

$$P_d^*(\Delta\Theta_r^*) = \frac{P_d}{P_\Sigma} = \beta_d = \Delta\Theta_r^*, \text{ о.е.}, \quad (3)$$

где $P_\Sigma = 2NP_{nom}$; P_{nom} – номинальная мощность двигателя вентилятора.

Включение каждого двигателя приводит к приращению мощности на величину

$$P_{d1}^* = \frac{1}{2N} \text{ о.е.} \quad (4)$$

Комбинированное управление. В комбинированной системе управляющими воздействиями на процесс охлаждения газа являются количество включенных двигателей вентиляторов и скорость вентиляторов соответствующих групп аппаратов воздушного охлаждения. Требуемый температурный перепад создается за счет взаимосвязанного изменения управляющих воздействий.

Электродвигатели вентиляторов частотной группы АВО работают с одинаковой скоростью и создают на выходе УОГ относительный температурный перепад, пропорциональный их относительному количеству α и относительной скорости v [7–9, 16–19]:

$$\Delta\Theta_{fc}^* = \alpha v, \quad v = \frac{n}{n_{nom}}. \quad (5)$$

Относительная мощность на валу вентиляторов частотной группы АВО пропорциональна их количеству и кубу относительной скорости:

$$P_{fc}^* = \alpha v^3. \quad (6)$$

Относительный температурный перепад, создаваемый дискретно-регулируемой группой АВО,

$$\Delta\Theta_{dc}^* = \beta_c, \quad 0 \leq \beta_c \leq (1 - \alpha), \quad (7)$$

где d_c – количество включенных двигателей вентиляторов дискретно-регулируемой группы АВО в комбинированной системе; $\beta_c = \frac{d_c}{2N}$ – относительное количество включенных двигателей вентиляторов дискретно-регулируемой группы АВО.

Общий температурный перепад на УОГ в комбинированной системе с учетом (5), (7):

$$\Delta \Theta_c^* = \beta_c + \alpha v.$$

В комбинированной системе, как и в дискретной, включение каждого двигателя вентилятора дискретно-регулируемой группы АВО создает на выходе УОГ дополнительный температурный перепад $\Delta \Theta_{d1}^*$ и приращение мощности P_{d1}^* по (4).

Мощность на валу вентиляторов при комбинированном управлении с учетом (3), (6):

$$P_c^*(\Delta \Theta_r^*, \beta_c) = \beta_c + \alpha v^3. \quad (8)$$

Рассмотрим задачу оптимизации алгоритма управления электродвигателями вентиляторов АВО комбинированной системы по критерию суммарной мощности на валу вентиляторов с учетом дискретности изменения температурного перепада и мощности при переключениях двигателей.

На первом интервале оптимального управления требуемый температурный режим обеспечивается регулированием скорости вентиляторов частотно-регулируемой группы АВО. Требуемый температурный перепад на этом интервале изменяется от 0 до некоторого значения $\Delta \Theta_0^*$, при котором мощность P_{fc}^* по (5) не превышает мощности P_c^* по (8). На правой границе первого интервала скорость и мощность двигателей частотно-регулируемой группы АВО

$$v_0 = \frac{1}{\alpha} \Delta \Theta_0^*;$$

$$P_{fc}^*(\Delta \Theta_0^*) = \alpha v_0^3. \quad (9)$$

Включение двигателя дискретно-регулируемой группы АВО приводит к дополнительному температурному перепаду $\Delta \Theta_{d1}^*$ и увеличению мощности дискретно-регулируемой группы АВО на P_{d1}^* . Требуемый температурный перепад частотно-регулируемой группы АВО соответственно уменьшается на $\Delta \Theta_{d1}^*$. Скорость и мощность двигателей этой группы снижаются до значений

$$v_{01} = \frac{1}{\alpha} (\Delta \Theta_0^* - \Delta \Theta_{d1}^*); \quad (10)$$

$$P_{f1}^*(\Delta \Theta_0^* - \Delta \Theta_{d1}^*) = \alpha v_{01}^3. \quad (11)$$

Для минимизации критерия оптимизации определим значение $\Delta \Theta_0^*$ из условия

$$P_f^*(\Delta \Theta_0^*) = P_{f1}^*(\Delta \Theta_0^* - \Delta \Theta_{d1}^*) + P_{d1}^*.$$

Последнее выражение с учетом (9)–(11) можно преобразовать к виду квадратного уравнения:

$$3\Delta \Theta_0^{*2} - 3\Delta \Theta_{d1}^* \Delta \Theta_0^* + \Delta \Theta_{d1}^{*2} - \alpha^2 = 0.$$

Его решение дает искомое значение температурного перепада $\Delta\Theta_0^*$, при котором следует включать двигатель дискретно-регулируемой группы АВО.

На последующих $2N_d$ интервалах управления, вплоть до заключительного, температурный режим поддерживается согласованным управлением скоростью и количеством включенных электродвигателей дискретно-регулируемой группы АВО.

Правая граница второго интервала управления определяется выражением

$$\Delta\Theta_0^* + \Delta\Theta_{d1}^*.$$

На каждом последующем интервале правая граница дополнительно сдвигается на $\Delta\Theta_{d1}^*$. На заключительном интервале управления, когда включены все двигатели дискретно-регулируемой группы АВО, необходимый температурный перепад обеспечивается частотно-регулируемой группой АВО.

Проиллюстрируем оптимальный алгоритм для следующих условий: общее количество АВО $N = 4$, к дискретной и частотно-регулируемой группам отнесено по два АВО: $N_f = N_d = 2$, $\alpha = 0.5$; $0 \leq \beta_c \leq 0.5$.

Рассчитанное по приведенным соотношениям значение правой границы первого интервала управления $\Delta\Theta_0^* = 0.35$ о. е. Согласно (2) $\Delta\Theta_{d1}^* = 0.125$ о. е.

Значение скорости на правой границе первого интервала

$$v_0 = \frac{1}{\alpha} \Delta\Theta_0^* = \frac{0.35}{0.5} = 0.7 \text{ о. е.}$$

На рис. 1 приведены зависимости переменных от требуемого температурного перепада. Они построены в соответствии с выполненными расчетами по приведенным выше выражениям.

Скорость v частотно-регулируемой группы АВО (график 1) на границах интервалов при подключении очередного двигателя вентилятора дискретно-регулируемой группы АВО (график 3) снижается на 0,25, о. е. В границах каждого интервала скорость линейно изменяется для создания требуемого температурного перепада на УОГ. На заключительном интервале, когда включены все двигатели дискретно-регулируемой группы, скорость нарастает до номинального значения. Фактический температурный перепад $\Delta\theta^*$ (график 2) поддерживается равным требуемому.

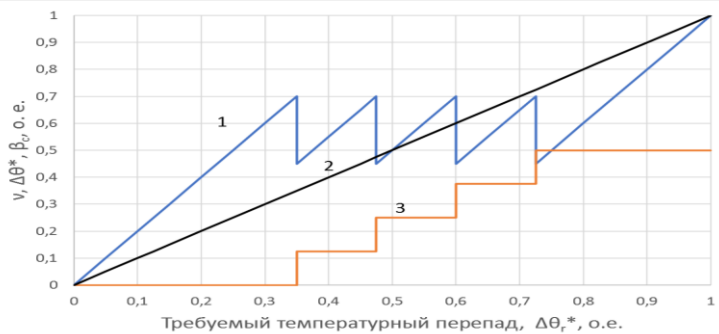


Рис. 1. Зависимость относительных значений переменных от требуемого температурного перепада для оптимального алгоритма управления с учетом дискретности: 1 – скорость вентиляторов; 2 – фактический температурный перепад; 3 – количество включенных дискретно-регулируемых двигателей

Для реализации рассмотренного алгоритма целесообразно использовать систему автоматического управления, замкнутую по температуре газа на выходе УОГ.

На рис. 2 приведены зависимости энергетических показателей от требуемого температурного перепада при оптимальном управлении.

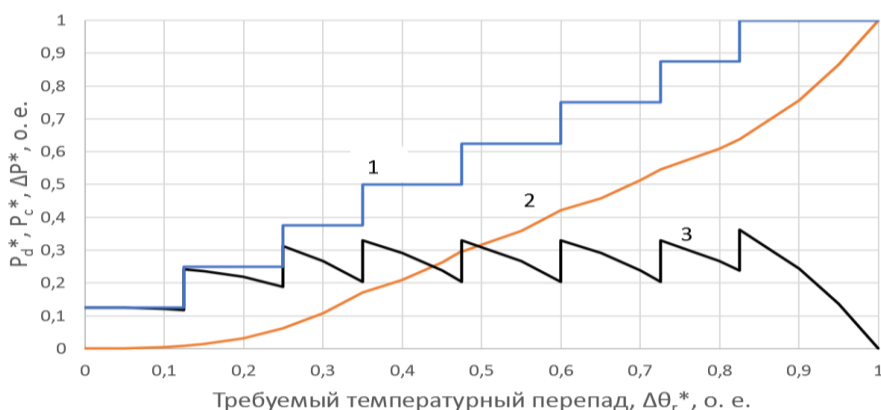


Рис. 2. Зависимость относительных значений мощности и экономии мощности от требуемого температурного перепада для оптимального алгоритма управления с учетом дискретности: 1 – дискретное управление; 2 – комбинированное управление; 3 – экономия мощности

Ступенчатый график 1 показывает изменение мощности при дискретном регулировании. График 2 отражает изменение мощности в комбинированной системе. Экономия мощности на валу вентиляторов (график 3) при замене дискретного управления на комбинированное определена в виде

$$\Delta P = P_d^*(\Delta\Theta_r^*) - P_c^*(\Delta\Theta_r^*, \beta_c).$$

Сравним показатели точности поддержания температуры и энергетические показатели полученного оптимального алгоритма управления с показателями алгоритма, разработанного без учета дискретности переменных.

В [16] рассмотрена задача минимизации мощности на валу двигателей вентиляторов АВО в комбинированной системе управления и показано, что в условиях изменения $\Delta\Theta_r^*$ от 0 до 1 оптимальный алгоритм комбинированного управления, не учитывающий дискретности изменения мощности и температурного перепада при переключениях дискретно-регулируемых двигателей, содержит три интервала. На первом интервале требуемый температурный перепад обеспечивается изменением скорости частотно-регулируемой группы АВО. При этом их скорость определяется соотношением

$$v(\Delta\Theta_r^*) = \frac{1}{\alpha} \Delta\Theta_r^*.$$

Правая граница первого интервала $(0, \Delta\Theta_{r1}^*)$ определяется выражением

$$\Delta\Theta_{r1}^* = \alpha v_{opt}.$$

На втором интервале управления $(\Delta\Theta_{r1}^*, \Delta\Theta_{r2}^*)$ скорость вентиляторов поддерживается постоянной, равной оптимальной:

$$v_{opt} = \frac{1}{\sqrt{3}},$$

а требуемый температурный режим обеспечивается включением необходимого количества дискретно-регулируемых двигателей:

$$\beta_c(\Delta\Theta_r^*) = \Delta\Theta_r^* - \alpha v_{opt}.$$

Правая граница второго интервала определяется ограничением на количество дискретно-регулируемых двигателей:

$$\Delta\Theta_{r2}^* = \alpha v_{opt} + (1 - \alpha).$$

На третьем интервале управления $(\Delta\Theta_{r2}^*, 1)$ температурный режим поддерживается изменением скорости ЧРП:

$$v(\Delta\Theta_r^*) = v_{opt} + \frac{1}{\alpha}(\Delta\Theta_r^* - \Delta\Theta_{r2}^*).$$

Рассмотрим точность поддержания температуры и энергетические показатели такого алгоритма для УОГ с приведенными выше параметрами: общее количество АВО $N = 4$, $N_f = N_d = 2$, $\alpha = 0.5$.

Расчетное значение правой границы первого интервала управления в соответствии с приведенными выше выражениями равно $\Delta\Theta_{r1}^* = 0.29$ о. е.

Как показывает анализ, значение температурного перепада $\Delta\Theta_0^*$ на правой границе первого интервала оптимального управления с учетом дискретности превышает соответствующее значение $\Delta\Theta_{r1}^*$, полученное без учета дискретности. Для $\alpha = 0.5$ и четырех АВО это превышение составляет около 14 %, для двенадцати АВО – до 5 %.

Графики изменения переменных в относительных единицах для рассматриваемого варианта алгоритма управления приведены на рис. 3. График 1 отражает изменение скорости частотно-регулируемой группы АВО, график 3 – изменение количества включенных двигателей вентиляторов дискретно-регулируемой группы АВО. При использовании этого варианта алгоритма управления температура на выходе УОГ (график 2) изменяется вследствие дискретности регулирования. Наибольшая погрешность стабилизации температуры для принятого количества АВО согласно (2) составляет $\Delta\Theta_{d1}^* = 0.125$ о. е. С увеличением количества АВО эта погрешность снижается; например, для двенадцати АВО она не превышает 0,042 о. е.

Наибольшая погрешность в именованных единицах зависит от температурного перепада $\Delta\Theta_{nom}$ на УОГ при работе всех вентиляторов с номинальной скоростью и определяется выражением

$$\delta\theta = \Delta\Theta_{nom} \Delta\Theta_{d1}^*, \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Например, при $\Delta\Theta_{nom} = 20$ °C наибольшая погрешность для УОГ с четырьмя АВО составит 2,5 °C, а для УОГ с двенадцатью АВО она составит 0,83 °C.

Согласно стандарту «Газпром» [20] допустимая погрешность поддержания температуры в выходном коллекторе УОГ составляет ± 1 °C. Как свидетельствуют приведенные выше оценки, показатели погрешности поддержания температуры могут быть основным ограничивающим фактором для использования алгоритма управления, не учитывающего дискретность переменных.

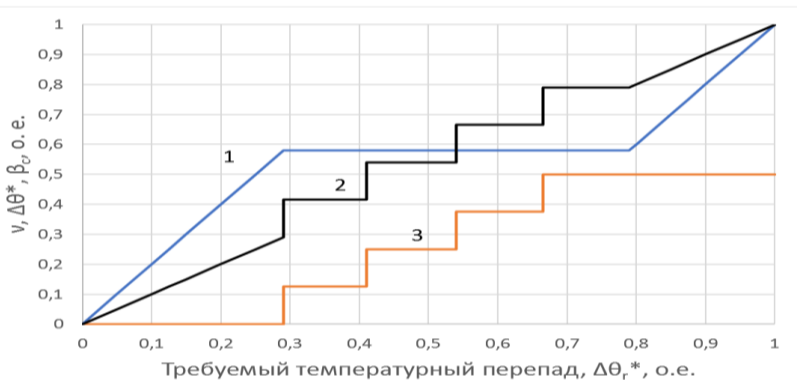


Рис. 3. Зависимость относительных значений переменных от требуемого температурного перепада для алгоритма управления без учета дискретности: 1 – скорость вентиляторов; 2 – фактический температурный перепад; 3 – количество включенных дискретно-регулируемых двигателей

Графики энергетических показателей при использовании алгоритма управления, не учитывающего дискретности переменных, приведены на рис. 4.

Ступенчатый график 1 показывает изменение мощности при дискретном регулировании. График 2 отражает изменение мощности в комбинированной системе. Экономия мощности на валу вентиляторов (график 3) немного ниже, чем при оптимальном управлении с учетом дискретности.

Оценим дополнительно показатели упрощенных алгоритмов комбинированного управления.

По упрощенному алгоритму для обеспечения требуемого температурного перепада на УОГ в первую очередь используется частотное управление, а затем подключаются двигатели дискретной группы.

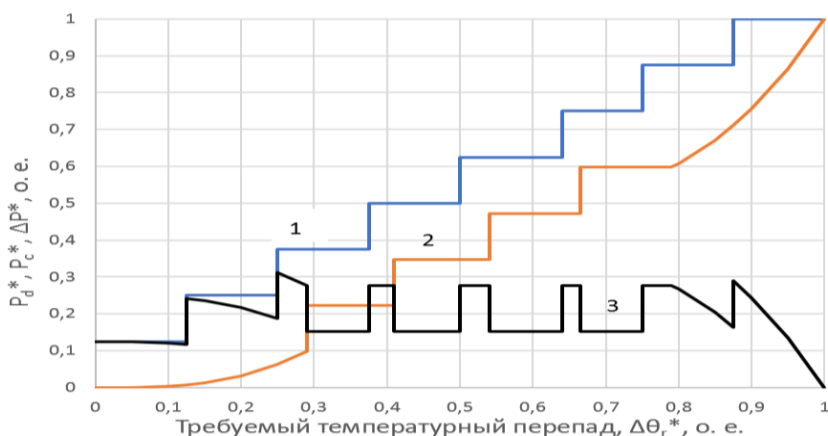


Рис. 4. Зависимость относительных значений мощности и экономии мощности от требуемого температурного перепада для алгоритма управления без учета дискретности: 1 – дискретное управление; 2 – комбинированное управление; 3 – экономия мощности

Для принятых выше параметров УОГ графики управляющих воздействий при использовании упрощенного алгоритма приведены на рис. 5.

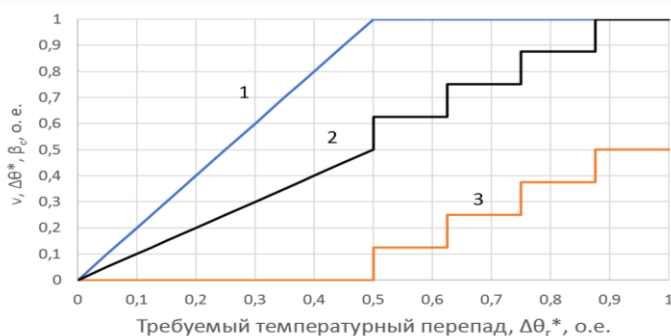


Рис. 5. Зависимость относительных значений переменных от требуемого температурного перепада для упрощенного алгоритма управления: 1 – скорость вентиляторов; 2 – фактический температурный перепад; 3 – количество включенных дискретно-регулируемых двигателей

Требуемый температурный перепад $\Delta\theta_r^*$ на интервале от 0 до 0,5 о. е. обеспечивается изменением скорости вентиляторов частотно-регулируемой группы АВО (график 1 на рис. 5) от $v=0$ до номинального значения $v=1$ о. е. Фактический температурный перепад $\Delta\theta^*$ на первом интервале управления в стационарных режимах поддерживается равным требуемому (график 2 на рис. 5).

Для $\Delta\theta_r^* > 0.5$ скорость ограничена номинальным значением, а требуемый температурный перепад достигается включением двигателей дискретно-регулируемой группы АВО (график 3 на рис. 5). Дискретность управления, как и в предыдущем алгоритме, приводит к погрешности в поддержании требуемого температурного перепада.

Энергетические показатели упрощенного алгоритма представлены на рис. 6. Мощность на валу вентиляторов при частотном управлении (кривая 2 на рис. 6) изменяется в соответствии с (6). Для $\Delta\theta_r^* > 0.5$ график 1 суммарной мощности совпадает с графиком мощности при дискретном регулировании. Экономия мощности (график 3) достигается только на интервале частотного управления.

Погрешности в поддержании требуемого значения температурного перепада могут быть устранены, если для значений $\Delta\theta_r^* > 0.5$ использовать взаимосвязанное управление скоростью и количеством включенных двигателей вентиляторов, как в рассмотренном выше оптимальном алгоритме с учетом дискретности. Однако, как показал анализ, средняя экономия мощности при использовании такого алгоритма для значений $\Delta\theta_r^* > 0.4$ о. е. примерно в 2 раза ниже, чем для оптимального.

Пример использования результатов исследования

Рассмотрим эффективность применения комбинированного управления на примере установки охлаждения газа компрессорного цеха компрессорной станции Тольятти Тольяттинского ЛПУ МГ. В состав установки входит 4 двухвентиляторных АВО типа HUDSON ITALIANA, единичная номинальная мощность электродвигателя вентилятора 30 кВт.

Экономия мощности на валу вентиляторов зависит от режима работы установки, который можно характеризовать значением температурного перепада $\Delta\Theta_r^*$.



Рис. 6. Зависимость относительных значений мощности и экономии мощности от требуемого температурного перепада для упрощенного алгоритма управления: 1 – дискретное управление; 2 – комбинированное управление; 3 – экономия мощности

При дискретном способе управления, как показано в [18], средневзвешенное значение температурного перепада, с которым работала установка, совпадает с так называемым коэффициентом использования K_u активной мощности. Последний показатель широко используется в расчетах электрических нагрузок и определяется как отношение средней активной мощности отдельного приемника или группы электроприемников за некоторый период времени к ее номинальному значению [21, 22].

Средневзвешенное значение коэффициента использования при дискретном управлении может быть определено по данным о потреблении электроэнергии W_d :

$$K_u = \frac{W_d}{W_{nom}},$$

где W_{nom} – максимально возможный расход электроэнергии при постоянной работе электроприемников в течение цикла с номинальной мощностью.

Значение K_u при дискретном управлении с учетом (3) совпадает со значением требуемого температурного перепада $\Delta\Theta_r^*$.

Для определения значений K_u проведен анализ архивных данных о месячном потреблении электроэнергии W_d электроприемниками УОГ за 2022 г. Выявлено, что за рассматриваемый период установка пять месяцев работала со средневзвешенными коэффициентами использования $0.1 < K_u < 0.2$.

Оценим целесообразность использования в этих условиях частотного и комбинированного управления вместо дискретного.

Для варианта частотного управления, когда все двигателей АВО оснащены частотными преобразователями ($\alpha = 1$), относительная скорость вентиляторов

определяется выражением $v = \Delta\theta_r^* = K_u$ и составляет меньше 0,2 о. е. Минимальная скорость вентиляторов согласно требованиям [20] регламентируется значением $0,2n_{ном}$ ($v = 0,2$). Следовательно, в рассматриваемых условиях для повышения скорости частотно-регулируемых приводов и обеспечения ее допустимого значения часть ЧРП необходимо отключать, что приведет к снижению энергосберегающего эффекта.

Для варианта комбинированного управления и принятого выше разделения АВО на группы частотного и дискретного регулирования ($\alpha = 0.5$) значению $k_u = 0.1$ соответствует относительная скорость вентиляторов $v = 2k_u = 0.2$ о.е. Следовательно, электроприводы частотно-регулируемой группы АВО рассматриваемой УОГ в течение всего года будут работать с допустимой скоростью. Приближенные расчеты экономии электроэнергии по методике, приведенной в [18], показали, что использование оптимального алгоритма комбинированного управления взамен дискретного при работе УОГ в режимах 2022 г. обеспечивает годовую экономию электроэнергии около 70 тыс. кВт·ч. При этом простой срок окупаемости [23] проекта модернизации при существующем соотношении цен на частотные преобразователи и электроэнергию не превысит двух лет.

Выводы

1. В установках охлаждения природного газа, содержащих менее шести - восьми двух вентиляторных АВО, использование алгоритмов комбинированного управления электроприводами вентиляторов, не учитывающих дискретность изменения управляющего воздействия (количества включенных двигателей вентиляторов), не обеспечивает требуемой точности поддержания заданного значения температуры на выходе УОГ.

2. Разработанный алгоритм оптимального управления электроприводами вентиляторов АВО газа, учитывающий дискретность управляющего воздействия, содержит два интервала, на которых требуемый температурный режим обеспечивается частотно-регулируемой группой АВО, а также интервалы совместного согласованного управления скоростью ЧРП и количеством включенных дискретно-регулируемых приводов.

3. Использование разработанного алгоритма оптимального комбинированного управления для установок охлаждения с относительно небольшим количеством АВО обеспечивает высокую точность поддержания требуемого температурного режима и существенный энергосберегающий эффект.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Белоусенко И.В., Шварц Г.Р., Шпилевой В.А. Энергетика и электрификация газовых промыслов и месторождений. Тюмень, 2000. 274 с.
2. Шайхутдинов А.З., Лифанов В.А., Маланичев В.А. Современные АВО газа – ресурс энергосбережения в газовой отрасли // Газовая промышленность. 2010. № 9. С. 40–41.
3. Устинов Е.В. Уменьшение энергопотребления аппаратов воздушного охлаждения газа // Газовая промышленность. 2011. № 8. С. 54–57.
4. Меньшов Б.Г., Еришов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности. М.: Недра, 2000. 487 с.
5. Алимов С.В., Прокопец А.О., Кубаров С.В. и др. Модернизация вентиляторов АВО газа при реконструкции КС МГ // Газовая промышленность. 2009. № 4. С. 54–56.
6. Linde R. Advantage of pipelining gas at low temperatures // Pipe Line Industry. 1984. Vol. 55. No. 3. P. 49–56.

7. Артюхов И.И., Аршалян И.И., Крылов И.П. Автоматическое управление аппаратами воздушного охлаждения на объектах магистрального транспорта газа // Мехатроника, автоматизация, управление. 2003. № 1. С. 33–36.
8. Артюхов И.И., Аршалян И.И., Тарисов Р.Ш., Тримбач А.А., Устинов Е.В. Ресурсосберегающая технология охлаждения газа на компрессорных станциях // Вестник Саратовского гос. техн. ун-та. 2011. № 1 (54). Вып. 3. С. 25–32.
9. Алимов С.В. Повышение энергоэффективности стационарных режимов работы установок охлаждения газа с частотно-регулируемым электроприводом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Самара: СамГТУ, 2011. 24 с.
10. Кумар Б.К., Выгонюк П.И. Система автоматического управления аппаратами воздушного охлаждения сырого природного газа // Вестник Казахского национального технического университета им. К.И. Сатнаева. 2011. № 1 (83). С. 67–71.
11. Тримбач А.А. Совершенствование электротехнических комплексов установок охлаждения компримированного газа: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2007. 24 с.
12. Artyukhov I., Abakumov A., Zemtsov A., Yerbayev Y. Energy Efficiency Analysis of Control Algorithms for Fan Electric Drives in Gas Air-Cooling Plants // International Conference on Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP 2021. Lecture Notes in Civil Engineering. P. 46–55.
13. Артюхов И.И., Аршалян И.И., Жабский М.В., Коротков А.В., Погодин Н.В., Тримбач А.А. Некоторые аспекты применения частотно-регулируемого электропривода в системах воздушного охлаждения компримированного газа // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2006. № 1(100). Вып. 1. С. 20–29.
14. Артюхов И.И., Бочкарева И.И., Тримбач А.А. Качество электроэнергии в системе электроснабжения газотурбинной компрессорной станции в условиях оснащения установок охлаждения газа частотно-регулируемым электроприводом вентиляторов // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2011. № 4(60). Вып. 2. С. 165–170.
15. Бочкарева И.И. Обеспечение электромагнитной совместимости частотно-регулируемых установок охлаждения газа с источниками электроснабжения: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Саратов: СГТУ, 2012. 19 с.
16. Абакумов А.М., Кузнецов П.К. Комбинированное управление электроприводами вентиляторов установок охлаждения газа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. 2021. № 3. С. 67–82. DOI: 10.14498/tech.2021.3.4. EDN: CACBTX.
17. Абакумов А.М., Зубков Ю.В., Абакумов О.А. Оптимизация стационарных режимов работы установок охлаждения газа с частотно-регулируемым приводом вентиляторов // Известия вузов. Электромеханика. 2024. Т. 67, № 1. С. 36–45. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-36-45. EDN: NSATJU.
18. Абакумов А.М., Зубков Ю.В., Абакумов О.А. Оптимизация алгоритмов комбинированного управления электроприводами установок охлаждения природного газа // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2024. Т. 32, № 2. С. 103–118. DOI: 10.14498/tech.2024.2.6. EDN: FXTJTU.
19. Абакумов А.М., Зубков Ю.В., Абакумов О.А. Энергосберегающие режимы работы установок охлаждения природного газа // Электричество. 2025. № 1. С. 50–57. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-1-50-57. EDN: QTIOEY.
20. СТО Газпром 2-3.5-510-2010. Установки и аппараты воздушного охлаждения газа. Технические требования.
21. Сивков А.А., Герасимов Д.Ю., Сайгаи А.С. Основы электроснабжения: учеб. пособие. 2-е изд., доп. Томск: ТПУ, 2014. 174 с.
22. Радкевич В.Н., Козловская В.Б., Колосова И.В. Расчет электрических нагрузок промышленных предприятий: учебно-методическое пособие для студентов. Минск: БНТУ, 2013. 124 с.
23. Ильинский Н.Ф., Москаленко В.В. Электропривод: энерго- и ресурсосбережение. М.: Академия, 2008. 208 с.

Статья поступила в редакцию 07.07.2025

ALGORITHMS OPTIMIZATION FOR COMBINED NATURAL GAS COOLING UNITS CONTROL OF ELECTRIC DRIVES TAKING INTO ACCOUNT THE DISCRETENESS OF CONTROL EFFECT

Yu.V. Zubkov, A.M. Abakumov, O.A. Abakumov¹

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

E-mail: zub577@mail.ru, abakumov-am@yandex.ru, abakumovoleg1@gmail.com

Abstract. *The problems of main gas pipelines compressor stations electromagnetic compatibility electrical complex of elements, arising when using a frequency-controlled drive of air-cooling devices fans for natural gas, are noted. The feasibility of using combined control systems is substantiated, in which air cooling devices included in the gas cooling unit are divided into two groups: with frequency and discrete regulation of fan speed. The control algorithms optimization issue for electric drives of a combined system by the criterion of power on the fan shaft is discussed. An algorithm for fan speed optimal interconnected control and the number of switched-on fan motors of the air-cooling devices corresponding groups is developed, taking into account the discreteness of the control action. An assessment is given of the power savings on the fan shaft when replacing discrete control with a combined one using the developed control algorithm. It is proposed to use an automatic control system closed by the gas temperature at the outlet of the cooling unit for implementing the optimal algorithm. A comparative the cooling process analysis the energy indicators and the accuracy of temperature maintenance was carried out using the developed optimal control algorithm and an algorithm that does not take into account the discreteness of the control action. It was shown that the use of the latter with a relatively small number of air cooling devices can lead to an unacceptable error in stabilizing the temperature at the outlet of the cooling unit. The control algorithms possibility of using simplified versions is considered. The advantages of using a combined control system, providing a significant energy-saving effect, are shown using the example of a cooling unit containing four two-fan air-cooling devices and operating under conditions of a significantly uneven load.*

Keywords: *natural gas cooling units, electric drives for air cooling units, combined systems, control algorithms.*

REFERENCES

1. Belousenko I.V., Shvarc G.R., Shpilevoj V.A. Energetika i elektrifikaciya gazovyh promyslov i mestorozhdenij [Power engineering and electrification of gas fields and deposits]. Tyumen, 2000. 274 p. (In Russian)



© The Author(s), 2025

¹ Yury V. Zubkov (Dr. Sci. (Techn.)), professor, Head Dept. of Industrial Power Supply.
Alexander M. Abakumov (Dr. Sci. (Techn.)), professor, professor Dept. of Electromechanics and Automotive Electrical Equipment.

Oleg A. Abakumov, Postgraduate Student Dept. of Industrial Power Supply.

2. *Shajhutdinov A.Z., Lifanov V.A., Malanichev V.A.* Sovremennye AVO gaza – resursy energosberezheniya v gazovoy otrasli [Modern gas air coolers are a resource for energy saving in the gas industry] // *Gazovaya promyshlennost'*. 2010. № 9. P. 40–41. (In Russian)
3. *Ustinov E.V.* Umenshenie energopotrebleniya apparatov vozdušnogo ohlazhdeniya gaza [Reducing energy consumption of air-cooled gas units] // *Gazovaya promyshlennost'*. 2011. № 8. P. 54–57. (In Russian)
4. *Menshov B.G., Ershov M.S., Yarizov A.D.* Elektrotekhnicheskie ustanovki i komplekсы v neftegazovoy promyshlennosti [Electrical installations and complexes in the oil and gas industry]. M.: Nedra, 2000. 487 p. (In Russian)
5. *Alimov S.V., Prokopec A.O., Kubarov S.V. i dr.* Modernizatsiya ventilyatorov AVO gaza pri rekonstrukcii KS MG [Modernization of MG CS gas AVO fans during reconstruction] // *Gazovaya promyshlennost'*. 2009. № 4. P. 54–56. (In Russian)
6. *Linde R.* Advantage of pipelining gas at low temperatures // *Pipe Line Industry*. 1984. Vol. 55. No. 3. P. 49–56.
7. *Artyuhov I.I., Arshakyan I.I., Krylov I.P.* Avtomaticheskoe upravlenie apparatami vozdušnogo ohlazhdeniya na obektakh magistralnogo transporta gaza [Automatic control of air cooling units at gas main transportation facilities] // *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie*. 2003. № 1. P. 33–36. (In Russian)
8. *Artyuhov I.I., Arshakyan I.I., Tarisov R.SH., Trimbach A.A., Ustinov E.V.* Resursosberegayushchaya tekhnologiya ohlazhdeniya gaza na kompressornykh stantsiyakh [Resource-saving technology for gas cooling at compressor stations] // *Vestnik Saratovskogo gos. tekhn. un-ta*. 2011. № 1(54). Vyp. 3. P. 25–32. (In Russian)
9. *Alimov S.V.* Povyshenie energoeffektivnosti stacionarnykh rezhimov raboty ustanovok ohlazhdeniya gaza s chastotno-reguliruemym elektroprivodom [Improving the stationary operating modes energy efficiency of gas cooling units with a frequency-controlled electric drive]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Samara: SamGTU, 2011. 24 p. (In Russian)
10. *Kumar B.K., Vygoniyuk P.I.* Sistema avtomaticheskogo upravleniya apparatami vozdušnogo ohlazhdeniya syrogo prirodnogo gaza [Automatic control system for air cooling units of raw natural gas] // *Vestnik kazahskogo nacionalnogo tekhnicheskogo universiteta im. K.I. Satnaeva*. 2011. № 1 (83). P. 67–71. (In Russian)
11. *Trimbach A.A.* Sovershenstvovanie elektrotekhnicheskikh kompleksov ustanovok ohlazhdeniya komprimirovannogo gaza [Improvement of compressed gas cooling units electrical complexes]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Saratov: SGTU, 2007. 24 p. (In Russian)
12. *Artyukhov I., Abakumov A., Zemtsov A., Yerbayev Y.* Energy Efficiency Analysis of Control Algorithms for Fan Electric Drives in Gas Air-Cooling Plants // *International Conference on Efficient Production and Processing ICEPP 2021: Proceedings of ICEPP 2021. Lecture Notes in Civil Engineering*. P. 46–55.
13. *Artyuhov I.I., Arshakyan I.I., Zhabskij M.V., Korotkov A.V., Pogodin N.V., Trimbach A.A.* Nekotorye aspekty primeneniya chastotno-reguliruemogo elektroprivoda v sistemakh vozdušnogo ohlazhdeniya komprimirovannogo gaza [Some aspects of the use of variable frequency electric drives in compressed gas air cooling systems] // *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2006. № 1(100). Vyp. 1. P. 20–29. (In Russian)
14. *Artyuhov I.I., Bochkareva I.I., Trimbach A.A.* Kachestvo elektroenergii v sisteme elektrosnabzheniya gazoturbinnoy kompressornoj stantsii v usloviyakh osnashcheniya ustanovok ohlazhdeniya gaza chastotno-reguliruemym elektroprivodom ventilyatorov [Quality of electricity in the power supply system of a gas turbine compressor station when gas cooling units are equipped with frequency-controlled electric fan drives] // *Vestnik Saratovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2011. № 4(60). Vyp. 2. P. 165–170. (In Russian)
15. *Bochkareva I.I.* Obespechenie elektromagnitnoy sovmestimosti chastotno-reguliruemyykh ustanovok ohlazhdeniya gaza s istochnikami elektrosnabzheniya [Ensuring Electromagnetic Compatibility of Frequency-Controlled Gas Cooling Plants with Power Supply Systems]: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. Saratov: SGTU, 2012. 19 p. (In Russian)
16. *Abakumov A.M., Kuznecov P.K.* Kombinirovannoe upravlenie elektroprivodami ventilyatorov ustanovok ohlazhdeniya gaza [Combined control of electric drives for fans of gas cooling units] // *Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki*. 2021. № 3. P. 67–82. DOI: 10.14498/tech.2021.3.4. (In Russian)
17. *Abakumov A.M., Zubkov Yu.V., Abakumov O.A.* Optimizatsiya stacionarnykh rezhimov raboty ustanovok ohlazhdeniya gaza s chastotno-reguliruemym privodom ventilyatorov [Optimization of stationary operating modes of gas cooling units with frequency-controlled fan drives] //

- Izvestiya vuzov. Elektromekhanika. 2024. T. 67, № 1. P. 36–45. DOI: 10.17213/0136-3360-2024-1-36-45. (In Russian)
18. *Abakumov A.M., Zubkov Yu.V., Abakumov O.A.* Optimizatsiya algoritmov kombinirovannogo upravleniya elektroprivodami ustanovok ohlazhdeniya prirodnogo gaza [Algorithms optimization for combined natural gas cooling units control of electric drives] // Vestnik SamGTU. Ser. Tekhnicheskie nauki. 2024. V. 32, № 2. P. 103–118. DOI: 10.1 4498/tech.2024.2.6. (In Russian)
 19. *Abakumov A.M., Zubkov Yu.V., Abakumov O.A.* Energoberegayushchie rezhimy raboty ustanovok ohlazhdeniya prirodnogo gaza [Energy-saving modes of natural gas operation cooling units] // Elektrichestvo. 2025. № 1. P. 50–57. DOI: 10.24160/0013-5380-2025-1-50-57. (In Russian)
 20. STO Gazprom 2-3.5-510-2010. Ustanovki i apparaty vozdushnogo ohlazhdeniya gaza [STO Gazprom 2-3.5-510-2010. Installations and apparatus for air cooling of gas]. Tekhnicheskie trebovaniya. (In Russian)
 21. *Sivkov A.A., Gerasimov D.Yu., Sajgash A.S.* Osnovy elektrosnabzheniya: uchebnoe posobie. 2-e izd., dop [Electrical Basics: A Tutorial]. Tomsk: TPU, 2014. 174 p. (In Russian)
 22. *Radkevich V.N., Kozlovskaya V.B., Kolosova I.V.* Raschet elektricheskikh nagruzok promyshlennykh predpriyatij: uchebno-metodicheskoe posobie dlya studentov. Minsk: BNTU, 2013. 124 p. (In Russian)
 23. *Ilinskij N.F., Moskalenko V.V.* Elektroprivod: energo- i resursosberezhenie [Electric drive: energy and resource saving]. M.: Akademiya, 2008. 208 p. (In Russian)

Original article submitted 07.07.2025

ПОДПИСКА – 2025

на январь-декабрь

в «каталоге «Газеты и журналы – 2025»,

и на сайте «ООО Урал-Пресс Округ»

<http://www.ural-press.ru/>

Уважаемые читатели!

Проводится подписная кампания на журналы

Самарского государственного технического

университета на 2025 год

18106 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки»

18108 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки»

70570 Градостроительство и архитектура

18107 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Психолого-педагогические науки»

41340 Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Философия»

Условия оформления подписки Вы найдете

на сайте <http://www.ural-press.ru/>