



ISSN 1991-8542 (Print)

ISSN 2712-8938 (Online)

ВЕСТНИК САМАРСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Серия
«ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ»

2024. Т. 32, № 3

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»

2024. Том 32. № 3

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. Nаске (проф., Германия)

M. Forzan (проф., Италия)

НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ

Вестник Самарского государственного технического университета
Серия «Технические науки» (2024. Том 32. № 3)

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 16.12.24
Выход в свет 25.12.24

Формат 70 × 108 ¹/₁₆.
Усл. печ. л. 23,83 п.л.
Уч.-изд. л. 23,27 п.л.
Тираж 500 экз. Рег. № 118/24
Заказ № 468

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, 2024
© Самарский государственный
технический университет, 2024

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

2024. Vol. 32. Issue 3

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. Zagrebina
Compiled and typeset by O. S. Afanaseva

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>Асланов Р.Э.</i> Виртуальные тренажеры в подсистеме АСУП для подготовки операторов металлорежущих станков.....	6
<i>Борзова А.С., Елисов Л.Н., Овченков Н.И.</i> Пространственно-ситуативный подход к управлению транспортной безопасностью аэропорта.....	21
<i>Деревянов М.Ю., Плешивцева Ю.Э., Афиногентов А.А., Мандра А.Г.</i> Анализ ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки промышленных отходов предприятий нефтегазового комплекса для достижения целей устойчивого развития.....	32
<i>Казаринов А.В.</i> Сравнительный анализ эффективности технологии каталитического пиролиза метана для производства водорода на основе DEA-метода.....	46
<i>Колпацников С.А., Пешкин К.С.</i> Разработка структуры киберфизической системы управления процессом зонного индукционного нагрева стальной заготовки	63

Энергетика и электротехника

<i>Базаров А.А., Будко С.И.</i> Исследование термогидродинамических процессов в воздушной среде в системе плавки гололеда на проводах линии электропередачи	81
<i>Зотеев В.Е., Сагитова Л.А., Гаврилова А.А.</i> Прогнозное моделирование динамики основных ресурсов и построение имитационной системы управления деятельностью региональной энергосистемы Самарской области	100
<i>Романова А.С.</i> Энергоэффективность гальванического участка с мелкосерийным характером производства.....	117

Информационные технологии и коммуникации

УДК 004.946

ВИРТУАЛЬНЫЕ ТРЕНАЖЕРЫ В ПОДСИСТЕМЕ АСУП ДЛЯ ПОДГОТОВКИ ОПЕРАТОРОВ МЕТАЛЛОРЕЖУЩИХ СТАНКОВ

Р.Э. Асланов^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный
технологический институт (технический университет)
Россия, 190013, г. Санкт-Петербург, Московский пр., 24–26/49 литера А

² Московский городской педагогический университет
Россия, 129226, г. Москва, 2-й Сельскохозяйственный проезд, 4

E-mail: aslanov.boxing@mail.ru

Аннотация. Описан предложенный метод автоматизированного построения виртуальных тренажеров для подсистемы подготовки персонала АСУ машиностроительными производствами. Его отличительной особенностью является работа с заказчиком на основе предоставления с производства функциональных видеороликов, а также формализация процесса проектирования и разработки в виде структур процесса создания программных и визуальных модулей с учетом специфики разработки тренажеров виртуальной реальности. Разработана онтологическая модель для построения виртуальных тренажеров для подготовки операторов металлорежущих станков в ППП АСУ машиностроительными производствами, в которой используются выявленные основные понятия и отношения между ними в предметной области работы операторов металлорежущих станков. Ее реализация осуществлена на основе инструментальной программной среды *Protege*. Предложены диаграммы: функциональная и контекстная IDEF0 функционирования виртуальных тренажеров для обучения работе на универсальных металлорежущих станках – фрезерном и токарном. Описана архитектура виртуального тренажера для использования в подсистеме подготовки персонала АСУ производствами, а также структурная схема формирования практико-ориентированных умений работе на металлорежущих станках с использованием виртуальных тренажеров.

Ключевые слова: иммерсивная технология, виртуальная реальность, компьютерный тренажер.

Введение

Автоматизированные системы управления производством (АСУП) представляют сложный комплекс, состоящий из множества взаимосвязанных подси-



© Автор(ы), 2024

Роман Эдвирович Асланов:

¹ соискатель кафедры систем автоматизированного проектирования и управления;

² ассистент департамента информатизации образования.

стем для управления производственными процессами организации. Подсистема подготовки персонала (ППП) является одним из важнейших компонентов АСУП, который предназначен для подготовки, мониторинга и управления кадровым составом производственного процесса.

Технологии виртуальной реальности [1–3] все более широко применяются при подготовке и оценке квалификации персонала АСУП. Использование виртуальных тренажеров позволяет обеспечить обучение профессиональным навыкам сотрудников [4–6] в условиях физической недоступности в учебном центре станков, машин и механизмов, необходимых для организации подобной оценки в реальных производственных условиях, а также в случаях, когда простой производственного оборудования повлечет большие издержки производства. При этом снижается потребность в дорогостоящем обучении на рабочем месте, сокращаются денежные затраты на расходные материалы, уменьшается количество обучающего персонала. Таким образом, виртуальные тренажеры являются современным инструментом для повышения эффективности подготовки специалистов в ППП АСУП. Они позволяют обеспечить безопасную, гибкую и реалистичную среду для тестирования, обучения и оптимизации производственных процессов.

В связи с этим важной народнохозяйственной задачей является разработка моделей, методов и алгоритмов по проектированию, построению и реализации виртуальных тренажеров для подсистемы подготовки операторов металлорежущих станков АСУП [7, 8]. Для решения этой задачи требуется:

- создание метода проектирования экономически эффективных виртуальных тренажеров металлорежущих станков для подсистемы подготовки персонала АСУП;

- разработка метода построения архитектуры программного приложения подсистемы подготовки персонала АСУП с исполняющими алгоритмами и визуальными компонентами виртуальных тренажеров металлорежущих станков [9, 10];

- разработка онтологической модели в виде семантической сети для построения виртуальных тренажеров металлорежущих станков для подсистемы подготовки операторов АСУП [11, 12];

- построение метода оценки качества визуализации разработанного виртуального тренажера с применением экспертных методов для выбора лучшей альтернативы [13, 14];

- апробация виртуальных тренажеров для подсистемы АСУП подготовки операторов металлорежущих станков для определения эффективности и качества профессионального обучения.

Ниже рассматриваются основные полученные результаты решения вышеуказанной задачи.

Метод проектирования и построения виртуальных тренажеров для ППП АСУП

Его отличительной особенностью является работа с заказчиком на основе предоставления с производства функциональных видеороликов, а также формализация процесса проектирования и разработки в виде структур процесса создания программных и визуальных модулей с учетом специфики разработки виртуальных тренажеров. Съемка видеороликов должна следовать заранее разработанному сценарию. Требования к видеоролику производственного процесса описаны как вектор V_{prod} , содержащий следующие компоненты:

$$V_{prod} = f(T_{length}, R_{quality}, S_{content}, A_{angles}, S_{sound}, F_{format}, Sc_{script}), \quad (1)$$

где T_{length} – длительность видеоролика $T_{length} \leq 900$ с (15 мин); $R_{quality}$ – разрешение видео и частота кадров $R_{quality} \geq 1080$ р и $FPS \geq 30$; $S_{content}$ – содержание видео, включающее все ключевые этапы работы оборудования ($S_{content} = \{launch, process, shutdown, keyactions\}$); A_{angles} – количество ракурсов съемки $A_{angles} \geq 3$ (общий вид, крупные планы, детали оборудования); S_{sound} – наличие звукового сопровождения; F_{format} – формат видео ($F_{format} = MP4$); Sc_{script} – сценарий видеосъемки; $Sc_{script} = \{launch, operatoractions, emergenciesituations\}$, где $launch$ – параметры запуска, $operatoractions$ – характеристика действия оператора, $emergenciesituations$ – описание аварийных ситуаций.

Предложенный метод при условии выполнения требований позволяет оперативно осуществлять мониторинг правильности выполнения операций, уменьшить ошибки разработчика, а также сократить время разработки технического описания и тем самым повысить результативность процесса проектирования и разработки виртуальных тренажеров для обучения операторов металлорежущих станков. Метод включает процесс поэтапной разработки, состоящий из трех основных блоков: Pre-Production, Production и Post-Production.

Этап Pre-Production включает несколько ключевых процессов, таких как концептуализация на основе функциональных видеороликов и материалов заказчика, бюджетирование, формирование технической документации и планирование:

$$PreProd_{VR} = f(Concept_{idea}, Budget_{plan}, TechDoc_{create}, Team_{form}, Plan_{dev}), \quad (2)$$

где $Concept_{idea}$ – создание концепции и идеи проекта на основе видео и материалов заказчика; $Budget_{plan}$ – планирование бюджета; $TechDoc_{create}$ – составление технической документации; $Team_{form}$ – формирование команды разработчиков; $Plan_{dev}$ – планирование процесса разработки.

На этапе Production процесс разработки организован по методологии Agile с разбивкой на спринты и обратной связью от заказчика:

$$Prod_{VR} = \sum_{s=1}^n Sprint_s(Backlog_s, Task_{plan}, Task_{dev}, Rev_s, Feedback_{cust}), \quad (3)$$

где $Sprint_s$ – s-й спринт разработки (регулярный ограниченный промежуток времени, в течение которого команда выполняет заданный объем работы в рамках большого проекта, что позволяет сделать работу над проектом более гибкой, прозрачной и удобной как для заказчика, так и для команды разработчиков); $Backlog_s$ – составление бэклога задач для s-го спринта; $Task_{plan}$ – планирование задач для s-го спринта; $Task_{dev}$ – разработка задач команды; Rev_s – ревью задач

после завершения спринта; $Feedback_{cust}$ – обратная связь от заказчика после демонстрации результатов спринта.

Этап Post-Production включает тестирование, оптимизацию и сдачу проекта заказчику согласно вектору характеристик f :

$$PostProd_{VR} = f \left(Test_{perf}, Test_{function}, Bug_{fix}, Final_{opt}, Project_{delivery} \right), \quad (4)$$

где $Test_{perf}$ – тестирование производительности; $Test_{function}$ – функциональное тестирование (виртуальной среды и ПО); Bug_{fix} – поиск и исправление ошибок; $Final_{opt}$ – финальная оптимизация ПО и виртуальной среды; $Project_{delivery}$ – сдача проекта заказчику.

Объединяя этапы разработки, можно выразить весь процесс создания виртуального тренажера в виде развернутой формулы:

$$\begin{aligned} DevProd_{VR} &= f \left(Concept_{idea}, Budget_{plan}, TechDoc_{create}, Team_{form}, Plan_{dev} \right) \\ &\rightarrow \sum_{s=1}^n Sprint_s \left(Backlog_s, Task_{plan}, Task_{dev}, Rev_s, Feedback_{cust} \right) \\ &\rightarrow f \left(Test_{perf}, Test_{function}, Bug_{fix}, Final_{opt}, Project_{delivery} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь знак « $\Rightarrow$ » означает «по определению» и в указанном ниже виде представляет последовательный переход от одного этапа к другому:

$$DevPro_{VR} = PreProd_{VR} \rightarrow Prod_{VR} \rightarrow PostProd_{VR}. \quad (6)$$

Метод систематизирует процесс разработки виртуального тренажера начиная с этапа Pre-Production, проходя через фазу разработки Production и завершая тестированием и сдачей проекта Post-Production. Метод позволяет учитывать влияние каждого этапа на конечный результат, а также поддерживает итеративный процесс с постоянной обратной связью от заказчика.

В работе используется разработанная онтологическая модель в виде семантической сети [15] (рис. 1), а также предложенные метод проектирования и разработки симулятора, способы разработки 3D-моделей, программной части, базы данных и программной оптимизации.

Построение предложенной онтологической модели в виде семантической сети для подсистемы подготовки персонала АСУП является результатом формализации знаний о процессе подготовки специалистов. Этот процесс включает структурирование информации о компетенциях, навыках, профессиональных знаниях, обучающих материалах и методиках обучения, используемых в подсистеме подготовки персонала.

Онтологическая модель представляет семантическую сеть, в которой понятия и связи между ними представлены в виде узлов и ребер графа:

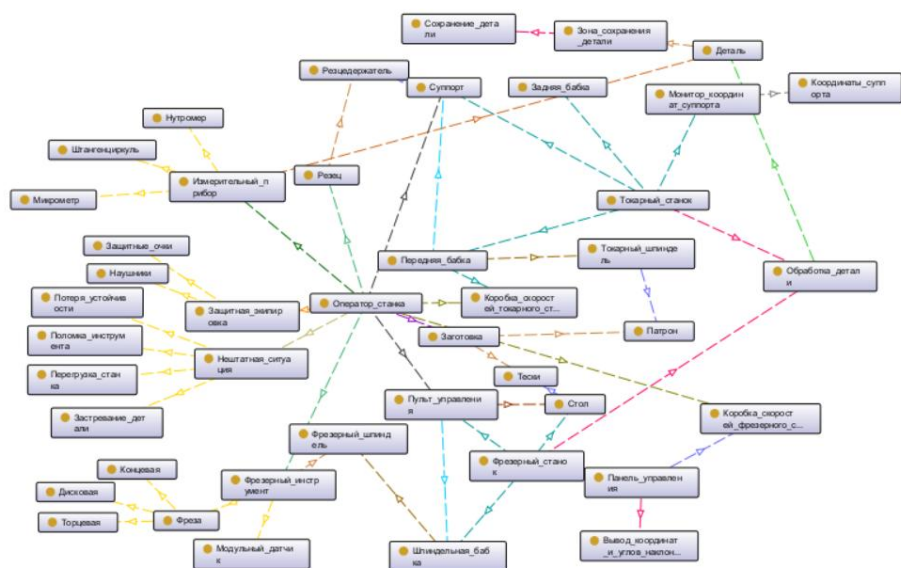
$$OM = \langle X, Y, Z \rangle, \quad (7)$$

где $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ – конечное множество понятий предметной области проектирования и разработки виртуальных тренажеров; $Y = \{Y_1, Y_2, \dots, Y_M\}$, $Y \subseteq \{X_1 \times X_2 \times \dots \times X_N\}$ – конечное множество семантически значимых отношений между понятиями-объектами вышеописанной предметной области; $Z = \{X \times Y\}$ – конечное множество функций интерпретации, которые задаются

```

graph TD
    System[Система станка] --> Measurement[Измерительные приборы]
    System --> Control[Управление]
    System --> Drive[Привод]
    System --> Spindle[Шпиндель]
    
    Measurement --> Micrometers[Микрометры]
    Measurement --> DepthGauges[Глубиномеры]
    Measurement --> Verniers[Штангенциркули]
    
    Control --> Operator[Оператор станка]
    Control --> PLC[Пульт управления]
    Control --> CNC[ЧПУ]
    
    Drive --> Motor[Mотор]
    Drive --> GearBox[Коробка скоростей]
    
    Spindle --> Headstock[Главный шпиндель]
    Spindle --> Tailstock[Задний шпиндель]
    
    Headstock --> Workpiece[Заготовка]
    Headstock --> Tool[Инструмент]
    
    Tailstock --> Support[Поддержка]
    
    Workpiece --> Turning[Turning]
    Workpiece --> Boring[Boring]
    Workpiece --> Drilling[Drilling]
    Workpiece --> Grinding[Grinding]
    
    Tool --> TurningTool[Токарный инструмент]
    Tool --> BoringTool[Резьбонарезной инструмент]
    Tool --> DrillingTool[Дрель]
    Tool --> GrindingWheel[Шлифовальный круг]
    
    Turning --> Lathe[Точильный станок]
    Boring --> BoreMachining[Обработка отверстий]
    Drilling --> DrillMachining[Обработка сверлами]
    Grinding --> GrindMachining[Обработка шлифованием]
    
    Lathe --> HeadstockMech[Механизм головки]
    Lathe --> TailstockMech[Механизм хвостовика]
    Lathe --> Bed[Станина]
    Lathe --> Saddle[Стол]
    Lathe --> Apron[Фартук]
    Lathe --> ToolRest[Подставка для инструмента]
    Lathe --> ChipCollector[Сборщик стружки]
    
    HeadstockMech --> HeadstockGear[Коробка передач]
    HeadstockMech --> HeadstockMotor[Двигатель]
    HeadstockMech --> HeadstockFrame[Каркас]
    
    TailstockMech --> TailstockGear[Коробка передач]
    TailstockMech --> TailstockMotor[Двигатель]
    TailstockMech --> TailstockFrame[Каркас]
    
    Bed --> BedBase[Основание]
    Bed --> BedColumns[Столбы]
    Bed --> BedCross[Перекладина]
    
    Saddle --> SaddleBase[Основание]
    Saddle --> SaddleColumns[Столбы]
    Saddle --> SaddleCross[Перекладина]
    
    Apron --> ApronBase[Основание]
    Apron --> ApronColumns[Столбы]
    Apron --> ApronCross[Перекладина]
    
    ToolRest --> ToolRestBase[Основание]
    ToolRest --> ToolRestColumns[Столбы]
    ToolRest --> ToolRestCross[Перекладина]
    
    ChipCollector --> ChipCollectorBase[Основание]
    ChipCollector --> ChipCollectorColumns[Столбы]
    ChipCollector --> ChipCollectorCross[Перекладина]

```



10

Структура процесса создания программных и визуальных модулей виртуальных тренажеров для ППП АСУП также включает три основных этапа: Pre-Production, Production и Post-Production.

Этап Pre-Production включает формирование технического задания на основе видеоконтента:

$$PreProd_{VR\ ACY\P} = f(TZ_{form}, Video_{content}), \quad (8)$$

где TZ_{form} – формирование технического задания (ТЗ); $Video_{content}$ – использование видеоконтента для уточнения ТЗ.

На этапе Production выполняются три ключевые задачи: разработка и интеграция 3D-моделей, разработка и развертывание программного обеспечения, создание и интеграция баз данных при необходимости:

$$Prod_{VR\ ACY\P} = Dev_{3D} \rightarrow Dev_{SW} \rightarrow Dev_{DB}, \quad (9)$$

где Dev_{3D} – разработка и интеграция 3D-моделей; Dev_{SW} – разработка и развертывание программного обеспечения; Dev_{DB} – создание и интеграция баз данных. Взаимодействие между этими задачами можно выразить как циклический процесс с возможностью взаимодействия между компонентами:

$$Cycle_{Prod} = Dev_{3D} \leftrightarrow Dev_{SW} \leftrightarrow Dev_{DB}. \quad (10)$$

На этапе Post-Production проводится оптимизация системы. Если в процессе оптимизации выявляются ошибки, то они корректируются с возвращением на этап разработки ПО:

$$PostProd_{VR\ ACY\P} = Opt_{system} \leftrightarrow Revise_{SW}, \quad (11)$$

где Opt_{system} – оптимизация системы; $Revise_{SW}$ – исправление ошибок в ПО при их обнаружении. Процесс корректировки при обнаружении некорректной работы: возврат на этап разработки ПО, в случае успешного исправления – завершение работы:

$$Revise_{SW} \begin{cases} Return_{prod}, \\ End_{VR\ ACY\P}. \end{cases} \quad (12)$$

Объединяя этапы разработки, можно выразить весь процесс создания системы VR АСУП так:

$$Dev_{VR\ ACY\P} = PreProd_{VR\ ACY\P} \rightarrow Cycle_{Prod} \rightarrow PostProd_{VR\ ACY\P} \quad (13)$$

с развернутой формулой:

$$\begin{aligned} Dev_{VR\ ACY\P} &= f(TZ_{form}, Video_{content}) \rightarrow (Dev_{3D} \leftrightarrow Dev_{SW} \leftrightarrow Dev_{DB}) \\ &\rightarrow (Opt_{system} \leftrightarrow Revise_{SW}). \end{aligned} \quad (14)$$

Формула систематизирует процесс разработки системы VR АСУП, включая начальную фазу планирования и формирования ТЗ, циклический процесс разработки и интеграции 3D-моделей, ПО и баз данных, а также этап финальной оптимизации и исправления ошибок. Структура процесса создания программных и визуальных модулей виртуальных тренажеров представляет совокупность структур процессов: создания программных модулей, создания базы данных, создания 3D-моделей и оптимизации программных компонент.

Оценка эффективности визуализации разработанного виртуального тренажера для подготовки операторов металлорежущих станков в ППП АСУП осу-

Пользователь имеет возможность выбрать режим работы на оборудовании (металлорежущие станки), например на токарных или фрезерных универсальных станках, или обратиться к режиму обучения. В зависимости от выбора включаются модули по сохранению 3D-объектов, модуль сохранения других результатов обучения, модуль анализа выполняемых действий. Информация хранится в базе данных (БД) и управляется системой управления базой данных (СУБД).

Предлагаемая функциональная структура системы виртуальной реальности по работе на универсальных металлорежущих станках – фрезерных и токарных – изображена на рис. 3.

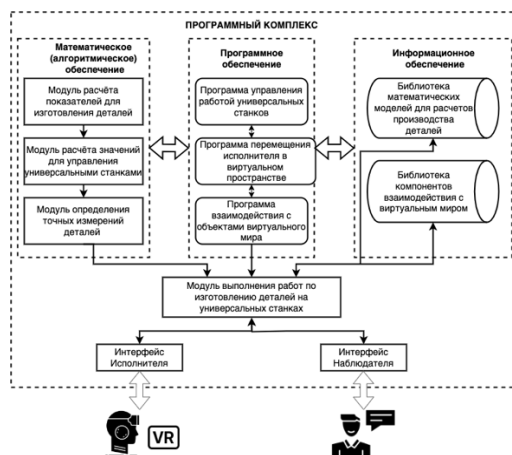


Рис. 3. Функциональная диаграмма системы VR по работе на универсальных металлорежущих станках: фрезерном и токарном

Функциональная часть виртуального тренажера по изготовлению деталей на универсальных металлорежущих станках – фрезерных и токарных – иллюстрируется на диаграмме прецедентов (рис. 4). Пользователь выполняет задания по производству деталей на универсальных станках: работает с измерительными инструментами, электронными панелями станков, имеет возможность создать заготовку в соответствии с заданными параметрами, а также заниматься наладкой и настройкой. Действия пользователя должны выполняться с соблюдением требований техники безопасности, охраны труда и производственной дисциплины. Контроль действий осуществляется разработанной системой VR по работе на универсальных металлорежущих станках – фрезерном и токарном, а также преподавателями, экспертами и наблюдателями. Данные о пользователе и результаты его работы сохраняются.

На рис. 5 представлена контекстная диаграмма IDEF0. Она описывает взаимодействие системы с другими системами, пользователями и внешними источниками данных. Ресурсами, которые выполняют работу, являются преподаватели специальных дисциплин, обучающиеся сектора «Производство и инженерные технологии» и специалисты производства, работающие на универсальных станках.

Входными переменными являются рассматриваемые универсальные металлорежущие станки (токарные, фрезерные), заготовки для создания деталей

и собственно действия обучающихся по работе на станках. Мониторинг и управление изготовлением деталей на станках осуществляются специальной системой, которая контролирует процесс работы на станках по специальным критериям, основываясь на инструкции по правилам работы на станках и чертежах деталей, которые изготавливаются. Эти действия обеспечивают изготовление деталей на универсальных станках с оценками качества процесса выполнения работы по заданным критериям. На выходе – изготовленная деталь и оценка навыков работы на станках в соответствии с критериями виртуальной среды.

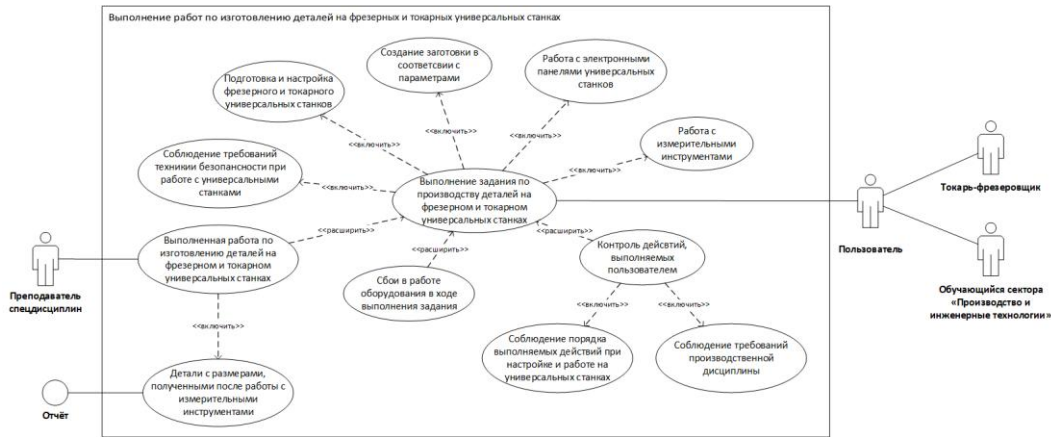


Рис. 4. Диаграмма прецедентов

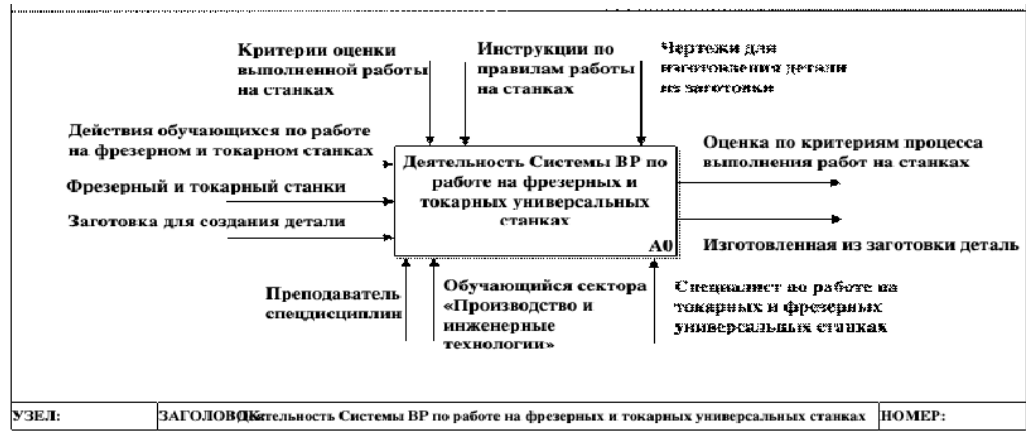


Рис. 5. Контекстная диаграмма IDEF0 функционирования виртуальных тренажеров реальности для универсальных металлорежущих станков – фрезерных и токарных

В процессе обучения с использованием виртуальных тренажеров также отработываются нештатные ситуации [18]. Некоторые из них представлены в таблице.

Блок-схема сценария обучения на примере токарного станка представлена на рис. 6. В процессе обучения также генерируются нештатные ситуации.

Характеристика нештатных ситуаций

№	Наименование нештатной ситуации	Описание	Решение
1	Перегрузка режущего инструмента	Использование неправильной скорости резания, недостаточное охлаждение или неправильная глубина резания могут привести к перегрузке режущего инструмента и его поломке.	Изменение параметров резания, увеличение охлаждения, замена изношенного инструмента.
2	Защемление материала или инструмента	Неправильная установка заготовки или инструмента может привести к их защемлению, что вызывает повреждение станка или травму оператора.	Остановка станка, освобождение защемленной части, проверка и исправление причин защемления.
3	Образование острой стружки	Неправильная скорость подачи или форма режущего инструмента могут привести к образованию острой стружки, которая представляет опасность при контакте с оператором.	Изменение параметров подачи, замена режущего инструмента.
...	...	...	...
15	Потеря качества обработки	Неправильная настройка станка, износ режущего инструмента или дефекты в материале могут привести к потере качества обработки детали.	Проверка и коррекция параметров обработки, замена изношенного инструмента, проверка материала перед обработкой.

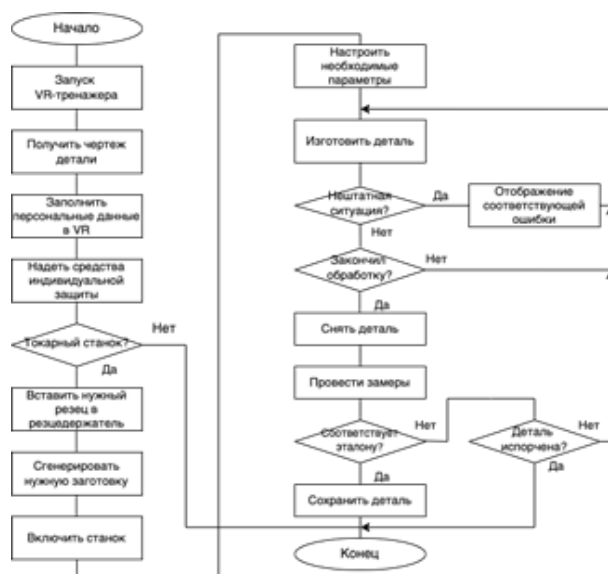


Рис. 6. Сценарий обучения на токарном станке с использованием виртуальных тренажеров

Формирование практико-ориентированных умений управления металлорежущими станками с использованием виртуальных тренажеров осуществляется согласно схеме, представленной на рис. 7.

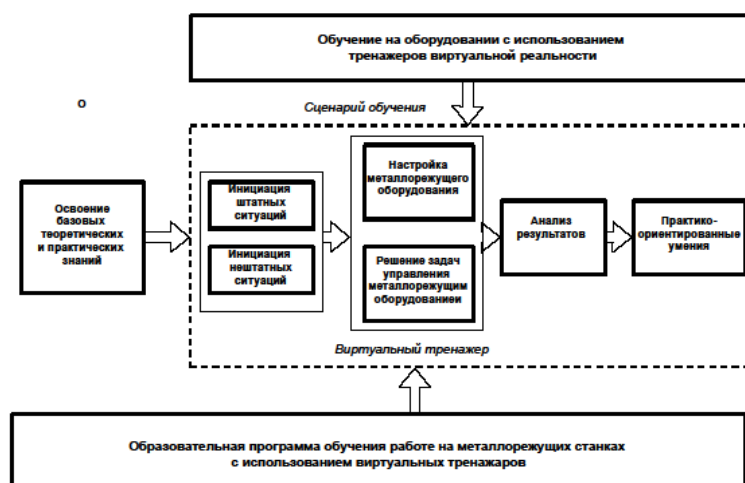


Рис. 7. Структурная схема формирования практико-ориентированных умений работе на металлорежущих станках с использованием виртуальных тренажеров

На основе предоставленных заказчиком чертежей металлорежущего станка осуществляется разработка 3D-модели в соответствии с реальными размерами и параметрами. Для этого проводится тщательный анализ графических изображений компонентов и деталей станка, включая их размеры, формы, материалы и технические характеристики. Определение необходимых параметров для построения 3D-модели включает учет ключевых характеристик станка, таких как размеры и формы деталей, материалы, используемые в производстве, функциональные требования и технические характеристики.

Заключение

Разработанный метод автоматизированного построения виртуальных тренажеров для ППП АСУП основывается на предоставлении заказчиком функциональных видеороликов с производства, а также формализации процесса проектирования и разработки в виде структур процесса создания программных и визуальных модулей с учетом специфики разработки тренажеров под виртуальную реальность. Позволяет оперативно осуществить мониторинг правильности выполнения операций, уменьшить ошибки разработчика, а также сократить время разработки технического описания и тем самым повысить результативность процесса проектирования и разработки виртуальных тренажеров для обучения операторов металлорежущих станков. Разработанная онтологическая модель построения виртуальных тренажеров для подготовки операторов металлорежущих станков в ППП АСУП позволяет выявить основные понятия и отношения между понятиями в предметной области работы операторов металлорежущих станков и последующей реализации. Это позволило повысить эффективность планирования и стандартизации для подготовки операторов металл-

орежущих станков в ППП АСУП. Предложенный экспертный метод оценки эффективности визуализации разработанного виртуального тренажера подготовки операторов токарной и фрезерной обработок ППП АСУ производствами позволяет подобрать лучшую альтернативу на основе ранжирования экспертных оценок при выборе качественной визуализации тренажера виртуальной реальности для ППП АСУП. Разработан и апробирован виртуальный тренажер для подсистемы подготовки операторов металлорежущих станков на примере токарной и фрезерной обработок АСУП. Это позволило повысить результативность обучения операторов, а также отработать сложно реализуемые нештатные ситуации.

Полученные результаты могут использоваться для эффективного проектирования и разработки виртуальных тренажеров для ППП АСУП для различных отраслей промышленности, а также при подготовке студентов колледжей по специальностям 09.02.10 «Разработка компьютерных игр, дополненной и виртуальной реальности» и 09.02.07 «Информационные системы и программирование».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Тявкин И.В.* Симуляторы и тренажеры в виртуальной реальности. Под ред. проф. В.М. Тютюнника. Тамбов: Нобелистика, 2011. 68 с.
2. *Aslanov R., Bolshakov A.* Method for constructing virtual reality simulators for turning and milling for an engineering education system for building cyber-physical systems // *Society 5.0. Cyber-Solutions for Human-Centric Technologies*. Ed. A.G. Kravets. Cham: Springer Nature Switzerland, Studies in Systems, Decision and Control. 2023. Vol. 437. Pp. 91–106. DOI 10.1007/978-3-031-35875-3_8.
3. *Меркулов И.А., Синельников А.О.* Виртуальная реальность // *Тенденции развития науки и образования*. 2019. № 50–1. С. 64–67.
4. *Корнеева Н.Ю., Уварина Н.В.* Иммерсивные технологии в современном профессиональном образовании // *Современное педагогическое образование*. 2022. № 6. С. 17–22.
5. *Козлов А.В.* Виртуальная и дополненная реальности в высшем техническом образовании // *Современное педагогическое образование*. 2023. № 2. С. 111–115.
6. *Bracq M., Michinova E., Arnaldib B., Caillaudc B., Gibaudd B., Gourantonb V., Jannin P.* Learning procedural skills with a virtual reality simulator: An acceptability study // *Nurse Education Today*. 2019. Vol. 79. Pp. 153–160.
7. *Жабицкий М.Г., Кулак С.А., Новикова А.С.* Проблема разработки VR тренажеров сборки/разборки и вариант высокопроизводительного решения на базе технологии VR Concept // *International Journal of Open Information Technologies*. 2022. Т. 10, № 8. С. 18–29.
8. *McGuinn Irina V.* Application of the new technologies: Augmented Reality and Virtual Reality in Education // *Cross-Cultural Studies: Education and Science*. 2022. Vol. 7. Issue 2. Pp. 126–132.
9. *Akin M., Uzun Y.* Application Design and Implementation for the Automotive Industry with Virtual Realit // *Hittite Journal of Science and Engineering*. 2022. Vol. 9. Issue 2. Pp. 133–143. DOI: 10.17350/HJSE19030000264.
10. *Ярославцева В.А., Соловьев С.П.* Автоматизация процесса создания виртуальных тренажеров: интеграция семиотических объектов в сцены реального мира // *Международная конференция по мягким вычислениям и измерениям*. 2013. Т. 1. С. 93–94.
11. *Bolshakov A.A., Klyuchikov A.V., Kovylov N.V.* Building a system architecture for displaying data in a complex of output devices // *2020 Int. Conf. Actual Probl. Electron Devices Eng., APEDE 2020*. 2020. Pp. 302–304. DOI 10.1109/APEDE48864.2020.9255414.
12. *Бова В.В., Лещанов Д.В., Кравченко Д.Ю., Новиков А.А.* Компьютерная онтология: задачи и методология построения // *Информатика, вычислительная техника и инженерное образование*. 2014. № 4 (19). С. 44–55.
13. *Коломеец М.В.* Эффективность визуализации данных в виртуальной реальности // *Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2020. Т. 63, № 11. С. 1046–1052. DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-11-1046-1052.
14. *Hadamus A., Błażkiewicz M., Wydra K.T., Kowalska A.J., Łukowicz M., Białoszewski D., Marczyński W.* Effectiveness of Early Rehabilitation with Exergaming in Virtual Reality on Gait in Patients after Total Knee Replacement // *J. Clin. Med*. 2022. Vol. 11. P. 4950.

15. Бова В.В., Лещанов Д.В., Кравченко Д.Ю., Новиков А.А. Компьютерная онтология: задачи и методология построения // Информатика, вычислительная техника и инженерное образование. 2014. № 4 (19). С. 44–55.
16. Venkatesh V., Thong J., Chan F., Hoehle H., Spohrer K. How agile software development methods reduce work exhaustion: Insights on role perceptions and organizational skills // Information Systems Journal. 2020. Vol. 30. Pp. 733–761.
17. Rokooei S., Shojaei A., Alvanchi A., Azad R., Didehvar N. Virtual reality application for construction safety training // Safety Science. 2023. Vol. 157. Pp. 1–9.
18. Lerner D., Mohr S., Schild J., Göring M., Luiz T. An Immersive Multi-User Virtual Reality for Emergency Simulation Training: Usability Study // JMIR Serious Games. 2020. Vol. 8. Issue 3.

Статья поступила в редакцию 20.09.2024 г.

VIRTUAL SIMULATORS IN THE AUTOMATED CONTROL SYSTEM SUBSYSTEM FOR TRAINING OPERATORS OF METAL-CUTTING MACHINES

R.E. Aslanov^{1,2}

¹Saint Petersburg State Technological Institute (Technical University)
24–26/49(A), Moskovsky Prospekt, Saint Petersburg, 190013, Russian Federation

²Institute of Digital Education, Moscow City University
4, 2nd Selskhozaijstvenny proezd, Moscow, 129226, Russian Federation

E-mail: aslanov.boxing@mail.ru

Abstract. *The article describes the proposed method of automated construction of virtual simulators for the subsystem of personnel training of the automated control systems of production. Its distinctive feature is the work with the customer based on the provision of functional videos from production, as well as the formalization of the design and development process in the form of structures for the process of creating software and visual modules taking into account the specifics of the development of virtual reality simulators. An ontological model has been developed for the construction of virtual simulators for training machine tool operators in the automated control systems of production, which uses the identified basic concepts and relationships between them in the subject area of work of machine tool operators. Its implementation is based on the Protege software environment. The following diagrams are proposed: functional and contextual IDEF0 of the functioning of virtual simulators for training in working on universal metal-cutting machines: milling and turning. The architecture of a virtual simulator for use in the subsystem of training personnel of automated control systems of production, as well as a structural diagram of the formation of practice-oriented skills in working on metal-cutting machines using virtual simulators are described.*

Keywords: *immersive technology, virtual reality, augmented reality, computer simulator.*

REFERENCES

1. Tyavkin I.V. Simulyatory i trenazhery v virtual'noj real'nosti [Simulators and trainers in virtual reality]. Pod red. prof. V.M. Tyutyunnika. Tambov: Nobelistika, 2011. 68 p. (In Russian)
2. Aslanov R., Bolshakov A. Method for constructing virtual reality simulators for turning and milling for an engineering education system for building cyber-physical systems // Society 5.0. Cyber-Solutions for Human-Centric Technologies. Ed. A.G. Kravets. Cham: Springer Nature Switzerland, Studies in Systems, Decision and Control. 2023. Vol. 437. Pp. 91–106. DOI 10.1007/978-3-031-35875-3_8.
3. Merkulov I.A., Sinel'nikov A.O. Virtual'naya real'nost' [Virtual reality] // Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya. 2019. No. 50–1. Pp. 64–67. (In Russian)



© The Author(s), 2024

Roman E. Aslanov:

¹ applicant

² assistant

4. *Korneeva N.Yu., Uvarina N.V.* Immersivnye tekhnologii v sovremennom professional'nom obrazovanii [Immersive technologies in modern professional education] // *Sovremennoe pedagogicheskoe obrazovanie*. 2022. No. 6. Pp. 17–22. (In Russian)
5. *Kozlov A.V.* Virtual'naya i dopolnennaya real'nosti v vysshem tekhnicheskome obrazovanii [Virtual and augmented reality in higher technical education] // *Sovremennoe pedagogicheskoe obrazovanie*. 2023. No. 2. Pp. 111–115. (In Russian)
6. *Bracq M., Michinova E., Arnaldib B., Caillaudc B., Gibaudb B., Gourantonb V., Jannin P.* Learning procedural skills with a virtual reality simulator: An acceptability study // *Nurse Education Today*. 2019. Vol. 79. Pp. 153–160.
7. *Zhabitsky M.G., Kulak S.A., Novikova A.S.* The problem of developing VR simulators for assembly/disassembly, and a variant of a high-performance solution based on VR Concept technology // *International Journal of Open Information Technologies*. 2022. Vol. 10, No. 8. Pp. 18–29.
8. *McGuinn Irina V.* Application of the new technologies: Augmented Reality and Virtual Reality in Education // *Cross-Cultural Studies: Education and Science*. 2022. Vol. 7. Issue 2. Pp. 126–132.
9. *Akin M., Uzun Y.* Application Design and Implementation for the Automotive Industry with Virtual Realit // *Hittite Journal of Science and Engineering*. 2022. Vol. 9. Issue 2. Pp. 133–143. DOI: 10.17350/HJSE19030000264.
10. *Yaroslavceva V.A., Solov'ev S.P.* Avtomatizatsiya processa sozdaniya virtual'nyh trenazherov: integratsiya semioticheskikh ob"ektov v sceny real'nogo mira [Automation of the process of creating virtual simulators: integration of semiotic objects into real-world scenes] // *International Conference on Soft Computing and Measurement*. 2013. Vol. 1. Pp. 93–94. (In Russian).
11. *Bolshakov A.A., Klyuchikov A.V., Kovylov N.V.* Building a system architecture for displaying data in a complex of output devices // 2020 Int. Conf. Actual Probl. Electron Devices Eng., APEDE 2020. 2020. Pp. 302–304. DOI 10.1109/APEDE48864.2020.9255414.
12. *Bova V.V., Leshchanov D.V., Kravchenko D.Yu., Novikov A.A.* Komp'yuternaya ontologiya: zadachi i metodologiya postroeniya [Computer ontology: tasks and methodology of construction] // *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie*. 2014. No. 4 (19). Pp. 44–55. (In Russian)
13. *Kolomeets M.V.* Effektivnost' vizualizatsii dannyh v virtual'noj real'nosti [The effectiveness of data visualization in virtual reality] // *News of higher educational institutions. Instrumentation*, 2020. Vol. 63. No. 11. Pp. 1046–1052. DOI 10.17586/0021-3454-2020-63-11-1046-1052. (In Russian)
14. *Hadamus A., Błażkiewicz M., Wydra K.T., Kowalska A.J., Łukowicz M., Białoszewski D., Marczyński W.* Effectiveness of Early Rehabilitation with Exergaming in Virtual Reality on Gait in Patients after Total Knee Replacement // *J. Clin. Med*. 2022. Vol. 11. P. 4950.
15. *Bova V.V., Leshchanov D.V., Kravchenko D.Y., Novikov A.A.* Komp'yuternaya ontologiya: zadachi i metodologiya postroeniya [Computer ontology: tasks and methodology of construction] // *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoe obrazovanie*. 2014. No. 4(19). Pp. 44–55. (In Russian)
16. *Venkatesh V., Thong J., Chan F., Hoehle H., Spohrer K.* How agile software development methods reduce work exhaustion: Insights on role perceptions and organizational skills // *Information Systems Journal*. 2020. No. 30. Pp. 733–761.
17. *Rokooei S., Shojaei A., Alvanchi A., Azad R., Didehvar N.* Virtual reality application for construction safety training // *Safety Science*. 2023. Vol. 157. Pp. 1–9.
18. *Lerner D., Mohr S., Schild J., Göring M., Luiz T.* An Immersive Multi-User Virtual Reality for Emergency Simulation Training: Usability Study // *JMIR Serious Games*. 2020. Vol. 8. Issue 3.

Original article submitted 20.09.2024

УДК 626.735.33

ПРОСТРАНСТВЕННО-СИТУАТИВНЫЙ ПОДХОД К УПРАВЛЕНИЮ ТРАНСПОРТНОЙ БЕЗОПАСНОСТЬЮ АЭРОПОРТА

А.С. Борзова², Л.Н. Елисов², Н.И. Овченков¹

¹ Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова

Россия, 150003 г. Ярославль, ул. Советская, 14

² Московский государственный технический университет гражданской авиации

Россия, 125993, г. Москва, Кронштадтский бульвар, 20

E-mail: a.borzova@mstuca.aero, lev.el@list.ru, ovchenkov@electronika.ru

Аннотация. Тенденция развития систем обеспечения и управления авиационной безопасностью объектов транспортного комплекса в последние годы приобрела характер перехода от классических схем нормативно-правового управления к автоматизированному, использующему некоторый набор оптимальных в смысле определенного критерия процедур. Можно выделить ряд причин снижения эффективности управления безопасностью: связанные со временем, с отработкой ситуативных событий, несистемным сбором и обработкой информации; с гипотетичностью и потенциальностью угроз безопасности; с интегральностью безопасности и интегральностью систем безопасности, неделимостью безопасности и уязвимостью объектов транспортной инфраструктуры; с проблемой прогноза развития негативных событий. Все это предполагает переход к информационному управлению безопасностью, которое основано на пространственно-ситуативном подходе. В работе обосновано появление пространства угроз, пространства защиты и пространства безопасности. Показаны возможности использования этих пространств для решения проблем формализации процедур управления безопасностью.

Ключевые слова: транспортная безопасность, авиационная безопасность, пространственно-ситуативный подход, пространства угроз, защиты и безопасности, плохо формализуемая задача.

Введение

Информационное управление представляет собой процесс выработки и реализации управленческих решений в ситуации, когда управляющее воздействие носит неявный, косвенный характер и объекту предоставляется информация о ситуации (информационная картина), ориентируясь на которую выбирается линия поведения (реакции).

Информационное управление в безопасности (рис. 1) основано на оценке ситуации в объекте защиты, связанной с определенными внешними или внутренними воздействиями (угрозами), и предполагает взаимодействие гипотетических пространств угроз, защиты и безопасности.



© Автор(ы), 2024

² Анжела Сергеевна Борзова, доктор технических наук, доцент, проректор по учебно-методической работе и молодежной политике.

² Лев Николаевич Елисов, доктор технических наук.

¹ Николай Иванович Овченков, кандидат технических наук, доцент кафедры теоретической информатики.

Постановка задачи

Информационное управление принципиально отличается от понятия «информационный менеджмент». Менеджмент использует методы и технологии для поддержки организационного управления [1]. Информационное управление более формализовано и основано на моделях и моделировании. Парадигма информационного управления: «создание и использование информационных моделей для построения полностью формализованных технологий управления, анализ которых может быть выполнен человеком или компьютером» [2].

Главными свойствами информационного управления безопасностью являются жесткая привязка к информационным управленческим моделям и обязательная интеграция последних в технологии управления.

Главной проблемой информационного управления безопасностью является существенная неопределенность и нестационарность в описании гипотетических полей угроз, защиты и безопасности.

Главная задача информационного управления безопасностью состоит в разработке или адаптации метода оптимизации управленческих процедур в условиях слабой формализуемости исходной задачи.

Цель и задача данной работы состоит в обосновании и структурно-логическом описании пространственно-ситуативного подхода как метода информационного управления безопасностью.

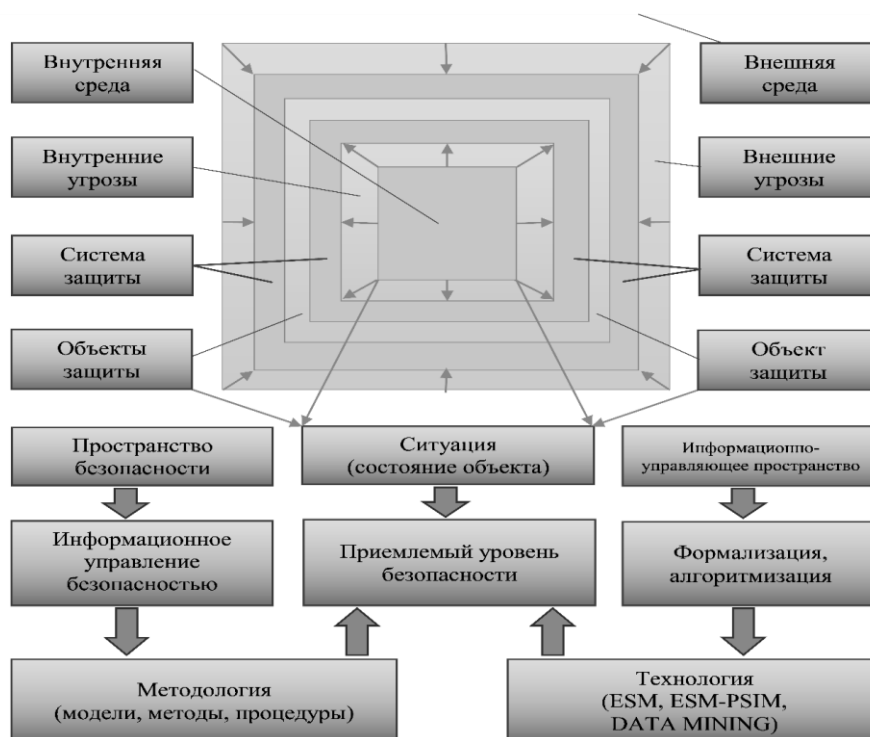


Рис. 1. Пространственно-ситуативный подход к информационному управлению безопасностью

Методы

Применение информационных моделей в управлении дает следующие преимущества:

- превращает технологию информационного управления в формализованную сложную конструкцию с возможностью системного анализа;
- создает возможность логического анализа для сложных систем управления и больших объемов управленческой информации;
- осуществляет объектный (ресурсы, данные, результаты) и процессуальный (процессы, соответствие целям) анализы;
- создает возможность проводить ситуационный анализ, формальный анализ рисков и строить прогнозы на основе объектных критериев.

Информационное управление транспортной безопасностью обладает свойством дуализма и основано на двух понятиях, действующих совместно: обеспечение и собственно управление (рис. 2).



Рис. 2. Дуализм информационного управления

Методология обеспечения безопасности

Ориентирована на теорию организационных систем и представляет собой нормативный тип управления. В рамках данной методологии результат формируется за счет удовлетворения совокупности определенных требований по безопасности, прописанных в нормативных документах, их оценки (уязвимость) применительно к объектам защиты, констатации факта приемлемости уровня безопасности и, если это условие не выполняется, подключения механизма защиты объекта, представляющего собой систему ликвидации или парирования угроз. Результат понимается как состояние (ситуация) объекта защиты. Ситуация обозначает множество устойчивых значений переменных параметров объекта.

Нормативное управление можно рассматривать как косвенное регулирование уровня безопасности объекта в соответствии с требованиями нормативных документов. В этом случае необходимо выстраивать определенную организационную структуру и управлять именно ей в соответствии с теорией управления организационными системами.

Организационная структура представляет собой целостную систему, состоящую из совокупности упорядоченных уровней управления, которая организует процесс коммуникации между ними с целью обеспечения приемлемого уровня безопасности в условиях взаимодействия с внешней и внутренней средой (рис. 3). Таким образом, обеспечение безопасности может быть квалифицировано как информационный менеджмент.



Рис. 3. Структура информационного менеджмента безопасности

Организационная структура (5) изменяется под воздействием факторов неустойчивости (2), которые по отношению к структуре могут быть внешними (3) и внутренними (1). Термин «изменяется» означает изменения в структуре системы защиты, внесенные на основании решения ЛПР (А).

Корректировка параметров защиты возникает при появлении рассогласования между характеристиками организационной структуры (6) и критериальными требованиями (4), задаваемыми ЛПР. Иными словами, ЛПР задают требования к организационной структуре в форме критериев и их параметров (4, 7), мониторинг характеристик (6), выявляет реальные параметры (9) этих критериев, которые сопоставляются в квалиметрической матрице (10), где происходит преобразование указанных параметров в показатели качества и осуществляются процедуры квалиметрической оптимизации (13). Результат оптимизации используется в виде оценочных значений.

Идея состоит в том, что векторные величины путем использования квалиметрических преобразований трансформируются в скалярные параметры, относящиеся к понятию «качество» [3, 4].

Если критерии оптимизации выражены через скалярные величины, то вопрос о переходе к качеству решается достаточно просто: можно поставить в соответствие значение критерия и уровень качества, приняв единую шкалу измерения критериев и определив шкалу оценки уровня качества. Если критерии – векторные, а их параметры – скалярные величины, квалиметрическая оптимизация (рис. 4) состоит в процедуре вычисления минимального, максимального и среднего значений качества (КС-процедура).



Рис. 4. К вопросу о квалиметрической оптимизации

Если критерии и их параметры – векторные, то каждый из векторов однозначно определяется соответствующими параметрами: A и B . Тогда для перехода к параметру «качество» по отношению к каждому вектору правомочно провести КС-процедуру и использовать квалиметрическую матрицу (рис. 5).

Скалярные параметры обоих векторов A и B расположены по сторонам и столбцам матрицы размерности $A \times B$.

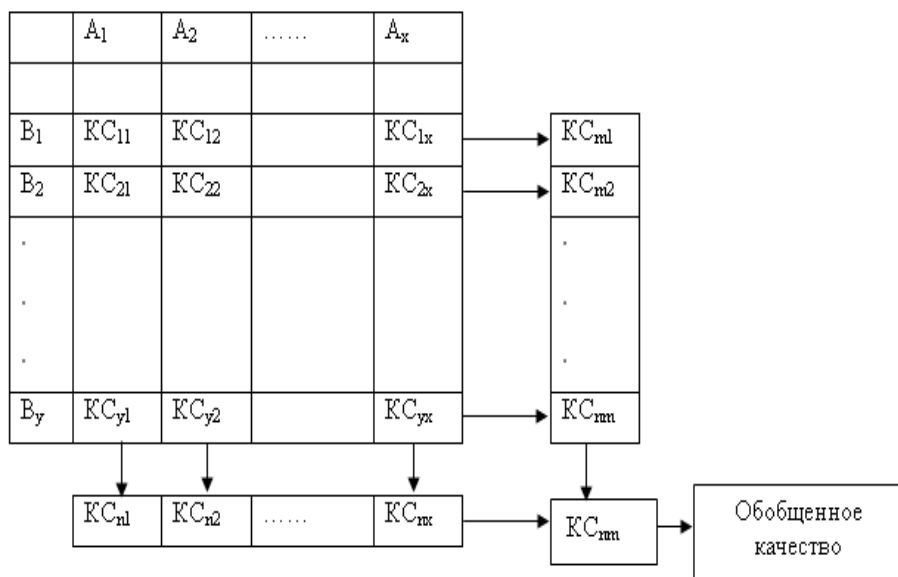


Рис. 5. Квалиметрическая матрица

Параметры сопоставляются каждый с каждым, при этом при каждом сопоставлении выполняется КС-операция, т. е. оценивается в рамках выбранной шкалы степень соответствия параметра (анализируемого) требованиям, заложенным в данном параметре. Полученные значения качества по каждому столбцу и строке подвергаются соответствующей КС-операции, в результате чего получаем совокупность уровней качества по каждому параметру A и B , которые затем усредняются и комплексуются в обобщенное значение (уровень) качества, соответствующего этим критериям. Оно сопоставляется с нормативным значением, и принимается решение о соответствии параметров безопасности заданным требованиям. Если такого соответствия нет, то, решая обратную задачу, двигаясь по

цепочке квалиметрических операций, можно выяснить причину несоответствия, т. е. определить то или те требования, которые не выполняются или не удовлетворяются, и принять соответствующие меры или согласиться с таким уровнем качества.

Рассмотренная квалиметрическая процедура реализует идею перехода от векторного представления критерия оптимизации к скалярному представлению этого критерия в виде уровня качества. На основе квалиметрической матрицы строятся процедуры обеспечения транспортной безопасности [5].

Управление в терминах информационного менеджмента осуществляется путем принятия соответствующих решений некоторой иерархией управляющих лиц: *A* – высший уровень иерархии управления; *B* – средний уровень; *C* – нижний уровень иерархии (см. рис. 3).

Методология управления безопасностью

Ориентирована на теорию оптимального управления. Такое управление предполагает постоянный или периодический мониторинг безопасности, при этом устанавливаются определенные единицы измерения. В подавляющем большинстве случаев это баллы, поскольку измерение уровня безопасности осуществляется экспертными методами. Устанавливается нормативное значение безопасности, т. е. выбирается приемлемый уровень, который поддерживается во времени, для чего существует соответствующая система коррекции. Информационное управление строится в соответствии с пространственным подходом [6, 7].

Результаты

С точки зрения системотехники исследуемый объект относится к категории сложных систем и включает в свой состав следующие элементы (категории): объект защиты, совокупность угроз, система защиты, безопасность как понятие, управление как процесс, определенный объем информации, внешняя среда, внутренняя среда. Эти категории определяют содержание и параметры процессов обеспечения и управления транспортной безопасностью. Каждую из этих категорий можно отобразить в форме некоторого пространства.

Пространство понимается как форма существования материальных объектов и процессов. Пространство характеризует структурность и протяженность материальных систем (рис. 6).

Ориентация информационного управления на пространственный подход позволяет использовать для исследования математическое моделирование [8], которое предполагает определенную формализацию. С учетом серьезной неопределенности в описании указанных выше категорий задача моделирования становится плохо формализуемой и слабо структурируемой. В таком случае приходится искать такие модели, которые при всех сложностях дадут приемлемый результат. Представление элементов управляющей структуры в форме некоторых пространств дает возможность решить эту задачу с приемлемой точностью.

Понятие угрозы является исходным при анализе безопасности. Применительно к транспортной безопасности необходимо исследовать четыре типа угроз: реализованные (акт незаконного вмешательства совершен), потенциальные (АНВ предполагается, но тип его известен), неизвестные (новые, не описанные и не объявленные ранее), несанкционированное вмешательство персонала. Угрозы, даже если они единичные, следует рассматривать в приложении к некоторому множеству объектов защиты, т. е. они обладают свойством протяженности и мо-

гут быть представлены в форме пространства. Такое представление упрощает формализацию и позволяет использовать более адекватные модели.



Рис. 6. Структура информационного управления безопасностью

Пространство защиты однозначно определяется системой защиты, которая формируется в противовес всем типам угроз. С другой стороны, пространство защиты предназначено для обеспечения безопасности объекта защиты, который обладает определенной топологией. Выбор модели ограничен методологией исследования угроз.

Сопоставление этих двух пространств в динамике позволяет определить параметры пространства безопасности, которое формируется под воздействием управляющих сигналов в системе защиты.

Указанные пространства формируют совокупность данных (информационные массивы), отражающих состояние объекта защиты с точки зрения безопасности. Вся информация поступает в информационно-управляющий центр (пространство), в котором после ситуационного анализа вырабатываются управляющие сигналы. Таким образом достигается определенная цикличность управления. Здесь как критерий оптимальности управления выступает гомеостаз безопасности [8].

Заключение

Информационные массивы, как структурные, так и ситуативные, образуют пространства угроз, пространство защиты и, как итог, пространство безопасности. Они отражаются в формате информационно-управляющего пространства, где концентрируются в виде соответствующих параметров этого пространства, измерение и анализ которых лежат в основе принятия решений по управлению пространством защиты, что, в свою очередь, управляет уровнем транспортной безопасности объекта защиты. Здесь решается главная задача информационного управления, а именно: формируются соответствующие модели и алгоритмы управления, реализация которых в цифровом формате представляет собой управляющее воздействие и передается на исполнительные системы. Задача решается

поэтапно, путем внедрения на соответствующих этапах технологий ESM, PSIM и BIG DATE.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Овченков Н.И.* Методы динамической интеграции средств обеспечения авиационной безопасности аэропорта: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. М.: Моск. гос. техн. ун-т гражд. авиации, 2015. 20 с.
2. *Elisov L., Ovchenkov N., Gorbachenko V.* The Paradoxes of Aviation Security and Some Approaches to their Formal Description // *Transportation Research Procedia*. 2021. No. 54. Pp. 726–732.
3. *Chalyy D.Ju., Ovchenkov N.I., Lazareva E.G., Yaikov R.R.* A security system event log analysis / *CEUR Workshop Proceedings*. 2018. 2268. Pp. 141–146.
4. *Elisov L.N., Ovchenkov N.I., Gorbachenko V.I., Abramov I.A.* Neural network classification of aviation personnel as an element of the information and control space for the security of a transport infrastructure object // *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. No. 1679 (3). 032019.
5. *Филиппов В.Л., Овченков Н.И.* О решении плохо формализуемых и слабо структурированных задач в области авиационной безопасности // *Вестник СПбГУГА*. СПб: СПбГУГА, 2019. № 1. С. 34–46.
6. *Шапкин В.С., Демин С.С., Никитин А.В., Демин Д.С., Ковтушенко Д.В.* К вопросу о применении рискоориентированного подхода в задаче обеспечения безопасности полетов // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2017. № 16. С. 61–72.
7. *Овченков Н.И., Елисов Л.Н.* Оценка уязвимости объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств в гражданской авиации // *Научный вестник МГТУГА*. 2014. № 204. С. 65–68.
8. *Кошкин Р.П.* Математические модели процессов создания и функционирования поисково-аналитических информационных систем гражданской авиации // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2014. № 5. С. 39–49.
9. *Елисов Л.Н., Филиппов В.Л., Овченков Н.И., Мусин С.М.* К вопросу о теории авиационной безопасности // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2019. № 27. С. 109–119.
10. *Аверин Д.В., Овченков Н.И.* Концепция, модели и методы управления авиационной безопасностью по критерию человеческий фактор // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2020. № 31. С. 108–118.
11. *Елисов Л.Н., Овченков Н.И.* К вопросу о физическом моделировании пространства угроз безопасности аэропорта // *Международная научно-техническая конференция «Гражданская авиация на современном этапе развития науки, техники и общества»: материалы конференции*. М.: МГТУГА, 2018. С. 140–141.
12. *Елисов Л.Н., Овченков Н.И.* Численная реализация эвристической модели угроз безопасности объекта гражданской авиации // *Вестник СПбГУ ГА*. СПб: СПбГУ ГА, 2018. № 1(18). С. 42–57.
13. *Благодарзумыев А.К., Глухов Г.Е., Куртичев И.Г.* Разработка системы информационного мониторинга безопасности авиационной деятельности // *Научный вестник МГТУ ГА*. 2015. № 218. С. 67–70.
14. *Бусленко Н.П.* Моделирование сложных систем. М.: Наука, 1978. 400 с.
15. *Волынский-Басманов Ю.М., Михайлов Ю.Б., Федоров А.Ю.* Методологические основы оценки уязвимости объектов гражданской авиации к актам незаконного вмешательства в их деятельность // *Транспортная безопасность и технологии*. 2011. № 1(24). С. 66–75.
16. *Елисеев Б.П., Лю Д., Борзова А.С., Железная И.П., Воробьев В.В., Сережкина А.А., Ванг Б.* Мониторинг производственной деятельности авиакомпании для создания системы качества. М.: МГТУ ГА, 2015. 100 с.
17. *Козлов В.В.* Безопасность полетов: от обеспечения к управлению. М.: Оперативная полиграфия, 2010. 144 с.
18. *Месарович М., Такахара Я.* Общая теория систем: математические основы. М.: Мир, 1978. 312 с.
19. *Михайлов Ю.Б., Волынский-Басманов Ю.М.* Безопасность на транспорте и ее количественная оценка. М.: НУЦ Абинтех, 2012. 268 с.
20. *Овченков Н.И.* Квалиметрические принципы управления интеграцией технических средств авиационной безопасности аэропорта // *Материалы IV Международной моло-*

- дежной научной конференции «Гражданская авиация – XXI век». Ульяновск: УВАУ ГА, 2012. С. 16–17.
21. *Борзова А.С., Железная И.П.* Ключевые показатели деятельности авиакомпании // Научный вестник МГТУГА. 2012. № 181. С. 35–38.
 22. *Поспелов Д.А.* Ситуационное управление: теория и практика. М.: Наука, 1986. 284 с.
 23. *Субетто А.И.* Квалиметрия. Л.: ВНИСИ, 1988. 312 с.

Статья поступила в редакцию 15.10.2024 г.

SPATIAL-SITUATIONAL APPROACH TO AIRPORT TRANSPORT SECURITY MANAGEMENT

A.S. Borzova², L.N. Elisov², N.I. Ovchenkov¹

¹Yaroslavl State University

14, Sovetskaya st., Yaroslavl, 150003, Russian Federation

² Moscow State Technical University of Civil Aviation

20, Kronstadt Boulevard, Moscow, 125993, Russian Federation

E-mail: a.borzova@mstuca.aero, lev.el@list.ru, ovchenkov@electronika.ru

Abstract. *The trend in the development of systems for ensuring and managing aviation security of transport facilities in recent years has acquired the character of a transition from classical regulatory management schemes to automated control schemes using procedures based on the theory of optimal control. A number of factors can be identified that reduce the effectiveness of security management in the current system: problems related to time, post-factum processing of situational events, non-systemic collection and processing of information, the problem of hypothetical and potential security threats, the problem of security integrality and security systems integrality, the problem of indivisibility of security and the problem of vulnerability of transport infrastructure and, finally, the problems of forecasting the development of negative events. All this implies a transition to information security management, which is based on a spatial-situational approach. The paper substantiates the emergence of threat space, protection space and security space and shows the possibilities of using these spaces to solve the problems of formalization of security management procedures in the modeling process.*

Keywords: *transport security, aviation security, spatial-situational approach, threat spaces, protection and security, poorly formalized task.*

REFERENCES

1. Ovchenkov N.I. Metody dinamicheskoy integratsii sredstv obespecheniya aviacionnoj bezopasnosti aeroporta [Methods of dynamic integration of airport aviation security facilities]: abstract. diss. ... Candidate of Technical Sciences. M.: MGTUGA, 2015. 20 p. (In Russian)
2. Elisov L., Ovchenkov N., Gorbachenko V. The Paradoxes of Aviation Security and Some Approaches to their Formal Description // Transportation Research Procedia. 2021. No. 54. Pp. 726–732.
3. Chalyy D.Ju., Ovchenkov N.I., Lazareva E.G., Yaikov R.R. A security system event log analysis / CEUR Workshop Proceedings. 2018. 2268. Pp. 141–146.
4. Elisov L.N., Ovchenkov N.I., Gorbachenko V.I., Abramov I.A. Neural network classification of aviation personnel as an element of the information and control space for the security of a transport infrastructure object // Journal of Physics: Conference Series. 2020. No. 1679 (3). 032019.
5. Filippov V.L., Ovchenkov N.I. O reshenii ploho formalizuemyyh i slabo strukturirovannyh zadach v oblasti aviacionnoj bezopasnosti [On solving poorly formalized and poorly structured tasks in the field of aviation security] // Vestnik SPbGUGA. SPb: SPbGUGA, 2019. No. 1. Pp. 34–46. (In Russian)
6. Shapkin V.S., Demin S.S., Nikitin A.V., Demin D.S., Kovtushenko D.V. K voprosu o primenenii riskoorientirovannogo podhoda v zadache obespecheniya bezopasnosti poletov [On the issue of applying a risk-oriented approach to the task of ensuring flight safety] // Nauchnyj vestnik GosNII GA. 2017. No. 16. Pp. 61–72. (In Russian)



© The Author(s), 2024

²Andgela S. Borzova (Dr. Sci. (Techn.)), Associate Professor.

²Lev N. Elisov (Dr. Sci. (Techn.)).

¹Nikolay I. Ovchenkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

7. *Ovchenkov N.I., Elisov L.N.* Ocenka uyazvimosti ob"ektov transportnoj infrastruktury i transportnyh sredstv v grazhdanskoj aviatsii [Vulnerability assessment of transport infrastructure and vehicles in civil aviation] // Nauchnyj vestnik MGTUGA. 2014. No. 204. Pp. 65–68. (In Russian)
8. *Koshkin R.P.* Matematicheskie modeli processov sozdaniya i funkcionirovaniya poiskovo-analiticheskikh informacionnyh sistem grazhdanskoj aviatsii [Mathematical models of the processes of creation and functioning of search and analytical information systems of civil aviation] // Nauchnyj vestnik GosNII GA. 2014. No. 5. Pp. 39–49. (In Russian)
9. *Elisov L.N., Filippov V.L., Ovchenkov N.I., Musin C.M.* K voprosu o teorii aviacionnoj bezopasnosti [On the issue of aviation security theory] // Nauchnyj vestnik GosNII GA. 2019. No. 27. Pp. 109–119. (In Russian)
10. *Averin D.V., Ovchenkov N.I.* Konceptiya, modeli i metody upravleniya aviacionnoj bezopasnost'yu po kriteriyu chelovecheskij faktor [The concept, models and methods of aviation safety management according to the criterion of the human factor] // Nauchnyj vestnik GosNII GA. 2020. No. 31. Pp. 108–118. (In Russian)
11. *Elisov L.N., Ovchenkov N.I.* K voprosu o fizicheskom modelirovanii prostranstva ugroz bezopasnosti aeroporta [On the issue of physical modeling of the airport security threat space] // Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferenciya «Grazhdanskaya aviatsiya na sovremennom etape razvitiya nauki, tekhniki i obshchestva», materialy konferencii. M.: MGTUGA, 2018. Pp. 140–141. (In Russian)
12. *Elisov L.N., Ovchenkov N.I.* Chislennaya realizatsiya evristicheskoy modeli ugroz bezopasnosti ob"ekta grazhdanskoj aviatsii [Numerical implementation of a heuristic model of threats to the security of a civil aviation facility] // Vestnik SPbGU GA. SPb: SPbGU GA, 2018. No. 1(18). Pp. 42–57. (In Russian)
13. *Blagorazumov A.K., Gluxov G.E., Kirpichev I.G.* Razrabotka sistemy informacionnogo monitoringa bezopasnosti aviacionnoj deyatel'nosti [Development of an information monitoring system for aviation safety] // Nauchnyj vestnik MGTU GA. 2015. No. 218. Pp. 67–70. (In Russian)
14. *Buslenko N.P.* Modeling of complex systems. Moscow: Nauka, 1978. 400 p. (In Russian)
15. *Voly`nskiy-Basmanov Yu.M., Mixajlov Yu.B., Fedorov A.Yu.* Methodological bases for assessing the vulnerability of civil aviation facilities to acts of unlawful interference in their activities // Transportnaya bezopasnost' i tekhnologii. 2011. No. 1(24). Pp. 66–75. (In Russian)
16. *Eliseev B.P., Lyu D., Borzova A.S., Zheleznyaya I.P., Vorob`ev V.V., Serezhkina A.A., Vang B.* Monitoring proizvodstvennoj deyatel'nosti aviakompanii dlya sozdaniya sistemy kachestva [Monitoring of the airline's production activities to create a quality system]. M.: MGTU GA, 2015. 100 p. (In Russian)
17. *Kozlov V.V.* Bezopasnost' poletov: ot obespecheniya k upravleniyu [Flight safety: from assurance to management]. M.: Operativnaya poligrafiya, 2010. 144 p. (In Russian)
18. *Mesarovich M., Takaxara Ya.* Obshchaya teoriya sistem: matematicheskie osnovy [General theory of systems: mathematical foundations]. M.: Mir, 1978. 312 p. (In Russian)
19. *Mixajlov Yu.B., Voly`nskiy-Basmanov Yu.M.* Bezopasnost' na transporte i ee kolichestvennaya ocenka [Transport safety and its quantitative assessment]. M.: NUC Abintekh, 2012. 268 p. (In Russian)
20. *Ovchenkov N.I.* Kvalimetricheskie principy upravleniya integratsiej tekhnicheskikh sredstv aviacionnoj bezopasnosti aeroporta [Qualimetric principles for managing the integration of airport aviation security equipment] // Materialy IV mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii «Grazhdanskaya aviatsiya – XXI vek». Ul'yanovsk: UVAU GA, 2012. Pp. 16–17. (In Russian)
21. *Borzova A.S., Zheleznyaya I.P.* Klyuchevye pokazateli deyatel'nosti aviakompanii [Key performance indicators of the airline] // Nauchnyj vestnik MGTUGA. 2012. No. 181. Pp. 35–38. (In Russian)
22. *Pospelov D.A.* Situacionnoe upravlenie: teoriya i praktika [Situational management: theory and practice]. M.: Nauka, 1986. 284 p. (In Russian)
23. *Subetto A.I.* Kvalimetriya [Qualimetry]. L.: BHICI, 1988. 312 p. (In Russian)

Original article submitted 15.10.2024

УДК 665.6/.7:502.171

АНАЛИЗ РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЯ И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В СИСТЕМЕ ПЕРЕРАБОТКИ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ПРЕДПРИЯТИЙ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ ЦЕЛЕЙ УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ¹**М.Ю. Деревянов, Ю.Э. Плешивецца, А.А. Афиногентов, А.Г. Мандра**

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

E-mail: mder2007@mail.ru, yulia_pl@mail.ru, pondex@yandex.ru, amandra@mail.ru

Аннотация. Проблемы экологической безопасности и ресурсосбережения при переработке промышленных отходов на предприятиях нефтегазовой отрасли России становятся все более значимыми, особенно в условиях существующих тенденций, ориентированных на декарбонизацию и устойчивое развитие. Рост промышленных отходов не компенсируется соответствующим ростом объемов и качества переработки, поскольку перерабатывается только 10 % нефтесодержащих отходов, а остальная часть подвергается захоронению или сжиганию, что оказывает дополнительное вредное воздействие на окружающую среду. В статье предлагается новый подход к многофакторному анализу ресурсосбережения и экологической безопасности при комплексной переработке промышленных отходов нефтегазовых предприятий для достижения целей устойчивого развития. Разработанный авторами алгоритм, теоретической основой которого является метод анализа оболочки данных (DEA), определяет последовательность решения взаимосвязанных задач многофакторного сравнения объектов системы переработки отходов по разнородным критериям качества: ресурсной ценности, ресурсному потенциалу, ресурсосбережению и экологической безопасности. Эти задачи формулируются на основе модели суперэффективности метода DEA как задачи математического программирования. Представленный и апробированный подход к многофакторному анализу ресурсосбережения и экологической безопасности системы переработки отходов позволяет: 1) получать и анализировать относительные сравнительные оценки объектов хранения отходов и технологий переработки по разнородным критериям качества; 2) формировать локальные и общие стратегии принятия решений, обеспечивающие достижение целей устойчивого развития. Проведенный анализ позво-



© Автор(ы), 2024

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема No FSSE-2024-0014) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

Максим Юрьевич Деревянов, кандидат технических наук, доцент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Юлия Эдгаровна Плешивецца, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Александр Александрович Афиногентов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры трубопроводного транспорта.

Андрей Геннадьевич Мандра, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматики и управления в технических системах.

ляет считать перспективным множественное применение представленных результатов в различных нефтеносных регионах Российской Федерации, где рост образования промышленных отходов имеет тяжелые и необратимые экологические последствия.

Ключевые слова: *промышленные отходы, ресурсная ценность, ресурсный потенциал, ресурсосбережение, экологическая безопасность, многофакторный анализ, Data Envelopment Analysis, нефтегазовый комплекс.*

Введение

По объемам добычи нефти и газа Россия входит в лидирующую тройку стран мира вместе с США и Саудовской Аравией, а нефтегазовый комплекс (НГК) РФ занимает ключевую позицию по влиянию на экономику страны. Однако географические особенности России, отстающее от передовых стран технологическое оснащение мест добычи и переработки, а также отсутствие норм и правил бережного отношения к ресурсам на предприятиях НГК и недостаточно развитая культура обращения с промышленными отходами (ПО) не позволяют добиться в ближайшей перспективе целей устойчивого развития [1].

В процессе добычи, транспортировки и переработки углеводородов потери нефти и нефтепродуктов в виде нефтесодержащих отходов (НСО), которые относятся к ПО, ежегодно составляют от 6 до 8 млн т [2, 3]. Низкий уровень переработки ПО в России (около 10 %) по сравнению с лидирующими европейскими странами, в которых уровень переработки достигает 90 %, приводит к стремительному росту накопления отходов. Накопленный объем таких отходов удваивается каждые 5–7 лет, а возникающие при этом экологические проблемы становятся критическими и требуют срочного решения. Кроме того, значительную часть производственного цикла переработки ПО составляют энерго- и ресурсоемкие технологические процессы, негативно влияющие на окружающую среду [4].

В соответствии с установившимися тенденциями устойчивого развития и декарбонизации в отрасли обращения с отходами происходит переход от концепции управления отходами к концепции управления ресурсами в рамках экономики замкнутого цикла (ЭЗЦ) [5]. ЭЗЦ направлена на повышение эффективности использования ресурсов и внедрение производственных моделей замкнутого цикла, а особое внимание в ней уделяется промышленным отходам для достижения наилучшего баланса между целями экономики, защитой окружающей среды и интересами общества [6–8]. В некоторых европейских странах введены ограничения на захоронение определенных материалов, которые послужили стимулом для поиска более рационального использования ПО в концепции ЭЗЦ [9].

Эффективность обращения с ПО в рамках ЭЗЦ определяется ценностью ресурсов, полученных из отходов. Ресурсная ценность может рассматриваться как комплексный количественный критерий, отражающий содержание ценных для вторичной переработки ресурсов и оцениваемый по совокупности разнородных показателей: содержанию «полезных» углеводородов и «вредных» механических и минеральных примесей, серы, асфальтенов, загрязненной воды [10, 11]. При использовании альтернативной оценки ресурсной ценности [12] применяются экологические показатели, которые включают выбросы углерода [13] и загрязняющие вещества в воздухе, воде и почве [14, 15], энергетические [16], социальные, экономические и интегральные показатели эффективности [17], повышение которых является актуальной задачей.

Ресурсная ценность может учитываться при определении ресурсного потенциала отходов [11, 18, 19], который является комплексным количественным показателем ресурсосберегающего эффективного вторичного использования отходов после рекуперации, регенерации и(или) рециклинга. Одновременно с ресурсным потенциалом отходов может определяться ресурсный потенциал технологий переработки, который является комплексным количественным показателем ресурсосбережения с учетом ресурсной ценности ПО.

Эффективность и экологическая безопасность системы переработки отходов НГК [20] может быть оценена путем проведения многофакторного анализа на основе метода Data Envelopment Analysis (DEA) [21]. Однако предложенный подход не учитывает потенциал ресурсосбережения в системе переработки отходов, что уменьшает эффективность использования ресурсов и возможность достижения уровня «нулевых» отходов.

Для достижения целей устойчивого развития экономики и ее декарбонизации необходимо пересмотреть подходы к принятию решений в области обращения ПО с позиций максимального ресурсосбережения и экологической безопасности.

В статье предлагается новый подход к анализу ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки ПО предприятий НГК на основе DEA-метода. Основным его отличием от известных подходов [22, 23] является одновременный учет ресурсной ценности отходов, ресурсного потенциала и экологической безопасности в системе переработки отходов. Результаты многофакторного анализа могут быть использованы в системе поддержки принятия решений, что позволит эффективно использовать ресурсы и снизить вредное влияние процессов переработки ПО на окружающую среду.

В статье представлен разработанный алгоритм многофакторного анализа ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки ПО и результаты апробации предлагаемого подхода на примере системы переработки НСО, включающей 14 технологий и 90 хранилищ НСО.

Многофакторный анализ на основе модели Super-Efficiency DEA-метода

Основу предлагаемого в статье подхода составляет известная модель Super-Efficiency DEA-метода [24], которая позволяет определить наилучший объект сравнения в анализируемой группе.

Сравнение Z объектов по показателю эффективности S_z , $z = \overline{1, Z}$ приводит к формулировке задачи поиска максимума целевой функции

$$S_z(X_z, Y_z) = \frac{\sum_{j=1}^J \bar{u}_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H \bar{v}_{iz} x_{iz}} \rightarrow \max_{\bar{U}, \bar{V} \in G} \quad (1)$$

при условии

$$\frac{\sum_{j=1}^J \bar{u}_{jz} y_{jz}}{\sum_{i=1}^H \bar{v}_{iz} x_{iz}} \leq 1 \forall \left(\begin{array}{l} z = \overline{1, Z}; z \neq k; j = \overline{1, J}; \\ i = \overline{1, H}; \bar{u}_{jz} > 0; \bar{v}_{iz} > 0 \end{array} \right), \quad (2)$$

где $\bar{U} = (\bar{u}_{jz})$, $j = \overline{1, J}$; $\bar{V} = (\bar{v}_{iz})$, $i = \overline{1, H}$ – весовые коэффициенты, которые ха-

рактизируют относительный вклад в оценку S_z каждого из выходов y_{jz} , $j = \overline{1, J}$, положительно влияющих на оценку S_z , и каждого из входов x_{iz} , $i = \overline{1, H}$, отрицательно влияющих на оценку S_z , соответственно.

Размерность векторов входных $X = (x_{iz})$, $i = \overline{1, H}$ и выходных $Y = (y_{jz})$, $j = \overline{1, J}$ параметров определяется числом учитываемых в сравнительном анализе значимых факторов и существованием потенциальной возможности определения их численных значений для всех объектов сравнения.

Векторы весовых коэффициентов в задаче математического программирования (ЗМП) (1), (2) являются неизвестными, за исключением коэффициентов $\bar{u}_{jk}$ и $\bar{v}_{ik}$, которые получены на основе решения ЗМП по базовой CCR модели DEA-метода [23] для выходных и входных параметров k -го объекта сравнения соответственно, с максимальным значением оценки эффективности $F_k = 1$; k – порядковый номер объекта сравнения со значением оценки $F_k = 1$, $k = \overline{1, P}$ в анализируемой группе из Z объектов, которые исключаются из ограничения (2), где P – число объектов сравнения со значением оценки эффективности $F_k = 1$.

Результатом решения ЗМП (1), (2) являются относительные оценки эффективности S_z , $z = \overline{1, Z}$, значения которых изменяются в интервале $(0, \infty)$. Объект, имеющий максимальную оценку S_z относительно целевой функции (1), считается наилучшим в анализируемой группе по выбранным параметрам сравнения.

На основе последовательного решения ЗМП (1), (2) для различных параметров сравнения с учетом поставленных целей анализа и полученных относительных оценок эффективности S_z формируется алгоритм многофакторного анализа, который позволяет определять базовые решения по управлению системой переработки НСО.

Алгоритм многофакторного анализа ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки промышленных отходов

Описанный выше подход был распространен авторами на новую предметную область актуальных инженерных приложений, связанных с проблемами переработки нефти [20], нефтесодержащих [25] и техногенных отходов [26].

Основой рассматриваемого в статье алгоритма анализа объектов системы переработки НСО (рис. 1), включающего 6 последовательных этапов, является разработанная авторами методика последовательного решения взаимосвязанных задач многофакторного сравнения объектов по разнородным критериям качества, отличающихся новыми формулировками сопутствующих ЗМП. В качестве объектов сравнения рассматриваются хранилища НСО и технологии их переработки.

На первом этапе осуществляется сбор и обработка информации на основе разработанных принципов классификации, систематизации и анализа ее качества (полнота, точность, достоверность, актуальность, согласованность). Обработанная информация в виде характеристик объектов системы переработки НСО является исходной для решения ЗМП 1, 2.1, 2.2, 3.1 и 3.2 (см. рис. 1).

На втором этапе решается задача анализа ресурсной ценности отходов в N хранилищах системы переработки НСО (ЗМП 1), сформулированная в виде (1), (2) [10]. Основными входными параметрами, уменьшающими ресурсную цен-

ность НСО в хранилищах, являются удельное содержание воды, асфальтенов и смол, механических и минеральных примесей, серы (входы 1–4 на рис. 1) Выходными параметрами, характеризующими ресурсную ценность НСО в хранилищах, являются средневзвешенное содержание светлых углеводородов и отношение массы светлых углеводородов к суммарной массе вредных примесей и воды (выходы 5–6, рис. 1). Результатом решения ЗМП 1 в виде (1), (2) являются относительные оценки S_n^1 , $n=1, \overline{N}$ ресурсной ценности НСО. Наибольшую ресурсную ценность в анализируемой группе из N хранилищ имеют отходы, содержащиеся в n -ом хранилище и имеющие максимальную оценку S_n^1 , которая показывает степень пригодности отходов к использованию в качестве материальных ресурсов для дальнейшей переработки.

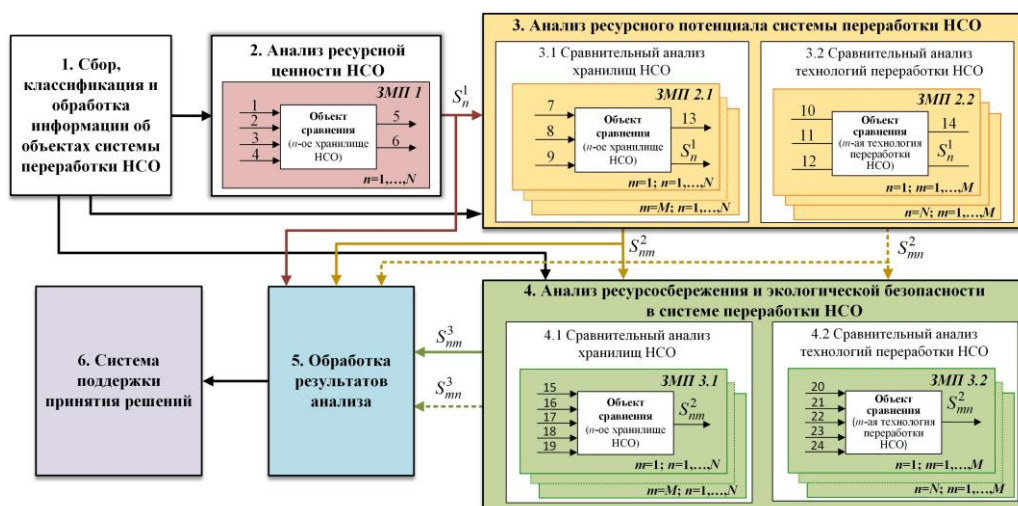


Рис. 1. Алгоритм многофакторного анализа ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки НСО

На третьем этапе определяется ресурсный потенциал для двух видов объектов сравнения в анализируемой системе переработки НСО: хранилищ (ЗМП 2.1) и технологий переработки НСО (ЗМП 2.2) [18].

Ресурсный потенциал n -го хранилища характеризует комплексный количественный показатель возможности эффективного вторичного использования содержащихся в нем отходов при их переработке с помощью применения конкретной технологии. Ресурсный потенциал m -ой технологии характеризует степень эффективности ее применения для вторичной переработки отходов в определенном хранилище.

Задачи анализа ресурсного потенциала системы переработки НСО (ЗМП 2.1 и 2.2) также формулируются в виде (1), (2). Входными параметрами являются длительность переработки отходов, масса реагентов и расход энергии (топлива) (входы 7–9 и 10–12 на рис. 1). Выходными параметрами являются масса полезных продуктов рециклинга (выходы 13 и 14, см. рис. 1) и оценка S_n^1 , $n=1, \overline{N}$ ресурсной ценности хранилища НСО, полученная на основе решения ЗМП 1 на втором этапе.

Решение ЗМП 2.1 позволяет определить относительные оценки S_{nm}^2 , $n = \overline{1, N}$, $m = \overline{1, M}$, $m = \overline{1, M}$ ресурсного потенциала n -го хранилища при переработке находящихся в нем отходов с помощью m -ой технологии. Анализ оценок S_{nm}^2 ресурсного потенциала позволяет выявить, какое из N хранилищ в анализируемой системе обладает наибольшим ресурсным потенциалом при применении m -ой из M технологий переработки. Аналогично в результате решения ЗМП 2.2 определяются относительные оценки S_{mn}^2 , $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$ ресурсного потенциала m -ой технологии для переработки НСО в n -ом хранилище. Анализ оценок S_{mn}^2 ресурсного потенциала позволяет выявить наилучшую m -ую технологию для переработки отходов в каждом n -ом из N анализируемых хранилищ в рассматриваемой системе переработки НСО.

На четвертом этапе решаются комплексные задачи многофакторного анализа ресурсосбережения и экологической безопасности в системе переработки ПО для двух типов объектов анализируемой системы: хранилищ и технологий переработки НСО (ЗМП 3.1 и ЗМП 3.2 на рис. 1). Ресурсосбережение в системе переработки НСО заключается в эффективном и экономном использовании ресурсов при переработке с учетом ресурсного потенциала отходов и применяемой для их переработки технологии. Экологическая безопасность в системе переработки НСО достигается за счет минимизации вредных для окружающей среды выбросов и объемов непереработанных отходов.

Входными параметрами являются валовые выбросы парниковых газов, сернистого ангидрида и сажи, масса непереработанной части минеральных и механических примесей и образовавшейся загрязненной воды в процессе вторичной переработки (входы 15–19 и 20–24 на рис. 1). Выходными параметрами являются оценки S_{nm}^2 и S_{mn}^2 , $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$ ресурсного потенциала, полученные в результате решения ЗМП 2.1 и ЗМП 2.2 соответственно.

В результате решения ЗМП 3.1, сформулированной в виде (1), (2), определяются относительные комплексные многофакторные оценки S_{nm}^3 , $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$ ресурсосбережения и экологической безопасности при переработке отходов в анализируемых хранилищах системы. Анализ комплексных оценок S_{nm}^3 позволяет выявить наилучшее n -ое хранилище, переработка НСО в котором с помощью каждой m -ой из анализируемой группы M технологий осуществляется с максимальным ресурсосбережением и экологической безопасностью в системе.

Аналогично в результате решения ЗМП 3.2, сформулированной в виде (1)–(2), определяются относительные комплексные многофакторные оценки S_{mn}^3 , $m = \overline{1, M}$, $n = \overline{1, N}$ ресурсосбережения и экологической безопасности при использовании m -ой технологии для переработки НСО в каждом n -ом хранилище. Анализ комплексных оценок S_{mn}^3 позволяет выявить наилучшую m -ую технологию для переработки НСО в каждом n -ом из N хранилищ с максимальным ресурсосбережением и экологической безопасностью в системе переработки.

На пятом этапе алгоритма происходит обработка полученных результатов многофакторного анализа и передача информации в систему поддержки принятия решений (шестой этап).

Результаты

В результате применения разработанного алгоритма проведен многофакторный анализ системы переработки НСО, включающей $N = 90$ хранилищ нефтесодержащих жидких отходов ($n = \overline{1,8}$ – нефтешламовые амбары; $n = \overline{9,23}$ – илонакопители; $n = \overline{24,59}$ – нефтеловушки; $n = \overline{60,84}$ – шламонакопители; $n = \overline{85,90}$ – обвалование свечей аварийного сброса) и $M = 14$ потенциально возможных технологий их переработки (см. таблицу), расположенных в пределах одного региона Российской Федерации.

Характеристики технологий переработки жидких НСО

m	Название технологии (установки)	Метод/Способ переработки	Производительность (по паспорту)	Наименование продукта вторичной переработки
1	МегаМакс	Физико-химический метод / рекуперация	7–15 м ³ /ч	Нефть
2	Минералоль	Пиролиз с рекуперацией	2 м ³ /ч	Нефть, сухой остаток
3	COMPEX НТР 2,2	Пиролиз	0,2 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
4	COMPEX НТР 20	Пиролиз	2–2,3 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
5	Holo-Scru 10	Термический метод / рекуперация	0,1–20 м ³ /ч	Нефть
6	Electric-Scru 10	Термический метод / рекуперация	0,1–20 м ³ /ч	Нефть
7	Установка пиролиза Фортан – 4	Метод полунепрерывного пиролиза жидкого сырья	0,1–0,5 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
8	Установка пиролиза Фортан – 20	Метод полунепрерывного пиролиза жидкого сырья	0,5–2,5 т/ч	Пиролизный газ, сухой остаток
9	Фортан ТМ 200	Термический метод / рекуперация	5,2–36 м ³ /ч	Жидкое печное топливо, технический углерод, газ
10	ПУ-01	Технология обезвреживания НСО методом реагентного капсулирования	2 м ³ /ч	Зола, горячая вода, пар, электроэнергия
11	УПБШ-10С/УПБШ-10СД	Физико-химический метод / рекуперация	10–15 м ³ /ч	Грунтово-шламовая смесь для отсыпки дорог 3-й категории
12	УОГ-15-В2ГЦ2-10	Физико-химический метод / рекуперация	15–20 м ³ /ч	Нефть
13	Eco-TechRecOil Oy	Физико-химический метод	30–50 м ³ /ч	Товарный нефтепродукт
14	ИнноТек	Физико-химический метод / рекуперация	0,3–0,35 т/ч	Жидкое печное топливо, зола

Результаты решения ЗМП 1, 2.1 и 3.1 представлены на рис. 2 в виде оценок S_n^1 ресурсной ценности, S_{n2}^2 ресурсного потенциала, а также комплексных многофакторных оценок S_{n2}^3 ресурсосбережения и экологической безопасности применения технологии № 2 (Минералоль) для переработки отходов в анализируемых $n = \overline{1,90}$ хранилищах системы соответственно.

Технология № 2 выбрана для демонстрации результатов расчетов, поскольку она имеет максимальную оценку $S_{52}^3 = 2.7$ ресурсосбережения и экологической безопасности переработки отходов в хранилище № 5 среди всех анализируемых хранилищ и технологий системы переработки НСО. На рис. 2 показаны ранжированные оценки S_{n2}^3 для 10 наилучших и 10 наихудших хранилищ с учетом переработки накапливаемых в них отходов с помощью технологии № 2.

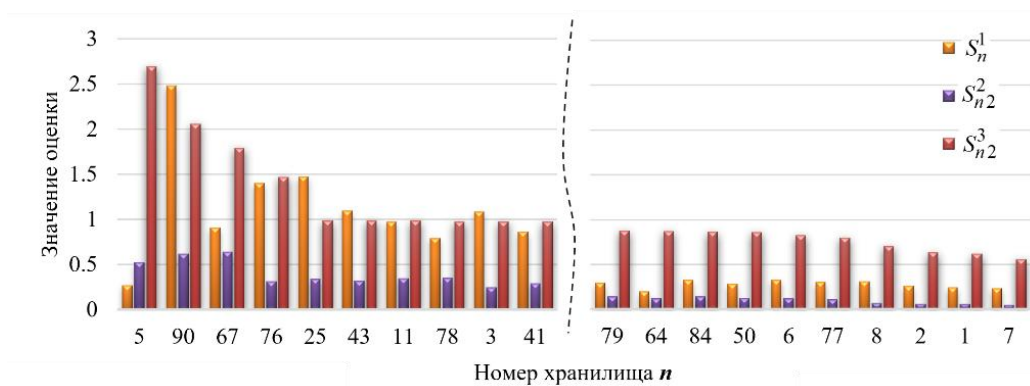


Рис. 2. Оценки ресурсной ценности, ресурсного потенциала, ресурсосбережения и экологической безопасности при переработке технологией № 2 отходов в хранилищах системы

Анализ результатов расчета оценок, представленных на рис. 2, показал, например, что для хранилища № 90, имеющего максимальную ресурсную ценность в анализируемой системе переработки с оценкой $S_{90}^1 = 2.48$, ресурсный потенциал имеет невысокое значение $S_{902}^2 = 0.62$, но по оценке $S_{902}^3 = 2.06$ ресурсосбережения и экологической безопасности хранилище № 90 при переработке технологией № 2 занимает 2-е место в группе (см. рис. 2).

Результаты решения ЗМП 2.2 и 3.2 представлены на рис. 3 в виде оценок S_{n2}^2 ресурсного потенциала и ранжированных комплексных многофакторных оценок S_{n2}^3 ресурсосбережения и экологической безопасности различных технологий при переработке отходов в хранилище № 5. Выбор хранилища № 5 для демонстрации результатов расчетов связан с тем, что оценки в системе переработки, полученные по результатам решения всех ЗМП, входящих в алгоритм (см. рис. 1), являются максимальными для этого хранилища и технологий, применяемых для переработки НСО в нем ($S_{52}^3 = S_{25}^3 = 2.7$).

Представленные на рис. 2 и 3 оценки имеют значение для принятия локальных решений для управления системой переработки НСО и позволяют определить оптимальные пары «хранилище НСО – технология переработки» по крите-

рию ресурсосбережения и экологической безопасности. Для принятия комплексных управленческих решений, когда необходимо оценить эффективность переработки всей системы, можно использовать анализ обобщенных оценок SN_m^3 ресурсосбережения и экологической безопасности технологий для N хранилищ в составе системы переработки:

$$SN_m^3 = \sum_{n=1}^N S_{mn}^3, \quad m = \overline{1, M}. \quad (3)$$

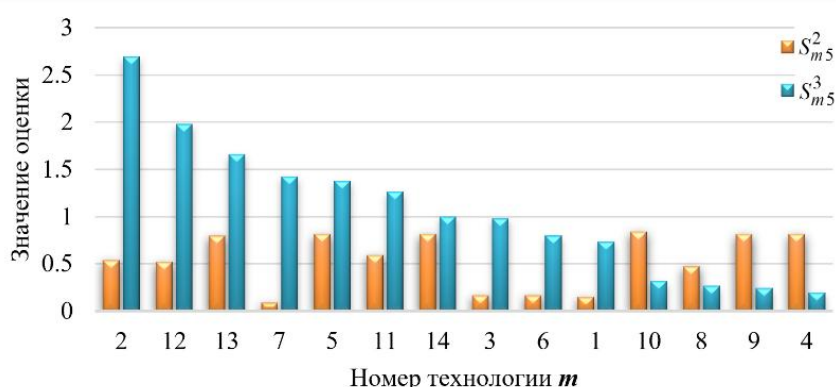


Рис. 3. Оценки ресурсного потенциала, ресурсосбережения и экологической безопасности технологий при переработке отходов в хранилище № 5

На рис. 4 представлены результаты анализа решений ЗМП 3.2 в виде ранжированных обобщенных оценок SN_m^3 ресурсосбережения и экологической безопасности технологий переработки отходов для всех $N=90$ хранилищ.

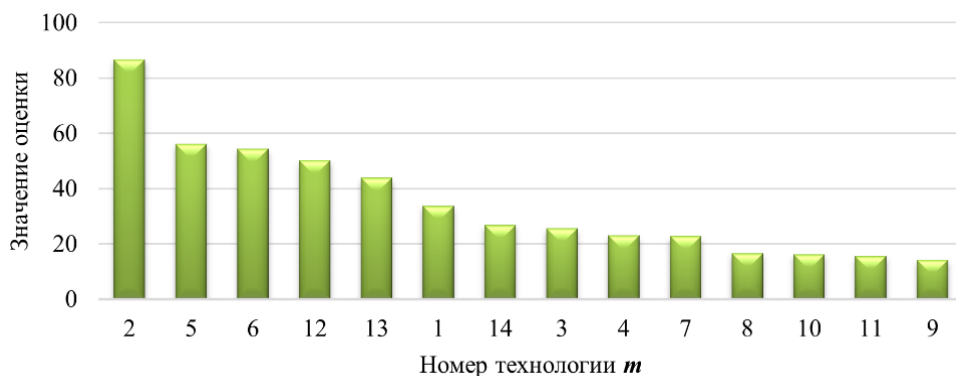


Рис. 4. Обобщенные оценки SN_m^3 ресурсосбережения и экологической безопасности технологий при переработке всех отходов в системе

Анализ полученных результатов (см. рис. 4) свидетельствует о высокой эффективности технологии № 2 с максимальной обобщенной оценкой $SN_2^3 = 86.65$ в системе, обеспечивающей максимальное ресурсосбережение и экологическую безопасность при переработке отходов во всех хранилищах.

Заключение

Представленная статья продолжает направление исследований по системному анализу и многофакторному оцениванию эффективности функционирования систем переработки промышленных отходов с использованием DEA-метода по разнородным критериям качества (ресурсная ценность [10], ресурсный потенциал [11, 18, 23], экологическая безопасность [27]).

Данный подход распространяется в статье на задачи многофакторного анализа ресурсосбережения и экологической безопасности системы переработки промышленных отходов предприятий НГК, сформулированные на основе модели суперэффективности DEA-метода. Для реализации предлагаемого подхода разработан соответствующий алгоритм и проведена его апробация на существующей системе переработки НСО в отдельном регионе РФ. Полученные относительные оценки ресурсной ценности хранилищ отходов, ресурсного потенциала, ресурсосбережения и экологической безопасности позволяют провести многофакторный анализ разнородных сравнительных параметров функционирования системы переработки без введения дополнительных удельных, усредненных или масштабирующих коэффициентов, что является весомым преимуществом DEA-метода перед альтернативными методами многокритериального сравнения.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования результатов анализа в системе поддержки принятия решений на локальном и стратегическом уровне управления, что позволит приблизить выполнение целей устойчивого развития экономики РФ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. United Nations Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: draft resolution referred to the United Nations summit for the adoption of the post-2015 development agenda by the General Assembly at its 69th session. 2015. 35 p.
2. Трубникова Е. 7,75 млрд тонн: в России установлен абсолютный рекорд по образованию производственных отходов. 2020 [Электронный ресурс]. URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2020/rekord-proizvodstv-otkhod/> (дата обращения: 11.10.2024).
3. Окружающая среда. Отходы производства и потребления // Федеральная служба государственной статистики РФ [Электронный ресурс]. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (дата обращения: 21.04.2024).
4. Мхитаров Р.А. Технологии и оборудование для переработки отходов нефтепереработки, нефтешламов и загрязненных углеводородами грунтов // Нефть. Газ. Новации. 2013. No. 10. С. 72–76.
5. Ashby M.F. The Vision // Materials and Sustainable Development. Elsevier, 2016. Pp. 211–239.
6. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 114. Pp. 11–32.
7. Velenturf A.P.M., Purnell P. Principles for a sustainable circular economy // Sustainable Production and Consumption. 2021. Vol. 27. Pp. 1437–1457.
8. Achi C.G., Snyman J., Ndambuki J.M., Kupolati W.K. Advanced Waste-to-Energy Technologies: A Review on Pathway to Sustainable Energy Recovery in a Circular Economy // Nature Environment and Pollution Technology. 2024. Vol. 23. No. 3. Pp. 1239–1259.
9. Mohamed Sultan A.A., Mativenga P.T. Sustainable Location Identification Decision Protocol (SuLIDeP) for determining the location of recycling centres in a circular economy // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 223. Pp. 508–521.
10. Pleshivtseva Yu.E., Derevyanov M.Yu., Kashirskikh D.V., Pimenov A.A., Kerov A.V., Tyan V.K. Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method // Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry. 2018. No. 11. Pp. 139–144.
11. Деревянов М.Ю. Анализ ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов с учетом переменного эффекта масштаба // Вестник Астраханского

- государственного технического университета. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 3. С. 65–75.
12. Iacovidou E., Velis C.A., Purnell P., Zwirner O., Brown A., Hahladakis J., Millward-Hopkins J., Williams P.T. Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review // *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 166. Pp. 910–938.
 13. Christensen T.H., Gentil E., Boldrin A., Larsen A.W., Weidema B.P., Hauschild M. C balance, carbon dioxide emissions and global warming potentials in LCA-modelling of waste management systems // *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*. 2009. Vol. 27. No. 8. Pp. 707–715.
 14. Allegrini E., Vadenbo C., Boldrin A., Astrup T.F. Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash // *Journal of Environmental Management*. 2015. Vol. 151. Pp. 132–143.
 15. Hu G., Feng H., He P., Li J., Hewage K., Sadiq R. Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches // *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 251. Pp. 119594.
 16. Puig R., Fullana-i-Palmer P., Baquero G., Riba J.-R., Bala A. A Cumulative Energy Demand indicator (CED), life cycle based, for industrial waste management decision making // *Waste Management*. 2013. Vol. 33. No. 12. Pp. 2789–2797.
 17. Fang K., Heijungs R., De Snoo G.R. Understanding the complementary linkages between environmental footprints and planetary boundaries in a footprint–boundary environmental sustainability assessment framework // *Ecological Economics*. 2015. Vol. 114. Pp. 218–226.
 18. Derevyanov M., Pleshivtseva Y., Afinogentov A., Mandra A., Pimenov A. Simulation and Multi-Objective Evaluation of Reuse Potential of Waste Recycling System for Oil And Gas Industry // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara: IEEE, 2019. Pp. 429–434.
 19. Derevyanov M. Analysis of the resource value and resource potential of the objects of the oil-contaminated wastes recycling system based on the DEA method // *University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series*. 2022. No. 4. Pp. 27–34.
 20. Tyukilina P.M., Krasnikov P.E., Derevyanov M.Yu., Pimenov A.A., Pleshivtseva Yu.E. Assessment of Resource Potential of Heavy Petroleum Residues by Data Envelopment Analysis // *Petroleum Chemistry*. 2019. Vol. 59. No. 11. Pp. 1207–1212.
 21. Charnes A., Cooper W.W., Lewin A.Y., Seiford L.M. *Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications*. Data Envelopment Analysis. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994. 513 p.
 22. Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A. Simulation and Evaluation of the Efficiency of Oil-contaminated Wastes Recycling System // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 459. No. 4. P. 042058.
 23. Деревянов М.Ю., Пleshивцева Ю.Э., Афиногентов А.А. Многофакторный анализ ресурсо- и энергосбережения в системе переработки техногенных отходов предприятий нефтегазового комплекса // *Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки*. 2021. № 29 (1). С. 19–35.
 24. Chen Y., Du J. Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis // *Data Envelopment Analysis: International Series in Operations Research & Management Science*. Ed. J. Zhu. Boston, MA: Springer US, 2015. Vol. 221. Pp. 381–414.
 25. Деревянов М.Ю. Анализ показателей масштабирования при оценке ресурсного потенциала объектов системы переработки нефтесодержащих отходов на основе метода DEA // *Системы анализа и обработки данных*. 2023. № 3(91). С. 47–68.
 26. Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A., Kirpichenkov S.A., Mandra A.G., Pimenov A.A. Application of data envelopment analysis for multi-criteria evaluation of system for technogenic waste recycling in oil refining industry // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1089. No. 1. Pp. 012023.
 27. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A., Pimenov A.A., Krasnikov P.E., Derevyanov M.Yu. Optimization of the Disposal System of Oily Waste According to the Criterion of Environmental Safety // *Proceedings of the International Symposium “Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research” dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019)*. Grozny, Russia: Atlantis Press, 2019. Vol. 1. Pp. 33–38.

Статья поступила в редакцию 15.08.2024 г.

ANALYZING RESOURCE SAVING AND ENVIRONMENTAL SAFETY IN OIL AND GAS WASTE PROCESSING SYSTEM TO PROVIDE SUSTAINABLE DEVELOPMENT¹

M.Yu. Derevyanov, Yu.E. Pleshivtseva, A.A. Afinogentov, A.G. Mandra

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

E-mail: mder2007@mail.ru, yulia_pl@mail.ru, pondex@yandex.ru, amandra@mail.ru

Abstract. *The problems of environmental safety and resource conservation in the processing of industrial waste at Russian oil and gas enterprises are becoming more and more significant, especially in the context of current trends focused on decarbonization and sustainable development. The growth of industrial waste is not compensated by the corresponding growth in the volume and quality of processing, since only 10% of oily waste is processed, and the rest is buried or incinerated, which has an additional harmful impact on the environment. The article proposes a new approach to multifactor analysis of resource conservation and environmental safety in the integrated processing of industrial waste from oil and gas enterprises to achieve sustainable development goals. The algorithm developed by the authors, the theoretical basis of which is the method of data envelopment analysis (DEA), determines the sequence of solving interrelated problems of multifactor comparison of objects of the waste processing system by heterogeneous quality criteria: resource value, resource potential, resource saving and environmental safety. These problems are formulated on the basis of the super-efficiency model of the DEA method as a mathematical programming problem. The presented and tested approach to multifactor analysis of resource conservation and environmental safety of the waste treatment system allows: (1) to obtain and analyze relative comparative assessments of waste storage facilities and technologies regarding heterogeneous quality criteria, and (2) forming local and general decision-making strategies that provide sustainable development goals. The proposed approach appears promising for multiple prospective applications in the oil-bearing regions of the Russian Federation, where the growth in the formation of industrial waste has severe and irreversible environmental consequences.*

Keywords: *industrial waste, resource value, resource potential, resource saving, environmental safety, multivariate analysis, Data Envelopment Analysis, oil and gas complex.*

REFERENCES

1. United Nations Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development: draft resolution referred to the United Nations summit for the adoption of the post-2015 development agenda by the General Assembly at its 69th session. 2015. 35 c.
2. Trubnikova E. 7,75 mlrd tonn: v Rossii ustanovlen absolyutnyj rekord po obrazovaniyu proizvodstvennyh othodov [7.75 billion tons: Russia has set an absolute record for the generation of industrial waste]. 2020. URL: <https://finexpertiza.ru/press-service/researches/2020/rekord-proizvodstv-otkhod/> (accessed: 11.10.2024). (In Russian).



© The Author(s), 2024

¹ The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme No. FSSE-2024-0014) as part of the state task of the Samara State Technical University.

Maksim Yu. Derevyanov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Yuliya E. Pleshivtseva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Aleksandr A. Afinogentov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

Andrey G. Mandra (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

3. Okruzhayushchaya sreda: oficial'naya statistika. Othody proizvodstva i potrebleniya [Environment: official statistics. Industrial and consumption waste] // Federal State Statistics Service of the Russian Federation. URL: <https://rosstat.gov.ru/folder/11194> (accessed: 21.04.2024). (In Russian)
4. *Mkhitarov R.A.* Tekhnologii i oborudovanie dlya pererabotki othodov neftepererabotki, nefteshlamov i zagryaznennyh uglevodorodami gruntov [Technologies and equipment for processing oil refining waste, oil sludge and hydrocarbon-contaminated soils] // Journal Oil. Gas. Innovations. 2013. No. 10. Pp. 72–76. (In Russian)
5. *Ashby M.F.* The Vision // Materials and Sustainable Development. Elsevier, 2016. Pp. 211–239.
6. *Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S.* A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems // Journal of Cleaner Production. 2016. Vol. 114. Pp. 11–32.
7. *Velenturf A.P.M., Purnell P.* Principles for a sustainable circular economy // Sustainable Production and Consumption, 2021. Vol. 27. Pp. 1437–1457.
8. *Achi C.G., Snyman J., Ndambuki J.M., Kupolati W.K.* Advanced Waste-to-Energy Technologies: A Review on Pathway to Sustainable Energy Recovery in a Circular Economy // Nature Environment and Pollution Technology. 2024. Vol. 23. No. 3. Pp. 1239–1259.
9. *Mohamed Sultan A.A., Mativenga P.T.* Sustainable Location Identification Decision Protocol (SuLIDeP) for determining the location of recycling centres in a circular economy // Journal of Cleaner Production. 2019. Vol. 223. Pp. 508–521.
10. *Pleshivtseva Yu.E., Derevyanov M.Yu., Kashirskikh D.V., Pimenov A.A., Kerov A.V., Tyan V.K.* Comparative evaluation of the reuse value of storage for oil-contaminated waste based on DEA method // Neftyanoe khozyaystvo – Oil Industry, 2018. No. 11. Pp. 139–144.
11. *Derevyanov M.Yu.* Analiz resurnogo potentsiala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchih othodov s uchetom peremennogo effekta masshtaba [Analysis of the resource potential of oil-containing waste processing system facilities taking into account variable economies of scale] // Bulletin of the Astrakhan State Technical University. Series: Management, computer technology and information science. 2023. No. 3. Pp. 65–75. (In Russian)
12. *Iacovidou E., Velis C.A., Purnell P., Zwirner O., Brown A., Hahladakis J., Millward-Hopkins J., Williams P.T.* Metrics for optimising the multi-dimensional value of resources recovered from waste in a circular economy: A critical review // Journal of Cleaner Production. 2017. Vol. 166. Pp. 910–938.
13. *Christensen T.H., Gentil E., Boldrin A., Larsen A.W., Weidema B.P., Hauschild M.* C balance, carbon dioxide emissions and global warming potentials in LCA-modelling of waste management systems // Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy. 2009. Vol. 27. No. 8. Pp. 707–715.
14. *Allegrini E., Vadenbo C., Boldrin A., Astrup T.F.* Life cycle assessment of resource recovery from municipal solid waste incineration bottom ash // Journal of Environmental Management. 2015. Vol. 151. Pp. 132–143.
15. *Hu G., Feng H., He P., Li J., Hewage K., Sadiq R.* Comparative life-cycle assessment of traditional and emerging oily sludge treatment approaches // Journal of Cleaner Production. 2020. Vol. 251. Pp. 119594.
16. *Puig R., Fullana-i-Palmer P., Baquero G., Riba J.-R., Bala A.* A Cumulative Energy Demand indicator (CED), life cycle based, for industrial waste management decision making // Waste Management. 2013. Vol. 33. No. 12. Pp. 2789–2797.
17. *Fang K., Heijungs R., De Snoo G.R.* Understanding the complementary linkages between environmental footprints and planetary boundaries in a footprint–boundary environmental sustainability assessment framework // Ecological Economics. 2015. Vol. 114. Pp. 218–226.
18. *Derevyanov M., Pleshivtseva Y., Afinogentov A., Mandra A., Pimenov A.* Simulation and Multi-Objective Evaluation of Reuse Potential of Waste Recycling System for Oil And Gas Industry // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara: IEEE, 2019. Pp. 429–434.
19. *Derevyanov M.* Analysis of the resource value and resource potential of the objects of the oil-contaminated wastes recycling system based on the DEA method // University News. North-Caucasian Region. Technical Sciences Series. 2022. No. 4. Pp. 27–34.
20. *Tyukilina P.M., Krasnikov P.E., Derevyanov M.Yu., Pimenov A.A., Pleshivtseva Yu.E.* Assessment of Resource Potential of Heavy Petroleum Residues by Data Envelopment Analysis // Petroleum Chemistry. 2019. Vol. 59. No. 11. Pp. 1207–1212.

21. Charnes A., Cooper W.W., Lewin A.Y., Seiford L.M. Data Envelopment Analysis: Theory, Methodology, and Applications. Data Envelopment Analysis. Dordrecht: Springer Netherlands, 1994. 513 p.
22. Derevyanov M.Y., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A. Simulation and Evaluation of the Efficiency of Oil-contaminated Wastes Recycling System // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 459. No. 4. Pp. 042058.
23. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A. Mnogofaktornyj analiz resurso- i energosberezheniya v sisteme pererabotki tekhnogennyh othodov predpriyatij neftegazovogo kompleksa [Multifactorial analysis of resource and energy conservation in the system of processing technogenic waste of oil and gas enterprises] // Bulletin of Samara State Technical University. Series "Engineering Sciences". 2021. No. 29 (1). Pp. 19–35. (In Russian)
24. Chen Y., Du J. Super-Efficiency in Data Envelopment Analysis // Data Envelopment Analysis: International Series in Operations Research & Management Science. Ed. J. Zhu. Boston, MA: Springer US, 2015. Vol. 221. Pp. 381–414.
25. Derevyanov M.Yu. Analiz pokazatelej masshtabirovaniya pri ocenke resursnogo potentsiala ob"ektov sistemy pererabotki neftesoderzhashchih othodov na osnove metoda DEA [Analysis of scaling indicators in assessing the resource potential of objects of the oil-containing waste processing system based on the DEA method] // Data analysis and processing systems. 2023. No. 3 (91). Pp. 47–68. (In Russian)
26. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Y.E., Afinogentov A.A., Kirpichenkov S.A., Mandra A.G., Pimenov A.A. Application of data envelopment analysis for multi-criteria evaluation of system for technogenic waste recycling in oil refining industry // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2021. Vol. 1089. No. 1. Pp. 012023.
27. Derevyanov M.Yu., Pleshivtseva Yu.E., Afinogentov A.A., Pimenov A.A., Krasnikov P.E., Derevyanov M.Yu. Optimization of the Disposal System of Oily Waste According to the Criterion of Environmental Safety // Proceedings of the International Symposium "Engineering and Earth Sciences: Applied and Fundamental Research" dedicated to the 85th anniversary of H.I. Ibragimov (ISEES 2019). Grozny, Russia: Atlantis Press, 2019. Vol. 1. Pp. 33–38.

Original article submitted 15.08.2024

УДК 662.767

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ КАТАЛИТИЧЕСКОГО ПИРОЛИЗА МЕТАНА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ DEA-МЕТОДА¹

А.В. Казаринов

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

E-mail: artemrus987@gmail.com

Аннотация. Представлен комплексный анализ эффективности технологий пиролиза метана при применении различных катализаторов с использованием DEA-метода. Исследование основано на обширном наборе экспериментальных данных, полученных в лабораторных условиях. Применение DEA-метода позволило выявить ключевые факторы, влияющие на производительность процесса пиролиза и отражающие затраты на реализацию процесса, основные технологические параметры и характеристики катализаторов. Особое внимание уделено влиянию компонентного состава катализаторов на эффективность процесса пиролиза метана. Высокоэффективные катализаторы показывают значительное увеличение скорости реакции и снижение энергетических затрат.

Применение DEA-метода позволило определить, что к набору факторов, являющихся наиболее значимыми для повышения эффективности, следует отнести носитель катализатора, температурные условия и состав активных компонентов. Анализ выявил, что стабильность катализатора и его способность поддерживать высокую активность на протяжении времени проведения реакции являются особенно важными для промышленного применения.

Анализ результатов позволил оценить относительную эффективность каждого катализатора и выявить оптимальные сочетания условий реакции. Установлено, что катализаторы с высоким содержанием никеля (более 80 %) на носителе Al_2O_3 демонстрируют наибольшую эффективность при температуре около 750 °С, достигая высоких значений конверсии метана и выхода водорода. Катализаторы на основе SiO_2 показывают высокую начальную активность, но склонны к дезактивации или зауглероживанию со временем, что, в свою очередь, заметно снижает их эффективность в длительных процессах.

Полученные результаты обосновывают необходимость оптимального выбора состава катализатора и условий проведения реакции для повышения эффективности и экономической целесообразности процесса пиролиза метана. Исследование демонстрирует потенциал метода DEA как инструмента для комплексной оценки и оптимизации технологических процессов производства водорода и подчеркивает перспективность дальнейшего развития и внедрения технологии пиролиза метана



© Автор(ы), 2024

¹ Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема No FSSE-2024-0014) в рамках государственного задания Самарского государственного технического университета.

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

в промышленном производстве водорода как одного из основных энергоносителей при переходе к низкоуглеродной энергетике.

Ключевые слова: *Data Envelopment Analysis, многофакторный анализ, эффективность, пиролиз метана, производство водорода, анализ, катализаторы.*

Введение

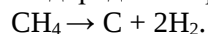
Актуальность темы. Глобальное изменение климата и растущие экологические проблемы, связанные с использованием ископаемых видов топлива, стимулируют поиск устойчивых и экологически чистых источников энергии. Водород является одним из наиболее перспективных энергоносителей будущего благодаря своей высокой энергоемкости, универсальности применения и экологической чистоте при использовании, поскольку при его сжигании нет выбросов углекислого газа, а единственным побочным продуктом является вода. Водородная энергетика рассматривается как один из ключевых элементов в стратегии перехода к низкоуглеродной экономике и достижения целей устойчивого развития [1–4].

Однако несмотря на очевидные преимущества, широкомасштабное внедрение водородных технологий сдерживается из-за отсутствия экономически эффективных и экологически устойчивых методов производства водорода. В настоящее время в большей части мирового производства водорода, основанной на ископаемых видах топлива, таких как природный газ, нефть и уголь, используются процессы паровой конверсии метана, частичного окисления и газификации угля [5, 6]. Это связано с экономическими факторами, поскольку производство водорода из ископаемого топлива значительно дешевле других методов [7]. Однако такие методы производства водорода сопровождаются значительными выбросами парниковых газов и потребляют большое количество энергии [8, 9].

Технология пиролиза метана привлекает внимание как потенциально более экологически чистый и энергоэффективный метод получения водорода. В процессе пиролиза метана происходит термическое разложение метана на водород и твердый углерод без прямых выбросов CO₂, что делает этот метод особенно перспективным в контексте перехода к низкоуглеродной экономике.

В сравнении с традиционными методами производства водорода, такими как паровая конверсия метана, пиролиз метана показывает существенное снижение удельных энергозатрат. Помимо этого, технология обладает преимуществом, заключающимся в возможности производства твердого углерода в качестве побочного продукта, что открывает дополнительные возможности для его коммерциализации [10, 11].

Технология пиролиза метана. Пиролиз метана представляет собой термическое разложение метана при высоких температурах (700–1500 °C) в условиях отсутствия кислорода с образованием водорода и твердого углерода:



Преимуществом этого процесса является то, что углерод из метана не окисляется до CO₂, а выделяется в виде элементарного углерода, что устраняет прямые выбросы CO₂ в атмосферу. Твердый углерод может быть использован на различные нужды, однако в настоящий момент рынок углерода ограничен [12]. Технология пиролиза метана обладает высоким потенциалом повышения эффективности и экологической устойчивости в процессах производства водорода.

Пиролиз метана является эндотермическим процессом, требующим значительных энергозатрат на поддержание высокой температуры. Применение катализаторов может существенно снизить температуру реакции и увеличить выход

водорода. По этой причине разработка эффективных катализаторов, устойчивых к осаждению углерода и обеспечивающих высокую активность и селективность, является важным направлением исследований в данной области. Эта технология не выведена на промышленный уровень, но в разных странах ведутся активные исследования по данной теме [13].

Несмотря на потенциальные преимущества, развитие технологии пиролиза метана сталкивается с рядом технических и экономических вызовов. К основным направлениям совершенствования технологии относятся снижение относительно высоких энергозатрат для поддержания температурного режима без использования катализаторов, эффективная утилизация или коммерциализация твердого углерода, оптимальный выбор и определение состава катализаторов, а также масштабирование процессов для промышленного применения.

Роль катализаторов в процессе пиролиза метана. Катализаторы играют ключевую роль в процессе пиролиза метана. Использование металлических катализаторов, таких как никель, медь, кобальт и их сплавы, позволяет снизить температуру реакции до 500–700 °C и увеличить скорость образования водорода [14]. Однако проблемы деградации катализаторов из-за осаждения углерода остаются актуальными.

Перспективным направлением является разработка катализаторов на основе благородных металлов (например, платины, палладия и др.), обладающих высокой стабильностью при продолжительном времени реакции, но их применение ограничено высокой стоимостью. Перспективные исследования в области наноструктурированных катализаторов и использование промоторов и модификаторов поверхности могут открывать новые возможности для повышения эффективности и экономической привлекательности процесса.

Значимость анализа эффективности. Для успешного промышленного внедрения технологии пиролиза метана необходимо проведение комплексной оценки ее эффективности с учетом технических, экономических и экологических аспектов. Метод Data Envelopment Analysis (DEA) является мощным инструментом для оценки относительной эффективности производственных единиц при наличии множества входных и выходных параметров [15]. DEA-метод позволяет не только получить оценки эффективности каждого объекта сравнения, но и выявить факторы, влияющие на производительность, что оказывается особенно важным при проведении оптимизации процессов и стратегическом планировании их развития.

Применение DEA для оценки технологий производства водорода позволяет сравнить различные технологические подходы, выявить лучшие параметры, технологические режимы и определить направления для их оптимизации [16]. В частности, анализ эффективности процесса пиролиза с учетом применения различных катализаторов и технологических параметров потенциально позволит определить оптимальные решения для промышленного внедрения технологии пиролиза метана.

Цель и задачи исследования. Цель данной статьи – проведение комплексного анализа эффективности технологии пиролиза метана и используемых катализаторов на основе DEA-метода, разработка рекомендаций по ее оптимизации и определение направления дальнейших исследований на пути к промышленному внедрению технологии.

Задачи исследования:

- сбор и систематизация данных о работе установки пиролиза метана, включая информацию о типах катализаторов, температуре реакции, расходе метана и других технологических параметрах;
- выбор и обоснование выбора модели DEA-метода для проведения анализа;
- выявление ключевых факторов, влияющих на эффективность проведения процесса; проведение анализа эффективности с учетом выявленных ключевых факторов;
- разработка рекомендаций по оптимизации процесса пиролиза метана, включая выбор катализаторов, оптимальные технологические параметры и т. д.;
- оценка потенциала промышленного внедрения технологий пиролиза метана и ее влияние на развитие водородной энергетики и переход к низкоуглеродной экономике.

Источники данных

В ходе экспериментального исследования, проведенного с использованием специализированной аппаратуры, был осуществлен сбор данных функционирования установки с использованием разных катализаторов при различных технологических условиях. На рис. 1 представлена схема лабораторной установки каталитического пиролиза метана [17].

Для проведения анализа эффективности процесса пиролиза метана были обработаны и систематизированы экспериментальные данные, включающие 21 эксперимент, было проведено 247 замеров, часть которых представлена в табл. 1. В рамках проведенных экспериментов исследовались различные катализаторы и параметры проведения процесса с целью определения их влияния на эффективность процесса пиролиза. Представленные экспериментальные данные охватывают разнообразные комбинации катализаторов и параметров проведения процесса, позволяя провести всесторонний анализ влияния каждого фактора на эффективность пиролиза метана в целом. В указанных экспериментальных данных время эксперимента указано без учета времени выхода реактора на рабочий режим.

Методология и инструментарий проведения анализа

Пиролиз метана является перспективным методом получения водорода, обладающим высокой эффективностью и экологической безопасностью. Однако для оптимизации этого процесса необходимо оценить эффективность комбинаций различных условий проведения реакции и состава катализаторов, реализованных в описанных выше экспериментах. В данном контексте метод Data Envelopment Analysis (DEA) предоставляет мощный инструмент для количественной оценки эффективности технологических режимов. Возможность получения сравнительных безразмерных оценок является основной причиной выбора DEA-метода для проведения многофакторного анализа. Помимо этого, весомое преимущество данного метода для разработки алгоритма многофакторной

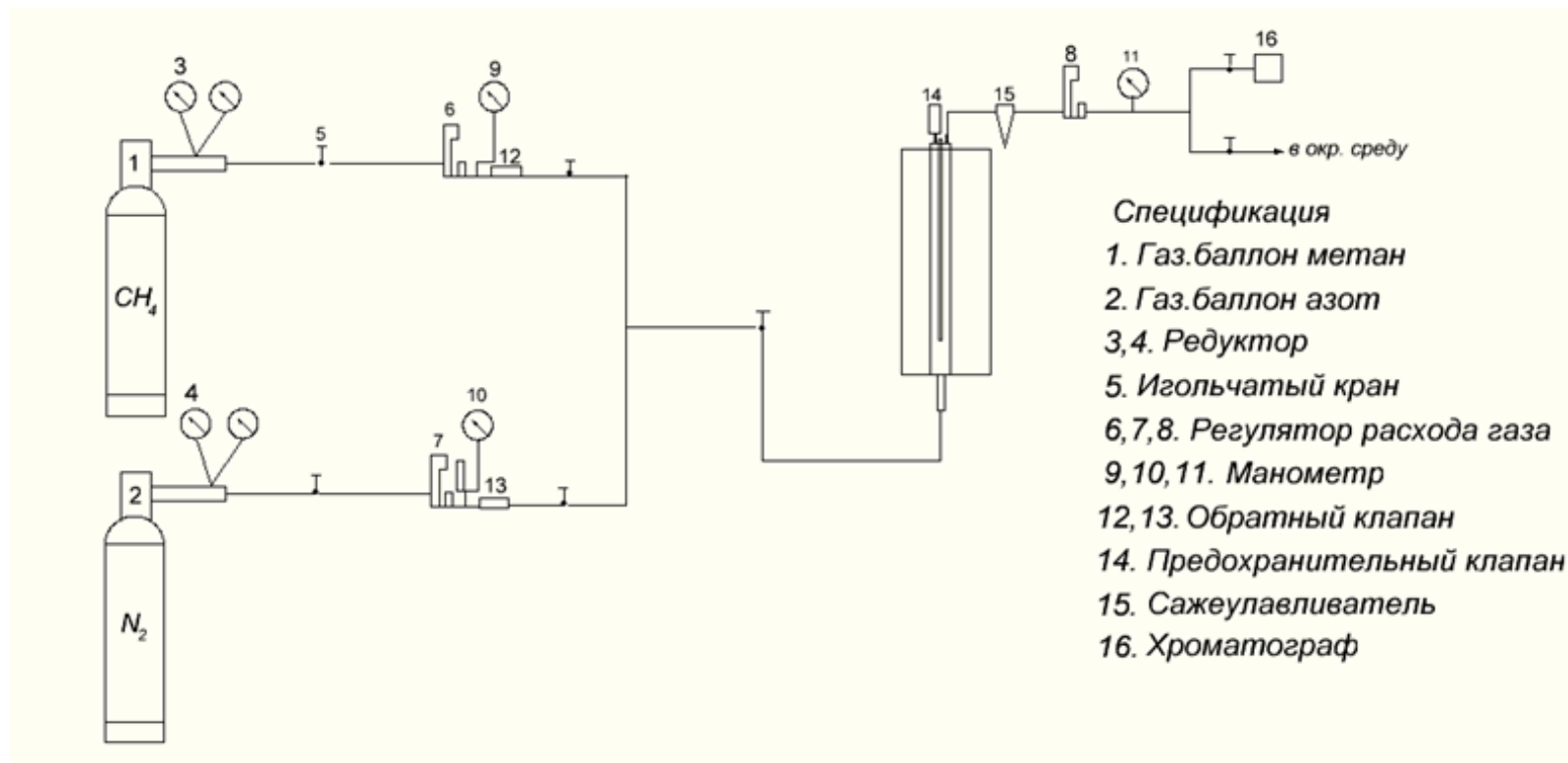


Рис. 1. Схема лабораторной установки каталитического пиролиза [17]

Таблица 1

Пример собранных экспериментальных данных

Состав и вес катализатора	№ за-мера	Темпер. в зоне реакции, °С	Давление в зоне реакции, атм.	Расход метана, л/ч	Время эксп., мин	CH ₄ , %	H ₂ , %	Конверсия CH ₄ , %	Цена катализ., руб/кг
82 Ni/8 Cu/10 Al ₂ O ₃ , 100 мг	1	550	3,4	5	0	85,1	15,01	14,09	3697,1
	2	550	3,4	5	15	86,2	15,05	13,08	3697,1
	3	550	3,4	5	30	85,9	15,07	14,1	3697,1
	4	650	3,4	5	60	60,6	41,6	39,4	3697,1
	5	650	3,4	5	75	62,2	40,1	37,8	3697,1
	6	650	3,4	5	90	63,0	40,6	37	3697,1
	7	650	3,4	5	105	62,6	40	37,4	3697,1
	8	750	3,4	5	135	32,1	69,8	67,9	3697,1
	9	750	3,4	5	150	33,1	69,4	66,9	3697,1
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
90 Ni/10 Al ₂ O ₃ , 100 мг	239	550	3,4	2	0	76,1	19	23,9	3038,3
	240	550	3,4	2	15	77,2	18,7	22,8	3038,3
	241	550	3,4	2	30	77,1	18,6	22,9	3038,3
	242	650	3,4	2	50	54,5	39,5	45,5	3038,3
	243	650	3,4	2	65	54,1	42,8	45,9	3038,3
	244	650	3,4	2	80	53,7	43,3	46,3	3038,3
	245	750	3,4	2	100	37,4	58,8	62,6	3038,3
	246	750	3,4	2	115	37,8	58,3	62,2	3038,3
	247	750	3,4	2	130	38,3	58,2	61,7	3038,3

сравнительной оценки технологических процессов пиролиза метана заключается в его широких возможностях для решения прикладных задач: использовании для оценки неограниченного числа разнородных физических факторов и легкости визуализации этих оценок в наглядной форме. Данный метод уже широко используется для получения сравнительных оценок эффективности сложных объектов, чьи относительные показатели эффективности определяются в терминах различных логистических, эксплуатационных, технико-экономических, энергетических и других неоднородных характеристик.

При этом данный метод обладает существенными преимуществами перед известными методами многофакторного анализа, сравнительная характеристика которых представлена в табл. 2 [18]. Указанные преимущества обусловили выбор DEA-метода в статье как теоретической основы решения задачи многофакторного анализа процессов пиролиза метана. Это позволяет получить их интегральные сравнительные оценки, обеспечивающие ранжирование по различным разнородным критериям.

Таблица 2

Сравнение методов многофакторного анализа [18]

Методы скаляризации	Интерактивные методы	Методы исследования пространства параметров	Data Envelopment Analysis
Введение единой целевой функции как свертки нескольких функций с известными фиксированными весовыми коэффициентами	Назначение весовых коэффициентов и иерархии целевых функций в ходе процедуры анализа и оптимизации	Работа с большим набором равнозначных решений с использованием дополнительной информации о субъективных предпочтениях	Весовые коэффициенты определяются в ходе решения задачи
Субъективные оценки учитываются заранее	Субъективные оценки влияют на процесс решения задачи	Субъективные оценки учитываются после решения задачи	Субъективные факторы не влияют на процедуру решения и анализ результатов
Формулировка, процедура решения и анализ результатов основаны на субъективной информации или зависят от принимающего решения лица			Процедуры анализа и оптимизации не зависят от субъективной информации

Согласно теории DEA-метода, для сравнительного анализа численных оценок комплексного критерия (показателя) эффективности группы из N объектов на основе ССR-модели применяется следующий подход. Предполагается, что величины всех сравнительных оценок некоторого критерия эффективности f имеют конечные значения и необходимо проранжировать эти значения на числовом интервале $[0,1]$ для всех объектов сравнения. Таким образом, задача многофакторной сравнительной оценки группы образцов сводится к задаче математического программирования с целью максимизации критерия эффективности f . Этот критерий определяется как отношение взвешенной суммы выходных параметров к взвешенной сумме входных параметров.

Выходные параметры $Y_1, Y_2, \dots, Y_k$ подбираются таким образом, чтобы каждый из них характеризовал положительный вклад в суммарный показатель эффективности объекта f . В качестве выходных параметров могут использоваться разнообразные характеристики, отражающие различные аспекты функционирования объектов, включая производственно-технологические (например, объем и качество конечной продукции, надежность, долговечность), экономические (прибыль, доход, рентабельность), рыночные (размер рынка, количество связей с контрагентами) и другие.

Входные и выходные параметры могут иметь существенно отличающиеся значения, быть несвязанными и несопоставимыми, разнородными по смыслу и единицам измерения. При этом требуется, чтобы выходные характеристики можно было охарактеризовать численным значением, а увеличение каждого из параметров Y_i приводило бы к возрастанию суммарного показателя эффективности f :

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

Входные параметры $X_1, X_2, \dots, X_m$ подбираются так, чтобы уменьшение каждого из них увеличивало суммарную оценку эффективности f . Входными параметрами, как правило, являются разнообразные характеристики задействованных в осуществлении производственно-технологического процесса ресурсов. Эти параметры могут характеризовать финансовые, материальные, энергетические, информационные, трудовые, сырьевые, капитальные и другие ресурсы. Увеличение затрат приводит к снижению эффективности анализируемых объектов сравнения, поэтому для входных параметров должны выполняться условия:

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

Согласно модели CCR, конкретную численную величину оценки показателя эффективности f следует отыскивать для каждого из N объектов путем максимизации f на множестве значений весовых коэффициентов u, v , принадлежащих области определения G . Тогда задача определения для j -го объекта оценки обобщенного показателя сравнительной эффективности f_j и соответствующих весовых коэффициентов u_{ij} и v_{lj} может быть сформулирована следующим образом:

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

при наличии ограничений

$$\frac{u_{1j} \cdot Y_{1j} + u_{2j} \cdot Y_{2j} + \dots + u_{kj} \cdot Y_{kj}}{v_{1j} \cdot X_{1j} + v_{2j} \cdot X_{2j} + \dots + v_{mj} \cdot X_{mj}} \leq 1, \quad \forall \left(j = \overline{1, N}; i = \overline{1, k}; l = \overline{1, m}; \bar{u}_{ij} > 0; \bar{v}_{lj} > 0 \right), \quad (4)$$

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

Система соотношений (1) и (2) представляет собой N задач математического программирования. В результате их решения определяются относительные

показатели эффективности f_j для каждого из N объектов сравнения в виде ранжированных на единичном интервале $[0,1]$ численных оценок, при этом также происходит определение соответствующих весовых коэффициентов u_{ij} и v_{lj} ($i=1,2,...,k$, $l=1,2,...,m$) в функционале (1).

Модель Super-efficiency (суперэффективности) применяется тогда, когда несколько объектов сравнения имеют оценки эффективности, равные 1, но при этом требуется выделить наилучший объект сравнения в анализируемой группе. Предлагается подход, основанный на использовании базовой модели Super-efficiency DEA-метода, который заключается в исключении из ограничений вида (2) эффективных объектов с оценкой, равной 1.

Формулировка ЗМП на основе модели Super-efficiency для получения сравнительных оценок эффективности объектов может быть представлена аналогично базовой CCR-модели, однако задача определения эффективности объектов сравнения будет заключаться в максимизации функционала при исключении из рассмотрения ряда ограничений:

$$S_j = \frac{\bar{u}_{1j}Y_{1j} + \bar{u}_{2j}Y_{2j} + \dots + \bar{u}_{kj}Y_{kj}}{\bar{v}_{1j}X_{1j} + \bar{v}_{2j}X_{2j} + \dots + \bar{v}_{mj}X_{mj}} \rightarrow \max_{(\bar{u}_{ij}, \bar{v}_{lj}) \in \bar{G}_j}, \quad (5)$$

$$\frac{\bar{u}_{1j}Y_{1j} + \bar{u}_{2j}Y_{2j} + \dots + \bar{u}_{kj}Y_{kj}}{\bar{v}_{1j}X_{1j} + \bar{v}_{2j}X_{2j} + \dots + \bar{v}_{mj}X_{mj}} \leq 1, \quad \forall \begin{cases} j = \overline{1, N}; j \neq n; i = \overline{1, k}; \\ l = \overline{1, m}; \bar{u}_{ij} > 0; \bar{v}_{lj} > 0 \end{cases}. \quad (6)$$

Результатом решения ЗМП (3) и (4) являются сравнительные оценки, находящиеся в интервале $[0, \infty)$; при этом объект сравнения, имеющий максимальную оценку эффективности, может считаться наилучшим в группе сравнения при заданных условиях. Неэффективные по базовой CCR-модели объекты с оценкой меньше 1 не изменят свои сравнительные оценки по модели Super-efficiency [19].

Анализ технологических режимов процесса каталитического пиролиза проводился по модели SE суперэффективности DEA-метода. Реализация процесса пиролиза метана определяется множеством факторов, влияющих на эффективность процесса, таких как расход метана, финансовые затраты и расход энергии, технологические параметры, определяющие протекание реакции (температура, давление), компонентный состав и расход катализаторов и прочие параметры. Применение DEA-метода позволяет оценить относительную эффективность различных экспериментальных условий и наилучшие значения параметров, на которые следует ориентироваться для оптимизации процесса, определить потенциальные возможности для улучшения неэффективных DMU, предоставив конкретные рекомендации по оптимизации различных показателей качества.

Для проведения сравнения различных технологических режимов процесса пиролиза метана на основе модели суперэффективности DEA-метода сформулирована задача многофакторного анализа, входные и выходные параметры которой представлены на рис. 2.

Данная задача учитывает данные об условиях проведения технологического процесса, стоимости катализаторов и показателях его эффективности.

В данной статье было принято, что каждый замер отдельного эксперимента с определенным катализатором и заданными технологическими условиями рассматривается как единица принятия решения (DMU), представляющая собой объект сравнения с определенным набором входных и выходных параметров.

В качестве компонентов вектора входа выбраны параметры, характеризующие затраты на реализацию технологического процесса и условия его проведения:

- температура ($^{\circ}\text{C}$), при которой проводится реакция;
- давление в реакционной зоне (атм.) – давление, при котором протекает реакция;
- расход (л/ч) реагента, подаваемого в реакционную зону в единицу времени;
- время эксперимента (мин), под которым понимается время проведения эксперимента, прошедшее с момента **выхода реактора на рабочий режим**;
- цена катализатора за 1 кг.



Рис. 2. Входные и выходные параметры для формулировки задачи сравнительного анализа

В качестве выходных параметров использованы следующие показатели, которые позволяют оценивать эффективность проведения процесса:

- процентное содержание водорода в продуктах реакции H_2 (%);
- конверсия CH_4 (%), характеризующая степень преобразования метана в ходе реакции;
- конверсия CH_4 на 1 г катализатора ((л/ч)/г), характеризующая эффективность использования катализатора с учетом его массы;
- количество полученного водорода H_2 на 1 г катализатора ((л/ч)/г).

Поскольку выборка экспериментальных данных содержит 247 точек замера (см. табл. 1), решение задачи многофакторного анализа сводится к решению 247 задач математического программирования вида (ЗМП) (5), (6), которые позволяют получить сравнительные оценки для каждого объекта сравнения и соответствующие им весовые коэффициенты, определяемые в ходе решения данной задачи.

Результаты

В результате решения 247 ЗМП с помощью специализированного программного обеспечения каждый объект сравнения получил соответствующую ему оценку эффективности. На рис. 3 представлены значения оценок эффективности для объектов сравнения, получивших максимальные и минимальные оценки в группе сравнения.

На основе результатов расчета была проанализирована эффективность различных катализаторов, использованных в процессе пиролиза метана. На рис. 4 представлены ранжированные оценки эффективности применяемых катализаторов. Для исследования 8 видов катализаторов было проведено 247 замеров параметров процесса пиролиза в ходе проведения 21 эксперимента. Для катализатора $80 \text{ Ni}/10 \text{ Cu}/10 \text{ SiO}_2$ было проведено 6 экспериментов, для катализатора $90 \text{ Ni}/10$

Al_2O_3 – 5 экспериментов, для катализатора 82 Ni/8 Cu/10 Al_2O_3 – 4 эксперимента, для катализатора 60 Ni/40 SiO_2 – 2 эксперимента, а катализаторы 60 Ni/40 Al_2O_3 , 50 Ni/40 Cu/10 Al_2O_3 , 71 Ni/9 Cu/20 Al_2O_3 и 75,5 Ni/9,5 Cu/15 Al_2O_3 исследованы в 1 эксперименте каждый в отдельности.

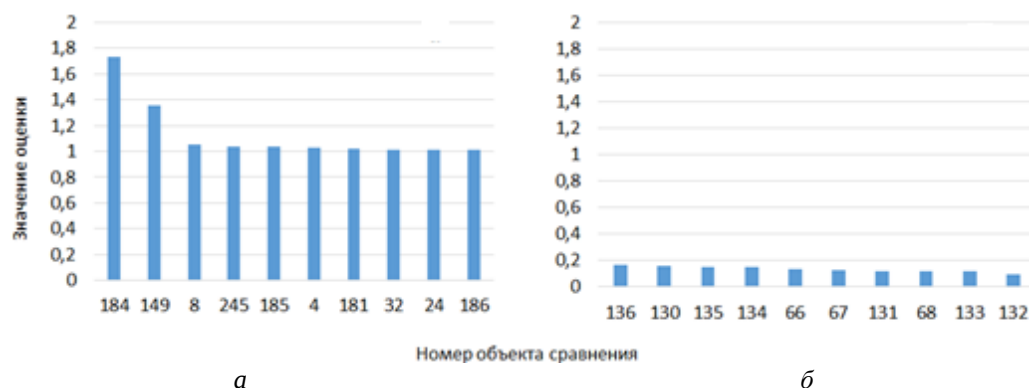


Рис. 3. Оценки эффективности объектов сравнения:
a – максимальные, *б* – минимальные

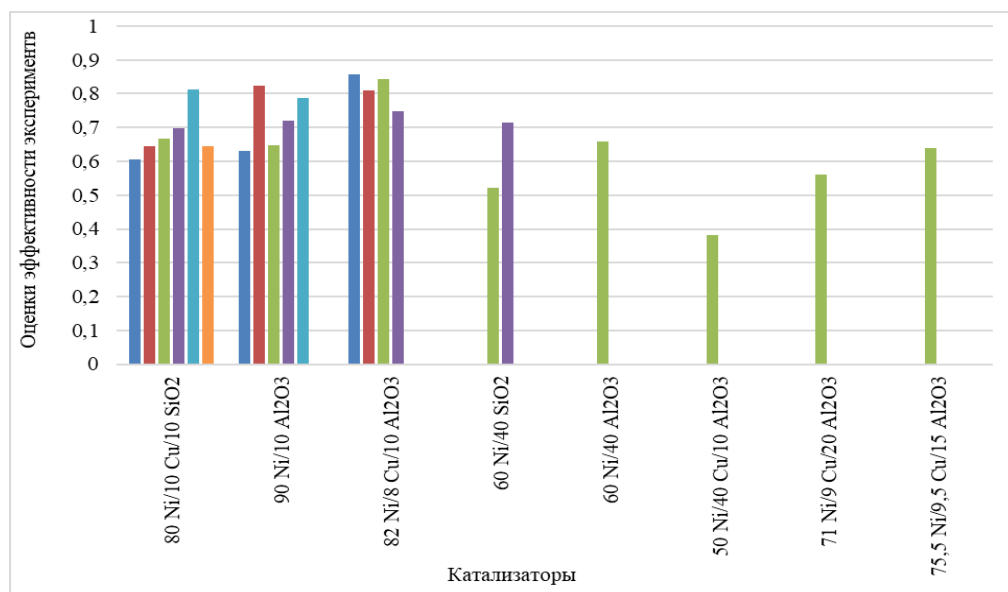


Рис. 4. Усредненные значения оценок эффективности экспериментов
с различными катализаторами

На основе полученных оценок эффективности технологических режимов (DMU) из представленных данных можно сделать следующие выводы о катализаторах.

Катализатор **82 Ni/8 Cu/10 Al_2O_3** . Данный катализатор продемонстрировал высокую эффективность при различных температурных режимах, особенно при повышенных температурах. В имеющихся условиях катализатор 82 Ni/8 Cu/10 Al_2O_3 показывает наивысшую оценку эффективности, в ходе 4 экспериментов его

эффективность имеет оценку от 0,75 до 0,86. Высокие значения оценок эффективности (более 1) достигнуты при температурах 650 и 750 °С. При использовании данного катализатора наблюдается высокая степень конверсии метана и значительный выход водорода на 1 г катализатора. Помимо этого, катализатор сохраняет активность достаточно длительный период времени. При большой длительности процесса пиролиза эффективность незначительно снижается, но остается на достаточно высоком уровне. Катализатор может быть рекомендован для процессов, требующих высокой производительности. Таким образом, катализатор 82 Ni/8 Cu/10 Al₂O₃ является одним из наиболее эффективных, сочетая высокую активность с относительно низкой стоимостью.

Катализатор 90 Ni/10 Al₂O₃. Катализатор с высоким содержанием никеля на алюмооксидном носителе показал хорошие результаты, особенно при высоких температурах. Повышение температуры с 550 до 750 °С приводит к значительному увеличению конверсии CH₄ и выхода H₂, оценки эффективности приближаются к 1 при достижении температуры 750 °С. Катализатор обеспечивает высокую стабильность работы: с увеличением времени эксперимента производительность и оценка эффективности снижаются незначительно. Обеспечивает высокую конверсию метана и большой показатель выхода водорода. Цена катализатора ниже средней, но несмотря на это он обеспечивает достаточно высокую эффективность процесса. Среди других катализаторов 90 Ni/10 Al₂O₃ является одним из самых эффективных при проведении пиролиза при высоких температурах, предлагая относительно низкую стоимость и относительно высокую производительность. Данный катализатор является эффективным и экономически выгодным для процессов при высоких температурах.

Катализатор 80 Ni/10 Cu/10 SiO₂. Катализатор на кремнеземном носителе с добавлением меди показал высокие результаты, особенно при температуре 750 °С. В некоторых экспериментах оценки эффективности превышают 1. Катализатор имеет высокую степень активности, обеспечивает высокую степень конверсии CH₄ и выход H₂ на 1 г катализатора. Катализатор 80 Ni/10 Cu/10 SiO₂ является высокоэффективным в течение ограниченного количества времени при высоких температурах, а добавление меди положительно влияет на его активность. Катализатор обладает высокой начальной эффективностью – например, в начале одного из экспериментов при температуре 750 °С оценка эффективности достигает 1,73, но эффективность постепенно снижается приблизительно до 0,61 после длительного времени проведения процесса. Помимо снижения оценки происходит значительное снижение производительности. Цена катализатора средняя, но с учетом снижения эффективности экономическая целесообразность его применения уменьшается со временем. Целесообразность применения данного катализатора необходимо дополнительно экспериментально изучать. Таким образом, данный катализатор эффективен в краткосрочной перспективе, но требует решения проблем со стабильностью для длительного использования.

Катализатор 71 Ni/9 Cu/20 Al₂O₃. Данный катализатор показал среднюю эффективность, сильно зависящую от условий проведения реакции. Оценки эффективности варьируются от 0,23 при температуре 550 °С до 0,91 при температуре 750 °С. Катализатор сильно зависит от температуры проведения процесса – наилучшие результаты при 750 °С, а при более низких температурах показывает существенно более низкую производительность и эффективность. Несмотря на то, что с повышением температуры эффективность его применения постепенно возрастает, она остается ниже, чем у катализаторов с более высоким содержа-

ем Ni. Катализатор показывает относительно высокий показатель стабильности при высоких температурах и длительном времени проведения эксперимента. Стоимость катализатора – выше средней. Таким образом, катализатор 71 Ni/9 Cu/20 Al₂O₃ может быть использован при высоких температурах, но он уступает по эффективности катализаторам с более высоким содержанием никеля. Для достижения максимальной эффективности требуется проведение дополнительной оптимизации условий реакции.

Катализатор 60 Ni/40 SiO₂. Катализатор с более низким содержанием никеля показал низкую эффективность при низких и средних температурах, но он имеет приемлемые показатели при температуре 750 °С. Оценки эффективности достигают 1,02 при высоких температурах. Явным достоинством катализатора является его низкая цена. Однако он неэффективен при низких и средних температурах: при температуре 550 °С оценка эффективности составляет ~ 0,15. При повышении температуры до 750 °С и понижении давления до 2,5 атм происходит значительное увеличение показателя эффективности – до 1,35. Показатели конверсии CH₄ и выхода H₂ на 1 г катализатора значительно увеличиваются при достижении данных условий. Эти факторы указывают на высокую чувствительность катализатора к условиям процесса. Цена катализатора – ниже средней. Таким образом, катализатор 60 Ni/40 SiO₂ может быть эффективным при специфических условиях (высокая температура, пониженное давление), но менее универсален по сравнению с другими катализаторами.

Катализатор 50 Ni/40 Cu/10 Al₂O₃. Катализатор с высоким содержанием меди имеет самую низкую эффективность, это худший результат среди всех анализируемых катализаторов. При анализе не были выявлены преимущества данного катализатора перед другими в рассматриваемой группе сравнения: имеет низкую эффективность во всем диапазоне параметров проведения процесса, показатели конверсии CH₄ и выхода H₂ на 1 г катализатора существенно ниже, чем у других катализаторов, а его оценка эффективности не превышает 0,68. Кроме того, данный катализатор имеет самую высокую стоимость среди всех катализаторов. Таким образом, данный катализатор наименее предпочтителен для использования, требует пересмотра состава или параметров проведения процесса. Высокое содержание меди может негативно влиять на активность катализатора в процессе пиролиза.

Выводы

Исходя из проведенного анализа можно сделать следующие выводы и рекомендации относительно применения катализаторов.

1. Высокое содержание никеля (более 80 %) в катализаторе положительно влияет на эффективность процесса пиролиза.

2. Добавление меди в небольшом количестве может улучшить активность катализатора. Но высокое содержание меди (ориентировочно более 10 %, требуются дополнительные исследования) может негативно влиять на конверсию метана и выход водорода. Оптимальные соотношения необходимо определять экспериментально.

3. Наиболее эффективными оказались катализаторы с высоким содержанием никеля на носителе Al₂O₃ при высоких температурах. Среди анализируемых катализаторов самым эффективным оказался катализатор 82 Ni/8 Cu/10 Al₂O₃.

4. Носитель (Al₂O₃ или SiO₂) влияет на распределение активных компонентов и эффективность катализатора, однако имеющиеся данные позволяют оце-

нить только стабильность катализаторов. Согласно анализу, катализаторы на Al_2O_3 демонстрируют лучшую долговременную стабильность (стойкость к зауглероживанию), а катализаторы на SiO_2 показывают высокую начальную эффективность пиролиза, но их эффективность снижается со временем. Вероятное улучшение стабильности катализаторов на основе SiO_2 может быть достигнуто посредством проведения дополнительных исследований.

5. Повышение температуры до 750 °C существенно улучшает эффективность большинства катализаторов.

6. Экономическая составляющая обязательно должна учитываться при выборе катализатора, более дорогие катализаторы не всегда обеспечивают лучшую производительность.

7. Для оптимального выбора катализатора в каждом отдельном случае необходимо находить баланс между стоимостью катализатора и его производительностью, стабильностью и способами регенерации.

8. Для определения оптимального состава катализатора, в частности соотношений Ni и Cu, с целью улучшения эффективности и стабильности необходимо проведение дальнейших экспериментов.

DEA-метод позволил провести комплексный анализ эффективности различных катализаторов с учетом множества разнородных параметров и позволил выявить ключевые факторы, влияющие на эффективность процесса пиролиза метана.

Полученные результаты и выводы могут быть использованы для выработки стратегий и направлений дальнейших исследований, оптимизации процесса производства водорода, выбора наиболее подходящих катализаторов для промышленного применения, а также для масштабирования технологии. Выбор катализатора должен основываться на балансе между производительностью, стабильностью и экономической целесообразностью.

Таким образом, метод DEA является мощным инструментом анализа и оптимизации процессов пиролиза метана при получении водорода. Его применение позволяет объективно оценить эффективность различных экспериментальных условий и установок, выявить лучшие практики и определить конкретные направления для их улучшения. Внедрение DEA-метода способствует повышению общей эффективности процесса, снижению затрат и улучшению качества получаемого водорода, что особенно важно в условиях растущего спроса на экологически чистые источники энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Sørensen B., Spazzafumo G.* Hydrogen and fuel cells: Emerging Technologies and Applications. London: Academic Press, 2018. doi.org/10.1016/C2015-0-01635-5
2. *Якубсон К.И.* Перспективы производства и использования водорода как одно из направлений развития низкоуглеродной экономики в Российской Федерации // Журнал прикладной химии. 2020. Т. 93, № 12. С. 1675–1695. DOI 10.31857/S0044461820120014. EDN NWBSUH.
3. Парижское соглашение [Электронный ресурс]. – URL: https://unfccc.int/sites/default/files/paris_agreement.pdf.
4. *Веселов Ф., Соляник А., Урванцева Л.* Низкоуглеродная перестройка электроэнергетики России до 2035 года: потенциал снижения эмиссии CO_2 и его «цена» для потребителя // Энергетическая политика. 2021. № 11.
5. Global hydrogen review. IEA. 2022. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>
6. *Dincer I., Acar C.* Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. No. 40(34). Pp. 11094–11111.

7. *Макарян И.А., Седов И.В.* Оценка экономической эффективности масштабов получения водорода различными методами // Российский химический журнал. 2021. № 1.
8. *Kuang B et al.* A Comparative Analysis of Different Hydrogen Production Methods and Their Environmental Impact // *Clean Technologies*. 2023. No. 5(4). Pp. 1344–1380. doi.org/10.3390/cleantechnol5040067
9. *Кузнецов О.А., Балугев А.С., Вальцева А.И.* Сравнительная оценка методов производства водорода. Энерго- и ресурсосбережение // Энергообеспечение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: материалы Международной научно-практической конференции. Екатеринбург: УрФУ, 2017. С. 822–827.
10. *Желнов Ю.В., Долгих В.Д., Иванов С.А., Виноградова М.Р., Мелешко Н.В., Кудинов И.В.* Получение водорода термokatалитическим разложением метана с использованием катализатора «никель на кизельгуре» // Сибирский физический журнал. 2023. № 18(3). С. 95–103. doi.org/10.25205/2541-9447-2023-18-3-95-103.
11. *Солодова Н.Л., Абдуллин А.И.* Пиролиз углеводородного сырья. Казань: КГТУ, 2007. 239 с.
12. *Dagle R.A., Dagle V., Bearden M.D., Holladay J.D., Krause T.R., Ahmed S.* An Overview of Natural Gas Conversion Technologies for Co-Production of Hydrogen and Value-Added Solid Carbon Products // Pacific Northwest National Lab: Richland, WA, USA. 2017.
13. *Аксютин О.Е. и др.* Метан, водород, углерод: новые рынки, новые возможности // Транспорт на альтернативном топливе. 2020. № 6 (78). С. 48–58.
14. *Lee J.S. et al.* Catalytic methane decomposition over nickel catalysts: active sites and catalytic mechanism // *Journal of Catalysis*. 2010. No. 269 (2). Pp. 359–369.
15. *Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E.* Measuring the efficiency of decision making units // *European Journal of Operational Research*. 1978. No. 2(6). Pp. 429–444.
16. *Korhonen P., Luptacik M.* Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis // *European Journal of Operational Research*. 2004. No. 154(2). Pp. 437–446.
17. *Dolgikh V.D., Pashin A.V., Mikheeva G.V., Golovanova T.N., Kudinov I.V.* 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. No. 1. P. 1070. doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012017
18. *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. No. 1. Pp. 239–247. DOI 10.1108/COMPEL-11-2019-0454. EDN UYETTQ
19. *Плешивцева Ю.Э., Казаринов А.В., Деревянов М.Ю.* Многофакторный анализ процессов производства дорожных битумов путем окисления продуктов нефтепереработки // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. № 3 (71). С. 52–66.

Статья поступила в редакцию 20.08.2024 г.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFICIENCY OF CATALYTIC METHANE PYROLYSIS TECHNOLOGY FOR HYDROGEN PRODUCTION BASED ON DEA METHOD¹

A.V. Kazarinov

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

E-mail: artemrus987@gmail.com

Abstract. This paper presents a comprehensive analysis of the efficiency of methane pyrolysis technologies and various catalysts using the DEA method. The study is based on an extensive set of experimental data obtained under laboratory conditions. Application of DEA method allowed to identify key factors affecting the pyrolysis process performance, including costs, process parameters and catalyst properties. Particular attention is paid to the role of catalysts in the methane pyrolysis process. Highly efficient catalysts show significant increases in reaction rate and decreases in energy costs.

The DEA method allowed the identification of key factors affecting process efficiency, including the choice of catalyst carrier, temperature conditions and composition of active components. The analysis revealed that catalyst stability and its ability to maintain high activity over the reaction time were particularly important for industrial applications.

The results of the analysis allowed us to evaluate the relative efficiency of each catalyst and identify the most optimal combinations of reaction conditions. It was found that catalysts with high nickel content (more than 80%) on Al₂O₃ carrier show the highest efficiency at about 750 °C, achieving high values of methane conversion and hydrogen yield. SiO₂ based catalysts show high initial activity, but tend to deactivate or carbonize with time, which in turn markedly reduces their efficiency in long-term processes.

The results highlight the importance of optimal catalyst composition and reaction conditions to improve the efficiency and economic viability of the methane pyrolysis process. The study demonstrates the potential of DEA method as a tool for comprehensive assessment and optimization of technological processes of hydrogen production and emphasizes the prospects for further development and implementation of methane pyrolysis technology in industrial hydrogen production as a component of the transition to low-carbon energy production.

Keywords: Data Envelopment Analysis, DEA, multivariate analysis, methane pyrolysis, hydrogen production, efficiency, analysis, catalysts.

REFERENCES

1. *Sørensen B., Spazzafumo G.* Hydrogen and fuel cells: Emerging Technologies and Applications. London: Academic Press, 2018. doi.org/10.1016/C2015-0-01635-5
2. *Yakubson K.I.* Perspektivy` proizvodstva i ispol`zovaniya vodoroda kak odno iz napravlenij razvitiya nizkouglerodnoj e`konomiki v Rossijskoj Federacii [Prospects for the production and use of hydrogen as one of the areas of development of a low-carbon economy in the Russian Federation] // Zhurnal prikladnoj ximii. 2020. Vol. 93. No. 12. Pp. 1675–1695. DOI 10.31857/S0044461820120014. – EDN NWBSUH. (In Russian)
3. Parizhskoe soglasenie [Paris Agreement]. URL: https://unfccc.int/sites/default/files/paris_agreement.pdf. (In Russian)



© The Author(s), 2024

¹ The work was carried out with the support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic No. FSSE-2024-0014) within the framework of the state assignment of the Samara State Technical University
Artem V. Kazarinov, Postgraduate Student

4. Veselov F., Solyanik A., Urvanceva L. Nizkouglerodnaya perestrojka e`lektroe`nergetiki Rossii do 2035 goda: potencial snizheniya e`missii SO<sub>2</sub> i ego «cena» dlya potrebitelya [Low-carbon restructuring of the Russian electric power industry until 2035: potential for reducing CO<sub>2</sub> emissions and its “price” for the consumer] // E`nergeticheskaya politika. 2021. No. 11. (In Russian)
5. Global hydrogen review. IEA. 2022. URL: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/c5bc75b1-9e4d-460d-9056-6e8e626a11c4/GlobalHydrogenReview2022.pdf>
6. Dincer I., Acar C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability // International Journal of Hydrogen Energy. 2015. No. 40 (34). Pp. 11094–11111.
7. Makaryan I.A., Sedov I.V. Ocenka e`konomicheskoy e`ffektivnosti masshtabov polucheniya vodoroda razlichny`mi metodami [Evaluation of the economic efficiency of the scale of hydrogen production by various methods] // Rossijskij ximicheskij zhurnal. 2021. No. 1. (In Russian)
8. Kuang B et al. A Comparative Analysis of Different Hydrogen Production Methods and Their Environmental Impact // Clean Technologies. 2023. No. 5(4). Pp. 1344–1380. doi.org/10.3390/cleantechnol5040067
9. Kuznecov O.A., Baluev A.S., Val`ceva A.I. Sravnitel`naya ocenka metodov proizvodstva vodoroda. Energo- i resursosberezhenie [Comparative assessment of hydrogen production methods. Energy and resource conservation] // Energoobespechenie. Netradicionny`e i vozobnovlyaemy`e istochniki e`nergii: materialy` Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ekaterinburg: UrFU, 2017. Pp. 822–827. (In Russian)
10. Zhelnov Yu.V., Dolgix V.D., Ivanov S.A., Vinogradova M.R., Meleshko N.V., Kudinov I.V. Poluchenie vodoroda termokatalicheskim razlozheniem metana s ispol`zovaniem katalizatora «nikel` na kizel`gure» [Hydrogen production by thermal catalytic decomposition of methane using a nickel-on-kieselguhr catalyst] // Sibirskij fizicheskij zhurnal. 2023. No. 18(3). Pp. 95–103. URL: <https://doi.org/10.25205/2541-9447-2023-18-3-95-103>. (In Russian)
11. Solodova N.L., Abdullin A.I. Piroliz uglevodorodnogo syrya [Pyrolysis of hydrocarbon raw materials]. Kazan: KGTU, 2007. P. 239. (In Russian)
12. Dagle R.A., Dagle V., Bearden M.D., Holladay J.D., Krause T.R., Ahmed S. An Overview of Natural Gas Conversion Technologies for Co-Production of Hydrogen and Value-Added Solid Carbon Products // Pacific Northwest National Lab: Richland, WA, USA. 2017.
13. Aksyutin O.E. i dr. Metan, vodorod, ugi`lerod: novye rynki, novye vozmozhnosti [Methane, Hydrogen, Carbon: New Markets, New Opportunities] // Transport na alternativnom toplive. 2020. No. 6 (78). Pp. 48–58. (In Russian)
14. Lee J.S. et al. Catalytic methane decomposition over nickel catalysts: active sites and catalytic mechanism // Journal of Catalysis. 2010. No. 269(2). Pp. 359–369.
15. Charnes A., Cooper W.W., Rhodes E. Measuring the efficiency of decision making units // European Journal of Operational Research. 1978. No. 2 (6). Pp. 429–444.
16. Korhonen P., Luptacik M. Eco-efficiency analysis of power plants: An extension of data envelopment analysis // European Journal of Operational Research. 2004. No. 154 (2). Pp. 437–446.
17. Dolgikh V.D., Pashin A.V., Mikheeva G.V., Golovanova T.N., Kudinov I.V. 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. No. 1. Pp. 1070. doi.org/10.1088/1755-1315/1070/1/012017
18. 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. No. 1. Pp. 239–247. DOI 10.1108/COMPEL-11-2019-0454. EDN UYETTQ
19. Pleshivtseva Y.E., Kazarinov A.V., Derevyanov M.Y. Mnogofaktornyj analiz processov proizvodstva dorozhny`x bitumov putem okisleniya produktov neftepererabotki [Multivariate analysis of the processes of production of road bitumen by oxidation of petroleum products] // Vestnik Samars. gosud. tekhn. un-ta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2021. No. 3 (71). C. 52–66.

Original article submitted 20.08.2024

УДК 681.518

РАЗРАБОТКА СТРУКТУРЫ КИБЕРФИЗИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ЗОННОГО ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА СТАЛЬНОЙ ЗАГОТОВКИ

С.А. Колпащиков, К.С. Пешкин¹

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

E-mail: skolpaschikov@mail.ru, kir.peschkin@yandex.ru

Аннотация. Статья посвящена разработке структуры киберфизической системы управления процессом зонного индукционного нагрева, широко распространенного в современном промышленном производстве при термической обработке металлических изделий различного назначения. Анализ номенклатуры выпускаемых с использованием индукционной термообработки изделий и преимуществ использования индукционных нагревательных систем показал широкую область применения данного способа термообработки в современном производстве и большие возможности по автоматизации и оптимизации процессов, связанные с индукционным нагревом изделий. Данный факт свидетельствует об актуальности разработок различного рода интеллектуальных систем управления применительно к процессам промышленного индукционного нагрева металлических заготовок и полуфабрикатов. В статье описывается индукционный метод зонной термической обработки металлов, его преимущества перед пламенными способами термообработки и номенклатура выпускаемых при помощи него изделий. Представлено описание системы заготовка – индуктор, для которой разработана структура киберфизической системы управления процессом зонного индукционного нагрева. Рассмотрено технологическое требование к конечному температурному распределению на поверхности заготовки и факторы, влияющие на отклонение температурного распределения от требуемого в процессе зонного индукционного нагрева. Приведен перечень возможных возмущающих воздействий, сформулированы требования к технологическому процессу, описаны принципы управления и на основе этого разработана структура системы управления процессом зонного индукционного нагрева, которая относится к классу киберфизических систем управления технологическими процессами.

Ключевые слова: зонный сквозной индукционный нагрев, интеллектуальная система управления, операция пластической деформации, киберфизическая система, индукционная нагревательная установка, технологический процесс.



© Автор(ы), 2024

¹ Сергей Александрович Колпащиков, кандидат технических наук, заведующий кафедрой автоматики и управления в технических системах.

Кирилл Сергеевич Пешкин, аспирант кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Введение

Термическая обработка металлов широко распространена в технологических процессах современных металлургических предприятий, поскольку она является необходимым этапом перед технологическими операциями пластической деформации, такими как прессование, прокатка, ковка, обжатие, вдавливание, вытяжка, правка, накатывание и т. д. [1]. Основные тенденции совершенствования технологий термообработки металлов непосредственно связаны с постоянно растущими требованиями к производству более сложных и качественных изделий различного назначения, которые должны отвечать современным стандартам надежности, прочности и износостойкости. Высокая конкуренция, рост производственных мощностей и требований к качеству готовых изделий обуславливают для производителей необходимость концентрироваться на повышении эффективности технологических процессов, которое достигается за счет применения высокоэффективных методов термической обработки металлов, внедрения интеллектуальных систем контроля и управления, оптимизации процессов и т. д.

На промышленных предприятиях, характеризующихся большими объемами выпуска продукции, часто применяют индукционные способы термической обработки, отличающиеся от конкурентоспособных технологий нагрева рядом преимуществ: экономичным потреблением энергоресурсов; многофункциональностью (на одной установке допускается производить несколько видов термообработки); эффективностью в массовом промышленном производстве; высокой скоростью нагрева; широкими возможностями по контролю и управлению процессом; соответствием современным требованиям охраны окружающей среды и техники безопасности [2]. Кроме того, индукционные нагревательные установки (ИНУ) позволяют обеспечить весомое снижение доли потерь металла в окалину, которая является одной из значительных статей затрат в себестоимости процесса нагрева металлических заготовок [9–11]. ИНУ достаточно просты и удобны в эксплуатации, отличаются высокой мобильностью, а гибкое проектирование геометрии витков индуктора, повторяющей форму заготовки, позволяет осуществлять более качественный нагрев и существенно снижать долю брака в партии заготовок одной номенклатуры. Применение ИНУ обеспечивает заданную технологическими требованиями точность достижения требуемого температурного распределения по объему заготовки.

На современных промышленных предприятиях с использованием индукционных способов термообработки производят широкую номенклатуру изделий различного назначения, включая ответственные детали для машиностроительного производства (валы, шестерни, фланцы и т. д.), подвергающиеся значительным механическим нагрузкам и эксплуатируемые в агрессивных средах.

Отличительной особенностью процессов индукционной термообработки металлов перед операциями пластической деформации является наличие широких возможностей по оптимизации процесса нагрева, которые направлены на поиск оптимальных конструктивных и режимных параметров ИНУ с целью достижения требуемого конечного температурного профиля по объему заготовки при обеспечении максимальной эффективности процесса индукционного нагрева по выбранному критерию оптимальности [3].

Однако сложные технологические процессы промышленного индукционного нагрева подвержены значительным возмущающим воздействиям, которые приводят к отклонению параметров процесса нагрева от их оптимальных значений и существенному ухудшению выбранных показателей качества функциони-

рования ИНУ. В связи с этим на современных производственных предприятиях все чаще применяются сложные автоматизированные системы управления, предназначенные для оптимизации процессов и их адаптации к изменяющимся условиям для отработки возмущений и принятия решений в режиме реального времени. Среди таких систем особое внимание в последнее время уделяется киберфизическим системам управления технологическими процессами (КФСУ ТП), которые отличаются высокой скоростью обработки информации в режиме реального времени (от момента поступления до формирования управляющего воздействия), в том числе за счет непосредственной интеграции физического объекта управления в систему [4].

Киберфизические системы объединяют вычислительные, информационные, измерительные, управляющие и коммуникационные подсистемы с физическим объектом управления [5], выполняют свои функции в режиме реального времени и позволяют получать данные о текущем состоянии технологического процесса для принятия оперативного решения по управлению. Такие системы открывают широкие возможности для автоматизации, оптимизации и интеллектуализации процессов индукционной термической обработки и повышают их эффективность, поскольку в них обеспечивается тесная взаимосвязь между физическими процессами и цифровыми технологиями, что обеспечивает адаптацию режимов функционирования установок к изменяющимся условиям среды.

В статье рассматриваются вопросы разработки структуры киберфизической системы управления зонной индукционной установкой для сквозного нагрева стальной цилиндрической заготовки перед операциями пластической деформации, описываются принцип действия данной установки и ее основные элементы.

Процесс зонного индукционного нагрева стальной заготовки

В статье рассматривается технологический процесс сквозного зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки в многосекционном индукторе перед операциями пластической деформации.

Индукционный нагрев основан на явлении электромагнитной индукции, т. е. возникновение источников тепла в заготовке происходит за счет вихревых токов, возбуждаемых вследствие пропускания переменного электрического тока по обмотке индуктора [6]. Отличительной особенностью индукционной термообработки от традиционных способов нагрева является возбуждение тепловой энергии непосредственно в самой заготовке. При этом глубина проникновения тепловой энергии напрямую зависит от физических характеристик заготовки и режимных параметров ИНУ [7].

Сквозной индукционный нагрев применяется, если требуется обеспечить нагрев заготовки по всему объему с определенной точностью. При таком нагреве заготовку обычно полностью помещают в зону действия индуктора. Распределение температуры зависит от времени процесса и энергии, которую получает заготовка, при этом чем больше удельная мощность внутренних источников тепла, тем меньше время нагрева. При сквозном индукционном нагреве применяют достаточно низкую частоту тока, обеспечивая тем самым большую глубину проникновения тока. Это означает, что в существенной части заготовки концентрируются наведенные токи, которые нагревают поверхностный слой заготовки, при этом оставшаяся часть нагревается за счет явления теплопроводности [8].

Особенность зонного индукционного нагрева заключается в том, что активный нагрев заготовки за счет возбуждения внутренних источников тепла проис-

ходит не по всему объему, а только в участках, над которыми в дальнейшем будут производиться операции пластической деформации. При этом остальные участки заготовки также нагреваются до некоторой меньшей температуры с целью сохранения допустимого температурного перепада, обеспечивающего предотвращение коробления и образования трещин на последующих технологических операциях и в процессе эксплуатации.

Таким образом, основной целью зонного индукционного нагрева заготовок является локализация нагрева до высоких температур только в тех зонах, которые на последующих стадиях подвергаются пластической деформации для получения требуемой конфигурации готовых изделий [12]. Применение в промышленном производстве зонного нагрева заготовок позволяет не только упростить последующие операции пластической деформации и спрогнозировать формоизменение заготовок, но и сократить длительность и количество подготовительных операций, повысить точность достижения требуемого неравномерного температурного распределения, а главное – существенно сэкономить материальные и энергетические ресурсы [13, 14].

Стальная заготовка представляет собой полуфабрикат для изготовления вала ответственного изделия путем обработки давлением, перед которой она должна быть нагрета с высокой точностью до температуры, требуемой для качественного формоизменения. На рис. 1 выделены участки нагрева по длине заготовки: ДУ1 – длина первого участка нагрева (64 мм), ДУ2 – длина второго участка нагрева (93 мм), ДУ3 – длина третьего участка нагрева, ПЗ – переходная зона (30 мм).

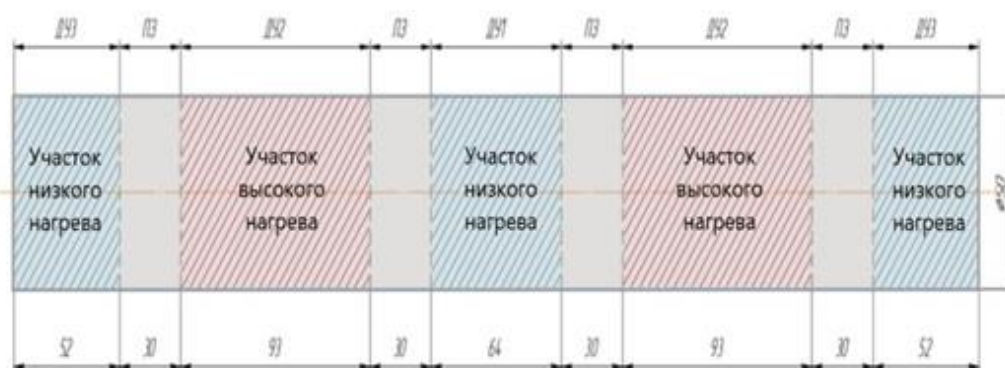


Рис. 1. Участки нагрева стальной заготовки

Каждый нагреваемый участок стальной заготовки должен отвечать соответствующим технологическим требованиям по температурному распределению в конце процесса нагрева. Требуемое конечное температурное распределение на поверхности стальной заготовки в конце процесса зонного индукционного нагрева изображено на рис. 2.

Участки активного нагрева ДУ2, которые подвергаются операциям обкатки и прессования, требуется нагреть до 1250 °С с допустимым отклонением температуры ± 15 °С. Участки нагрева ДУ1 и ДУ3 нагреваются до меньшей температуры – до 950 °С (с допустимым отклонением температуры ± 15 °С) с целью сохранения температурного перепада. Максимальная допустимая температура нагрева стальной заготовки составляет 1350 °С – температура плавления стали, мини-

мальная температура нагрева заготовки перед операциями пластической деформации $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ – это температура, по достижении которой снимаются внутренние напряжения [15]. Такого рода профиль рационально применять для термообработки ответственных изделий в машиностроении (например, валов), где пластической деформации подвергаются конкретные участки по длине заготовки, что в массовом производстве позволит существенно снизить энергетические затраты. Данный подход принципиально отличается от типового сквозного равномерного нагрева заготовки перед обработкой давлением и приводит к существенному усложнению технологического процесса.

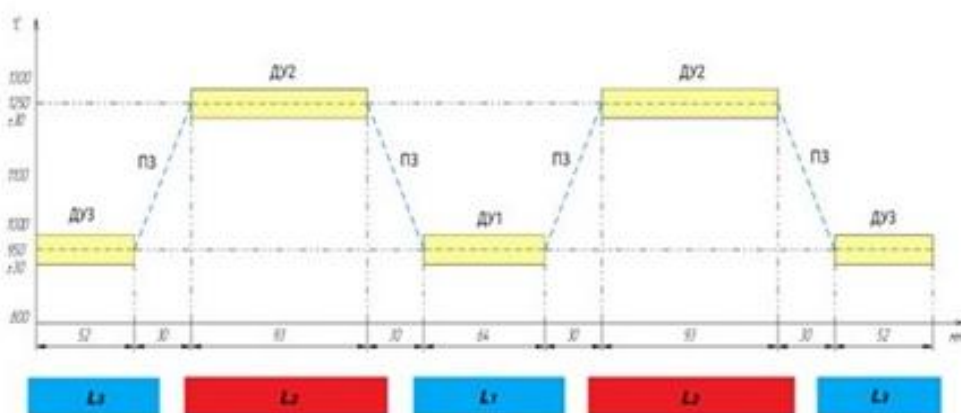


Рис. 2. Требуемое конечное температурное распределение на поверхности стальной заготовки в конце процесса нагрева

Для достижения неравномерного температурного профиля, изображенного на рис. 2, необходимо спроектировать зонную ИНУ автономно управляемыми секциями, каждая из которых характеризуется определенным набором конструктивных и режимных параметров (рис. 3).

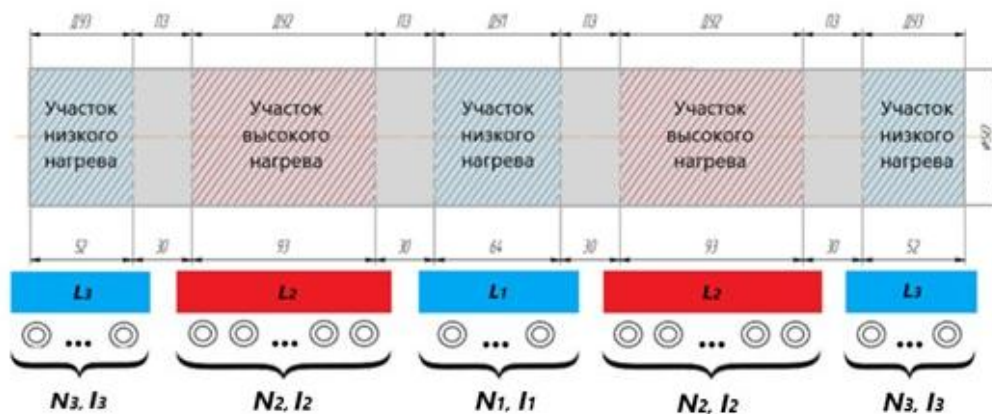


Рис. 3. Схема расположения индуктора относительно стальной заготовки

Термообработка участков активного нагрева ДУ2 происходит за счет секций индуктора длиной L_2 с током источника питания I_2 , каждая из которых вклю-

часть N_2 равномерно расположенных витков. Аналогично термообработка участков нагрева ДУ1 и ДУ3 проводится за счет секций индуктора длинами L_1 и L_3 с равномерно распределенными на них N_1 и N_2 витками и токами источников питания I_1 и I_3 соответственно. Достижение заданного неравномерного температурного распределения на поверхности заготовки (см. рис. 2) обеспечивается за счет выбора оптимальных значений конструктивных и режимных параметров индукционной системы.

Численная модель процесса зонного индукционного нагрева

Математическая модель индукционных нагревательных установок, принцип действия которых основан на взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессах, в общем виде может быть представлена системой уравнений Максвелла и Фурье для электромагнитных и температурных полей [16, 17]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t}; \\ \operatorname{rot} E = -\frac{\partial B}{\partial t}; \\ \operatorname{div} B = 0; \\ \operatorname{div} E = 0; \\ c(\theta(x, y, t)) \gamma(\theta(x, y, t)) \frac{\partial \theta(x, y, t)}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda(\theta(x, y, t)) \operatorname{grad} \theta(x, y, t)) \\ - c(\theta(x, y, t)) \gamma(\theta(x, y, t)) V \operatorname{grad} \theta(x, y, t) - \operatorname{div}[E H]. \end{array} \right. \quad (1)$$

Здесь E – напряженность электрического поля; D – электрическая индукция; B – магнитная индукция; H – напряженность магнитного поля; J – плотность тока проводимости; t – время; θ – температурное распределение; x – координата по длине; y – радиальная координата; $c(\theta)$ – удельная теплоемкость металла; $\lambda(\theta)$ – коэффициент теплопроводности металла; $\gamma(\theta)$ – плотность металла; V – вектор скорости перемещения заготовки.

Для численного решения сложных систем взаимосвязанных нелинейных уравнений, к которым относится система уравнений Максвелла и Фурье (1) [18], применяют специальные пакеты прикладных программ для конечно-элементного мультифизического анализа.

Использование программных пакетов, таких как ANSYS, FLUX и др., для численного моделирования процесса зонного индукционного нагрева стальной заготовки позволяет с высокой степенью точности рассчитать электромагнитные и температурные распределения в процессе индукционного нагрева, что необходимо для проведения анализа, реализации автоматизированных оптимизационных процедур (в том числе для поиска оптимальных значений конструктивных и режимных параметров ИНУ), синтеза интеллектуальных систем управления технологическим процессом индукционного нагрева и других целей.

Кроме того, численная модель, получающая в режиме реального времени информацию о параметрах процесса с измерительных устройств, является необходимым элементом для построения цифрового двойника технологического процесса, который совместно с информационными и управляющими подсистемами

формирует основу для синтеза сложных систем интеллектуального управления технологическим процессом, к которым в полной мере относятся КФСУ ТП.

Специальные требования к численному моделированию процесса зонного индукционного нагрева обусловлены его использованием при решении задачи оптимального управления и проектирования ИНУ для зонного нагрева стальной цилиндрической заготовки. В соответствии с этими требованиями предполагается секционное проектирование индуктора с равномерным распределением витков внутри секций и автономным управлением токами для каждой из этих секций, что подробно описано ниже.

На рис. 4 представлено схематичное изображение индукционной системы «заготовка – индуктор» и показаны основные конструктивные параметры ИНУ для решения задачи моделирования.

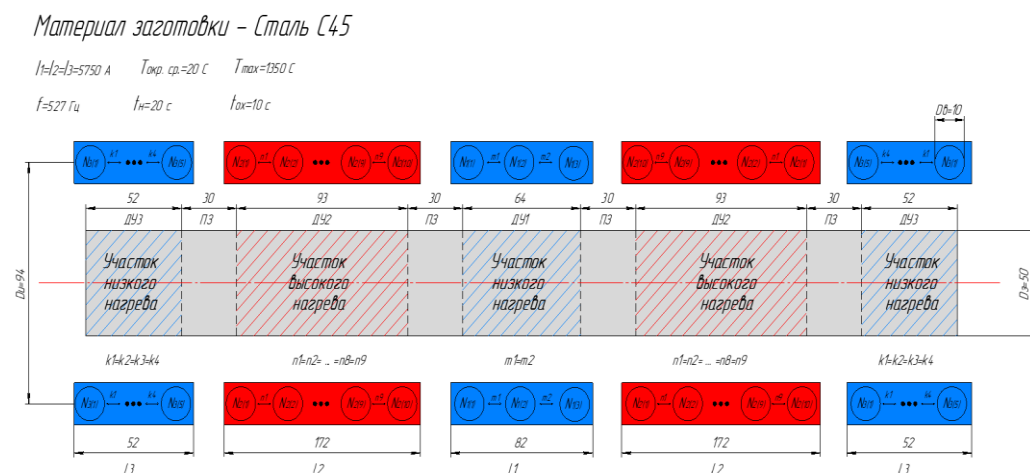


Рис. 4. Геометрия индукционной нагревательной системы

Моделируемая система индукционного нагрева состоит из трех основных элементов: стальной (марки С45) заготовки, медных витков индуктора и окружающей среды (воздуха). Для численного моделирования всем элементам присваиваются типовые теплофизические и электромагнитные свойства. Кроме того, для моделирования процесса нагрева задаются начальные условия и технологические ограничения: начальная температура окружающей среды $T_{\text{нач}} = T_{\text{окр. ср.}}$ (воздуха) и критическая температура материала заготовки T_{max} (стали С45), по достижении которой происходит пережог металла.

Основными геометрическими параметрами заготовки являются диаметр D_z и длина, равная сумме участков термообработки ДУ1, ДУ2, ДУ3 и ПЗ (см. рис. 4). В свою очередь, основными конструктивными параметрами индуктора являются диаметр D_n , длины секций нагрева L_1 , L_2 и L_3 и число витков на каждой секции нагрева N_1 , N_2 и N_3 . Витки индуктора диаметром D_n расположены равномерно вдоль секций нагрева, т. е. расстояние между витками в пределах каждой из рассматриваемых секций является одинаковым (см. рис. 4).

Помимо конструктивных параметров задаются режимные параметры: сила тока и частота источника питания. В представленной численной модели, в отличие от известных моделей зонного нагрева [19], реализована возможность авто-

номного управления токами для каждой секции индуктора. Это означает, что каждой секции нагрева индуктора соответствует собственное значение питающего тока I_1 , I_2 , I_3 (для секций L_1 , L_2 , L_3 соответственно, см. рис. 4). К режимным параметрам индуктора также относится и время процесса, которое можно разделить на два временных интервала: время нагрева t_n и время охлаждения $t_{ох}$. Под t_n понимается этап нагрева, во время которого ИНУ индуцирует внутренние источники тепла в заготовке. Во время охлаждения ИНУ отключается и стальная заготовка естественно охлаждается за счет температуры окружающей среды. При оптимальной длительности интервала охлаждения заготовки $t_{ох}$ происходит выравнивание температурного распределения для его максимального приближения к требуемому профилю, необходимому для последующих технологических операций, за счет естественных тепловых потерь при отсутствии внутренних источников тепла.

Результатом численного моделирования процесса зонного индукционного нагрева (рис. 5) является конечное температурное распределение, которое необходимо для последующего анализа и принятия технологических решений (оранжевый график – требуемое конечное температурное распределение на поверхности стальной заготовки, синий график – полученное в ходе численного моделирования конечное температурное распределение на поверхности стальной заготовки).

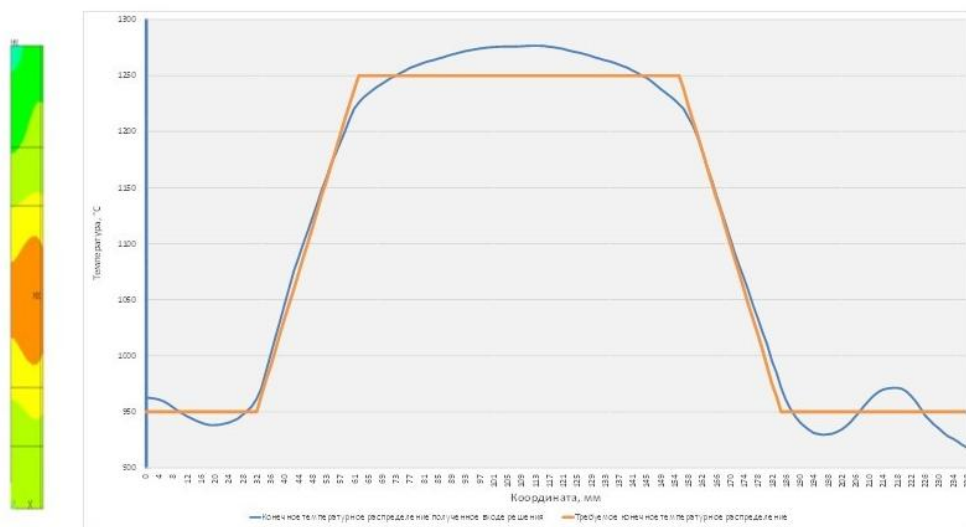


Рис. 5. Конечное температурное распределение на поверхности заготовки, полученное в ходе численного решения, в сравнении с требуемым конечным температурным распределением

Численные модели реальных технологических установок предоставляют широкие возможности для анализа сложных систем и физических процессов, позволяя проводить исследования и тестовые испытания без риска для функционирования реальных производственных процессов. Кроме того, их использование способствует реализации оптимизационных процедур с минимальными затратами ресурсов, а также облегчает проектирование систем автоматического управления различной степени сложности, включая киберфизические системы

управления технологическими процессами. В то же время численные модели реальных технологических процессов характеризуются высокой вычислительной сложностью и значительной ресурсоемкостью, что связано с необходимостью учета множества факторов, существенно влияющих на точность и достоверность результатов моделирования. В связи с этим их обычно применяют только на этапах оптимального проектирования. Однако далее в статье предложен вариант построения киберфизической системы, позволяющей использовать численную модель не только для решения задачи оптимального проектирования установки, но и для оперативного управления процессом нагрева заготовок в режиме реального времени.

Структура киберфизической системы управления процессом индукционного нагрева

Для обеспечения требуемого температурного профиля на поверхности стальной заготовки процесс зонного индукционного нагрева необходимо рассмотреть как объект управления и оптимизации. Ввиду пространственной распределенности температурного поля процесс зонного индукционного нагрева представляет собой объект управления с распределенными параметрами (ОРП), а изменяющееся во времени и пространстве температурное поле является управляемой функцией состояния данного ОРП. Такое представление объекта управления обуславливает принципиальные особенности и накладывает существенные ограничения при синтезе системы управления.

Процесс нагрева заготовки в ИНУ подвержен влиянию различного рода возмущающих воздействий, которые согласно классификации, принятой в [20], делятся на параметрические и функциональные. Параметрические возмущения обусловлены неполнотой информации о теплофизических и электромагнитных характеристиках материала нагреваемой заготовки или их непредсказуемым изменением в течение процесса нагрева (например, при изменении номенклатуры изделий). Функциональные возмущения связаны с конструкцией индуктора и реализацией управляющих воздействий.

Одним из основных способов достижения требуемого результата работы системы в условиях действия возмущений является построение замкнутой системы управления, направленной на отработку данных возмущений. В случае управления ОРП построение замкнутой системы автоматического управления связано с множеством усложняющих факторов, в первую очередь с распределенным характером управляемой функции состояния [20]. При управлении пространственно-временным распределением функции состояния ОРП (изменяющимся во времени распределением температуры на поверхности заготовки) требуется распределенный по пространственным координатам контроль, при этом количество точек измерения напрямую влияет на точность контроля конечного температурного поля, формируемого замкнутой системой управления с учетом действия возмущений. Однако в реальных условиях установка датчиков измерения температуры по длине заготовки обычно ограничена конструкцией индуктора, поэтому наиболее доступными для измерения являются температуры торцов заготовки. В рассматриваемой задаче формирования заданного неравномерного температурного распределения по длине заготовки измерение только торцевых температур не отвечает требуемой точности контроля температурного распределения.

В этом случае для построения замкнутой системы управления температурным распределением заготовок в процессе зонного индукционного нагрева пред-

лагается перейти от рассмотрения замкнутой системы управления одной заготовкой к рассмотрению дискретно управляемого и дискретно наблюдаемого множества последовательно нагреваемых заготовок. При этом принимаются следующие допущения.

Во-первых, конструктивные и режимные параметры ИНУ рассчитываются исходя из предположения, что геометрические параметры заготовок и физические свойства материалов варьируются незначительно для партии заготовок одной номенклатуры, при этом основные технологические параметры остаются неизменными в течение всего производственного цикла до изменения номенклатуры нагреваемого изделия и режима работы установки.

Во-вторых, предполагается, что измерение температурного распределения вдоль пространственной координаты по окончании процесса нагрева технически реализуемо. После выхода из индуктора либо заготовка перемещается вдоль датчика измерения температуры, или датчик температуры – вдоль заготовки, либо заготовка позиционируется на некоторое время в поле нескольких датчиков температуры.

Выполнение указанных условий позволяет предложить управление процессом зонного индукционного нагрева партии заготовок в замкнутой системе, когда измерение выходной (управляемой) величины осуществляется по окончании процесса нагрева отдельной заготовки, а результат измерения участвует в формировании управляющего воздействия следующей заготовки (в рамках одной партии).

Задача предлагаемой системы состоит в непрерывной оценке отклонения требуемого температурного профиля на поверхности стальной заготовки с полученным температурным распределением в конце процесса зонного индукционного нагрева (определяемым по измерительным сигналам обратной связи). В общем случае управляющие воздействия, влияющие на конечное температурное распределение в ходе индукционного нагрева, можно разделить на режимные и конструктивные. В качестве режимных управляющих воздействий рассматриваются длительности интервалов включения/выключения секций индуктора (t_n , t_{ox}) и значения токов на каждой его секции (I_1 , I_2 , I_3), возможность реализации которых подробно описана ранее. Реализация оптимальных режимных параметров ИНУ позволяет в оперативном режиме компенсировать отклонение температурного распределения от заданного, в т. ч. вызванного изменением измеряемых возмущений, к которым относятся температура окружающей среды ($T_{окр.ср.}$).

При этом оптимальные конструктивные параметры ИНУ, к которым относятся количество и размер витков (N_1 , N_2 , N_3 , D_B , D_n), шаг намотки и т. д., рассчитываются один раз на этапе проектирования для производственного цикла нагрева одной номенклатуры стальных заготовок (для каждой партии заготовок, отличных по характеристиками от предыдущей, отдельно). Такая особенность применения оптимальных значений конструктивных параметров ИНУ объясняется отсутствием технической возможности реализации оперативного (автоматического) изменения конструкции ИНУ в условиях технологического непрерывного процесса. Исключением является использование роботизированных систем автоматической замены секций индуктора или их изменения путем подключения или отключения отдельных витков или их групп. Однако для реализации такой возможности в любом случае необходимо наличие нескольких типовых форм индукторов для каждого вида заготовок, что накладывает существенную финан-

совую нагрузку и не решает в полной мере проблему оперативной замены индуктора во время технологического процесса (появление нового материала или формы заготовки в условиях быстроменяющегося рынка). Расчет оптимальных значений режимных и конструктивных параметров ИНУ проводится с использованием специальных методов параметрической оптимизации и оптимального управления, которые являются предметом отдельного рассмотрения.

Формирование управляющего воздействия, к которому относятся режимные параметры ИНУ, в предлагаемой системе связано с применением численных процедур, требующих больших вычислительных ресурсов. Поэтому мощность вычислительного устройства системы управления и сложность алгоритма формирования управляющего воздействия будут определять запаздывание реакции системы на возмущающие воздействие, имеющее переменный характер. В зависимости от соотношения вычислительной мощности системы и вычислительной нагрузки время на внедрение управляющего воздействия может быть скорректировано с учетом запаздывания, при этом запаздывание может составлять время, эквивалентное нагреву нескольких заготовок в зависимости от скорости процесса индукционного нагрева одной заготовки и мощности вычислительных устройств.

Задача формирования управляющего воздействия включает в себя задачи идентификации модели, отражающей поведение реальной ИНУ, и разработки оптимального закона программного управления на основе полученной модели и в дальнейшем формирования этого управления в режиме реального времени.

Рассмотренные выше математическая и численная модели позволяют формировать оптимальные значения не только режимных параметров управления ИНУ, к которым относятся количество интервалов постоянства и их длительность (интервалы работы ИНУ), но и параметры, относящиеся к конструктивным характеристикам ИНУ: длины секций индуктора, значения токов данных секций, число витков и т. д. Оптимальные параметры ИНУ определяются на первом этапе расчета – этапе конструирования. В нашем случае этап проектирования конструктивной части фактически выполняет управляющая часть системы, формируя на выходе оптимальные значения этих параметров. Параметры, которые остаются неизменными после первого этапа конструирования (конструктивные параметры ИНУ), в последующих циклах управления не оптимизируются, но их значения в модели могут быть скорректированы от принятых в конструкции по результатам циклически выполняемой идентификации модели.

Для реализации представленных выше возможностей система управления должна обладать необходимым функционалом и отвечать определенным требованиям. Наиболее подходящим классом систем являются киберфизические системы управления технологическими процессами (КФСУ ТП). КФСУ ТП, в отличие от традиционных систем автоматического управления (САУ), обладают рядом принципиальных достоинств [5], позволяющих реализовать систему управления, представленную на рис. 6. Они позволяют проектировать более гибкие и адаптивные технологические структуры, позволяющие оперативно реагировать на изменения рынка спроса и характеристик производства, тем самым повышая экономическую и производственную эффективность предприятия.

Системы управления киберфизического класса представляют собой взаимосвязанные вычислительную, коммуникационную, измерительную, управляющую подсистемы, интегрированные непосредственно с управляемым физическим процессом [5, 21–23].

В соответствии с [23] предлагается КФСУ ТП зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки, структурная схема которой приведена на рис. 6. Измеренный температурный профиль по объему заготовки по окончании процесса нагрева в совокупности с известными управляющим воздействием (УВ) и возмущениями, обрабатываемыми в режиме реального времени (РРВ), подается на вход блока интеллектуального анализа (БИА), выходом которого является оценка соответствия полученного температурного распределения на поверхности заготовки требуемому по техническому заданию в условиях действий УВ и возмущений.

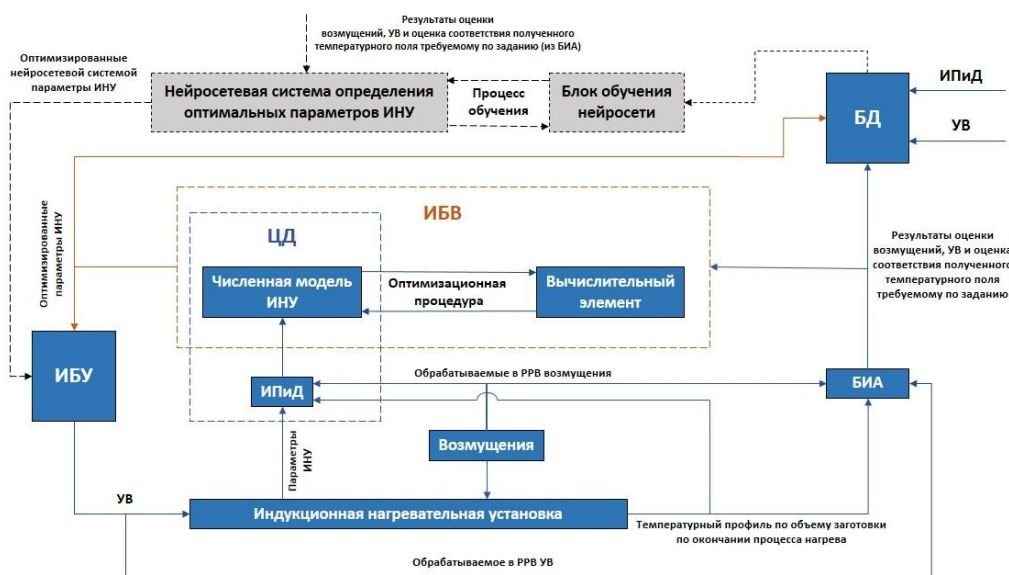


Рис. 6. Структура КФСУ ТП

Результат работы БИА передается в интеллектуальный блок вычислений (ИБВ), задача которого состоит в поиске оптимальных параметров ИНУ, значения которых позволяют получить требуемый по техническому заданию температурный профиль на поверхности нагреваемой заготовки. Поиск оптимальных параметров ИНУ происходит с использованием оптимизационной процедуры, основанной на совместной работе численной модели ИНУ (реализованной в специализированных программных пакетах для численного моделирования) и вычислительного элемента, представляющего собой пакет прикладных программ для высокосложных математических вычислений. При этом численная модель ИНУ постоянно актуализируется при взаимодействии с измерительными приборами и датчиками (ИПид) и, таким образом, формирует цифровой двойник (ЦД) реальной ИНУ. Наличие ЦД в структуре системы является одним из принципиальных отличий КФСУ ТП от типовых систем управления.

Результат работы ИБВ, представляемый вектором оптимальных параметров ИНУ, передается на блок интеллектуального управления (ИБУ), который, в свою очередь, формирует УВ (изменение значений токов, частот, длин секций индуктора, шага витков и т. д.).

В рамках КФСУ ТП зонного индукционного нагрева предлагается формировать базу данных (БД) для хранения информации о ходе технологического про-

цесса. БД аккумулирует в себе результаты работы БИА, ИБВ, данные с ИПИД и информацию об УВ. БД реализует возможность применения альтернативных методов управления, основанных на искусственном интеллекте, которые способны проводить оценку параметров модели без ресурсоемкой оценки с использованием самой модели. При таком режиме работы системы управления на нее подаются данные о технологическом процессе с БИА. На основе полученной информации и данных из блока обучения нейросети система формирует собственный вектор оптимальных значений ИНУ на основе ранее полученного опыта (данные из БД и блока обучения нейросети), без непосредственного использования численной модели ИНУ и оптимизационного алгоритма. Такой подход не должен и не может полностью заменить являющийся основным метод оптимизации на основе применения модели, но позволит осуществлять оценку параметров для каждой заготовки.

Таким образом, описанная выше КФСУ ТП позволяет реализовать оптимальное управление процессом зонного индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки с целью достижения требуемого температурного распределения на ее поверхности перед последующими операциями обработки давлением в условиях действия параметрических и функциональных возмущений.

Заключение

Рассмотренные в данной статье вопросы разработки структуры киберфизической системы управления раскрывают сущность управления и контроля за процессом зонного индукционного сквозного нагрева стальной цилиндрической заготовки, заключающегося в необходимости создания неравномерного по длине заготовки конечного температурного распределения, профиль которого определяется наличием отдельных зон заготовки, подвергаемых в дальнейшем операциям пластической деформации.

В статье проведен анализ технологических требований к формированию неравномерного температурного профиля на поверхности стальной цилиндрической заготовки в конце процесса нагрева. Достижение предъявляемых требований возможно путем применения установки зонного сквозного индукционного нагрева. Проектирование такой установки требует построения математической модели для анализа и оценки качества конечного температурного распределения в процессе определения оптимальных конструктивных и режимных параметров ИУ. В статье приведено краткое описание численной нелинейной модели процесса зонного индукционного нагрева с учетом специальных требований к проектированию многосекционной индукционной установки.

Предложено расширить область применения численной модели зонного индукционного нагрева с целью построения автоматической системы управления процессом нагрева непрерывного потока заготовок. Приведена структура системы, которая относится к классу киберфизических систем управления ОРП, позволяющих достигать требуемое конечное пространственно-временное распределение функции состояния и обеспечивать отработку возмущающих воздействий различной природы, в том числе оценивать потребность в корректировке конструктивных параметров ИУ за счет подключения или отключения активных витков в режиме реального времени. Численная модель процесса зонного индукционного нагрева является основой для создания цифрового двойника, отражающего поведение технологического процесса в режиме реального времени, который совместно с подсистемами, изображенными на рис. 6, формирует КФСУ ТП.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Айтмухамбетов И.Е., Никонова Т.Ю.* Пластическая деформация. Методы и применение // Научный журнал. 2020. № 3 (48). С. 20–22.
2. Плюсы и минусы установок индукционного нагрева // НПП «ЭЛСИТ» [Электронный ресурс]. – URL: <https://элсит.рф/статьи/плюсы-и-минусы-установок-индукционного-нагрева?ysclid=lompxy868v313694259> (дата обращения: 06.11.2023).
3. *Артур М.Х.* Синтез алгоритмов оптимального управления процессом индукционного нагрева стальной цилиндрической заготовки при неполном измерении состояния // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2017. № 3. С. 7–15.
4. *Цветков В.Я.* Управление с применением кибер-физических систем // Перспективы науки и образования. 2017. № 3 (27). С. 55–60.
5. *Пешкин К.С.* Назначение и перспективы развития киберфизических систем управления технологическими процессами // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. № 1. С. 47–59.
6. *Кучеров В.В.* Индукционный нагрев в промышленности // Индустрия. 2014. № 3. С. 85.
7. *Петров П.А., Крутина Е.В., Калтин Ю.Г.* Нагрев и нагревательные устройства в кузнечном производстве. М.: МГТУ «МАМИ», 2010. 110 с.
8. *Сасса В.С.* Футеровка индукционных электропечей. М.: Металлургия, 1989. 231 с.
9. *Rudnev V.I. et al.* Handbook of induction heating. N.Y.: Marcel Dekker, 2003.
10. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. М.: Металлургия, 1993. 278 с.
11. *Яицков С.А.* Ускоренный изотермический индукционный нагрев кузнечных заготовок. М.: Машгиз, 1962. 96 с.
12. *Кухарь В.В., Лаврентик О.А., Бурко В.А., Крестников М.В.* Моделирование температурного поля неравномерно нагретой по длине заготовки при ее остывании на штампе // Вестник Приазовского государственного технического университета. 2007. № 17. С. 125–129.
13. *Кухарь В.В., Диамантопуло К.К., Мазан В.И.* Способы получения профилированной заготовки. Пат. 43614А Украина, МПК В 21 К 1/08. 2001.
14. Способ получения фасонной заготовки под штамповку. Пат. 49389А Украина, МПК В 21 К 1/08.
15. Сталь 45. Применение углеродистой конструкционной Стали 45 при производстве редукторов и цепных звездочек // Stalcu.ru все про обработку металла [Электронный ресурс]. – URL: <https://stalcu.ru/temperaturny/temperatura-plavleniya-stali-45.html?ysclid=lojx4dvej6319835808> (дата обращения: 05.11.2023).
16. *Вайнберг А.М.* Индукционные плавильные печи. М.: Энергия, 1967. 415 с.
17. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. М., Высшая школа, 1967. 559 с.
18. *Шарапова О.Ю.* Создание численной модели индукционно нагревательной установки периодического действия в среде наукоемкого расчетного программного комплекса FLUX // Технические науки: проблемы и перспективы. Материалы I Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, март 2011 г.). Санкт-Петербург: Реноме, 2011. С. 191–195.
19. *Ennen M., Niedzwiecki I., Baake E.* Tailored heating of billets for hot forming using an induction heating approach // In Proceeding of XIX International UIE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing: Plzen (Czech Republic), September 2–3. 2021.
20. *Рапопорт Э.Я., Плишивцева Ю.Э.* Технология оптимального проектирования систем с распределенными параметрами: программные стратегии принятия решений // Онтология проектирования. 2017. Т. 7. № 2(24). С. 172–190. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-172-190.
21. *Гурьянов А.В., Заколдаев Д.А., Шукалов А.В., Жаринов И.О., Костишин М.О.* Организация цифровых производств на основе киберфизических систем и онтологий // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 2. С. 268–277. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277.
22. *Юдинцев А.Г., Дмитриев В.М., Ганджа Т.В., Зайченко Т.Н., Дубинин Н.М.* Структурно-функциональная схема цифрового двойника испытательного комплекса системы электроснабжения космических аппаратов на основе многоуровневой компьютерной модели // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2022 Т. 18. № 3–4. С. 141–150. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-141-150.
23. ПНЕТ 854–2023 (ИСО 23704-1 2022). Системы киберфизические. Типовая архитектура для киберфизической системы управления умным станком. Часть 1. Биомаркеры: пред-

варительный национальный стандарт Российской Федерации: издание официальное: утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 ноября 2023 г. № 72-пнст: подготовлен Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «МИРЭА – Российский технологический университет» (РТУ МИРЭА) на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта. М.: Российский институт стандартизации, 2023.

Статья поступила в редакцию 10.09.2024 г.

DEVELOPMENT OF THE STRUCTURE OF A CYBERPHYSICAL CONTROL SYSTEM FOR THE PROCESS OF TAILORED INDUCTION HEATING OF A STEEL BILLET

S.A. Kolpashchikov, K.S. Peshkin¹

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

E-mail: skolpaschikov@mail.ru, kir.peschkin@yandex.ru

Abstract. The article is devoted to the development of the structure of a cyberphysical control system for the process of zone induction heating, widely used in modern industrial production during the heat treatment of metal products for various purposes. An analysis of the range of products manufactured using induction heat treatment and the advantages of using induction heating systems has shown a wide range of applications of this method of heat treatment in modern production and great opportunities for automation and optimization of processes associated with induction heating of products. This fact indicates the relevance of the development of various kinds of intelligent control systems in relation to the processes of industrial induction heating of metal blanks and semi-finished products. The article describes the induction method of zone heat treatment of metals, its advantages over flame heat treatment methods and the range of products manufactured using it. A description of the billet-inductor system is presented, for which the structure of a cyberphysical control system for the process of zone induction heating has been developed. The technological requirement for the final temperature distribution on the surface of the workpiece and the factors influencing the deviation of the temperature distribution from that required in the process of zone induction heating are considered. A list of possible disturbing influences is given, requirements for the technological process are formulated, control principles are described and, based on this, the structure of the zone induction heating process control system, which belongs to the class of cyberphysical process control systems, is developed.

Keywords: tailored through induction heating, intelligent control system, plastic deformation surgery, cyberphysical system, induction heating system, technological process.

REFERENCES

1. Ajtmuxambetov I.E., Nikonova T.Yu. Plasticheskaya deformatsiya. Metody i primeneniye [Plastic deformation. Methods and application] // Nauchnyy zhurnal. 2020. No. 3(48). Pp. 20–22. (In Russian)
2. Plyusy i minusy ustanovok indukcionnogo nagreva [Pros and cons of induction heating systems] // NPP "ELSIT". URL: <https://e.lsit.rf/stat/i/plyusy-i-minusy-ustanovok-indukcionnogo-nagreva?ysclid=lompxy868v313694259> (data obrasheniya: 06.11.2023). (In Russian)
3. Artur M.H. Sintez algoritmov optimal'nogo upravleniya processom indukcionnogo nagreva stal'noj cilindricheskoj zagotovki pri nepolnom izmerenii sostoyaniya [Synthesis of optimal control algorithms for process of induction heating of steel] // Vestnik Samar. gosud. tekhn. un-ta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2017. No. 3. Pp. 7–15. (In Russian)
4. Czvetkov V.Ya. Upravlenie s primeneniem kiber-fizicheskix system [Management using cyber-physical systems] // Perspektivy Nauki i Obrazovaniya. 2017. No. 3 (27). Pp. 55–60. (In Russian)



© The Author(s), 2024

¹ Sergey A. Kolpashchikov (Ph.D. (Techn.)), Head of Department.

Kirill S. Peshkin, Postgraduate Student.

5. *Peshkin K.S.* Purpose and prospects for the development of cyberphysical systems for technological processes [Purpose and development prospects of cyber-physical systems for technological process control] // *Vestnik Samar. gosud. tekhn. un-ta. Seriya: Tekhnicheskie nauki.* 2023. No. 1. Pp. 47–59. (In Russian)
6. *Kuchеров V.V.* Indukcionnyy nagrev v promyshlennosti [Induction heating in industry] // *Industriya.* 2014. No. 3. Pp. 85. (In Russian)
7. *Petrov P.A., Krutina E.V., Kalpin Yu.G.* Nagrev i nagrevatelnye ustrojstva v kuznechnom proizvodstve [Heating and heating devices in forging production]. M.: MGTU "MAMI", 2010. 110 p. (In Russian)
8. *Sassa V.S.* Futerovka indukcionnykh elektropetchey [Lining of induction electric furnaces]. M.: Metallurgiya, 1989. 231 p. (In Russian)
9. *Rudnev V.I. et al.* Handbook of induction heating. N.Y.: Marcel Dekker, 2003.
10. *Rapoport E.Ya.* Optimizatsiya processov indukcionnogo nagreva metalla [Optimization of metal induction heating processes]. M.: Metallurgiya, 1993. 278 p. (In Russian)
11. *Yaiczkov S.A.* Uskorennyy izotermicheskij indukcionnyy nagrev kuznechnyx zagotovok [Accelerated isothermal induction heating of forging blanks]. M.: Mashgiz, 1962. 96 p. (In Russian)
12. *Kuxar V.V., Lavrentik O.A., Burko V.A., Krestnikov M.V.* Modelirovanie temperaturnogo polya neravnomerno nagretoy po dline zagotovki pri ee ostyvani na shtampe [Modeling the temperature field of a workpiece unevenly heated along its length during its cooling on a stamp] // *Vestnik Priazovskogo gosud. texnich. un-ta.* 2007. No. 17. Pp. 125–129. (In Russian)
13. *Kuxar V.V., Diamantopulo K.K., Mazan V.I.* Sposoby polucheniya profilirovannoy zagotovki [Methods for obtaining profiled blanks]. Pat. 43614A Ukraina, MPK V 21 K 1/08. 2001. (In Russian)
14. Sposob polucheniya fasonnoy zagotovki pod shtampovku [Method of obtaining a shaped blank for stamping]. Pat. 49389A Ukraina, MPK V 21 K 1/08. (In Russian)
15. Stal 45. Primenenie uglerodistoy konstrukcionnoy Stali 45 pri proizvodstve reduktorov i cepnyx zvyozdochek [Steel 45. Application of carbon structural Steel 45 in the production of gearboxes and chain sprockets] // *Stalcul.ru vse pro obrabotku metalla.* URL: <https://stalcul.ru/temperaturny/temperatura-plavleniya-stali-45.html?ysclid=lojx4dvej6319835808> (data obrashheniya: 05.11.2023). (In Russian)
16. *Vajnberg A.M.* Indukcionnye plavilnye pechi [Induction melting furnaces]. M.: Energiya, 1967. 415 p. (In Russian)
17. *Lykov A.V.* Teoriya teploprovodnosti [Theory of thermal conductivity]. M.: Vysshaya shkola, 1967. 559 p. (In Russian)
18. *Sharapova O.Yu.* Sozdanie chislennoy modeli indukcionno nagrevatel'noy ustanovki periodicheskogo dejstviya v srede naukoemkogo raschetnogo programmnogo kompleksa FLUX [Creation of a numerical model of a periodic induction heating unit in the environment of the high-tech calculation software package FLUX] // *Texnicheskie nauki: problemy i perspektivy: materialy I Mezhdunar. nauch. konf. (Sankt-Peterburg, mart 2011).* Sankt-Peterburg: Renome, 2011. Pp. 191–195. (In Russian)
19. *Ennen M., Niedzwiecki I., Baake E.* Tailored heating of billets for hot forming using an induction heating approach // In *Proceeding of XIX International UIE-Congress on Electrotechnologies for Material Processing: Plzen (Czech Republic), September 2–3. 2021.*
20. *Rapoport E.Ya., Pleshivceva Yu.E.* Tekhnologiya optimalnykh sistem s raspredelyonnymi parametrami: programmnnye strategii prinyatiya reshenij [Technology of optimal systems with distributed parameters: software strategies for decision making] // *Ontologiya proektirovaniya.* 2017. Vol. 7. No. 2 (24). Pp. 172–190. DOI: 10.18287/2223-9537-2017-7-2-172-190 (In Russian)
21. *Guryanov A.V., Zakoldaev D.A., Shukalov A.V., Zharinov I.O., Kostishin M.O.* Organizatsiya cifrovyykh proizvodstv na osnove kiberfizicheskix sistem i ontologiy [Organization of digital production based on cyber-physical systems and ontologies] // *Nauchno-texnicheskij vestnik informacionnykh tekhnologiy, mexaniki i optiki.* 2018. Vol. 18. No. 2. Pp. 268–277. DOI: 10.17586/2226-1494-2018-18-2-268-277. (In Russian)
22. *Yudincev A.G., Dmitriev V.M., Gandzha T.V., Zajchenko T.N., Dubinin N.M.* Strukturno-funktsionalnaya sxema cifrovogo dvojnika ispytatel'nogo kompleksa sistemy elektrosnabzheniya kosmicheskix apparatov na osnove mnogourovnevnoy kompyuternoy modeli [Structural and functional diagram of the digital twin of the test complex of the power supply system of spacecraft based on a multi-level computer model] // *Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekxy i sistemy.* 2022. Vol. 18. No. 3–4. Pp. 141–150. DOI: 10.17122/1999-5458-2022-18-3-4-141-150. (In Russian)

23. PNET 854–2023 (ISO 23704-1 2022). Sistemy kiberfizicheskie. Tipovaya ar-hitektura dlya kiberfizicheskoy sistemy upravleniya umnym stankom. Chast 1. Biomarkery: predvaritelnyj nacionalnyj standart Rossijskoj Federacii: izdanie oficialnoe: utverzhden i vveden v dejstvie Prikazom Federalnogo agentstva po tekhnicheskomu regulirovaniyu i metrologii ot 27 noyabrya 2023 g. No. 72-pnst: podgotovlen Federalnym gosudarstvennym byudzhetnym obrazovatelnyim uchrezhdeniem vysshego obrazovaniya "MIREA – Rossijskij tekhnologicheskij universitet" (RTU MIREA) na osnove sobstvennogo perevoda na russkij yazyk angloyazychnoj versii standarta [Part 1. Biomarkers: preliminary national standard of the Russian Federation: official edition: approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated November 27, 2023 No. 72-pnst: prepared by the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "MIREA – Russian Technological University" (RTU MIREA) based on its own translation into Russian of the English version of the standard]. M.: Rossijskij institut standartizacii, 2023. (In Russian)

Original article submitted 10.09.2024

Энергетика и электротехника

УДК 621.315.175

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ВОЗДУШНОЙ СРЕДЕ В СИСТЕМЕ ПЛАВКИ ГОЛОЛЕДА НА ПРОВОДАХ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

А.А. Базаров, С.И. Будко¹

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, budko-1998@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены вопросы, связанные с моделированием тепловых и гидродинамических процессов в системе «провод – ледяная оболочка – воздух», протекающих при плавлении гололеда на проводах. Проблема нарастания ледяной оболочки на поверхности проводов линии электропередач известна давно, и ее решению посвящено много работ в области контроля нарастания гололеда, технических средств борьбы с этим явлением. В последнее время появляются работы, посвященные системам плавки, функционирующим без отключения линий от потребителей, что повышает надежность и бесперебойность энергоснабжения, снижает экономические потери от недоотпуска продукции при перерывах электроснабжения. Процесс плавки гололеда может протекать в условиях нагрева проводников током большой величины до установившейся положительной температуры, при которой разрушается ледяная оболочка. При этом переключение в режим плавки осуществляется на короткий промежуток времени. Альтернативой такому способу является совмещение электроснабжения потребителей и плавки гололеда. В этом случае мощности тепловыделения в проводах меньше, время плавки увеличено, но не требуется отключение потребителей. Проблема сохранения линии в рабочем режиме передачи электрической энергии потребителям решается дополнительной загрузкой линии реактивными токами с помощью подключения определенной индуктивной нагрузки. Увеличение токов и мощности, поступающих от питающего трансформатора в линию, должно быть технически реализуемо, чтобы не перегрузить источник и не вызвать его отключение. В связи с ограничениями мощности требуется проведение точных расчетов тепловых процессов для определения приемлемых режимов расплавления ледяного слоя. Рассмотрено комплексное моделирование термогидродинамических процессов в системе «провод – ледяная оболочка – воздух» и несколько способов определения коэффициентов конвективного теплообмена на границах проводника при различных скоростях ветра.



© Автор(ы), 2024

¹ Александр Александрович Базаров, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий.
Степан Игоревич Будко, аспирант кафедры электроснабжения промышленных предприятий.

Ключевые слова: тепловые процессы, гидродинамика, модели турбулентности, коэффициент конвективного теплообмена, гололед, метод конечных элементов, связанные задачи.

Введение

Передача электрической энергии на большие расстояния в современной электроэнергетике осуществляется по высоковольтным линиям электропередачи с неизолированными сталеалюминевыми проводниками. Для бесперебойной работы линии создают проблему атмосферные гололедные явления, возникающие в условиях перехода температуры с положительной на отрицательную, что сопровождается порывистым ветром и повышенной влажностью воздуха. Гололедные отложения на металлических поверхностях вызывают значительные дополнительные механические нагрузки на арматуру железных опор, тросов и токоведущих проводов.

От того, будет ли образовываться гололед, изморозь или некоторая смесь из данных осадков, будет зависеть толщина стенки со временем нарастания. Структура таких осадков имеет прозрачную, полупрозрачную или замутненную прослойку с плотностью 600–900 кг/м³.

Обледенение на проводниках зачастую происходит при следующих погодных условиях: температура окружающей среды варьируется в пределах от –5 до –10 °С, ветер переменной направленности со скоростями от 5 до 20 м/с. Гололед формируется в течение нескольких часов в зависимости от ухудшения погодных условий.

Помимо известного способа плавки гололеда, заключающегося в подключении требующей разогрева линии к отдельному источнику питания с одновременным замыканием в конце линии, известны другие способы, позволяющие не отключать линию электроприемников.

Проблему можно решить с помощью нагрева проводов в линии при достаточном тепловыделении за счет пропускания дополнительных реактивных токов в рабочем режиме сети [1]. Кроме указанной работы имеется немало публикаций сходной направленности. В работах [2–5] рассмотрен метод плавки гололеда без отключения потребителей путем наложения постоянного тока на переменный. Исходя из экспериментальных исследований, представленных в работах, можно сделать вывод, что предлагаемая система плавки гололеда приводит к увеличению тока без изменения режима работы потребителей. Время плавки определяется исходя из величины гололедных отложений.

Известным способом плавки гололеда является нагрев проводов токами высокой частоты [6–10]. Основное преимущество данного метода заключается в том, что благодаря наличию поверхностного эффекта можно повысить мощность тепловыделения при сравнительно небольшом значении тока. Кроме систем плавки гололеда длительное время является актуальной тема выявления процесса гололедообразования и включения профилактического нагрева проводов еще до начала появления и скапливания осадков на проводах [11]. Оценке возможности появления гололеда на проводах посвящены также работы [12–14], где рассмотрены аппаратные средства систем обнаружения гололедных отложений и прогнозирования их формирования. Для повышения эффективности прогнозных моделей применяются обучаемые нейронные сети [11], что позволяет улучшить контроль налипания льда и определить параметры плавки для различных характеристик линий, параметров гололедной и ветровой нагрузки. На осно-

ве вариантов исходных данных могут быть быстро определены динамически изменяющиеся характеристики для различных условий.

Несмотря на обилие и многообразие работ, посвященных борьбе с гололедными отложениями на проводах, остаются нерешенными некоторые вопросы. Объяснений этому много: недостаток мощности в системе в нужный момент времени; недостаток времени для проведения работ по переводу системы в режим плавки гололеда; проблемы в системе контроля гололеда и другие. Нужно учитывать, что меры, принимаемые при плавке гололеда, существенно отличаются на линиях электропередачи разного напряжения.

На линиях электропередачи напряжением 6–10 кВ для плавки требуется сравнительно небольшая мощность по отношению к пропускаемой через линию, но все же не учитывать на этих линиях фактические потери мощности неправильно. Поэтому при использовании способа плавления гололеда без отключения потребителей необходимо более тщательное обоснование значения тока в линии, чтобы, во-первых, мощности тепловыделения в проводе было достаточно для расплавления гололеда, и во-вторых, питающий трансформатор не был перегружен.

Целью работы является исследование математических моделей тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда» при определении параметров системы плавки гололеда на проводах линии электропередач и выбор эффективной процедуры расчета с минимальной погрешностью.

Решение поставленных задач достигается в ходе определения тепловых потоков с поверхности ледяной оболочки провода при различных погодных условиях и определения необходимой величины мощности тепловыделения в проводах, необходимой для освобождения от льда.

Термогидродинамические процессы в системе «воздушная среда – ледяная оболочка» значительно влияют на величину тепловых потоков с поверхности провода. В зависимости от скорости ветра и толщины оболочки коэффициент теплообмена существенно изменяется, а также возникает неоднородность по угловой координате. Эти факторы приводят к усложнению расчетов тепловых процессов. Одновременное численное моделирование таких процессов, как передачи тепла за счет теплопроводности через ледяную оболочку с учетом изменения агрегатного состояния и теплообмена между воздухом и поверхностью ледяной оболочки, весьма сложно и требует ресурсов, превосходящих возможности персонального компьютера.

Для определения тепловых потоков с поверхности провода и точных коэффициентов теплообмена необходимы исследования при различных скоростях ветра.

Постановка задачи

Особенностью тепловых процессов при плавке гололеда на проводах является зависимость параметров граничных условий от направления ветра относительно провода, а также скорости ветра и температуры воздуха. Температура воздуха не только напрямую влияет на величину теплового потока, но и определяет плотность воздуха, что сказывается на его вязкости. Таким образом, коэффициент конвективного теплообмена имеет разную величину вдоль линии окружности провода. Для выявления особенностей процесса теплообмена предусматривается совместное решение тепловой и гидродинамической задач. Необ-

ходимо проанализировать распределение тепловых потоков, температур, определить коэффициенты конвективного теплообмена при различных скоростях ветра.

Тепловые процессы в проводе с ледяной оболочкой

Процессы передачи тепла в твердых телах описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Модель построена в декартовой системе координат. При анализе влияния ветра необходимо учитывать его направление. Поэтому использование более экономичной осесимметричной модели в данной задаче приведет к существенной погрешности из-за угловой несимметрии условий теплообмена с внешней средой. При использовании численных методов расчета для каждой отдельной подобласти уравнение содержит отличающиеся параметры. В случае нелинейной постановки задачи свойства среды неизменны только в пределах одного элемента. С учетом наличия нескольких сред в системе «ледяная оболочка – провод – воздух» стационарное уравнение теплопроводности записывается в общем виде

$$-\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x}\right) - \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial y}\right) = w_k - \rho_k C_k \mathbf{u} \cdot \left(\frac{\partial T_k}{\partial x} + \frac{\partial T_k}{\partial y}\right) \quad (1)$$

с начальными условиями

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y). \quad (2)$$

Здесь k – номер материала (1 – алюминий; 2 – лед; 3 – воздух); ρ_k – плотность материала; C_k – удельная теплоемкость; λ_k – коэффициент теплопроводности; T_k – температура; w_k – удельная мощность тепловыделения; $\mathbf{u}$ – вектор скорости (задается только для воздушной среды).

Начальные условия для упрощения предполагают задание начальной температуры системы «провод – оболочка», равной температуре окружающей среды. В большинстве вычислительных экспериментов принята температура среды, равная -5°C .

Теплопередача в системе «провод – ледяная оболочка» осуществляется за счет теплопроводности. Поэтому с учетом возможностей программного комплекса Comsol геометрическая модель неизменна, но свойства отдельных элементов могут изменяться.

Граничные условия задаются на внешних линиях расчетной области (воздух): на левом краю задана температура $T = 268 \text{ K}$; на верхней и нижней линиях задано условие теплоизоляции в виде равенства нулю теплового потока $Q = 0$; на правой линии задан конвективный тепловой поток

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(T - T_c). \quad (3)$$

Формально при движении воздуха задание теплообмена на выходе из расчетной области не влияет на процессы, протекающие в пределах данной области. С учетом такого подхода размеры области приняты достаточно большими, чтобы не вносить погрешность в расчеты.

Процессы теплообмена между поверхностью ледяной оболочки и воздухом представляют собой комбинацию процессов теплопроводности и переноса тепла с движущейся воздушной средой. В программе предусмотрен вывод различных составляющих теплового потока с поверхности твердого тела в газовую среду. Так как температура имеет небольшое значение, используется общее значение теплового потока.

Упрощенный расчет коэффициента конвективного теплообмена

В построенной модели воздух, лед и провод являются компонентами системы. Теплообмен между ними осуществляется путем сложного взаимодействия движущихся и неподвижных сред. Поэтому напрямую коэффициент теплообмена не участвует в расчетах. Он вычисляется по результатам решения связанной термогидродинамической задачи. Так как задачей является оценка коэффициента конвективного теплообмена, который может иметь разное значение на участках поверхности ледяной оболочки провода, то при моделировании в программе Comsol предусмотрено разделение линии окружности на четыре сектора. Это позволяет на каждом участке определять значения тепловых потоков и на их основе определять коэффициенты теплообмена для последующих расчетов процесса плавки гололеда.

Процессы плавления льда в данном исследовании не рассматриваются для упрощения процедуры решения. Значение мощности тепловыделения в проводнике подобрано исходя из условия нагрева не выше нуля градусов.

Для предварительного расчета коэффициента конвективного теплообмена используется стандартная процедура, использующая критерии Рейнольдса и Нуссельта, которые вычисляются через физические свойства воздуха, геометрические параметры и скорость движения [16].

Выражение для числа Рейнольдса имеет вид

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}. \quad (4)$$

Здесь ρ – плотность; v – скорость движения воздуха; d – диаметр провода (с учетом ледяной оболочки); η – кинематическая вязкость (в тексте используются обозначения скорости в виде скалярной величины v , в виде вектора $\mathbf{V}$ и в виде компонент вектора V_x). Динамическая вязкость связана с кинематической вязкостью соотношением

$$\mu = \frac{\eta}{\rho}. \quad (5)$$

Для значений Re в пределах от 10^3 до $2 \cdot 10^5$ определяется число Нуссельта

$$Nu = 0,245 Re^{0,6}. \quad (6)$$

Определив число Нуссельта, можно отыскать коэффициент конвективного теплообмена α :

$$Nu = \frac{\alpha \cdot d}{\lambda}; \quad (7)$$

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d}. \quad (8)$$

По приведенным соотношениям появляется возможность рассчитать значения коэффициента конвективного теплообмена для провода заданного сечения с ледяной оболочкой в диапазоне скоростей движения воздуха. Определение значений коэффициентов позволяет сделать заключение о степени интенсивности теплообмена. Моделирование теплового процесса позволяет определить уровень мощности, достаточный для плавки гололеда, а также затраченное время на процесс освобождения от ледяной корки.

Значения коэффициента конвективного теплообмена можно рассчитать в соответствии с геометрическими размерами проводников и ледяной оболочки. Полученные с помощью вычислений по формулам (4)–(8) результаты представлены

в табл. 1. Значения соответствуют проводу марки АС-50/8. С учетом ледяной оболочки диаметр провода составляет 20 мм. Температура окружающей среды принята равной -5°C .

Недостатком такого способа расчета коэффициентов конвекции является то, что полученные значения вычисляются с некоторой погрешностью и являются усредненными для всей поверхности ледяной оболочки. Для более точного решения задачи поиска коэффициентов теплообмена необходимо произвести численное моделирование связанной термогидродинамической задачи.

Таблица 1

Расчетные значения параметров при различных скоростях ветра

v , м/с	Марка провода	d , мм	Re	Nu	$\alpha_{ан}$, Вт/(м ² ·°C)
1	АС-50/8	0,02	1551	20,11	24,13
5			7606	52,22	62,67
10			15180	79,04	94,85

Гидродинамические процессы в воздушной среде

Модель гидродинамического процесса выбирается исходя из режима движения воздуха. Для определения характера движения воздуха используется критерий Рейнольдса (4), являющийся мерой отношения сил инерции и внутреннего трения в потоке. При значении числа Рейнольдса меньше критического, равного 2300, вдоль поверхности стенки (ледяной оболочки провода) образуется тонкий ламинарный пограничный слой. Если же число Рейнольдса больше критического значения, то на начальном участке возле стенки, как и в первом случае, образуется ламинарный пограничный слой, но за пределами этого слоя создается турбулентный слой.

Критическому числу Рейнольдса соответствует критическая скорость течения газа или жидкости в области с характерным размером d :

$$v_{kr} = 2300 \cdot \eta / d. \quad (9)$$

Использование в инженерных разработках полного комплекса уравнений для расчета несжимаемых турбулентных течений привело бы к непомерно большим затратам. Для практических целей, как правило, достаточно знать осредненные характеристики движения. Один из подходов состоит в выводе уравнений переноса некоторых турбулентных величин и моделировании членов более высокого порядка, которые оказываются равными тройным корреляциям. Здесь приводится так называемая $(k - \varepsilon)$ -модель, типичная модель турбулентности, основанная на двух уравнениях [16, 17]. Для упрощения сделаны допущения о постоянстве температуры, что приводит к неизменности теплофизических свойств, и о постоянстве плотности воздуха. Оба допущения имеют определенную погрешность, но для данной задачи не вносят большой ошибки в расчеты.

С учетом сказанного система уравнений для модели турбулентности записывается в виде:

– уравнение неразрывности

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0; \quad (10)$$

– уравнение Навье – Стокса

$$\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla p \eta \nabla^2 \mathbf{V}. \quad (11)$$

Здесь $\mathbf{V}$ – вектор скорости.

Система уравнений (10) и (11), записанная для бесконечно малого объема жидкости (воздуха), не может быть решена аналитически. Требуется использование численного метода с обоснованными допущениями.

Существуют разные модели турбулентности. Одной из них является $(k - \varepsilon)$ -модель. Она состоит из двух уравнений: уравнения для кинетической энергии и турбулентности k и уравнения для ее диссипации ε .

Данная модель описывает процессы зарождения переноса и рассеивания (диссипации) турбулентных вихрей с применением новой величины – турбулентной вязкости η_t , которая определяется в процессе решения задачи. Дифференциальные уравнения формулируются в следующем виде:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \text{div}(\rho \mathbf{V} k) = \text{div} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k) \right) + P_k - \rho \varepsilon + P_{kb}; \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \text{div}(\rho \mathbf{V} \varepsilon) = & \text{div} \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \text{grad}(\varepsilon) \right) + \\ & + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon + C_{\varepsilon 1} P_{\varepsilon b}), \end{aligned} \quad (13)$$

где k – кинетическая энергия турбулентности с размерностью $[m^2/c^2]$; ε – диссипация энергии турбулентности (m^2/c^3); p – давление (Па); P_k – генерация энергии турбулентности; P_{kb} и $P_{\varepsilon b}$ – слагаемые, учитывающие эффекты гравитации. В случае несжимаемой жидкости генерация энергии турбулентности определяется следующим образом:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial V_i}{\partial x_j}. \quad (14)$$

С помощью решения системы уравнений (12) и (13) рассчитывается распределение величин k и ε на расчетной области, на основании которых затем определяется значение турбулентной вязкости для каждого конечного элемента по формуле

$$\eta_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (15)$$

Уравнения (12) и (13) включают в свой состав ряд эмпирических констант:

$$C_\mu = 0.09; C_{\varepsilon 1} = 1.44; C_{\varepsilon 2} = 1.92; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon = 1.3.$$

Их значения получаются путем калибровки модели по серии натурных экспериментов. Использование полуэмпирических моделей турбулентности предполагает калибровку, заключающуюся в подборе констант. Известно, что более точные результаты получаются именно при моделировании тех течений, для которых была произведена калибровка. Из литературных источников известно, что $(k - \varepsilon)$ -модель турбулентности откалибрована для развитых турбулентных потоков жидкости и, соответственно, имеет хорошую точность при описании свободного течения жидкости на достаточном удалении от твердых стенок. В это же время применение $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности для задач расчета течения жидкости возле твердых стенок встречает проблемы.

Использование теории, разработанной для гидродинамических процессов в жидкости, для воздушной среды требует определенных допущений. В частно-

сти, условие несжимаемости воздуха перед стенкой при малой скорости движения вполне допустимо, так как повышение давления в тонком слое воздуха перед проводом незначительно.

В рассматриваемой задаче массовые силы не учитываются ввиду малости, так как плотность газа составляет $1,3 \text{ кг/м}^3$.

Уравнения (12) и (13) справедливы при $\mu_T \gg \mu$. Однако это неверно вблизи твердой поверхности, где турбулентные флуктуации затухают вблизи стенки. Для учета данного явления вблизи твердой поверхности используются специальные пристенные функции, которые формируют логарифмический закон изменения тангенциальной составляющей скорости в направлении нормали к поверхности. Принимается, что выделяемая турбулентная кинетическая энергия в данной области полностью рассеивается. Использование специальных пристенных функций позволяет определить и корректно задать граничные условия для k и ε на небольшом удалении от твердой поверхности:

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{V} = 0. \quad (16)$$

На боковой поверхности потока (верхняя и нижняя границы области) задаются условия с логарифмической функцией стенки. В набор функций входит также выражение вида (16). Так как размеры области довольно велики и расстояние от провода до верхней и нижней границ принято равным 0,3 м, влияние стенок на характер движения воздуха возле провода будет минимальным.

На входе задается начальное значение скорости

$$\mathbf{V} = -V_0 \mathbf{n}. \quad (17)$$

На выходе расчетной области (на правом краю) задается давление

$$p = p_0. \quad (18)$$

Кроме рассмотренных внешних границ области имеются внутренние границы между воздушной средой и отдельными линиями поверхности ледяной оболочки. Математическая формулировка условий на границе имеет вид:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_0; k = (3I_T^2 / 2)(\mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{V}_0); \varepsilon = C_\mu^{0.75} k^{1.5} / \left((3I_T^2 / 2)(\mathbf{V}_0 \cdot \mathbf{V}_0) \right)^{1.5} / L_T. \quad (19)$$

Здесь L_T – масштаб длины турбулентности; I_T – интенсивность турбулентности.

Интенсивность турбулентности по умолчанию принята равной 0,01, а масштаб длины турбулентности 0,05. Эти значения очень невелики, что объясняется низким возмущением от провода, помещенного в движущийся воздушный поток.

Приведенные дифференциальные уравнения для среды и граничных условий описывают математическую модель турбулентного движения газового потока, заложенную в программном пакете Comsol, который использован для проведения дальнейших расчетов.

Моделирование

Математическая модель термогидродинамических процессов на границе системы «окружающая среда – ледяная оболочка – проводник» представляет собой объединение тепловой и гидродинамической задач. Для трех сред (окружающее воздушное пространство, сталеалюминевый провод, ледяная оболочка) модели задаются значения плотности и динамической вязкости. Задача решается в стационарном режиме.

В тепловой задаче задаются для всех сред значения теплопроводности, плотности и теплоемкости. Для провода задается мощность источника тепловыделения.

Сечение провода принято равным $50,26 \text{ мм}^2$, диаметр провода $0,008 \text{ м}$, диаметр ледяной оболочки составляет $0,02 \text{ м}$, мощность тепловыделения в проводе соответствует длительно допустимому току и равна $5,026 \text{ Вт}$, динамическая вязкость при температуре -5°C равна $\mu = 1.7 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$, плотность воздуха $\rho = 1.318 \text{ кг/м}^3$, теплопроводность $\lambda = 0.024 \text{ Вт/(м}\cdot\text{град)}$; число Рейнольдса взято из табл. 1. Для задачи в двухмерной постановке протяженность вдоль третьей координаты по умолчанию принимается равной одному метру.

Указанные значения используются для расчета на численной модели и для аналитического расчета.

В ходе исследований выполнен ряд расчетов при разных скоростях движения воздуха – от 1 до 10 м/с.

Несмотря на то, что использовалась стационарная термогидродинамическая модель процессов, возникали некоторые отклонения в балансе мощности тепловыделения в проводе и суммарного теплового потока с поверхности ледяной оболочки в движущийся воздух. Погрешность расчетов $\varepsilon = 100(Q_{\text{сум}} - P)/P$ определена относительно интегрального значения мощности тепловыделения в проводе $P = 5.026 \text{ Вт}$.

Для расчетов использован алгоритм раздельного поочередного решения системы тепловой и гидродинамической задач Stationary Segregated, что приводит к увеличению погрешности даже при большем числе элементов, но время решения в несколько раз меньше.

На рис. 1, 2 представлены распределения температуры при скорости ветра 1 и 10 м/с. Из рисунков видно, что тепловые потоки в окружающую среду быстро уменьшаются и процесс теплообмена протекает в ограниченном пространстве за проводом. Как уже отмечалось, выделяющаяся в проводе мощность не рассчитана на плавление оболочки, а более сложные процессы не рассматривались.

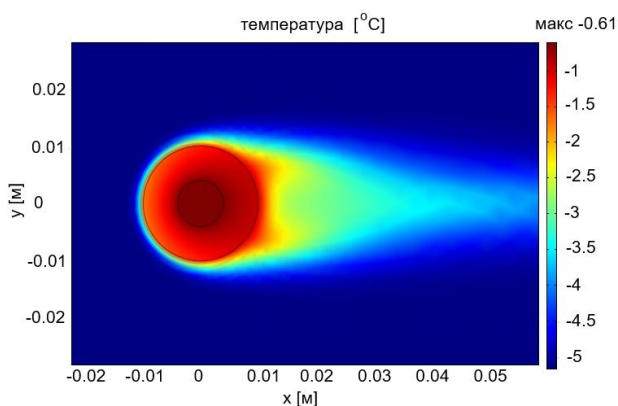


Рис. 1. Распределение температуры при скорости ветра 1 м/с при турбулентном характере движения

Определение коэффициентов конвективного теплообмена по результатам решения термогидродинамической задачи выполнено с учетом разбиения периметра внешней линии, охватывающей ледяную оболочку, на четыре отрезка (при

построении окружностей в программе предусмотрено разбиение на четыре части). Разбиение на большее число возможно, но для данной задачи нецелесообразно. Интегрирование на границе выполняется для дуги одного участка, потому что интегрирование векторных величин, таких как тепловой поток, сразу для четырех секторов приведет к нулевому результату или близкому к нему. Расчеты выполняются отдельно и суммирование производится с учетом знаков векторных величин.

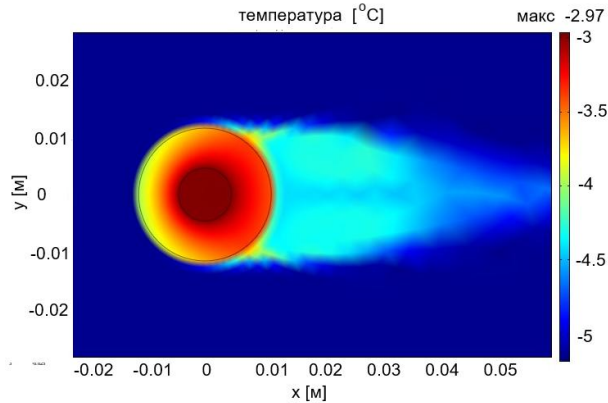


Рис. 2. Распределение температуры при скорости ветра 10 м/с при турбулентном характере движения

При расчетах задано движение воздушного потока слева направо. Поэтому два сектора – левый верхний и левый нижний – испытывают большее воздействие, чем два сектора, находящиеся с правой стороны провода. Средние значения тепловых потоков и температуры могут быть определены через специальные процедуры при численном решении, а также вручную при обработке диаграмм температуры и плотности теплового потока по линии окружности. Для выявления особенностей теплообмена между поверхностью ледяной оболочки и движущимся воздухом отдельно рассчитаны значения для левой и правой стороны поверхности.

Площадь боковой поверхности для половины ледяной оболочки (длина принята равной 1 м) составляет

$$S_{\partial} = \pi \frac{d}{2} L_{\text{пр}} = 0.0314 \text{ м}^2. \quad (20)$$

Определение тепловых потоков на двух дугах (левая и правая) внешней поверхности ледяной оболочки провода выполнено с помощью встроенной процедуры интегрирования величин по длине дуги L_{∂} на линии границы:

$$Q_{\text{инт}} = \int_0^{L_{\partial}} q(x) dx. \quad (21)$$

При поиске коэффициента теплообмена необходимо знать величину температуры поверхности. Для этого можно воспользоваться процедурой интегрирования температуры вдоль линии, а затем разделить полученную величину на длину линии:

$$T_{\text{инт}} = \frac{4}{\pi D} \int_0^{\pi/2} T(x) dx. \quad (22)$$

Длина линии L_o , вдоль которой производится интегрирование, соответствует четвертой части длины окружности внешней поверхности ледяной оболочки.

Другой способ расчета теплового потока заключается в разбиении длины дуги на короткие участки, определении среднего значения плотности теплового потока и умножении его на длину линии (четвертая часть длины окружности):

$$q_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N q_n ; \quad (23)$$

$$Q_{cp} = q_{cp} \frac{\pi D}{4} . \quad (24)$$

Аналогичная процедура используется при определении средней температуры на поверхности ледяной оболочки:

$$T_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n . \quad (25)$$

Значения тепловых потоков, определяемые с помощью двух способов расчета, совпадают с небольшими отклонениями, и можно принять

$$Q_{инт} = Q_{cp} . \quad (26)$$

Далее будем обозначать эти величины как интегральные, с указанием стороны дуги – левая l или правая r .

Другие величины, от которых зависят коэффициенты конвективного теплообмена, существенно отличаются:

$$Q_{инт}^l = 3.87 \text{ Вт}, \quad Q_{инт}^r = 1.234 \text{ Вт}.$$

Суммарное значение теплового потока с поверхности ледяной оболочки составляет $Q_{сум} = 5.26 \text{ Вт}$.

На основании выполненных решений для диаграмм, разбитых на участки, определены средние значения температуры поверхности и плотности теплового потока. Полученные значения представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные значения температуры и плотности теплового потока при разбиении линии окружности на участки при скорости ветра 1 м/с

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_n^l, ^\circ\text{C}$	-1,68	-1,66	-1,62	-1,56	-1,53	-1,46	-1,4	-1,33
$T_n^r, ^\circ\text{C}$	-1,25	-1,16	-1,1	-1,03	-0,96	-0,93	-0,91	-0,9
$q_n^l, \text{Вт/м}^2$	148	145	136	130	120	110	104	94
$q_n^r, \text{Вт/м}^2$	79	61	45	30	20	20	28	31

По формулам (23) и (25) определены средние значения температур и плотности теплового потока на левой и правой дугах. По полученным значениям найдены коэффициенты конвективного теплообмена для левой и правой дуг:

$$\alpha = \frac{q_{cp}}{T_{cp} - T_{oc}}. \quad (27)$$

Средним значениям температуры на дугах $T_{cp}^l = -1.53^\circ\text{C}$ и $T_{cp}^r = -1.03^\circ\text{C}$ соответствуют значения коэффициентов теплообмена:

- для левой верхней дуги: $\alpha = 35.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$;
- для правой верхней дуги: $\alpha = 9.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Среднее значение $\alpha = 22.6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Коэффициент конвективного теплообмена, полученный по методике, представленной в [15] и приведенный в табл. 1, равен $24,135 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ при температуре -5°C . Разница между средним значением коэффициента теплообмена, полученным с помощью численного расчета, и вычисленным по формулам составляет 6,7 %.

Аналогичные расчеты выполнены для скорости ветра 5 и 10 м/с.

По результатам расчетов построены диаграммы плотности теплового потока и температуры вдоль линии дуги (рис. 3, 4).

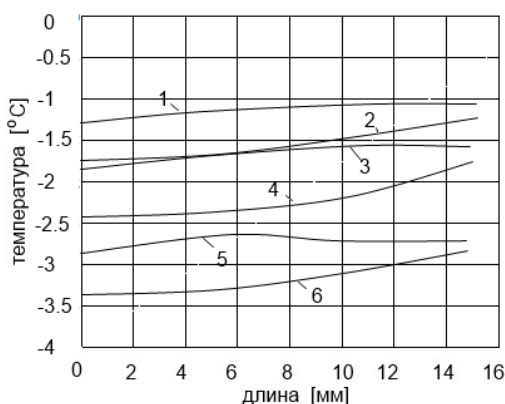


Рис. 3. Диаграммы температуры на поверхности провода: левая верхняя дуга: 1 – при скорости 1 м/с; 3 – при скорости 5 м/с; 5 – при скорости 10 м/с; правая верхняя дуга: 2 – при скорости 1 м/с; 4 – при скорости 5 м/с; 6 – при скорости 10 м/с

Для варианта расчета при скорости 5 м/с после решения задачи определены тепловые потоки на дугах проводника: на левой дуге $Q_{\text{инт}}^l = 3.638 \text{ Вт}$, на правой дуге $Q_{\text{инт}}^r = 1.322 \text{ Вт}$. По этим значениям найдено суммарное значение теплового потока с поверхности ледяной оболочки $Q_{\Sigma} = 4.96 \text{ Вт}$.

Для варианта расчета при скорости 10 м/с определены тепловые потоки на дугах проводника: для левой дуги $Q_{\text{инт}}^l = 3.79 \text{ Вт}$; для правой дуги $Q_{\text{инт}}^r = 1.33 \text{ Вт}$.

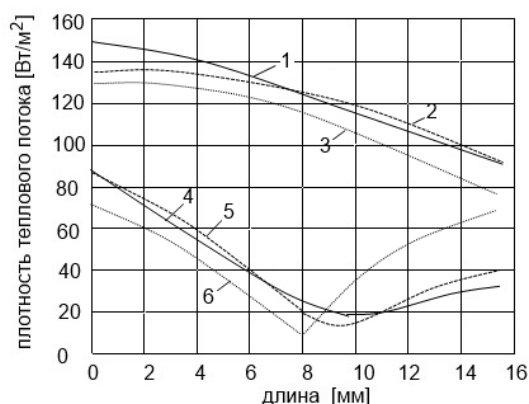


Рис. 4. Диаграммы плотности теплового потока на поверхности провода: левая верхняя дуга: 1 – при скорости 1 м/с; 2 – при скорости 5 м/с; 3 – при скорости 10 м/с; правая верхняя дуга: 4 – при скорости 1 м/с; 5 – при скорости 5 м/с; 6 – при скорости 10 м/с

Сумма этих значений определяет величину теплового потока с поверхности ледяной оболочки $Q_{\Sigma} = 5.12$ Вт.

Для определения средних значений температуры и плотности теплового потока на поверхности ледяной оболочки диаграммы разбиты на участки и выполнены расчеты, результаты которых представлены в табл. 3, 4.

Таблица 3

Расчетные значения температуры и плотности теплового потока при разбиении линии окружности на участки при скорости ветра 5 м/с

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_n^l, ^\circ\text{C}$	-2,38	-2,35	-2,31	-2,24	-2,16	-2,07	-1,96	-1,85
$T_n^r, ^\circ\text{C}$	-1,8	-1,73	-1,65	-1,6	-1,54	-1,5	-1,49	-1,48
$q_n^l, \text{Вт/м}^2$	135	135	132	130	122	114	105	93
$q_n^r, \text{Вт/м}^2$	80	65	48	30	16	27	34	39

После подстановки значений температуры и плотности теплового потока из табл. 3 в формулы (23) и (25) получены средние значения температуры для левой дуги $T_{\text{ср}}^l = -2.165$ $^\circ\text{C}$ и для правой дуги $T_{\text{ср}}^r = -1.599$ $^\circ\text{C}$, а также значения коэффициента конвективного теплообмена для левой верхней дуги $\alpha = 42.6$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ и для правой верхней дуги $\alpha = 12.6$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Среднее значение коэффициента для всей поверхности составляет $\alpha = 27.6$ $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$.

Полученный коэффициент конвективного теплообмена по методике, представленной в [15], имеет величину 47,16 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C})$. Разница между средним значением коэффициента теплообмена, полученным с помощью численного расчета, и вычисленным по формулам равна 70,8 %. Коэффициент теплообмена, опре-

деленный аналитически, превышает даже максимальное значение, найденное при численном расчете. Если обратиться к табл. 1, то можно сопоставить полученную разницу с величиной числа Рейнольдса. При малой скорости воздуха критерий Рейнольдса соответствует ламинарному режиму движения. Конечно, говорить о постоянной скорости ветра сложно, так как чаще наблюдается порывистый характер движения. В этом случае стабильного ламинарного движения не бывает даже при сравнительно небольшой средней скорости.

После обработки значений из табл. 4 получено среднее значение температуры на левой дуге, равное $T_{cp}^l = -3.21\text{ }^{\circ}\text{C}$, и на правой дуге, равное $T_{cp}^r = -2.7\text{ }^{\circ}\text{C}$. Значения коэффициента конвективного теплообмена для левой верхней дуги равно $\alpha = 67.45\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$, а для правой верхней дуги $\alpha = 18.5\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$. Среднее значение коэффициента теплообмена на всей поверхности составляет $\alpha = 43\text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$.

Таблица 4

Расчетные значения температуры и плотности теплового потока при разбиении линии окружности на участки при скорости ветра 10 м/с

№	1	2	3	4	5	6	7	8
$T_n^l, ^{\circ}\text{C}$	-3,29	-3,26	-3,2	-3,14	-3,06	-3,01	-2,94	-2,86
$T_n^r, ^{\circ}\text{C}$	-2,76	-2,67	-2,61	-2,58	-2,6	-2,61	-2,63	-2,64
$q_n^l, \text{Вт}/\text{м}^2$	134	135	131	125	115	108	93	82
$q_n^r, \text{Вт}/\text{м}^2$	72	48	23	15	34	50	59	67

Расчет коэффициента теплообмена с помощью процедур интегрирования Comsol

Полученные в результате расчетов значения коэффициента конвективного теплообмена продемонстрировали значительное расхождение с величиной коэффициента, найденного через критерии Рейнольдса и Нуссельта. Для сравнения приведен еще один способ расчета, в котором используются только процедуры, предусмотренные программой Comsol.

Для определения средней температуры дуги производится интегрирование по линии дуги, а затем полученная величина делится на длину отрезка:

$$T_{cp} = \frac{4}{\pi D} \int_0^{\pi/2} T(x) dx. \quad (28)$$

Коэффициент конвективного теплообмена рассчитывается по той же формуле, что и для предыдущих расчетов. Отличие состоит в том, что величина теплового потока с поверхности ледяной оболочки для вычисления коэффициента берется без каких-либо изменений:

$$\alpha = \frac{Q}{(T - T_c) S_{бок}}. \quad (29)$$

Здесь площадь боковой поверхности ледяной оболочки определяется для сектора углом 90 градусов:

$$S_{бок} = \pi DL / 4 = 0.015708\text{ м}^2.$$

Результаты расчета сведены в табл. 5.

Таблица 5

Расчетные значения параметров процесса теплообмена средствами Comsol

№	v , м/с	$T_{\text{ср}}^l$, °C	$T_{\text{ср}}^r$, °C	Q^l , Вт	Q^r , Вт	Q_{Σ} , Вт	α^l , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	α^r , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha_{\text{ср.1}}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha_{\text{ан}}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	ε_{α} , %
1	1	273,8	274,4	4	1,2	5,2	21,9	5,99	13,9	24,1	–9,2
2	5	271	271,6	3,73	1,26	4,97	37,7	11,1	24,4	63,4	–40
3	10	270,1	270,5	3,66	1,47	5,11	50,95	18,5	34,7	96	–47

Обсуждение

Для сопоставления результатов расчета коэффициента конвективного теплообмена, найденных разными способами, все полученные значения представлены в табл. 6.

Среднее значение коэффициента конвективного теплообмена, найденное при использовании стандартных средств Comsol, обозначено $\alpha_{\text{ср.1}}$.

Отклонения средних значений коэффициента теплообмена, найденных средствами Comsol, от значений, найденных по аналитическим выражениям, составляют от –9 до –47 %.

Таблица 6

Расчетные значения процесса теплообмена средствами Comsol с разбиением дуги окружности ледяной оболочки

№	v , м/с	Q^l , Вт	Q^r , Вт	Q_{Σ} , Вт	α^l , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	α^r , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha_{\text{ср.2}}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha_{\text{ср.1}}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$	$\alpha_{\text{ан}}$, $\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{°C}}$
1	1	3,87	1,23	5,1	35,6	9,94	22,7	13,9	24,1
2	5	3,64	1,32	4,96	42,6	12,6	27,6	24,4	63,4
3	10	3,79	1,33	5,09	67,45	18,5	42,98	34,7	96

Среднее значение коэффициента конвективного теплообмена, найденное при разбиении дуги на участки, обозначено $\alpha_{\text{ср.2}}$.

Коэффициенты конвективного теплообмена, найденные тремя способами, существенно отличаются друг от друга. Для более точного представления о характеристиках реального процесса теплообмена нужен физический эксперимент. Однако учитывая геометрические размеры провода и ледяной оболочки, сложно обеспечить качественный результат без возможности искажения тепловых процессов вносимыми датчиками в ледяную оболочку малой толщины. Кроме того, отдельная проблема заключается в процедуре настройки модели гидродинамики. Картина распределения температуры возле провода с ледяной оболочкой свидетельствует о затухании вихревых процессов на небольшом расстоянии, как и было предусмотрено в настройках модели. Однако известные проблемы используемой $(k - \varepsilon)$ -модели турбулентности, связанные с поведением потока жидкости (газа) возле поверхности, до конца не преодолены.

Проведенное исследование разных способов определения коэффициента конвективного теплообмена между поверхностью проводов и воздушным пото-

ком показало значительное влияние скорости ветра не только на величину коэффициента теплообмена, но и на возможность использования упрощенных процедур расчета тепловых процессов в системе «воздушная среда – ледяная оболочка – провод». При малой скорости ветра (1 м/с) использование формул для расчета коэффициента теплообмена приводит к допустимым значениям погрешности (менее 10 %). Увеличение скорости до 5 м/с и более приводит к значительному ухудшению точности расчетов – погрешность возрастает до десятков процентов. В таких условиях расчет тепловых процессов внутри системы «ледяная оболочка – провод» с учетом изменения агрегатного состояния при плавлении и кристаллизации становится непредсказуемым. При малом резерве мощности тепловыделения в проводе процесс расплавления льда на проводе может завершиться безрезультатно. Таким образом, несмотря на сложность и ресурсоемкость процедур расчета термогидродинамических процессов, данный этап является необходимым. Только после полноценного численного определения значений коэффициентов теплообмена при различных параметрах ледяной оболочки, температуры и скорости ветра можно переходить к основной задаче – расчету процесса плавления гололеда на проводах.

Заключение

Использование различных моделей термогидродинамических процессов при плавке гололеда на проводах показало возможность повышения точности расчетов в условиях ограниченных возможностей используемого математического аппарата.

Уточненные параметры позволяют улучшить и скорректировать математические модели для проведения моделирования с минимизацией погрешностей, исключения недостоверных расчетов, а также определения мощности и времени при заданных значениях коэффициентов конвекции.

Проведение математических исследований термогидродинамических процессов при плавке гололеда на проводах в различных погодных условиях позволит подбирать оптимальные режимы дополнительной загрузки линии токами для эффективной плавки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Базаров А.А., Будко С.И.* Моделирование тепловых процессов при плавке гололеда на линии электропередач // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2023. Т. 31. № 4. С. 49–67.
2. *Елизарьев А.Ю.* Обеспечение надежности работы воздушных линий электропередачи в условиях гололедных нагрузок: Автореферат дис. ... канд. техн. наук. Томск, 2017. 22 с.
3. *Гузаиров М.Б., Максимов В.А., Валеев А.Р.* Совершенствование системы плавки гололеда на высоковольтных ВЛ // Электротехнические комплексы и системы. Межвузовский научный сборник. Уфа: УГАТУ, 2014. С. 33–37.
4. *Мясоедов Ю.В., Коржова О.Н.* Плавка гололеда на линиях электропередачи: методы, инновации, эксплуатация // Вестник АМГУ. 2019. № 87. С. 65–66.
5. *Елизарьев А.Ю., Валеев А.Р.* Плавка гололеда на воздушных линиях электропередачи без отключения потребителей // Вестник УГАТУ. 2015. Т. 19. № 4 (70). С. 59–66.
6. *Каганов В.И.* Борьба с гололедом в линиях электропередачи с помощью высокочастотной электромагнитной волны // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2010. № 5. С. 41–45.
7. *Каганов В.И.* Нагрев проводов электрических сетей с помощью высокочастотной электромагнитной волны для борьбы с гололедом // Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. 2012. № 3. С. 21–25.

8. *Sullivan C.R., Petrenko V.F., McCurdy J.D., Kozliouk V.* Breaking the ice: de-icing power transmission lines with highfrequency, high-voltage excitation // *IEEE Ind. Appl. Mag.* 2003. Vol. 9. No. 5. Pp. 49–54.
9. *Zhou Y.S., Zeng L., Chen P.Y., Pan Z.* A High-Frequency High-Voltage Excitation Melting Ice Power Design // *Appl. Mech. Mater.* 2013. Vol. 325–326. Pp. 271–276.
10. *Розинская Л.Э., Карташев В.В., Лютов А.Г., Рахматуллина Г.Э.* Моделирование установки для плавки гололеда с использованием реактивных токов на ВЛ 10 кВ ПС Альмухаметово ООО «Башкирэнерго» // *Вопросы надежности работы систем электроснабжения в условиях гололедно-ветровых нагрузок: Материалы международной научно-практической конференции.* Уфа: УГАТУ, 2016. С. 76–81.
11. *Дементьев С.С.* Диагностика состояния воздушных линий электропередачи с применением нейрокомпьютера // *Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт.* 2017. № 2 (19). С. 21–26.
12. *Засыпкин А.С. (мл.).* Технология дистанционного контроля гололедообразования на ВЛ и ее обоснование при допустимых упрощениях модели физических процессов // *Электротехнические системы и комплексы.* 2021. № 3 (52). С. 52–56.
13. *Тимофеева М.В., Титов Д.Е.* Развитие моделей оценки ледяных отложений на проводах линий электропередачи // *Электротехнические и информационные комплексы и системы.* 2017. Т. 13. № 4. С. 37–45.
14. *Nan Wen, Bo Yan, Zheyue Mou, Guizao Huang, Hanxu Yang, Xin Lv.* Prediction models for dynamic response parameters of transmission lines after ice-shedding based on machine learning method // *Electric Power Systems Research.* 2022. Vol. 202. Pp. 1–11.
15. *Мухеев М.А., Мухеева И.М.* Основы теплопередачи. М.: Энергия, 1977. 344 с.
16. *Щерба В.Е. и др.* Механика жидкости и газа. Спецглавы. Омск: ОмГТУ, 2020. 92 с.
17. *Белов И.А., Исаев С.А.* Моделирование турбулентных течений. СПб: БалтГТУ, 2001. 108 с.

Статья поступила в редакцию 20.09.2024 г.

STUDY OF THERMOHYDRODYNAMIC PROCESSES IN THE AIR ENVIRONMENT IN THE SYSTEM OF MELTING ICE ON THE WIRES OF THE POWER TRANSMISSION LINE

A.A. Bazarov, S.I. Budko¹

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

E-mail: aleksbazarov@yandex.ru, budko-1998@mail.ru

Abstract. The paper considers issues related to modeling thermal and hydrodynamic processes in the "wire – ice shell – air" system that occur during melting of ice on wires. The problem of ice shell growth on the surface of power transmission line wires has been known for a long time, and many works in the field of ice growth control and technical means of combating this phenomenon are devoted to its solution. Recently, works have appeared on melting systems that operate without disconnecting lines from consumers, which increases the reliability and uninterrupted power supply, reduces economic losses from undersupply of products during power supply interruptions. The process of ice melting can occur under conditions of heating the conductors with a high current to a steady positive temperature until the ice shell is destroyed. In this case, switching to the melting mode is carried out for a short period of time. An alternative to this method is to combine power supply to consumers and ice melting. In this case, the heat generation capacity in the wires is less, the melting time is increased, but there is no need to disconnect consumers. The problem of maintaining the line in the operating mode of transmitting electric energy to consumers is solved by additionally loading the line with reactive currents by connecting a certain inductive load. The increase in currents and power coming from the supply transformer to the line must be technically feasible so as not to overload the source and not cause its shutdown. Due to power limitations, it is necessary to carry out accurate calculations of thermal processes to determine acceptable modes of melting the ice layer. Complex modeling of thermohydrodynamic processes in the "wire – ice shell – air" system is considered. Several methods for determining the coefficients of convective heat exchange at the boundaries of the conductor at different wind speeds are considered.

Keywords: thermal processes, hydrodynamics, turbulence models, convective heat transfer coefficient, ice, finite element method, related problems.

REFERENCES

1. Bazarov A.A., Budko S.I. Modelirovanie teplovyh processov pri plavke gololeda na linii elektroperedach [Modeling of thermal processes when melting ice on power lines] // Vestnik Samar. gosud. tekhn. un-ta. Seriya: Tekhnicheskie nauki. 2023. Vol. 31. No. 4. Pp. 49–67. (In Russian)
2. Elizarev A.Yu. Obespechenie nadezhnosti raboty vozdukhnykh linii elektroperedachi v usloviyakh gololednykh nagruzok [Ensuring reliable operation of overhead power transmission lines under icy load conditions]. Avtoreferat dic. ... kand. tekhn. nauk. Tomsk, 2017. 22 p. (In Russian)
3. Guzairov M.B., Maksimov V.A., Valeev A.R. Sovershenstvovanie sistemy plavok gololeda na vysokovo'tnykh VL [Improvement of ice flattening systems on high-voltage overlinenets] // Elektrotekhnicheskie kompleksty i sistemy. Mezhvuzovskij nauchnyj sbornik. Ufa: UGATU, 2014. Pp. 33–37. (In Russian)
4. Myasoedov Yu.V., Korzhova O.N. Plavka gololyoda na liniyakh elektroperedachi: metody,



© The Author(s), 2024

¹ Alexander A. Bazarov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Stepan I. Budko, Postgraduate Student.

- innovacii, ekspluatatsiya [Melting ice on power lines: methods, innovations, operation] // Vestnik AmGU. 2019. № 87. Pp. 65–66. (In Russian)
5. *Elizarev A.Yu., Valeev A.R.* Plavka gololeda na vozdukhnykh liniyakh elektroperedachi bez otklyucheniya potrebitel'ev [Melting ice on overhead power lines without disconnecting consumers] // Vestnik UGATU. 2015. Vol. 19. No. 4 (70). Pp. 59–66. (In Russian)
 6. *Kaganov V.I.* Borba s gololedom v liniyakh elektroperedachi s pomoshch'yu vysokochastotnoj elektromagnitnoj volny [Fighting ice in power lines using high-frequency electromagnetic waves] // Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost. 2010. No. 5. Pp. 41–45. (In Russian)
 7. *Kaganov V.I.* Nagrev provodov elektricheskikh setej s i pomoshch'yu vysokochastotnoj elektromagnitnoj volny dlya bor'by s gololedom [Heating of electrical network wires using high-frequency electromagnetic waves to combat ice] // Elektrotehnika, elektroenergetika, elektrotekhnicheskaya promyshlennost. 2012. No. 3. Pp. 21–25. (In Russian)
 8. *Sullivan C.R., Petrenko V.F., McCurdy J.D., Kozliouk V.* Breaking the ice: de-icing power transmission lines with highfrequency, high-voltage excitation // IEEE Ind. Appl. Mag. 2003. Vol. 9. No. 5. Pp. 49–54.
 9. *Zhou Y.S., Zeng L., Chen P.Y., Pan Z.* A High-Frequency High-Voltage Excitation Melting Ice Power Design // Appl. Mech. Mater. 2013. Vol. 325–326. Pp. 271–276.
 10. *Roginskaya L.E., Kartashev V.V., Lyutov A.G., Rahmatullina G.E.* Modelirovanie ustanovki dlya plavki gololeda s ispolzovaniem reaktivnykh tokov na VL 10 kV PS Almuhametovo OOO "Bashkirenergo" [Modeling of an installation for melting ice using reactive currents on a 10 kV overhead line at Almuhametovo Substation LLC "Bashkirenergo"] // Voprosy nadezhnosti raboty sistem elektroobrazovaniya v usloviyakh gololedno-vetrovykh nagruzok. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii. Ufa: UGATU, 2016. Pp. 76–81. (In Russian)
 11. *Dementiev S.S.* Diagnostika sostoyaniya vozdukhnykh liniy elektroperedachi s primeneniem nejrokompyutera [Diagnostics of the condition of overhead power lines using a neurocomputer] // Energo- i resursosberezhenie: promyshlennost' i transport. 2017. No. 2 (19). Pp. 21–26. (In Russian)
 12. *Zasyarkin A.S. (ml.).* Tekhnologiya distantsionnogo kontrolya gololyodoobrazovaniya na VL i eyo obosnovanie pri dopustimnykh uproshcheniyah modeli fizicheskikh processov [Technology of remote control of ice formation on overhead power lines and its justification with acceptable simplifications of the model of physical processes] // Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы. 2021. No. 3(52). Pp. 52–56. (In Russian)
 13. *Timofeeva M.V., Titov D.E.* Razvitie modelej ocenki ledyanykh otlozhenij na provodakh liniy elektroperedachi [Development of models for assessing ice deposits on power transmission line wires] // Elektrotekhnicheskie i informacionnye komplekсы i sistemy. 2017. Vol. 13. No. 4. Pp. 37–45. (In Russian)
 14. *Nan Wen, Bo Yan, Zheyue Mou, Guizao Huang, Hanxu Yang, Xin Lv.* Prediction models for dynamic response parameters of transmission lines after ice-shedding based on machine learning method // Electric Power Systems Research. 2022. Vol. 202. Pp. 1–11.
 15. *Mihev M.A., Miheva I.M.* Osnovy teploperedachi [Basics of Heat Transfer]. M.: Energiya, 1977. 344 p. (In Russian)
 16. *Shcherba V.E. i dr.* Mekhanika zhidkosti i gaza. Specglavy [Fluid and Gas Mechanics. Special Chapters]. Omsk: OmGTU, 2020. 92 p. (In Russian)
 17. *Belov I.A., Isaev S.A.* Modelirovanie turbulentnykh techenij [Modeling of turbulent flows]. SPb: BaltGTU, 2001. 108 p. (In Russian)

Original article submitted 20.09.2024

УДК 620.9, 519.654

ПРОГНОЗНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ОСНОВНЫХ РЕСУРСОВ И ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ РЕГИОНАЛЬНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ САМАРСКОЙ ОБЛАСТИ

В.Е. Зотеев, Л.А. Сагитова, А.А. Гаврилова¹

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

E-mail: zoteev-ve@mail.ru, l0410@mail.ru, a.a.gavrilova@mail.ru

Аннотация. В связи с тем, что региональные энергосистемы являются сложными динамическими системами, функционирующими в условиях постоянных изменений внешней среды, возникает необходимость выработки сложных управленческих решений и проведения системного анализа эффективности, что невозможно без совершенствования математических моделей динамики капитальных, трудовых и топливных ресурсов, оказывающих наибольшее влияние на выпуск энергии энергосистемой.

В работе проведен анализ существующих методов математического описания динамики основных ресурсов и их недостатков. Рассмотрены ковариационно-стационарные модели временных рядов в форме разностных уравнений с детерминированным полиномиальным трендом. Приведены результаты математического моделирования динамики капитальных, трудовых и топливных ресурсов на основе статистических данных деятельности энергосистемы Самарской области, публикуемых в ежегодной отчетности региональных министерств и энергетических компаний, и проведен их анализ.

На основе сравнительного анализа математических моделей были выбраны наиболее эффективные модели динамики капитальных, трудовых и топливных ресурсов, обладающие наилучшими прогнозными качествами.

Также в работе описана одноконтурная имитационная модель системы управления энергосистемой на основе формирования инвестиций на обновление капитальных ресурсов, а также система поддержки принятия решений (СППР), позволяющая формировать математически обоснованные управленческие решения.

Ключевые слова: энергосистема, энергоэффективность, основные ресурсы, ковариационно-стационарные модели временных рядов, статистический анализ, имитационная модель управления, СППР.



© Автор(ы), 2024

¹ Владимир Евгеньевич Зотеев, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры прикладной математики и информатики.

Ляйсан Акзамовна Сагитова, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции.

Анна Александровна Гаврилова, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Введение

Энергетическая отрасль любого региона является основой развития промышленности и поддержания качества жизни бытовых потребителей. Поэтому возникает необходимость решения задач повышения эффективности, оптимизации и управления энергопроизводствами. Прогнозирование технико-экономических процессов позволяет анализировать сложившиеся закономерности технологических процессов, конструировать сценарии их деятельности, определять направления их развития.

В работах [1–3] были разработаны математические модели суммарного производства тепловой электрической энергии энергосистемой Самарской области, проведены оценки их качества и сравнительный анализ. Поскольку в построенных моделях производство энергии определялось зависимостью от факторов производства – капитальных, трудовых и топливных ресурсов, то для планирования работы энергосистемы и выработки управляющих воздействий, направленных на повышение эффективности ее работы, необходима также достоверная оценка прогнозных значений входных ресурсов. Таким образом, актуальной становится задача построения и статистического анализа математических моделей динамики основных ресурсов на основе статистических данных за период с 1990 по 2021 гг.

Постановка задачи и методы ее решения

В работах [4, 5] для построения прогнозов капитальных, трудовых и топливных ресурсов использовались стандартные методы прогнозирования временных рядов, основанные на экспоненциальном сглаживании (метод Брауна, Хольта и Тригга – Лича).

Суть метода Брауна заключается в том, что прогнозное значение определяется через предыдущее спрогнозированное значение, но скорректированное на величину отклонения факта от прогноза:

$$y_k = \hat{y}_{k-1} + \alpha \cdot (y_{k-1} - \hat{y}_{k-1}).$$

К основным недостаткам адаптивных моделей прогнозирования можно отнести то, что данные модели хорошо воспроизводят гладкие временные ряды и очень плохо воспроизводят выбросы [6, 7]. Преимущественно данные методы используются для краткосрочного прогнозирования.

Также в работах [4, 5] отсутствуют интервальные оценки прогнозов и прогнозные значения имеют достаточно большие отклонения от реальных данных, что можно отнести к недостаткам метода.

Основными задачами исследования при построении математических моделей ресурсов являются первоначальный выбор вида модели, оценка параметров этой модели и статистический анализ результатов вычислений, корректировка моделей динамики основных ресурсов и оценка ее эффективности.

В данной работе для устранения недостатков существующих методов прогнозирования входных ресурсов используются ковариационно-стационарные стохастические модели временных рядов в форме разностных уравнений с детерминированным полиномиальным трендом в виде [8–13]

$$y_k = \sum_{j=1}^p \lambda_j y_{k-j} + \sum_{j=p+1}^{m+p+1} \lambda_j t_k^{j-(p+1)} + \varepsilon_k, \quad (1)$$

где $y_k = \sum_{j=1}^p \lambda_j y_{k-j} + \varepsilon_k$ – стохастическое разностное уравнение в форме модели

авторегрессии порядка p ; $P_m(t_k) = \sum_{j=p+1}^{m+p+1} \lambda_j t_k^{j-(p+1)}$ – детерминированный тренд

в форме многочлена степени m относительно временной переменной t_k ; ε_k – последовательность независимых случайных величин с нулевым математическим ожиданием и одинаковыми дисперсиями σ_ε^2 : $M[\varepsilon_k] = 0$,

$$\text{cov}[\varepsilon_k, \varepsilon_{k \pm p}] = \begin{cases} 0, & p \neq 0; \\ \sigma_\varepsilon^2, & p = 0. \end{cases}$$

В качестве критерия среднеквадратичного оценивания параметров моделей используется минимизация суммы квадратов остатков

$$\sum_{k=0}^{31} (y_k - \hat{y}_k)^2 = \|y - \hat{y}\|^2 = \|e\|^2 \rightarrow \min \quad [14, 16].$$

Проверка обоснованности выбора такого критерия строится на основе анализа остатков и выявления в них корреляции с использованием статистики Дарбина – Уотсона [14, 15, 17].

Оценка адекватности математической модели состоит из проверки статистической значимости каждого коэффициента регрессионного уравнения на основе t -статистики Стьюдента, а также анализа значений суммы квадратов отклонений $Q_{ост}$ модельных значений от фактических, средних относительных отклонений $s, \%$ модельных значений от фактических, а также значения статистики Дарбина – Уотсона.

Разработка и построение математических моделей динамики капитальных ресурсов

При построении модели динамики капитальных ресурсов $K(t)$ в качестве первоначальной математической модели была выбрана ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения третьего порядка с полиномиальным трендом второго порядка:

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 y_{k-2} + \lambda_3 y_{k-3} + \lambda_4 + \lambda_5 t_k + \lambda_6 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 3, 4, 5, \dots, N-1. \quad (2)$$

Результаты вычислений параметров данной и последующих моделей динамики капитальных ресурсов и их статистического анализа приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов параметров математических моделей динамики капитальных ресурсов

Модель		Коэффициенты модели						$Q_{ост}$	$s, \%$	DW
№	Формула	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6			
1	(2)	0,856	-0,179	-0,008	0,55	0,001	-0,00128	0,175	5,5	2,04
2	(3)	0,722	0,462	-0,0018	-0,0010	–	–	0,192	5,7	1,74
3	(4)	0,664	0,555	-0,0013	–	–	–	0,197	5,8	1,60
4	(5)	0,767	1,631	-0,0031	–	–	–	0,213	6,0	1,82

В последних трех столбцах табл. 1 приведены: $Q_{ocm} = \|y - \hat{y}\|^2$ – сумма квадратов отклонений результатов расчета $\hat{y}_k$ по модели от результатов наблюдений; $s, \% = \frac{\|y - \hat{y}\|}{\|y\|} \cdot 100\%$ – оценка относительного отклонения модели от эксперимента; $DW = 2(1-r)$ – статистика Дарбина – Уотсона, на основе которой можно сделать вывод о наличии автокорреляции в случайном возмущении ε_k , где r – выборочный коэффициент корреляции.

Проверка значимости параметров построенной модели (2) на основе t -статистики Стьюдента показала, что критерий Стьюдента для параметров λ_2 и λ_3 меньше критического значения; следовательно, значения полученных коэффициентов являются незначимыми.

С учетом сделанного вывода была рассмотрена ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения первого порядка с полиномиальным трендом второго порядка:

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \lambda_4 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 1, 2, 3, 4, \dots, N-1. \quad (3)$$

Поскольку в модели (3) согласно результатам вычислений незначимым оказался параметр λ_3 , то математическая модель динамики капитальных ресурсов упрощается к виду

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 1, 2, 3, 4, \dots, N-1. \quad (4)$$

Упрощенная модель (4) динамики капитальных ресурсов является ковариационно-стационарной стохастической моделью временного ряда, построенной на основе полиномиального тренда второго порядка.

Анализ остатков для модели (4) указал на наличие автокорреляции в элементах случайного возмущения ε_k , что снижает эффективность оценок ее коэффициентов. Поэтому была рассмотрена ковариационно-стационарная стохастическая модель временного ряда, в которой случайное возмущение η_k описывается авторегрессионной моделью временного ряда первого порядка:

$$\begin{cases} y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k^2 + \eta_k, & k = 0, 1, \dots, N-1; \\ \eta_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{1-\lambda_1^2}}, & \eta_k = \lambda_1 \eta_{k-1} + \varepsilon_k, \quad k = 1, 2, \dots, N-1, \end{cases}$$

которая может быть приведена к виду:

$$\begin{cases} y_0 = y_0 - \sqrt{1-\lambda_1^2} (y_0 - \lambda_2 - \lambda_3 t_0^2) + \varepsilon_0; \\ y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k^2 + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_2 - \lambda_3 t_{k-1}^2) + \varepsilon_k, & k = 1, 2, \dots, N-1. \end{cases} \quad (5)$$

Статистический анализ полученных результатов показал, что построенные модели (2)–(5) обладают достаточно хорошими аппроксимативными свойствами и высокой степенью адекватности, а также что повышение порядка авторегрессии при описании модели динамики капитальных ресурсов статистически не оправдано.

Для окончательного выбора математической модели, описывающей динамику капитальных ресурсов, была проведена оценка погрешностей ретроспективных прогнозов динамики капитальных ресурсов по моделям (2)–(5) на основе

статистических данных за 20 лет с прогнозом на 1 год вперед. Усредненные значения относительных погрешностей прогнозов и усредненные радиусы доверительных интервалов в относительных единицах графически отображены на рис. 1 в сравнении с методом Брауна (модель под номером 5) [2, 3].

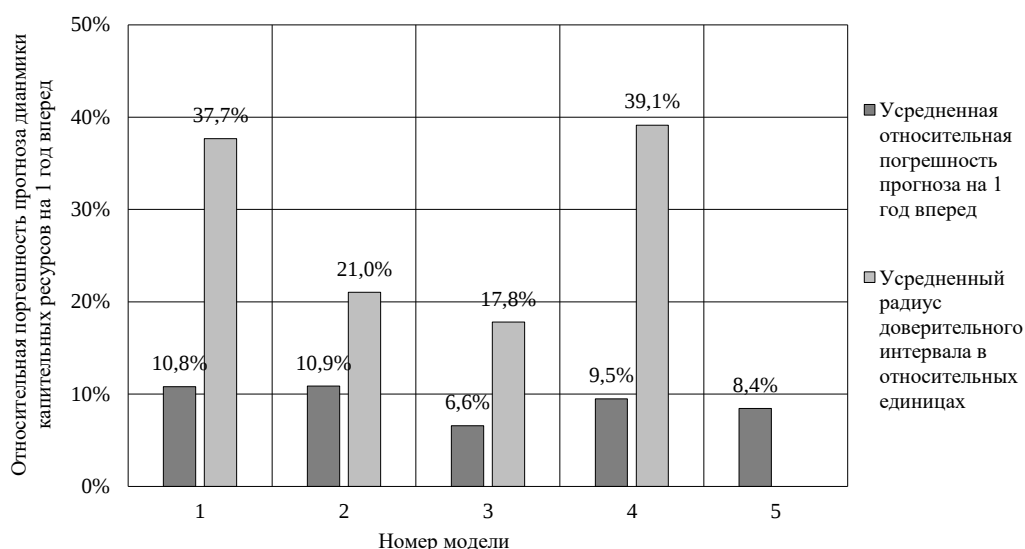


Рис. 1. Сравнительный анализ усредненных значений относительных погрешностей прогнозов и усредненных радиусов доверительных интервалов для моделей (2)–(5)

Также были исследованы прогнозные свойства моделей (2)–(5). Для этого были построены прогнозы на 1, 2, 3, 4 и 5 лет на даты с 2010 по 2021 год по выборкам результатов наблюдений за предыдущие $N = 20$. Усредненные результаты погрешностей прогнозов приведены в табл. 2, в которой под номером 5 представлены результаты расчета методом Брауна.

Таблица 2

**Погрешности прогноза динамики капитальных ресурсов,
сделанного на основе исследуемых математических моделей, %**

Количество лет, на которые сделан прогноз	Номер модели				
	1	2	3	4	5
1	10,8	10,9	6,6	9,5	8,4
2	14,8	14,9	10,6	15,6	14,7
3	17,4	16,7	13,0	19,7	15,5
4	21,1	23,0	15,5	26,6	20,2
5	28,5	32,9	20,4	37,1	33,1

По результатам анализа относительных ошибок прогнозов при использовании различных математических моделей (2)–(5) наилучшей моделью является модель 3, которая обладает наименьшими ошибками прогнозов по сравнению с остальными.

На рис. 2 продемонстрированы усредненные значения погрешностей прогнозов динамики капитальных ресурсов, рассчитанные по модели 3 и методу экспоненциального сглаживания Брауна.

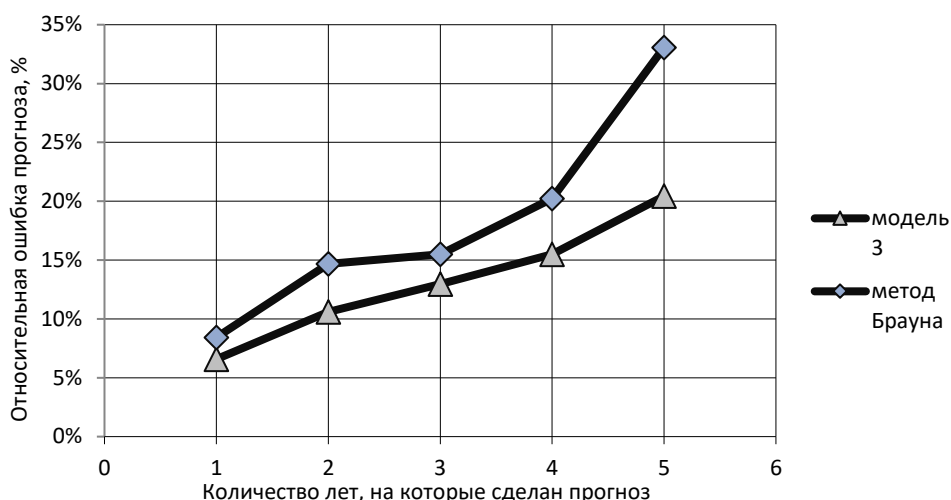


Рис. 2. Значения усредненных погрешностей ретроспективных прогнозов динамики капитальных ресурсов, рассчитанные по модели 3 (формула 4) и методом Брауна

Разработка и построение математических моделей динамики трудовых ресурсов

При построении модели динамики трудовых ресурсов $L(t)$ в качестве первоначальной математической модели была выбрана ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения третьего порядка с полиномиальным трендом второго порядка (2):

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 y_{k-2} + \lambda_3 y_{k-3} + \lambda_4 + \lambda_5 t_k + \lambda_6 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 3, 4, 5, \dots, N-1.$$

Результаты вычислений параметров данной и последующих моделей динамики капитальных ресурсов и их статистического анализа приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты расчетов параметров математических моделей динамики трудовых ресурсов

Модель		Коэффициенты модели						$Q_{ост}$	$s, \%$	DW
№	Формула	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6			
1	(2)	0,180	0,344	0,159	0,32	-0,025	0,00138	0,068	6,0	2,39
2	(3)	0,335	0,760	-0,0127	-0,0024	—	—	0,127	7,8	1,72
3	(6)	0,715	0,290	-0,0092	—	—	—	0,150	8,5	2,27
4	(7)	0,784	0,992	-0,0136	—	—	—	0,175	9,0	2,10

Проверка значимости параметров построенной модели (2) показала, что критерии Стьюдента для параметров λ_2 и λ_3 меньше критических значений; следовательно, значения полученных коэффициентов являются незначимыми.

С учетом сделанного вывода была рассмотрена ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения первого порядка с полиномиальным трендом второго порядка (3):

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \lambda_4 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k=1,2,3,4,\dots,N-1.$$

Поскольку в модели (3) согласно результатам исследований незначимым оказался параметр λ_4 , то математическую модель динамики трудовых ресурсов можно упростить к виду

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \varepsilon_k, \quad k=1,2,3,4,\dots,N-1. \quad (6)$$

Также была рассмотрена модель динамики трудовых ресурсов в форме ковариационно-стационарной стохастической модели временного ряда, построенной на основе линейного тренда, в которой случайное возмущение описывается авторегрессионной моделью временного ряда первого порядка

$$\begin{cases} y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \eta_k, & k=0,1,\dots,N-1; \\ \eta_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{1-\lambda_1^2}}, & \eta_k = \lambda_1 \eta_{k-1} + \varepsilon_k, \quad k=1,2,\dots,N-1, \end{cases}$$

или в виде

$$\begin{cases} y_0 = y_0 - \sqrt{1-\lambda_1^2} (y_0 - \lambda_2 - \lambda_3 t_0) + \varepsilon_0; \\ y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_2 - \lambda_3 t_{k-1}) + \varepsilon_k, & k=1,2,\dots,N-1. \end{cases} \quad (7)$$

Статистический анализ полученных результатов показал, что построенные модели (2), (3), (6) и (7) обладают достаточно хорошими аппроксимативными свойствами и высокой степенью адекватности.

С целью окончательного выбора наилучшей математической модели для описания динамики трудовых ресурсов также была проведена оценка погрешностей ретроспективных прогнозов по данным 20 лет на 1 год вперед. Усредненные значения относительных погрешностей прогнозов и усредненные радиусы доверительных интервалов в относительных единицах графически отображены на рис. 3 в сравнении с методом Брауна [2, 3].

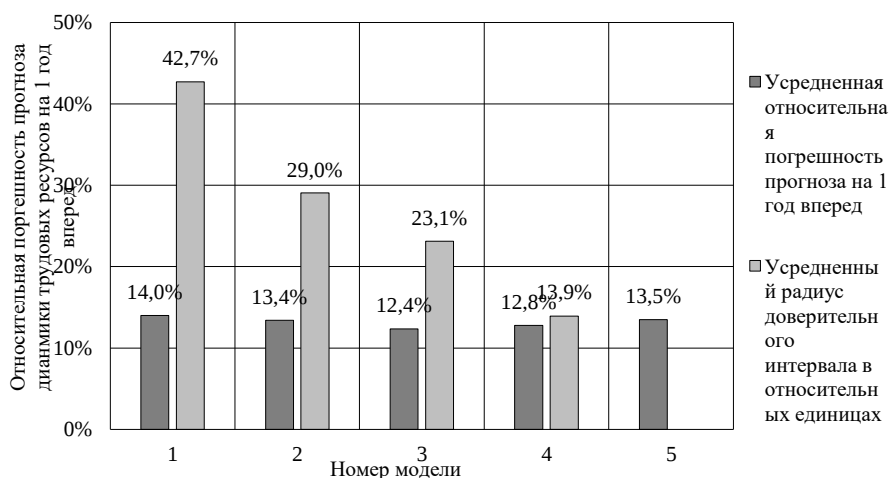


Рис. 3. Сравнительный анализ усредненных значений относительных погрешностей прогнозов и усредненных радиусов доверительных интервалов для моделей (2), (3), (6) и (7)

Также были исследованы прогнозные свойства моделей (2), (3), (6) и (7). Для этого были построены прогнозы на 1, 2, 3, 4 и 5 лет на даты с 2010 по 2021 год по

выборкам результатов наблюдений за предыдущие $N = 20$ лет. Усредненные результаты погрешностей прогнозов приведены в табл. 4.

Таблица 4

Погрешности прогноза динамики трудовых ресурсов, сделанного на основе исследуемых математических моделей, %

Количество лет, на которые сделан прогноз	Номер модели				
	1	2	3	4	5
1	14,0	13,4	12,4	12,8	13,5
2	30,8	24,5	18,6	19,8	21,4
3	34,6	28,8	19,3	20,3	26,5
4	30,9	31,1	18,5	19,6	27,1
5	31,9	35,2	16,5	21,5	22,8

По результатам анализа относительных ошибок прогнозов при использовании различных математических моделей (2), (3), (6) и (7) наилучшей моделью является модель 3 – формула (6), которая обладает наименьшими ошибками прогнозов по сравнению с остальными.

На рис. 4 продемонстрированы усредненные значения погрешностей прогнозов динамики трудовых ресурсов, рассчитанные по модели 3 и методом экспоненциального сглаживания Брауна [2, 3].

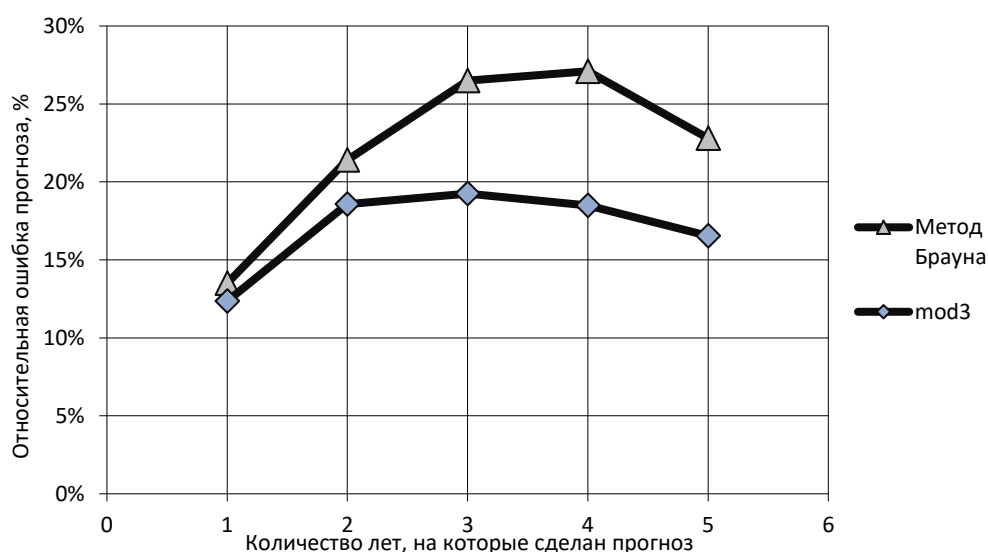


Рис. 4. Значения усредненных погрешностей ретроспективных прогнозов динамики трудовых ресурсов, рассчитанные по модели 3 (формула 6) и методом Брауна

Разработка и построение математических моделей динамики топливных ресурсов

При построении модели динамики топливных ресурсов $B(t)$ в качестве первоначальной математической модели аналогично построению моделей динамики капитальных и трудовых ресурсов была выбрана ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения третьего порядка с полиномиальным трендом второго порядка (2):

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 y_{k-2} + \lambda_3 y_{k-3} + \lambda_4 + \lambda_5 t_k + \lambda_6 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 3, 4, 5, \dots, N.$$

Результаты вычислений параметров данной и последующих моделей динамики топливных ресурсов и их статистического анализа приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты расчетов параметров математических моделей динамики топливных ресурсов

Модель		Коэффициенты модели						$Q_{ост}$	$s, \%$	DW
№	Формула	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	λ_6			
1	(2)	0,657	0,041	-0,166	0,29	-0,004	-0,00011	0,020	4,3	2,13
2	(3)	0,791	0,121	-0,0014	-0,0001	—	—	0,035	5,3	1,66
3	(6)	0,766	0,133	-0,0018	—	—	—	0,035	5,3	1,60
4	(7)	0,915	0,672	-0,01621	—	—	—	0,047	5,9	1,40

Проверка значимости параметров построенной модели (2) показала, что критерии Стьюдента для параметров λ_2 и λ_3 меньше критических значений; следовательно, значения полученных коэффициентов являются незначимыми.

С учетом сделанного вывода была рассмотрена ковариационно-стационарная стохастическая математическая модель в форме разностного уравнения первого порядка с полиномиальным трендом второго порядка (3):

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \lambda_4 t_k^2 + \varepsilon_k, \quad k = 2, 3, 4, \dots, N.$$

Поскольку в модели (3) согласно результатам исследований незначимым оказался параметр λ_4 , то математическую модель динамики топливных ресурсов можно упростить к виду (6):

$$y_k = \lambda_1 y_{k-1} + \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \varepsilon_k, \quad k = 2, 3, 4, \dots, N.$$

Также была рассмотрена модель динамики трудовых ресурсов в форме ковариационно-стационарной стохастической модели временного ряда, построенной на основе линейного тренда, в которой случайное возмущение описывается авторегрессионной моделью временного ряда первого порядка

$$\begin{cases} y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \eta_k, & k = 0, 1, \dots, N-1; \\ \eta_0 = \frac{\varepsilon_0}{\sqrt{1-\lambda_1^2}}, & \eta_k = \lambda_1 \eta_{k-1} + \varepsilon_k, & k = 1, 2, \dots, N-1, \end{cases}$$

или в виде (7)

$$\begin{cases} y_0 = y_0 - \sqrt{1-\lambda_1^2} (y_0 - \lambda_2 - \lambda_3 t_0) + \varepsilon_0; \\ y_k = \lambda_2 + \lambda_3 t_k + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_2 - \lambda_3 t_{k-1}) + \varepsilon_k, & k = 1, 2, \dots, N-1. \end{cases}$$

Для проведения сравнительного анализа различных моделей были также рассчитаны прогнозные значения динамики трудовых ресурсов адаптивным методом Брауна [2, 3].

Статистический анализ полученных результатов показал, что построенные модели (2), (3), (6) и (7) обладают достаточно хорошими аппроксимативными свойствами и высокой степенью адекватности.

С целью окончательного выбора наилучшей математической модели для описания динамики топливных ресурсов также была проведена оценка погреш-

ностей ретроспективных прогнозов по данным 20 лет на 1 год вперед. Усредненные значения относительных погрешностей прогнозов и усредненные радиусы доверительных интервалов в относительных единицах графически отображены на рис. 5 в сравнении с методом Брауна (модель под номером 5).

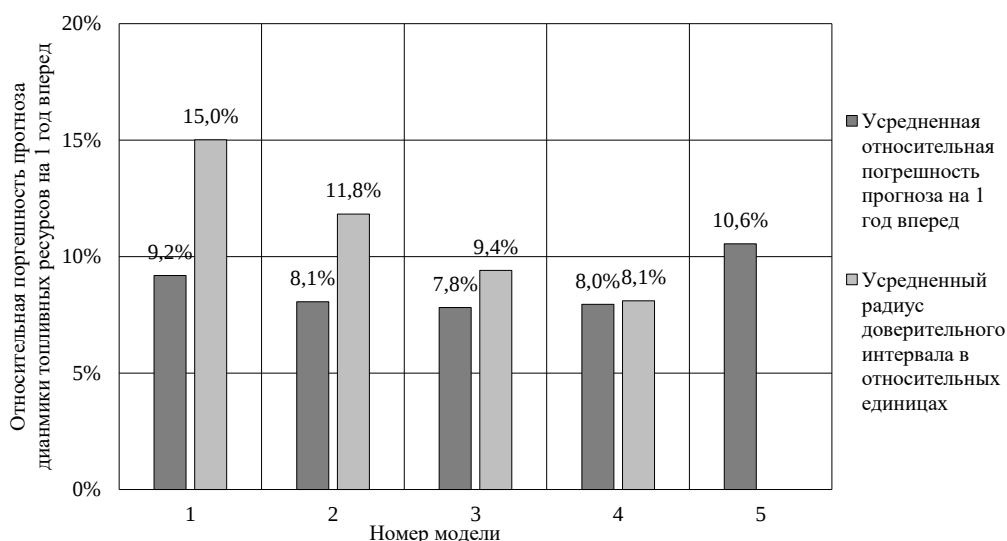


Рис. 5. Сравнительный анализ усредненных значений относительных погрешностей прогнозов и усредненных радиусов доверительных интервалов для моделей (2), (3), (6) и (7)

Также были исследованы прогнозные свойства моделей (2), (3), (6) и (7). Для этого были построены прогнозы на 1, 2, 3, 4 и 5 лет на даты с 2010 по 2021 год по выборкам результатов наблюдений за предыдущие $N = 20$ лет. Усредненные результаты погрешностей прогнозов приведены в табл. 6.

Таблица 6

Погрешности прогноза динамики топливных ресурсов, сделанного на основе исследуемых математических моделей, %

Количество лет, на которые сделан прогноз	Номер модели				
	1	2	3	4	5
1	9,2	8,1	7,8	8,0	10,6
2	12,9	12,8	10,0	9,1	14,3
3	16,9	18,1	13,5	12,4	22,3
4	17,6	21,2	16,1	11,7	29,4
5	19,5	23,8	18,3	11,7	35,2

По результатам анализа относительных ошибок прогнозов при использовании различных математических моделей (2), (3), (6) и (7) наилучшей моделью является модель 4 (формула 6), которая обладает наименьшими ошибками прогнозов по сравнению с остальными.

На рис. 6 продемонстрированы усредненные значения погрешностей прогнозов динамики топливных ресурсов, рассчитанные по модели 4 и методу экспоненциального сглаживания Брауна.

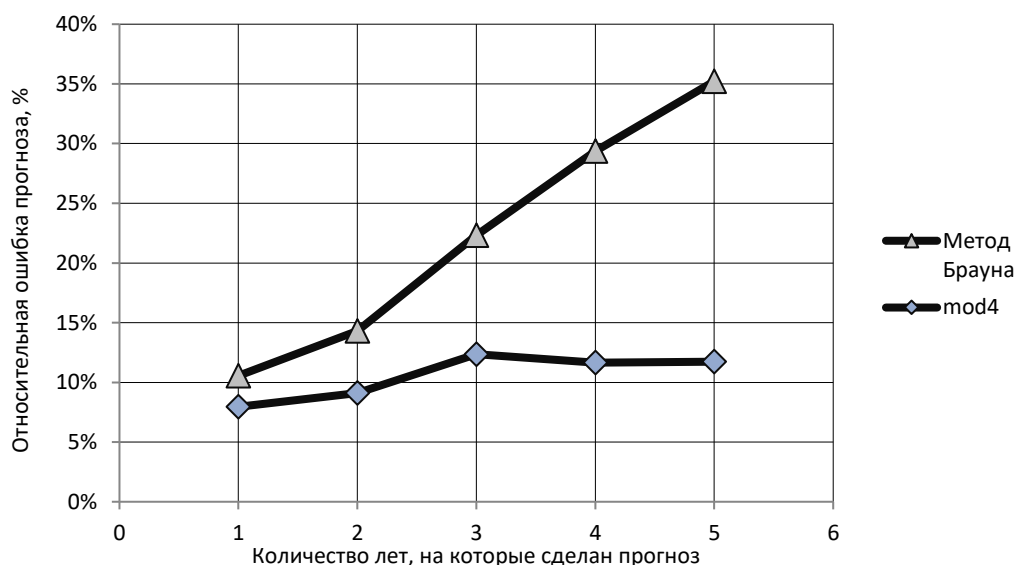


Рис. 6. Значения усредненных погрешностей ретроспективных прогнозов динамики топливных ресурсов, рассчитанные по модели 4 (формула 7) и методом Брауна

Построение имитационной системы управления деятельностью региональной энергосистемы Самарской области

Для повышения эффективности работы сложных развивающихся систем необходимо целенаправленное, стратегическое управление их деятельностью. Одним из направлений стратегии развития энергетического предприятия является процесс обновления основного капитала. В качестве инструмента выработки подобных управленческих решений и оценки их эффективности можно использовать системы поддержки принятия решений (СППР) на основе имитационной модели функционирования энергосистемы.

Имитационное моделирование дает возможность анализировать и вскрывать сущность протекающих производственно-экономических процессов, конструировать и совершенствовать стратегии управления промышленными производствами, повышать эффективность управления и использования ресурсов.

Для энергосистемы Самарской области была сконструирована одноконтурная имитационная модель системы управления (рис. 7).

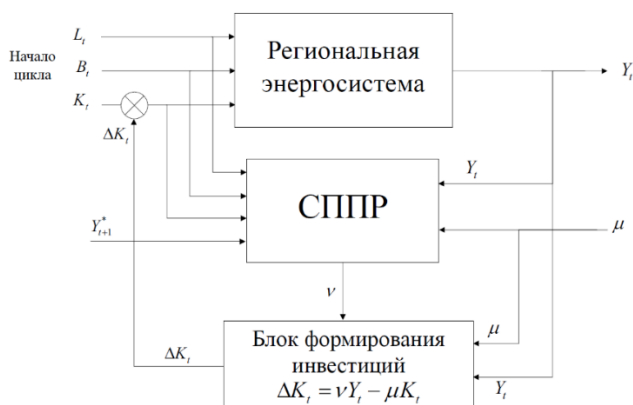


Рис. 7. Имитационная система управления энергосистемой Самарской области

В контуре управления энергосистемой моделируется формирование инвестиций на обновление капитальных ресурсов K_{t+1} за счет доли прибыли от выпуска продукции Y_t с помощью управляющей величины ν .

Особенностью производства тепловой и электрической энергии является то, что объемы производства в первую очередь определяются потребностями промышленных и коммунальных потребителей, а запасы энергии невозможно хранить. Таким образом, величина выпуска суммарной энергии на будущий год Y_{t+1}^* задается в определенных размерах потребностями потребителей.

С учетом специфики производства энергии будем считать, что изменения управляющих переменных возможны с периодом, равным длительности одного технологического цикла (1 год).

Объем инвестиций на обновление капитальных ресурсов определяется следующим образом:

$$I_{t+1} = \nu \cdot Y_t.$$

На величину ν накладывается естественное ограничение $0 \leq \nu \leq 1$.

Кроме этого, при определении величины капитальных ресурсов необходимо учитывать коэффициент выбытия основных фондов μ – долю капитальных ресурсов, выведенных из эксплуатации за отчетный период. Согласно статистическим данным энергетических производств значение коэффициента выбытия основных фондов μ определяется равным 0,05 в соответствии с планом проведения текущих и капитальных ремонтов основных фондов энергосистемы.

Тогда величина капитальных ресурсов следующего периода будет складываться из стоимости основных фондов текущего периода с учетом выбытия основных фондов и величины инвестиций:

$$K_{t+1} = (1 - \mu) \cdot K_t + I_{t+1} = (1 - \mu) \cdot K_t + \nu \cdot Y_t = K_t + \Delta K_t. \quad (8)$$

В результате преобразований получим величину изменения объема капитальных ресурсов на будущий год в следующем виде:

$$\Delta K_t = \nu \cdot Y_t - \mu \cdot K_t. \quad (9)$$

Для формирования математически оправданных решений при определении величины инвестиций в обновление капитальных ресурсов на будущий год в контуре имитационной модели была использована система поддержки принятия решений (СППР), структура которой приведена на рис. 8.

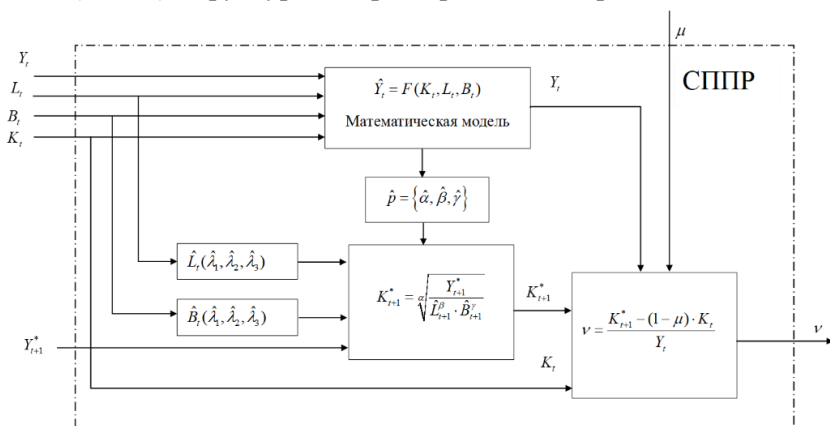


Рис. 8. Структура системы поддержки принятия решений

Сформированная СППР выполняет следующие задачи: на основе статистических данных функционирования энергосистемы происходит построение математической модели ее функционирования, проводятся статистический анализ результатов моделирования и оценка качества модели, определяются прогнозные значения объемов используемых трудовых и топливных ресурсов на следующий год, формируются рекомендации по величине капитальных ресурсов на будущий год в виде управляющей величины ν .

В качестве математической модели, описывающей деятельность энергосистемы для использования в СППР, была выбрана ковариационно-стационарная модель, построенная на основе нелинейной регрессионной модели со случайным возмущением, описываемым авторегрессией первого порядка, построение, идентификация и анализ которой проводились в работе [1]:

$$y_k = \lambda_2 x_{1k}^{\lambda_3} x_{2k}^{\lambda_4} x_{3k}^{\lambda_5} + \lambda_1 (y_{k-1} - \lambda_2 x_{1,k-1}^{\lambda_3} x_{2,k-1}^{\lambda_4} x_{3,k-1}^{\lambda_5}) + \varepsilon_k; \quad k = 1, 2, 3, \dots, N-1, \quad (10)$$

где x_{1k} , x_{2k} , x_{3k} – значения объемов затрачиваемых капитальных, трудовых и топливных ресурсов соответственно; $\lambda_i, i = 1, \dots, 5$ – коэффициенты нелинейной регрессионной модели.

Анализ результатов идентификации данной математической модели для временного интервала 1990–2021 гг. показал, что она обладает хорошими аппроксимативными и прогнозными свойствами. Результаты расчетов параметров модели и их статистический анализ приведены в табл. 7.

Таблица 7

Результаты расчетов параметров математической модели динамики производства энергии

Коэффициенты модели					$Q_{ост}$	$s, \%$	DW
λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5			
0,684	0,965	-0,128	0,016	0,945	0,012	3,3	1,9

В качестве математических моделей динамики трудовых и топливных ресурсов в СППР использовались модели (6) и (7), рассмотренные выше.

На основе выбранных моделей было проведено имитационное моделирование производства энергии энергосистемы Самарской области по выборке объемом 21 год, с 2000 по 2020 гг., на 1 год вперед.

Согласно модели (10) сценарий снижения прогнозируемого уровня производства энергии на 2021 год составляет 0,45 (интегральный выпуск энергии на 3,00 % ниже уровня производства в 2020 г.) и обеспечивается величиной ν , равной 0,26.

Для сценария стабильного отпуска энергии, при котором величина производства энергии останется неизменной с 2020 по 2021 гг., доля инвестиций в капитальные ресурсы должна быть равна $\nu = -0,27$. Сценарий увеличения энергопроизводства на 3 % обеспечивает управляющая величина $\nu = -0,65$.

Получившиеся отрицательные значения величины при планируемом росте или как минимум постоянстве выпуска энергии связаны с тем, что в энергосистеме имеется избыток основных фондов и для повышения эффективности производства энергии необходимо затрачивать дополнительные средства на поддержание резервов мощностей, а также демонтаж старого оборудования в случае необходимости.

Заключение

Проведен сравнительный анализ известных моделей и методов прогнозирования динамики капитальных, трудовых и топливных ресурсов энергетическими системами, основанных на экспоненциальном сглаживании.

Для описания динамики основных ресурсов предложены ковариационно-стационарные стохастические модели временных рядов в форме разностных уравнений с детерминированным полиномиальным трендом. На основе статистического анализа результатов параметрической идентификации предложенных моделей были выбраны наиболее эффективные математические модели с наименьшими ошибками прогнозов.

На основе построенных моделей разработаны одноконтурная имитационная модель системы управления энергосистемой и структура системы поддержки принятия решений, позволяющие разрабатывать управленческие решения по обновлению капитальных фондов и повышать эффективность деятельности энергосистемы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зотеев В.Е., Сагитова Л.А., Гаврилова А.А.* Разработка и сравнительный анализ математических моделей функционирования региональной энергосистемы Самарской области // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Физико-математические науки. 2024. Т. 28. № 2. С. 375–399.
2. *Gavrilova A., Salov A., Sagitova L.* System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of Transformation // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). Samara. 2019. Pp. 736–741. doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976644. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8976644> (accessed April 16, 2024).
3. *Гаврилова А.А., Цапенко М.В.* Синтез математических моделей региональной энергосистемы как многомерных производственных функций // Вестник Самарского государственного университета. Серия: Технические науки. 2002. Вып. 14. С. 126–192.
4. *Дилигенский Н.В., Гаврилова А.А., Цапенко М.В.* Построение и идентификация математических моделей производственных систем. Самара: Офорт, 2006. 126 с.
5. *Сагитова Л.А.* Структура алгоритма системы поддержки принятия решений повышения энергоэффективности регионального энергетического комплекса // Инфокоммуникационные технологии. 2021. Т. 19. № 2. С. 256–262.
6. *Колемаев В.А.* Эконометрика: учебник. М.: ИНФРА-М, 2004. 160 с.
7. *Гармаш А.Н., Орлова И.В., Федосеев В.В.* Экономико-математические методы и прикладные модели: учебник для бакалавриата и магистратуры. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Юрайт, 2022. 328 с.
8. *Кашияп Р.Д., Рао А.Р.* Построение динамических стохастических моделей по экспериментальным данным: Пер. с англ. М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. 384 с.
9. *Бокс Д., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов. Прогноз и управление. М.: Мир, 1974. Вып. 1. 406 с.
10. *Андерсон Т.* Статистический анализ временных рядов. М.: Мир, 1976. 756 с.
11. *Кендалл М., Стьюарт А.* Многомерный статистический анализ и временные ряды. М.: Наука, 1976. 736 с.
12. *Отнес Р., Энксон Л.* Прикладной анализ временных рядов. Основные методы. М.: Мир, 1982. 428 с.
13. *Замков О.О., Толстомятенко А.В., Черемных Ю.Н.* Математические методы в экономике. М.: МГУ, «ДИС», 1997. 368 с.
14. *Вучков И., Бояджиева Л., Солаков О.* Прикладной линейный регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1987. 238 с.
15. *Draper N.R., Smith H.* Applied Regression Analysis / Wiley Series in Probability and Statistics. New York: John Wiley & Sons, 1998. doi: 10.1002/9781118625590.
16. *Демиденко Е.З.* Линейная и нелинейная регрессии. М.: Финансы и статистика, 1981. 302 с.

17. *Darbin J., Watson G.* Testing for serial correlation in least squares regression // *Biometrika*. Vol. 58. 1971. P. 1.

Статья поступила в редакцию 12.09.2024 г.

FORECAST MODELING OF THE DYNAMICS OF MAIN RESOURCES AND CONSTRUCTION OF A SIMULATION SYSTEM FOR MANAGING THE ACTIVITIES OF THE REGIONAL ENERGY SYSTEM OF THE SAMARA REGION

V.E. Zoteev, L.A. Sagitova, A.A. Gavrilova¹

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

E-mail: zoteev-ve@mail.ru, l0410@mail.ru, a.a.gavrilova@mail.ru

Abstract. Regional energy systems are complex dynamic systems that operate in conditions of constant changes in the external environment. In this regard, the task of developing complex management decisions and conducting a systemic analysis of the efficiency of its activities arises. To solve this problem, it is necessary to improve the mathematical models of the dynamics of capital, labor and fuel resources, since they have the greatest impact on the energy output of the energy system.

The paper analyzes existing methods of mathematical description of the dynamics of basic resources and their shortcomings. The paper considers covariance-stationary models of time series in the form of difference equations with a deterministic polynomial trend. The paper presents the results of mathematical modeling of the dynamics of capital, labor and fuel resources based on statistical data on the activities of the energy system of the Samara Region, published in the annual reports of regional ministries and energy companies, and conducts a statistical analysis of them.

Based on a comparative analysis of mathematical models, the most effective models of the dynamics of capital, labor and fuel resources with the best predictive qualities were selected.

Also, in the work, a single-loop simulation model of the energy system management system was constructed by forming investments for the renewal of capital resources and the structure of the decision support system (DSS) was developed, allowing the formation of mathematically sound management decisions.

Keywords: power system, energy efficiency, basic resources, covariance-stationary time series models, statistical analysis, simulation model of control, decision support system.

REFERENCES

1. Zoteev V.E., Sagitova L.A., Gavrilova A.A. Development and comparative analysis mathematical models of functioning of the samara regional energy system // Vestn. Samar. Gos. Techn. Univ. Ser. Fiz.-Mat. Nauki. 2024. Vol. 28. No. 2. Pp. 375–399. (In Russian).
2. Gavrilova A., Salov A., Sagitova L. System Analysis of the Effectiveness of Regional Energy System Management in the Conditions of Transformation // 2019 XXI International Conference Complex Systems: Control and Modeling Problems (CSCMP). 2019. Pp. 736–741, doi: 10.1109/CSCMP45713.2019.8976644. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8976644> (accessed April 16, 2024).
3. Gavrilova A.A., Capenko M.V. Synthesis of mathematical models of the regional energy system as multidimensional production functions // Vestn. Samar. Gos. Techn. Univ. Ser. Techn. Nauki. 2002. Issue 14. Pp. 126–192. (In Russian).
4. Diligenskij N.V., Gavrilova A.A., Capenko M.B. Postroenie i identifikaciya matematicheskikh modelej proizvodstvennykh sistem: Uchebnoe posobie [Construction and identification of



© The Author(s), 2024

¹ Vladimir E. Zoteev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.

Lyaysan A. Sagitova, assistant professor.

Anna A. Gavrilova (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.

- mathematical models of production systems: Tutorial]. Samara: Ofort, 2005. 126 p. (In Russian).
5. *Sagitova L.A.* Struktura algoritma sistemy podderzhki prinyatiya reshenij povysheniya energoefektivnosti regional'nogo energeticheskogo kompleksa [The structure of the algorithm of the decision support system for increasing the energy efficiency of the regional energy complex] // *Infokommunikacionnye tekhnologii*. 2021. Vol. 19. No. 2. Pp. 256–262 (In Russian).
 6. *Kolemaev V.A.* E'konometrika: uchebnik [Econometrics: textbook]. Moscow: INFRA-M, 2004. 160 pp. (In Russian).
 7. *Garmash A.N., Orlova I.V., Fedoseev V.V.* Ekonomiko-matematicheskie metody i prikladnye modeli: uchebnik dlya bakalavriata i magistratury. 4-e izd., pererab. i dop. [Economic and Mathematical Methods and Applied Models: Textbook for Bachelor's and Master's Degrees. 4th ed., revised and enlarged]. Moscow: Yurajt, 2022. 328 p. (In Russian).
 8. *Kashyap R.D., Rao A.R.* Postroenie dinamicheskikh stohasticheskikh modelej po eksperimental'nym dannym. Per. s angl. [Construction of dynamic stochastic models based on experimental data. Translated from English] M.: Nauka. Glavnaya redakciya fiziko-matematicheskoy literatury, 1983. 384 pp. (In Russian).
 9. *Boks D., Dzhenkins G.* Analiz vremennyh ryadov. Prognoz i upravlenie [Time series analysis. Forecast and management]. M.: Mir, 1974. Issue 1. 406 p. (In Russian).
 10. *Anderson T.* Statisticheskij analiz vremennyh ryadov [Statistical analysis of time series.] M.: Mir, 1976. 756 p. (In Russian).
 11. *Kendall M., St'yuart A.* Mnogomernyj statisticheskij analiz i vremennye ryady [Multivariate statistical analysis and time series.] M.: Nauka, 1976. 736 p. (In Russian).
 12. *Otnes R., Enokson L.* Prikladnoj analiz vremennyh ryadov. Osnovnye metody [Applied time series analysis. Basic methods]. M.: Mir, 1982. 728 p. (In Russian).
 13. *Zamkov O.O., Tolstopyatenko A.V., Cheremnyh Yu.N.* Matematicheskie metody v ekonomike [Mathematical Methods in Economics]. M.: MGU, DIS, 1997. 368 p. (In Russian).
 14. *Vuchkov I., Boyadzhieva L., Solakov O.* Prikladnoj linejnyj regressionnyj analiz [Applied linear regression analysis]. M.: Finansy i statistika, 1987. 238 p. (In Russian).
 15. *Draper N.R., Smith H.* Applied Regression Analysis / Wiley Series in Probability and Statistics. New York: John Wiley & Sons, 1998. doi: 10.1002/9781118625590
 16. *Demidenko E.Z.* Linejnaya i nelinejnaya regressii [Linear and nonlinear regression.] M.: Finansy i statistika, 1981. 302 pp. (In Russian).
 17. *Darbin J., Watson G.* Testing for serial correlation in least squares regression // *Biometrika*. Vol. 58. 1971. P. 1.

Original article submitted 12.09.2024

УДК 621.311.1.004

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО УЧАСТКА С МЕЛКОСЕРИЙНЫМ ХАРАКТЕРОМ ПРОИЗВОДСТВА¹

А.С. Романова

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

E-mail: alyona512@yandex.ru

Аннотация. Рассмотрены проблемы энергетической эффективности гальванического участка промышленного предприятия с мелкосерийным характером производства. Проведен анализ потребляемых гальваническим участком энергоресурсов. Определены коэффициенты загрузки гальванических ванн в целом по участку и для каждой операции нанесения металлопокрытий в отдельности. Выявлена связанная с неравномерностью загрузки оборудования причина низкой энергоэффективности теплоснабжения участка, обусловленная невозможностью регулирования потребления тепловой энергии при централизованном пароснабжении. Составлен энергетический баланс теплообеспечения технологического процесса гальванического нанесения металлопокрытий для двух режимов работы технологического оборудования: вывода на режим и поддержания режима. Определены необходимые энергозатраты для нагрева гальванических ванн до номинальных температур, регламентируемых технологией процесса нанесения металлопокрытий, и энергозатраты, необходимые для стабилизации температурного режима процесса электролиза с учетом номенклатуры обрабатываемых деталей, продолжительности рабочего цикла, требуемой толщины и физических характеристик гальванического покрытия. Рассмотрены варианты децентрализованного теплоснабжения гальванических ванн с учетом технологических температур, коэффициентов загрузки и последовательности проведения операций нанесения металлопокрытий. Определен рациональный способ организации неравномерной загрузки гальванических ванн и технологического энергопотребления при децентрализованном теплоснабжении производственного участка. Установлен допустимый уровень снижения КПД промышленных серийных теплоисточников при повышенной неравномерности загрузки технологического оборудования. Предложен способ утилизации невостребованного технологического тепла в системе горячего водоснабжения с целью стабилизации КПД источников теплоснабжения на уровне, близком к номинальному. Определен экономический эффект от утилизации невостребованного технологического тепла на нужды горячего водоснабжения и отопления гальванического участка.

Ключевые слова: энергоэффективность, коэффициент загрузки, теплоснабжение, гальванический участок, теплообменник, КПД, парогенератор.



© Автор(ы), 2024

¹ Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания (тема № АААА-А 12-2110800012-0).

Алена Сергеевна Романова, аспирант кафедры управления и системного анализа теплоэнергетических и социотехнических комплексов.

Введение

В условиях плановой экономики загрузка большинства промышленных предприятий в целом и их отдельных производственных участков осуществлялась достаточно ритмично и предсказуемо, а энергоснабжение обычно было централизованным. Вопросам энергосбережения и энергоэффективности не придавалось первостепенного значения [1, 2]. С переходом к рыночной экономике отсутствие долговременного планирования, устойчивого и равномерного выпуска продукции повлекло за собой снижение коэффициента загрузки оборудования и часто критический перерасход затраченной на технологические нужды производства энергии. В этих условиях проблема энергоэффективности определяющим образом влияет на конкурентоспособность продукции и принимает актуальный характер [3].

Обоснование

В работе рассматривается энергоемкий гальванический участок типового промышленного предприятия машиностроительной отрасли с мелкосерийным характером производства.

На участке установлено 50 ванн ($n = 50$) с подогревом электролита или воды для промывки деталей, через которые проходит 1,5 тысячи номенклатурных наименований деталей и узлов.

Потребляемые энергетические ресурсы на гальваническом участке можно разделить на две группы:

1 – энергоресурс на вспомогательные нужды: горячая вода и пар – на отопление, электрическая энергия – на освещение и горячее водоснабжение;

2 – энергоресурс на технологические нужды: пар – на нагрев электролита, электроэнергия – на нагрев электролита и проведение процесса электролиза.

Неравномерность загрузки оборудования определяет нерациональное потребление энергоресурса, его перерасход и является одной из причин низкой энергоэффективности гальванического участка [4, 5]. Наиболее энергозатратным оборудованием гальванического участка являются ванны [6].

Равномерность загрузки гальванических ванн характеризуется суммарным коэффициентом загрузки всех n ванн гальванического участка [7]:

$$K_3 = \frac{\sum_{k=1}^n T_k}{\sum_{k=1}^n T_{k\phi}},$$

где T_k – время работы k -й гальванической ванны, ч; $T_{k\phi}$ – фонд времени работы k -й гальванической ванны, ч.

Из рис. 1 видно, что суммарный коэффициент загрузки гальванического участка меняется, принимая значения от 0,34 до 0,15.

Коэффициент загрузки оборудования по каждой j -й группе операций определяется соотношением

$$K_o^j = \frac{T_{об}^j}{T_{\phi}^j}.$$

Здесь $T_{ог}^j$ – время работы технологической группы гальванических ванн, обслуживающих соответствующую j -ю операцию, ч; $T_{ф}^j$ – фонд времени работы j -й группы оборудования, ч; $j=1$ – химическое оксидирование; $j=2$ – хромирование; $j=3$ – лужение; $j=4$ – травление; $j=5$ – хромовокислородное анодирование; $j=6$ – химическое никелирование; $j=7$ – электрополирование; $j=8$ – снятие нагара; $j=9$ – никелирование; $j=10$ – хроммолибденирование; $j=11$ – снятие специального слоя и нагара; $j=12$ – химическое фосфатирование с оксидированием в универсальной гидрофобизирующей жидкости; $j=13$ – снятие краски.

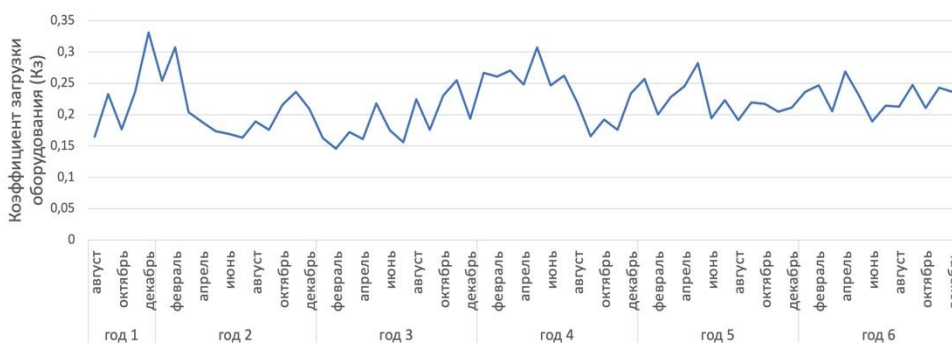


Рис. 1. Динамика суммарного коэффициента загрузки K_z ванн

Рис. 2–4 показывают, что для каждой j -й группы операций коэффициенты загрузки $K_{ог}^j$ изменяются от 0 до 0,95 в зависимости от графика поступления в цех деталей и узлов. Несмотря на это пар для нагрева электролита поступает на участок круглосуточно, без возможности регулирования его расхода на отдельные группы ванн.

В работе [8] проанализирована организация теплообеспечения технологических процессов топливно-энергетическими ресурсами в зависимости от коэффициента загрузки технологического оборудования $K_{ог}^j$ и применяемого источника тепловой энергии трех вариантов комбинации и расстановки гальванических ванн с обеспечением их тепловой энергией от различных видов децентрализованных источников. В этой же работе установлено, что существующая организация теплоснабжения подогрева гальванических ванн при централизованном пароснабжении неэффективна по сравнению с децентрализованным теплоснабжением.

Рассмотрим возможность утилизации на вспомогательные нужды временных излишков тепла, вырабатываемого децентрализованными источниками гальванического участка, что не только напрямую обеспечивает дополнительный энергоресурс, снижая энергозатраты системы отопления и горячего водоснабжения, но и повышает равномерность распределения нагрузки на источники технологического теплоснабжения гальванического участка, увеличивая их КПД.

Для определения количества тепла, необходимого для нагрева ванн, и определения количества избыточного тепла от децентрализованных источников необходимо составить тепловой баланс технологического оборудования [9].

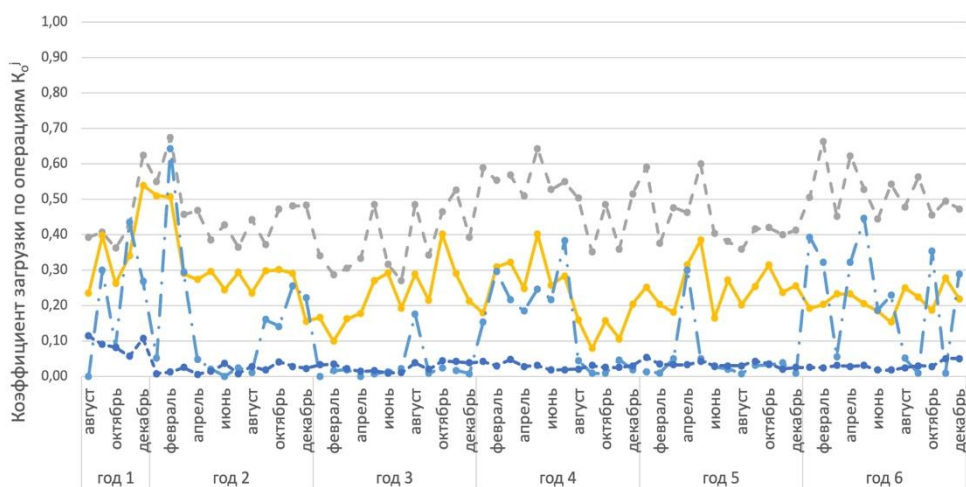


Рис. 2. Коэффициент загрузки оборудования по операциям K_o^j :

— K_o^1 — химическое оксидирование; — K_o^2 — хромирование;
 — K_o^3 — лужение; — K_o^4 — травление

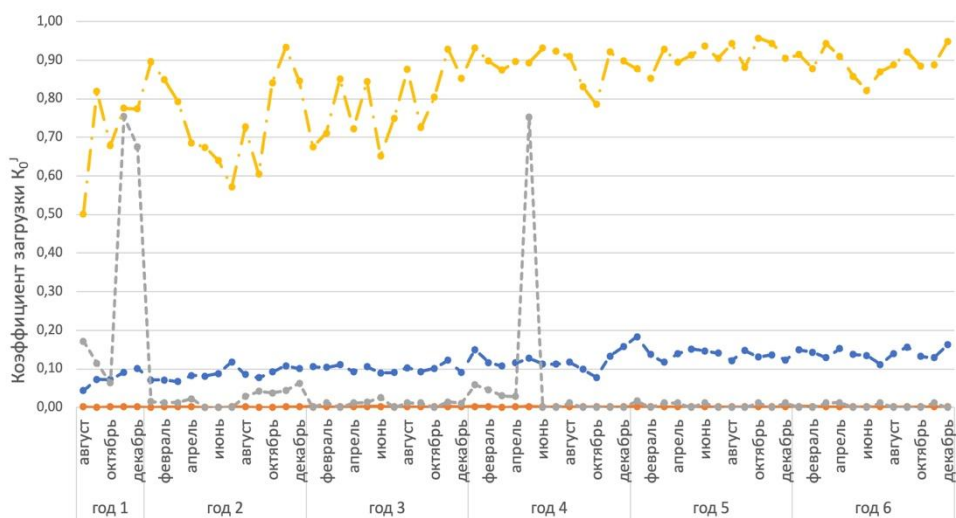


Рис. 3. Коэффициент загрузки оборудования по операциям K_o^j :

— K_o^5 — хромовокислотное анодирование; — K_o^6 — химическое никелирование; — K_o^7 — электрополирование; — K_o^8 — снятие нагара

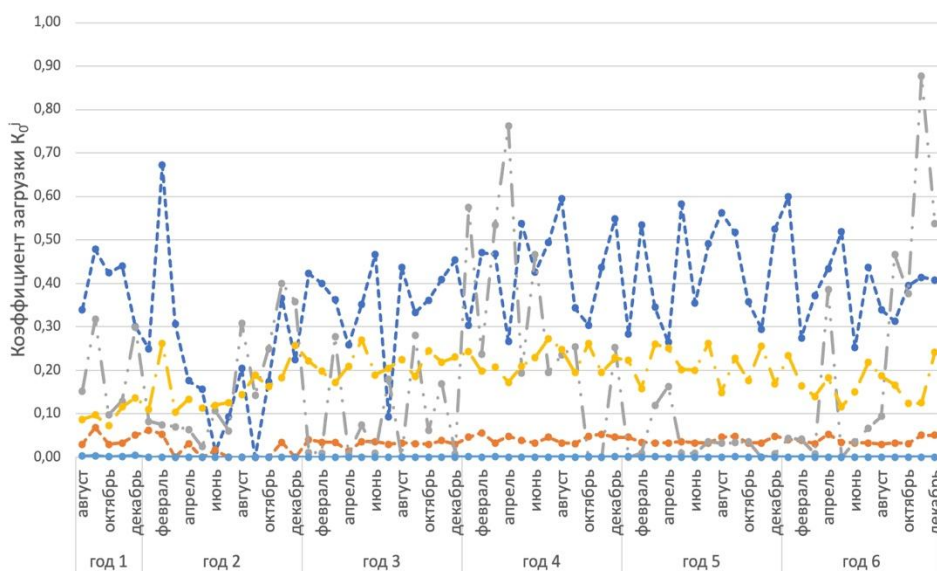


Рис. 4. Коэффициент загрузки оборудования по операциям K_d^j :

—•— K_0^9 – никелирование; —•— K_0^{10} – хроммолибденирование;
 —•— K_0^{11} – снятие специального слоя и нагара; —•— K_0^{12} – химическое фосфатирование с оксидированием в универсальной гидрофобизирующей жидкости; —•— K_0^{13} – снятие краски

Тепловой баланс технологического оборудования

Для энергоэффективной организации теплоснабжения гальванического производства составим тепловой баланс гальванических ванн.

Рассмотрим два режима работы гальванических ванн.

Вывод на режим

Для подготовки оборудования к проведению всех операций подготовки и гальванического нанесения металлопокрытий необходимо вначале нагреть ванны до требуемой технологической температуры T_1 (рис. 5). Процесс нагрева осуществляется с применением теплоисточника ТИ, находящегося внутри электролита.

Нагрев электролита. Пренебрегая неравномерностью распределения температуры по объему ванны, запишем зависимость температуры T_1 электролита от времени τ :

$$V_3 C_3 \rho_3 = \frac{dT_1}{d\tau} = Q_{в.и.} - S_3 \alpha_3 (T_1 - T_b) - 2S_{ст1} \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} (T_1 - T_2) - \\ - 2S_{ст2} \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} (T_1 - T_2) - S_{ст3} \frac{\lambda_{ст}}{\delta_{ст}} (T_1 - T_3).$$

Нагрев корпуса ванны. Температура боковых и фронтальных стенок ванны описывается уравнением [10]

$$C_{\text{ст}} \cdot \rho_{\text{ст}} \frac{dT_{\text{ст}}}{d\tau} = 2(S_{\text{ст1}} + S_{\text{ст2}}) \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\delta_{\text{ст}}} (T_1 - T_2) - 2(S_{\text{ст1}} + S_{\text{ст2}}) \alpha_{\text{ст}} (T_2 - T_{\text{в}}) + S_{\text{ст3}} \frac{\lambda_{\text{ст}}}{\delta_{\text{ст}}} (T_1 - T_3).$$

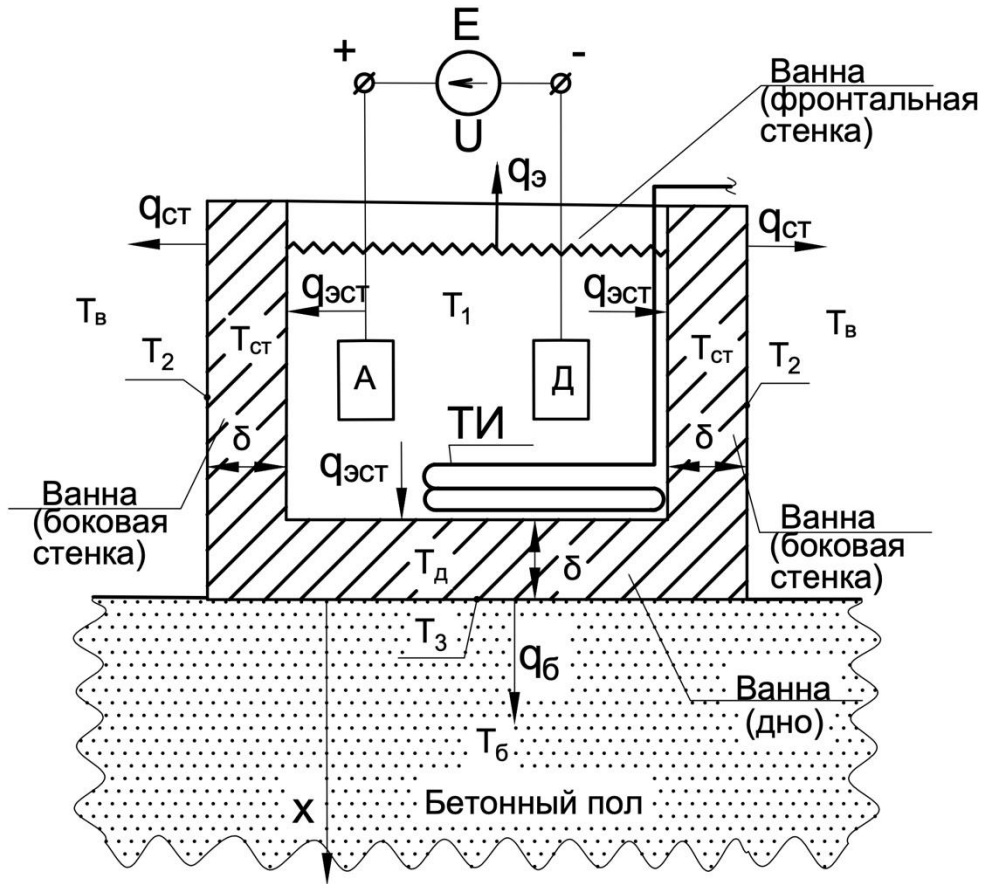


Рис. 5. Схема гальванической ванны: А – анод; Д – покрываемая деталь (катод); Е – источник тока

Здесь средняя температура стенки $T_{\text{ст}}$ и дна $T_{\text{д}}$ корпуса ванны:

$$T_{\text{ст}}(\tau) = \frac{1}{V_{\text{ст}}} \iiint_{V_{\text{ст}}} T_{\text{ст}}(x, y, z, \tau) dV; \quad (1)$$

$$T_{\text{д}}(\tau) = \frac{1}{V_{\text{д}}} \iiint_{V_{\text{д}}} T_{\text{д}}(x, y, z, \tau) dV.$$

На рассматриваемом гальваническом участке ванны установлены на бетонный пол без дополнительной теплоизоляции, что приводит к нагреву участка бетонного пола под ванной в соответствии с одномерным уравнением теплопроводности, в предположении одномерного характера прогрева пола:

$$C_{\text{б}} \rho_{\text{б}} \frac{\partial T_{\text{б}}}{\partial \tau} - \lambda_{\text{б}} \frac{\partial^2 T_{\text{б}}}{\partial x^2} = 0$$

с краевыми условиями:

$$\begin{aligned} T_6(x_i; \tau) \Big|_{\tau=0} &= T_i(\tau_0) = T_i(0); \\ T_6(x_i; \tau) \Big|_{\tau=0} &= T_3; \\ \frac{\partial T_6(x_i; \tau)}{\partial x} \Big|_{x \rightarrow \infty} &= 0; \\ T_6(x_i; \tau) \Big|_{x \rightarrow \infty} &\rightarrow T_i(\tau_0) = T_{6.\text{нач.}}. \end{aligned}$$

Энергозатраты на нагрев электролита. Количество теплоты Q_3 , необходимое для изменения средней по объему V_3 электролита от начальной T_{l_0} до T_{l_k} температуры T_1 , определяется интегральным законом Фурье:

$$\Delta Q_3 = V_3 \rho_3 C_3 (T_{l_0} - T_{l_k}). \quad (2)$$

Теплопотери через стенки корпуса ванны:

– на границе «электролит – стенка ванны» для составления баланса предполагается теплообмен при граничных условиях 1-го рода. Температура стенки равна температуре электролита (T_1);

– на границе «стенка ванны – воздух» принимаются граничные условия 3-го рода, где тепловой поток определяется:

$$q_{\text{ст}} = \alpha_{\text{ст}} (T_2 - T_{\text{в}}).$$

Для определения тепловых потерь через боковые стенки ванны необходимо найти распределение температурного поля в стенке ванны. В условиях идеального теплового контакта электролита с внутренней поверхностью стенки [11] температура стенки в нестационарном режиме определяется решением соответствующего уравнения теплопроводности для плоской стенки со смешанными граничными условиями:

$$T_{\text{ст},x} = T_1 - \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\mu_n \xi) \exp(-\mu_n^2 F_0).$$

Температура $T_{\text{ст},x}$ пола в нестационарном режиме определяется аналогично.

Количество теплоты $\Delta Q_{\text{ст}}$, проходящее через боковые и фронтальные стенки ванны в единицу времени:

$$\Delta Q_{\text{ст}} = q_{\text{ст}} 2(S_{\text{ст}1} + S_{\text{ст}2}).$$

Нагрев корпуса ванны. Определение количества теплоты на нагрев конструкции ванны производится аналогично расчету расхода тепла на нагрев электролита (2). Тепло $\Delta Q_{\text{в}}$ на нагрев элемента объема конструкции ванны за время $\Delta \tau$, затраченное на нагрев электролита до технологической температуры ($\Delta \tau = (\tau_{\text{к}} - \tau_0)$):

$$\Delta Q_{\text{в}} = V_{\text{в}} \rho_{\text{в}} C_{\text{в}} (T_{\text{ст}} - T_{\text{ст}0}). \quad (3)$$

Тепловые потери от зеркала электролита. Для расчета потерь тепла от зеркала электролита при нагреве ванны используется граничные условия по закону Ньютона:

$$Q_3 = \alpha_3 S_3 (T_1 - T_0).$$

Здесь и всюду: $T_{\text{ст}x} \Big|_{\tau=0} = T_{\text{ст}0}$ – температура корпуса ванны в момент времени $\tau = 0$, °C; C_B – теплоемкость материала стенок ванны, Дж/(кг·°C); ρ_B – плотность материала корпуса ванны, кг/м³; $V_B = \sum V_{\text{ст}}$ – общий объем стенок ванны, м³; $T_{\text{ст}}$ – средняя температура стенки ванны при времени τ_k , рассчитывается по (1), °C; $T_{\text{ст}x}$ – температурное распределение по толщине δ стенки, °C; μ_n – корень характеристического уравнения $\left(\text{ctg} \mu_n = \left(\frac{1}{\text{Bi}} \right) \mu_n \right)$, $\text{Bi} = \frac{\alpha_c}{\lambda}$; λ_c – коэффициент теплопроводности стенки; $\xi = \frac{x}{\delta}$ – относительная координата толщины стенки; $F_0 = \frac{(\alpha \tau)}{\delta^2}$ – критерий Фурье; $A_n = \frac{2 \sin \mu_n}{\mu_n + \sin \mu_n \cos \mu_n}$, $n = 1, 2, \dots$ (для наружной поверхности боковых стенок $x = \delta$, $\xi = 1$); V_3 – объем электролита, м³; $V_{\text{ст}}$, V_d – объем соответствующего элемента конструкции ванны (стенки или пола), м³; ρ_3 – плотность электролита, кг/м³; C_3 – теплоемкость электролита, Дж/(кг·°C); $C_{\text{ст}}$ – теплоемкость стенок ванны, Дж/(кг·°C); T_0 – температура электролита в момент времени $\tau_0 = 0$, °C; T_{1k} – температура электролита в момент времени τ_k , °C; $\rho_{\text{ст}}$ – плотность материала стенок ванны, кг/м³; $Q_{\text{в.и.}}$ – тепловая мощность внешнего источника, Вт; S_3 – площадь поверхности электролита, м²; α_3 – коэффициент теплоотдачи от зеркала электролита, Вт/м²; $\alpha_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопередачи от стенок к воздуху, Вт/(м²·°C); T_1 – температура электролита, °C; T_B – температура окружающего ванну воздуха, °C; $S_{\text{ст}1}$ – площадь боковой поверхности стенки, м²; $S_{\text{ст}2}$ – площадь фронтальной поверхности стенки, м²; $S_{\text{ст}3}$ – площадь дна ванны; $\lambda_{\text{ст}}$ – коэффициент теплопроводности стенки ванны, Вт/(м·°C); $\delta_{\text{ст}}$ – толщина стенки, м; T_2 – температура наружной поверхности стенки, °C; $S_3 = S_{\text{п}}$ – площадь поверхности пола, м²; $\lambda_{\text{п}}$ – коэффициент теплопроводности пола, Вт/(м·°C); $\delta_{\text{п}} = \delta$ – толщина пола, м; T_3 – температура внешней поверхности пола, °C; Вт/(м²·°C).

Поддержание режима

После вывода на режим для проведения процесса электролиза температура электролита поддерживается постоянной и не меняется со временем $\left(\frac{\partial T_1}{\partial \tau} = 0 \right)$ [12, 13].

Поддержание стационарного теплового режима гальванических ванн требует компенсации тепловых потерь в окружающую среду от стенок ванны, от дна ванны в бетонный пол, от зеркала электролита; количества тепла, затрачиваемого

на нагрев загружаемых деталей, и количества тепла, выделившегося при прохождении электрического тока через объем электролита:

$$Q_{в.и.} - (S_3 \alpha_3 (T_1(\tau_k) - T_v) + 2(S_{ст1} + S_{ст2}) \alpha_{ст} (T_2(\tau_k) - T_v) - Q_{эТ} + \\ + V_d C_d \rho_d (T_1(\tau_k) - T_{д0})) \tau_{пр} = 0$$

Здесь $\tau_{пр}$ – продолжительность технологического процесса, с; $Q_{эТ}$ – количество теплоты, выделяющееся при прохождении электрического тока через электролит.

Потери тепла через стенки корпуса ванны. С учетом допущения идеального теплового контакта в стационарном режиме на границе «электролит – стенка» температура на внутренней поверхности стенки будет равна температуре электролита ($T_1(\tau_k)$).

Температура внешней поверхности стенки ванны $T_2 = T_v + q_{ст} \frac{1}{\alpha_{ст}}$, тогда тепловой поток, проходящий через плоскую стенку в стационарном режиме, определяется выражением

$$q_{ст} = \frac{T_1(\tau_k) - T_2}{\left(\frac{\delta}{\lambda_{ст}} \right) + \alpha_{ст}}$$

Количество теплоты, необходимое для компенсации тепловых потерь через стенки ванны при осуществлении технологического процесса, определяется:

$$Q_c = 2(S_{ст1} + S_{ст2}) q_{ст} \tau_{пр}$$

Потери тепла от зеркала электролита:

$$Q_3 = \alpha_3 S_3 (T_1(\tau_k) - T_v) \tau_{пр}$$

Затраты тепла на нагрев загружаемых деталей. В установившемся технологическом режиме работы ванны производится загрузка холодных деталей и затрачивается тепло на их нагрев. Определение количества теплоты на нагрев загруженных деталей без внутренних тепловыделений происходит аналогично (2), (3):

$$Q_d = V_d C_d r_d (T_1(t_k) - T_{д0})$$

Здесь V_d – объем загружаемых деталей, м³; $T_{д0}$ – начальная температура детали до погружения в ванну, °С; r_d – плотность материала деталей, (кг/м³); C_d – теплоемкость загружаемых деталей, (Дж/(кг·°С)).

Технологическое тепловыделение. При проведении процесса электролиза для создания разности электрических потенциалов между катодом и анодом анод и катод подключают к источнику тока E (см. рис. 5). При прохождении электрического тока через электролит в нем выделяется тепло по закону Джоуля – Ленца:

$$Q_{\text{эт}} = \int_{\tau_k}^{\tau_{\text{пр}}} I^2 R d\tau.$$

Здесь I – сила тока, необходимая для осуществления процесса; R – сопротивление электролита.

По результатам теплового баланса определена динамика требуемого для обеспечения технологии гальванических процессов количества теплоты (рис. 6).

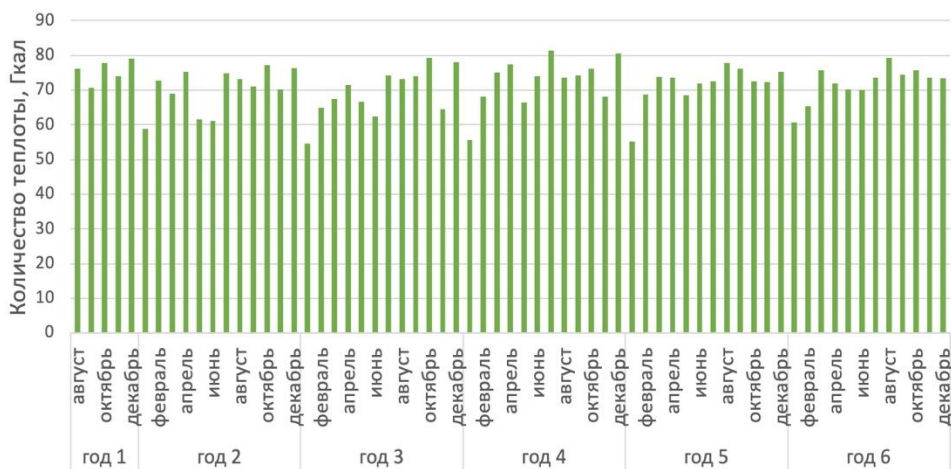


Рис. 6. Динамика требуемого количества теплоты на технологические процессы

Децентрализованное пароснабжение гальванического участка

В работе [8] установлено, что газовый парогенератор для обеспечения технологического теплоснабжения эффективно использовать в качестве децентрализованного источника тепла гальванического участка с последовательно-параллельным графиком работы оборудования.

В связи с неравномерностью коэффициента загрузки (K_z) гальванического оборудования не представляется возможным организовать равномерную номинальную загрузку парогенератора с максимальным КПД. Если же обеспечивать равномерную номинальную загрузку парогенератора при неравномерном потреблении пара гальваническим участком, высвобождается некоторое количество теплоты, которое можно использовать на общецеховые нужды отопления и горячего водоснабжения (ГВС).

Определим невостребованное количество тепла от парогенератора при его равномерной номинальной загрузке из формулы КПД парогенератора [14, 15]. Максимальный КПД парогенератора согласно технической документации определяется формулой

$$\eta = \frac{Q_{\text{шт}} 100}{B Q_{\text{н}}^{\text{p}}}$$

где $Q_{\text{шт}}$ – количество тепла, вырабатываемое парогенератором (ккал); B – расход топлива (кг/ч); $Q_{\text{н}}^{\text{p}}$ – низшая рабочая теплота сгорания топлива для природного газа $Q_{\text{н}}^{\text{p}} = 8630$ (ккал/кг).

Год	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	апрель	май	июнь	июль	август
2010-2011	14	18	11	15	12	26	18	19	14	13	12	14	16
2011-2012	12	15	12	26	12	24	19	18	14	12	11	13	15
2012-2013	14	24	14	24	12	28	19	16	16	11	10	12	16
2013-2014	16	21	15	21	12	22	20	19	16	11	10	12	15
2014-2015	15	22	15	22	10	31	20	15	12	9	10	12	15
2015-2016	15	18	12	18	10	31	18	15	15	10	18	26	23

Определим эффективность использования пара на нужды отопления и ГВС в предложенном способе.

Рассмотрим энергетический (рис. 9) и экономический (рис. 10) эффект от внедрения пароаккумулятора для обеспечения равномерности и номинальной загрузки парогенераторов при отпуске невостребованного тепла в систему отопления и ГВС.

Из таблицы видно, что при использовании избытков тепла от парогенераторов в системе ГВС экономический эффект за 5 лет на 2619 тыс. руб. больше, чем при использовании избыточного тепла только в системе отопления. Обуславливается это сезонностью работы системы отопления.

Система теплоснабжения	Количество тепла, Гкал	Ед. изм. та- рифа	Тариф, руб.	Экономический эффект, руб.
Теплоснабжение гальванических ванн (парогенератор)	1097,85	—	—	—
Отопление	616,923	руб/Гкал	1558	961170,116
ГВС	933,169	руб/кВт·ч	4,1	3581117,12

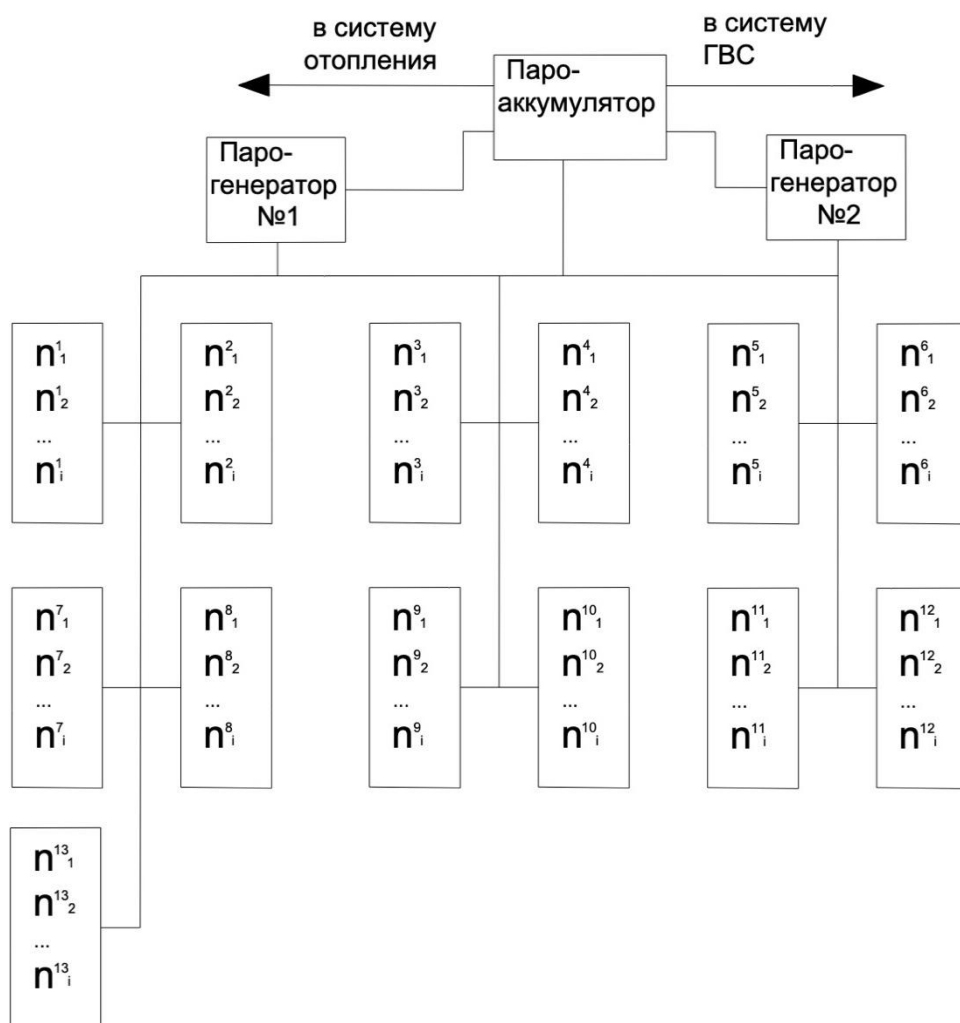


Рис. 8. Схема подключения систем отопления и водоснабжения к газовым парогенераторам: $n^1_1, n^1_2, \dots, n^1_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию химического оксидирования; $n^2_1, n^2_2, \dots, n^2_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию хромирования; $n^3_1, n^3_2, \dots, n^3_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию лужения; $n^4_1, n^4_2, \dots, n^4_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию травления; $n^5_1, n^5_2, \dots, n^5_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию хромо-кислого анодирования; $n^6_1, n^6_2, \dots, n^6_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию химического никелирования; $n^7_1, n^7_2, \dots, n^7_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию электрополирования; $n^8_1, n^8_2, \dots, n^8_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию снятия нагара; $n^9_1, n^9_2, \dots, n^9_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию никелирования; $n^{10}_1, n^{10}_2, \dots, n^{10}_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию хроммолибденирования; $n^{11}_1, n^{11}_2, \dots, n^{11}_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию снятия спецслоя и нагара; $n^{12}_1, n^{12}_2, \dots, n^{12}_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию химического фосфатирования с оксидированием в универсальной гидрофобизирующей жидкости; $n^{13}_1, n^{13}_2, \dots, n^{13}_i$ – ряд ванн, выполняющих операцию снятия краски

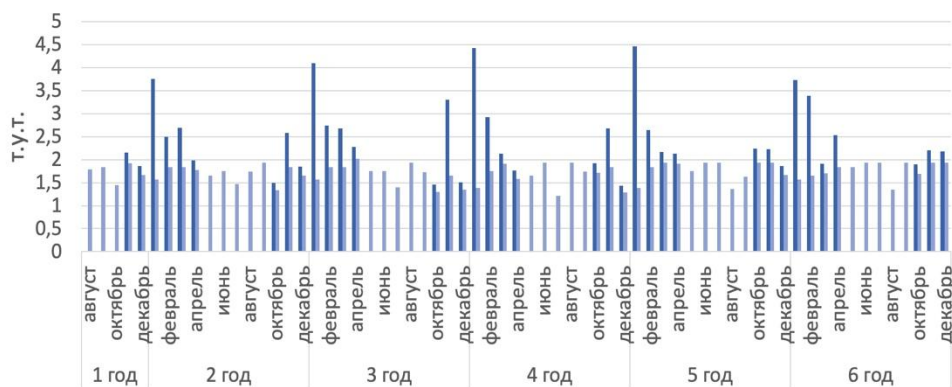


Рис. 9. Энергетический эффект: ■ – система отопления; ■ – система ГВС

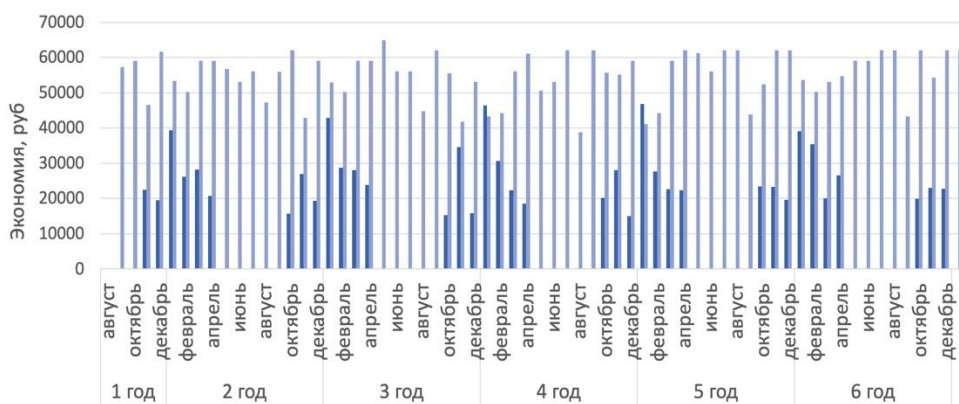


Рис. 10. Экономический эффект: ■ – система отопления; ■ – система ГВС

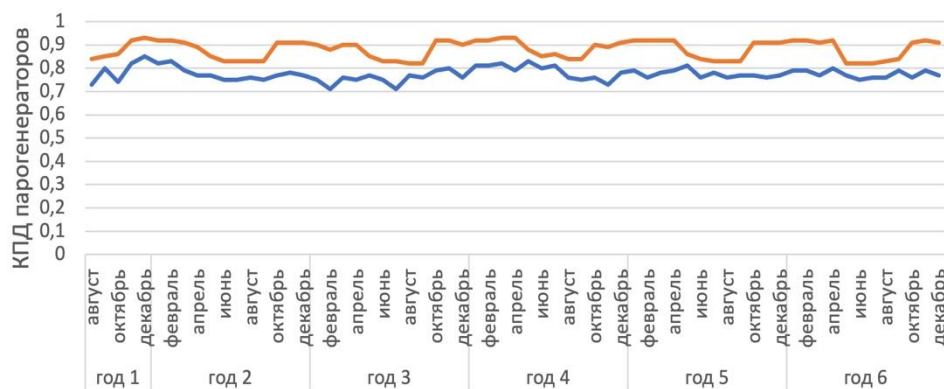


Рис. 11. КПД парогенераторов: ■ – КПД парогенераторов при исключительном обеспечении технологических процессов; ■ – КПД парогенераторов при дополнительном снабжении систем отопления и ГВС

Заключение

При использовании парогенератора на технологические нужды гальванического участка с мелкосерийным характером производства для повышения энергоэффективности и получения максимального КПД парогенераторов предложено использование избыточного тепла от парогенераторов на нужды системы водяного отопления и ГВС. Увеличение КПД при подключении парогенераторов дополнительно к системам теплоснабжения и ГВС составило от 6 до 12 % в сравнении с работой парогенераторов только на технологические нужды. Установлено, что при использовании избыточного тепла на ГВС наблюдается экономический эффект больше в 3,7 раза, чем при использовании на нужды системы отопления, что обусловливается сезонностью работы системы отопления и постоянством потребления тепла от системы ГВС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Mariana Resener, Steffen Rebennack, Panos M. Pardalos, Sérgio Haffner. Handbook of Optimization in Electric Power Distribution Systems // Publisher Springer Cham Published: 25 February 2020. Number of Pages XI, 382.
2. Виноградов С.С. Организация гальванического производства. Оборудование, расчет производства, нормирование. М.: Глобус, 2005. 240 с.
3. Пиркин А.Г. Теоретические основы системного анализа энергообеспечения предприятий. СПб: СПбГАУ, 2021. 92 с.
4. Kogan M.V., Mitchenko I.A. Economic risk planning of the industrial enterprises // European Journal of Economic Studies. 2012. No. 1(1). Pp. 30–36.
5. Шлугер М.А. Гальванические покрытия в машиностроении. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
6. Вайнер Я.В., Дасоян М.А. Оборудование цехов электрохимических покрытий. М.: Машиностроение, 1971. 288 с.
7. Чичкина В.Д. Организация и планирование производства. Самара: СамГУ, 2012. 186 с.
8. Романова А.С., Микушин М.Б., Воеводин А.Ю. Анализ энергоемкости гальванического комплекса машиностроительного производства // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. 2021. Т. 29. № 4. С. 44–55. doi: 10.14498/tech.2021.4.4
9. Цаплин А.И., Никулин И.Л. Моделирование теплофизических процессов и объектов в металлургии. Пермь: ПГТУ, 2011. 299 с.
10. Лыков А.В. Тепломассообмен. М.: Энергия, 1978. 480 с.
11. Чередниченко В.С., Синецын В.А., Алиферов А.И. и др. Теплопередача. Новосибирск: НГТУ, 2007. 232 с.
12. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа, 1959. 560 с.
13. Крейт Ф., Блэк У. Основы теплопередачи. М.: Мир, 1983. 512 с.
14. Ковалев А.П., Лелеев Н.С., Виленский Т.В. Парогенераторы. М.: Энергоатомиздат, 1985. 376 с.
15. Дубровский В.А. Увеличение тепловой эффективности поверхности нагрева котельных агрегатов // Тезисы докладов II всесоюзной конференции Теплообмен в парогенераторах. Новосибирск: СО АН СССР, 1990. С. 23–24.
16. Бородуля А.В., Хассан А.Ф., Пальченко Г.И. Теплообмен в топочном объеме парогенераторов с кипящим слоем // Тезисы докладов II всесоюзной конференции Теплообмен в парогенераторах. Новосибирск: СО АН СССР, 1990. С. 60–63.

Статья поступила в редакцию 20.10.2024 г.

IMPROVING THE ENERGY EFFICIENCY OF A GALVANIC AREA WITH A SMALL-SCALE NATURE OF PRODUCTION¹

A.S. Romanova

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

E-mail: alyona512@yandex.ru

Abstract. The article considers the problems of energy efficiency of the galvanic section of an industrial enterprise with a small-scale production nature. An analysis of the energy resources consumed by the galvanic section is carried out. The galvanic bath load factors are determined for the section as a whole and for each metal coating application operation separately. The reason for the low energy efficiency of the section's heat supply associated with the uneven equipment load is revealed, due to the impossibility of regulating the consumption of thermal energy with a centralized steam supply. An energy balance of heat supply for the technological process of galvanic application of metal coatings is compiled for two operating modes of the process equipment: bringing to the mode and maintaining the mode. The energy costs required for heating the galvanic baths to the nominal temperatures regulated by the technology of the metal coating application process and the energy costs required to stabilize the temperature mode of the electrolysis process are determined, taking into account the nomenclature of the processed parts, the duration of the working cycle, the required thickness and physical characteristics of the galvanic coating. The article considers options for decentralized heat supply of galvanic baths taking into account process temperatures, load factors and the sequence of metal coating application operations. It defines a rational method for organizing uneven loading of galvanic baths and process energy consumption during decentralized heat supply of the production area. It establishes an acceptable level of efficiency reduction of industrial serial heat sources with increased uneven loading of process equipment. It proposes a method for utilizing unclaimed process heat in the hot water supply system in order to stabilize the efficiency of heat supply sources at a level close to the nominal one. It defines the economic effect of utilizing unclaimed process heat for the needs of hot water supply and heating of the galvanic area.

Keywords: energy efficiency, load factor, heat supply, galvanic section, heat exchanger, efficiency, steam generator.

REFERENCES

1. Mariana Resener, Steffen Rebennack, Panos M. Pardalos, Sérgio Haffner. Handbook of Optimization in Electric Power Distribution Systems // Publisher Springer Cham Published: 25 February 2020. Number of Pages XI, 382.
2. Vinogradov S.S. Organizatsiya gal'vanicheskogo proizvodstva. Oborudovanie, raschet proizvodstva, normirovanie [Organization of galvanic production. Equipment, production calculations, rationing]. M.: Globus, 2005. 240 p. (In Russian)
3. Pirkin A.G. Teoreticheskie osnovy sistemnogo analiza energoobespecheniya predpriyatij. Uchebnoe posobie dlya obuchayushchihся po napravleniyu podgotovki 35.04.06. Agroi-



© The Author(s), 2024

¹ The research was conducted with financial support from the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as part of the state assignment (topic No. AAAA-A 12-2110800012-0).

Alena S. Romanova, Postgraduate Student.

- zheneriya [Theoretical foundations of system analysis of energy supply to enterprises. Textbook for students in the field of training 04/35/06. Agroengineering]. SPb.: SPbGAU, 2021. 92 p. (In Russian)
4. *Kogan M.V., Mitchenko I.A.* Economic risk planning of the industrial enterprises // *European Journal of Economic Studies*. 2012. No. 1(1). Pp. 30–36.
 5. *Shluger M.A.* Galvanicheskie pokrytiya v mashinostroenii [Galvanic coatings in mechanical engineering]. M.: Mashinostroenie, 1985. 240 p. (In Russian)
 6. *Vajner Ya.V., Dasoyan M.A.* Oborudovanie cekhov elektrohimicheskikh pokrytij [Equipment for electrochemical coating workshops]. M.: Mashinostroenie, 1971. 288 p. (In Russian)
 7. *Chichkina V.D.* Organizaciya i planirovanie proizvodstva [Organization and planning of production]. Samara: SamGU, 2012. 186 p. (In Russian)
 8. *Romanova A.S., Mikushin M.B., Voevodin A.Yu.* Analiz energoemkosti gal'vanicheskogo kompleksa mashinostroitel'nogo proizvodstva [Analysis of the energy intensity of the galvanic complex of machine-building production] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki*. 2021. Vol. 29. No. 4. Pp. 44–55. doi: 10.14498/tech.2021.4.4 (In Russian)
 9. *Caplin A.I., Nikulin I.L.* Modelirovanie teplofizicheskikh processov i ob'ektov v metallurgii [Modeling of thermophysical processes and objects in metallurgy]. Perm: PGU, 2011. 299 p. (In Russian)
 10. *Lykov A.V.* Teplomassoobmen [Heat and mass transfer]. M.: Energiya, 1978. 480 p. (In Russian)
 11. *Cherednichenko V.S., Sinicyn V.A., Aliferov A.I. i dr.* Teploperedacha [Heat transfer: textbook for universities]. Novosibirsk: NGTU, 2007. 232 p. (In Russian)
 12. *Nashchokin V.V.* Tekhnicheskaya termodinamika i teploperedacha [Technical thermodynamics and heat transfer]. M.: Vysshaya shkola, 1959. 560 p. (In Russian)
 13. *Krejt F., Blek U.* Osnovy teploperedachi [Fundamentals of Heat Transfer]. M.: Mir, 1983. 512 p. (In Russian)
 14. *Kovalev A.P., Leleev N.S., Vilenskij T.V.* Parogeneratory [Steam Generators]. M.: Energoatomizdat, 1985. 376 p. (In Russian)
 15. *Dubrovskij V.A.* Uvelichenie teplovoj effektivnosti poverhnosti nagreva kotel'nyh agregatov. Teploobmen v parogeneratorah [Increasing the Thermal Efficiency of the Heating Surface of Boiler Units. Heat Transfer in Steam Generators]. Novosibirsk, 1990. Pp. 23–24. (In Russian)
 16. *Borodulya A.V., Hassan A.F., Pal'chenok G.I.* Teploobmen v topochnom ob'eme parogeneratorov s kipyashchem sloem. Teploobmen v parogeneratorah [Heat Transfer in the Furnace Volume of Fluidized Bed Steam Generators. Heat Transfer in Steam Generators]. Novosibirsk, 1990. Pp. 60–63. (In Russian)

Original article submitted 20.10.2024

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/>***

Учебная литература, изданная в СамГТУ

ПОДПИСКА

на сайте «ООО Урал-Пресс Округ»

<http://www.ural-press.ru/>

- 014827** **Технология производства смазочных масел и спецпродуктов.** Учебное пособие / Тыщенко В.А., Агафонов И.А., Пимерзин А.А., Томина Н.Н., Антонов С.А., Жилкина Е.О. 2014 – 240 с.
- 014828** **Номограммы, графики и табличные данные для технологических расчетов процессов переработки нефти и газа:** справочное пособие / Власов В.Г., Агафонов И.Г., Пимерзин А.А., Максимов Н.М., Вишневская Е.Е., Ишутенко Д.И. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 91 с.
- 014829** **Проектирование установки ЭЛОУ-АВТ:** учебно-методическое пособие / В.Г.Власов, Агафонов И.А. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – 159 с.: ил.
- 014832** **Химия и технология вторичных процессов переработки нефти:** учебное пособие / Л.И. Заботин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 332 с.: 86 ил.
- 014833** **Каталитический риформинг:** учеб.-метод. пособие / Л.И. Заботин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2016. – 166 с.: ил.
- 014834** **Проектирование нефтеперерабатывающих заводов:** учеб. пособие / Л.И. Заботин, А.А. Пимерзин, А.В. Можяев. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2018. – 129 с.: 16
- 014835** **Методы очистки нефтяных фракций:** учебное пособие / Н.Н. Томина, Н.М. Максимов, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 293 с.
- 014837** **Катализ в химической промышленности:** учебное пособие / Н.Н. Томина, П.А. Никульшин, Н.М. Максимов, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 374 с.
- 014839** **Процессы нефтехимического синтеза в нефтепереработке:** учебное пособие /

В.А. Пильщиков, Ал.А. Пимерзин, А.А. Пимерзин. – Самара:
Самар. гос. техн. ун-т, 2017. – 207 с.

014840 Подготовка и первичная переработка нефти. Проектирование установок ЭЛОУ-АВТ: учебно-методическое пособие / В.Г Власов, И.А. Агафонов. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2015. – 327 с.: ил.

014841 Каталитический кретинг: учеб.-метод. пособие / Л.И. Заботин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 97 с.: ил

014842 Синтетические моторные масла и присадки: : учебное пособие / В.А.Тыщенко, С.В. Котов, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 20120. – 260 с.

014843 Алкилирование спиртов олефинами. Получение топливных оксигенатов. учебное пособие / В.А. Пильщиков, Ал.А. Пимерзин, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2020. – 115 с.

014844 Методы очистки нефтяных фракций ч.1. учебное пособие / Н.Н. Томина, Н.М. Максимов, В.А. Тыщенко, А.А. Пимерзин. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2014. – 293 с.