СОДЕРЖАНИЕ

Памяти академика Эдуарда Евгеньевича Сона	3
Современное состояние исследований в области управления интегрированными энергетическими системами <i>Е. А. Барахтенко, Н. И. Воропай, Д. В. Соколов</i>	4
Моделирование редких событий при расчете показателей балансовой надежности ЭЭС В. П. Обоскалов, А. С. Х. Абдель Менаем	24
Подходы к управлению режимами крупной промышленной системы электроснабжения с учетом ее системных свойств <i>А. В. Малафеев</i>	42
Быстродействующее устройство ограничения токов короткого замыкания на основе катушки-конденсатора П. А. Бутырин, Г. Г. Гусев, Д. В. Михеев, М. В. Карпунина, А. А. Кваснюк, Ф. Н. Шакирзянов	58
Разработка системы управления гибридного электроэнергетического комплекса, в состав которого входят нетрадиционные и возобновляемые источники энергии разных типов <i>Н. Н. Баранов, К. В. Крюков</i>	72
Особенности отключения генераторов капель в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе <i>А. А. Сафронов, А. А. Коротеев, А. В. Хлынов,</i> <i>Н. И. Филатов, А. Л. Григорьев</i>	82
Учет уходящего от Земли излучения в модели системы электропитания Российского сегмента Международной космической станции Д. Н. Рулев	90
Кинетика термохимического превращения твердого органического топлива при высокоскоростном нагреве <i>Е. А. Бойко, А. В. Страшников</i>	103
Методика расчета радиационно-конвективного теплопереноса в высокоэнтальпийном двухфазном потоке в канале энергетической установки А. М. Руденко, В. В. Миронов, А. В. Колпаков	127
Сопряженная задача "испарение – гиперболическое уравнение теплопроводности" Ю. Б. Зудин, Д. С. Уртенов, В. С. Устинов	140

CONTENTS

Obituary	3
Study on the Current State of Research in the Field of Integrated Energy Systems Control E. A. Barakhtenko, N. I. Voropai, and D. V. Sokolov	4
Simulation of Rare Events in Power Systems for Reliability Indices Asseement V. P. Oboskalov and A. A. Abdel Menaem	24
Approaches to Managing the Modes of an Large Industrial Power Supply System, Taking into Account Its System Properties <i>A. V. Malafeev</i>	42
Fast Acting Short-Circuit Current Limiting Device Based on a Coil-Capacitor P. A. Butyrin, G. G. Gusev, D. V. Mikheev, M. V. Karpunina, A. A. Kvasniuk, and F. N. Shakirzianov	58
Development of a Control System for a Hybrid Electric Power Complex, Which Includes Non-Traditional and Renewable Energy Sources of Various Types <i>N. N. Baranov and K. V. Kryukov</i>	72
Features of Disconnecting Droplet Generators in Frame-Free Low-Potential Heat Removal Systems in Space A. A. Safronov, A. A. Koroteev, A. V. Khlynov, N. I. Filatov, and A. L. Grigoriev	82
Accounting Coming from the Earth Radiation in the Model of Power Supply System of the Russian Segment of the International Space Station <i>D. N. Rulev</i>	90
Kinetics of Thermochemical Transformation of Solid Organic Fuel under High-Speed Heating <i>E. A. Boiko and A. V. Strashnikov</i>	103
Computation Method for Radiation-Convective Heat Transfer in a High Enthalpic Two-Phase Flow in a Power Plant Channel <i>A. M. Rudenko, V. V. Mironov, and A. V. Kolpakov</i>	127
The Conjugate Problem "Evaporation – the Hyperbolic Heat Conduction Equation" Yu. B. Zudin, D. S. Urtenov, and V. S. Ustinov	140

ПАМЯТИ АКАДЕМИКА ЭДУАРДА ЕВГЕНЬЕВИЧА СОНА

DOI: 10.31857/S0002331021040142



Эдуард Евгеньевич Сон 29.09.1944-17.08.2021

Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления Российской академии наук с прискорбием сообщает, что **17 августа 2021 года** на **77** году жизни скончался выдающийся ученый, специалист в области физики плазмы и электрофизики **академик Сон Эдуард Евгеньевич.** Это огромная, невосполнимая потеря для российской науки, для науки и техники в целом.

Сон Э.Е. внес значительный вклад в область изучения свойств плазмы различного состава, в том числе неидеальной, а также в развитие теории турбулентности и изучение процессов переработки нефтегазовых полезных ископаемых.

Сон Э.Е. был руководителем ведущей научной школы РФ (2006–2009), членом редколлегий журналов "Теплофизика высоких температур", "Известия РАН. Энергетика", председателем специализированного и членом Ученых советов в Московском физико-техническом институте и Объединенном институте высоких температур РАН. Он автор 165 научных работ, из них 11 монографий, 12 учебных пособий.

Академик Сон Э.Е. был одним из тех, кто создавал историю Академии наук, сохраняя и приумножая ее традиции. Блестящий ученый и педагог, академик Эдуард Евгеньевич по праву пользовался высочайшим авторитетом и уважением. Среди его неоспоримых заслуг фундаментальные труды и исследования, научная школа, целая плеяда талантливых учеников.

Ушел из жизни человек огромного ума, доброты и мудрости. Его не забудут те, кто когда-либо общался с ним, и нам всем будет не хватать доброго друга и мудрого наставника. Светлая память о нем навсегда сохранится в наших сердцах — всех тех, кто знал и высоко ценил этого яркого и одаренного человека. УДК 621.311.001.57

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

© 2021 г. Е. А. Барахтенко^{1, *}, Н. И. Воропай¹, Д. В. Соколов¹

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия *e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru

> Поступила в редакцию 21.05.2021 г. После доработки 04.08.2021 г. Принята к публикации 06.08.2021 г.

В статье рассматривается современное состояние исследований в области управления интегрированными энергетическими системами (ИЭС). Приведены результаты анализа публикационной активности по исследованиям ИЭС за период 2016–2020 гг. Представлена общая характеристика задач управления функционированием и развитием выделенных из общей задачи управления ИЭС. Дается обзор актуальных научных публикаций, в которых рассмотрены современные подходы к решению выделенных задач управления ИЭС.

Ключевые слова: интегрированная энергетическая система, задачи управления, управление функционированием, управление развитием, современные подходы

DOI: 10.31857/S0002331021040026

ВВЕДЕНИЕ

Существующая энергетическая инфраструктура включает в свой состав различные типы систем энергоснабжения (электро-, тепло-, хладо-, топливоснабжения). Каждая из этих систем имеет свои характерные особенности, закономерности развития и функционирования. И, как правило, эти системы при проектировании и эксплуатации рассматриваются независимо друг от друга [1]. Но в то же время эти системы имеют тесные технологические взаимосвязи, например, при выработке электроэнергии и тепла на ТЭЦ, обеспечении топливом источников электроэнергии и тепла системами газоснабжения, а также они могут взаимодействовать друг с другом в нормальных и аварийных режимах, например, при авариях в системе теплоснабжения потребителями могут быть задействованы электрообогреватели. С развитием энергетических технологий преобразования, генерации, транспорта и хранения энергии появляются новые возможности, которые еще более усиливают взаимосвязи между различными типами систем энергоснабжения. Например, технологии получения синтетического газа с помощью электроэнергии (технология Power-to-Gas, P2G) [2].

Новые условия, в которых функционирует энергетика, также способствуют взаимодействию между различными типами энергетических систем, что вызвано появлением множества новых субъектов экономических отношений, которые оказывают влияние на работу этих систем и могут предоставлять им дополнительные энергоуслуги. Так, активные потребители управляют своим энергопотреблением, могут иметь свои собственные источники энергии, при этом выполняя преобразование и аккумулирование необходимого вида энергии; или электротранспорт, который получает все большее распространение и может отдавать накопленную энергию в энергосистему во время пиковых нагрузок. Развитие телекоммуникационных и информационных технологий предоставляет дополнительные возможности для согласованного управления системами энергоснабжения и дает широкие возможности для сбора, обработки, передачи и хранения информации. Все вышеописанное приводит к значительному росту интереса к исследованиям объединенных систем энергоснабжения, которые представляют собой новую системную конструкцию в виде интегрированной энергетической системы (ИЭС).

Исследованиями ИЭС активно занимаются во многих странах, таких как Китай, США, Великобритания, страны Евросоюза и др. Одной из первых работ в этой области стало исследование [3], в котором рассматриваются различные энергоносители (электроэнергия, газ, нефть и уголь) в одной комплексной модели, включающей технологические, экономические и экологические аспекты проблемы. В выполненных впоследствии работах, как правило, рассматриваются конкретные энерготехнологические объединения систем, среди которых наиболее часто встречаются следующие:

- электро- и газоснабжения [4, 5 и др.];
- электро- и теплоснабжения [6, 7 и др.];
- электро-, тепло- и хладоснабжения [8, 9 и др.];
- электро-, тепло- и газоснабжения [10, 11 и др.];
- электро-, тепло-, газо- и хладоснабжения [12, 13 и др.];
- системы, использующие водород [14, 15 и др.].

В исследованиях рассматриваются различные по масштабу ИЭС, которые могут быть отнесены к одной из следующих групп:

- государственные/межгосударственные системы [16, 17 и др.];
- региональные системы [10, 18 и др.];
- системы энергоснабжения отдельных зданий [19, 20 и др.].

Широко применяемый подход к исследованию ИЭС основан на рассмотрении таких систем в виде энергетического хаба [21, 22]. Некоторые исследователи считают, что ИЭС по своей сути возникли из концепции энергетического хаба [23].

В России в связи с ее суровым климатом и протяженностью территории энергосистемы играют важную роль в экономике и социальной жизни страны. В связи с этим существует необходимость согласования различных энергетических систем для оптимального проектирования и управления ими. Поэтому возникает интерес к разработке технологий интегрированных систем, которыми в том числе занимается ряд известных научных организаций, например, таких как Сколтех, ИСЭМ СО РАН и др.

В работах [24, 25] представлены концептуальные положения по интеллектуальным ИЭС, где интеграция рассматривается в следующих трех аспектах:

• системном, представляющим объединение систем по их типам, включает системы электро-, тепло/хладо- и газоснабжения, в каждом конкретном случае они могут быть интегрированы все или их отдельные представители;

• пространственно-масштабном, отражающим крупность систем с дифференциацией на супер-, мини-, микросистемы;

• функциональном, определяющим вид деятельности системы (ее назначение), в их числе: энергетические (технологические); коммуникаций и управления; выработки решений.

В этой статье представлен краткий анализ публикационной активности в области исследований ИЭС, приведены и систематизированы мировые работы по исследованию ИЭС в соответствии с решаемыми задачами управления функционированием и развитием.



Рис. 1. Индексация научных работ по исследованиям ИЭС в период 2016–2020 гг.: (а) в системе Scopus; (б) в системе ScienceDirect.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИОННОЙ АКТИВНОСТИ

Авторами выполнен поиск научных работ, опубликованных за последние пять лет, в период 2016—2020 гг., с использованием международных систем ScienceDirect и Scopus. Поиск выполнялся на основе сформированных запросов, которые включали список слов, используемых в заголовках или ключевых словах публикаций. Список слов состоял из различных словосочетаний, что вызвано использованием разных терминов для обозначения ИЭС. Область рассмотрения в поисковых запросах была ограничена энергетикой. В результате выполнения поисковых запросов найдено 675 работ в системе ScienceDirect и 1208 работ в системе Scopus.

Индексация научных работ в рассматриваемых международных системах за рассматриваемый период представлена на рис. 1. График на рис. 1 показывает значительный рост публикаций, что свидетельствует о возрастающем интересе к ИЭС.

О научных изданиях, в которых публикуются работы по исследованиям ИЭС, можно судить по диаграммам на рис. 2, где приведены те издания, в которых за рассматриваемый период опубликовано не менее 10 работ.

Картину по публикационной активности в исследованиях ИЭС дополняет рис. 3, на котором представлены данные из Scopus по странам, имеющим наибольшее количество научных работ по ИЭС за 2016–2020 гг. Для сравнения здесь же приведены данные по России.

Таким образом, очевидно, что вопросы управления ИЭС являются актуальными и ими занимаются множество исследователей в различных странах.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ ИМИ

В комплексе задач управления ИЭС можно выделить следующие группы задач:

1) управления функционированием,

2) управления развитием.

При этом основополагающее значение имеют вопросы моделирования ИЭС как объекта управления. Решение задач управления функционированием направлено на обеспечение необходимыми объемом, надежностью энергоснабжения и качеством потребляемой энергии потребителями при удовлетворении физико-технических условий функционирования системы и выполнении ограничений на режимные параметры с минимизацией эксплуатационных затрат. При решении этой задачи необходимо найти такие управляющие воздействия на систему или ее подсистемы, которые введут показатели функционирования в необходимую допустимую область значений.



Рис. 2. Научные издания, в которых опубликованы работы по исследованиям интегрированных энергетических систем за 2016–2020 гг., в соответствии с результатами поиска в системах: (а) в системе Scopus; (б) в системе ScienceDirect.

При этом для ИЭС или любой ее подсистемы должен выполняться следующий комплекс условий [26]:

1) материальные балансы в узлах (І закон Кирхгофа)

$$\mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{Q},\tag{1}$$

где A — матрица инцидентности; x — вектор значений потоков энергии или энергоносителя; Q — вектор значений узловых отборов и притоков в систему;

2) равенство приращений и потерь узловых потенциалов для независимых контуров (II закон Кирхгофа)

$$\mathbf{B}\mathbf{y} = \mathbf{0},\tag{2}$$

где **В** — матрица контуров или совпадений выбранной базисной системы контуров и ветвей; \mathbf{y} — вектор изменения узловых потенциалов на ветвях;

3) замыкающее соотношение в виде функции изменения узловых потенциалов на ветви

$$y_i = f_i(x_i, H_i, \varphi_i), \quad i \in I,$$
(3)

7



Рис. 3. Количество опубликованных научных работ по интегрированным энергетическим системам в различных странах.

$$y_i = P_i - P_{i+1}, \quad j \in J,$$
 (4)

где x_i — расход энергии (энергоносителя) на *i*-ой ветви; H_i — управляемое приращение потенциала на *i*-ой ветви; φ_i — управляемое сопротивление *i*-ой ветви; P_j — значение узлового потенциала; *j* и *j* + 1 — номера начального и конечного узлов *i*-ой ветви; *I* и *J* — множества ветвей и узлов сети;

4) ограничения на показатели функционирования при оптимальном выборе управляющих воздействий для ввода в допустимую область их значений в соответствии с заданным критерием:

$$P_j^{\min} \le P_j \le P_j^{\max},\tag{5}$$

$$x_i^{\min} \le x_i \le x_i^{\max},\tag{6}$$

$$H_i^{\min} \le H_i \le H_i^{\max},\tag{7}$$

$$\varphi_i^{\min} \le \varphi_i \le \varphi_i^{\max}.$$
(8)

Решение задач управления развитием направлено на определение направления изменения структуры и параметров системы с минимальными капитальными и эксплуатационными затратами для обеспечения текущих и будущих потребностей потребителей в энергии. Эта проблема в общем случае предполагает решение задачи математического программирования, в которой целевая функция представляет собой зависимость приведенных затрат от искомых структуры и параметров системы, рассчитывается с учетом периода обслуживания капитала, полученного в виде кредита для реализации предлагаемого проекта:

$$C = aC_K + C_I,(9) \tag{9}$$

где C_K – капитальные вложения; C_I – ежегодные издержки; a – коэффициент приведения, являющийся фактически коэффициентом ежегодного возврата капитала. Условия (1)–(8), как правило, входят в математическую формулировку задачи управления развитием.

При решении задач управления ИЭС требуется обеспечить необходимые уровни надежности энергоснабжения и качества энергии. Расчет надежности, как правило, предполагает рассмотрение двух показателей, оцениваемых с помощью коэффициен-

та готовности $K_j^{(1)}$ (для расчетного уровня энергоснабжения *j*-ого потребителя) и вероятности безотказной работы $R_j^{(2)}$ (для пониженного уровня энергоснабжения *j*-ого

потребителя в аварийной ситуации). Требования качества энергоспаюжения у-ото стимого уровня искажения синусоиды переменного электрического тока (уровня высших гармоник), или требуемого уровня параметров теплоносителя в системах теплоснабжения) задаются соответствующими ограничениями вида

$$\kappa_{\min} \le \kappa_j \le \kappa_{\max}, \quad j \in J,$$
(10)

где κ_i – показатель качества энергии для *j*-го узла.

Существуют два следующих направления в моделировании ИЭС: 1) традиционное при использовании систем уравнений, включающих формулы (1)–(8); 2) на основе применения концепции энергетического хаба, представляемого системой уравнений в матричном виде, которая связывает входные переменные энергетического хаба с его выходными переменными [11, 22, 27 и др.], имеющей следующий вид:

$$\mathbf{L} = \mathbf{C}\mathbf{E},\tag{11}$$

где C — матрица прямых связей, которая описывает преобразование видов энергии от входов к выходу; L — вектор входных переменных; E — вектор выходных переменных. И те и другие переменные представляют различные виды энергии. Каждый член матрицы описывает один конкретный вход с определенным выходом.

В выполненных исследованиях, прежде всего в диссертациях [28, 29], представлены формализованные постановки конкретных задач интегрированных мульти-энергетических систем, методы и результаты их решения на основе линейных моделей энергетического хаба вида (11).

Современные специализированные программные пакеты получают широкое применение при моделировании ИЭС. Один из подходов к имитационному моделированию ИЭС средствами Matlab/Simulink с использованием концепции энергетического хаба предложен в работе [30]. В библиотеке моделей энергетических систем, имеющейся в Matlab/Simulink, содержатся модели достаточно простых элементов (например, ЛЭП, трансформаторов, трубопроводов и т.п.). В дополнение к этой библиотеке формируется библиотека моделей более сложных элементов, имеющих структуру энергетического хаба со многими входами и многими выходами и реализацией операций преобразования и накопления энергии (например, жилая квартира с входами электроэнергии, газа и централизованного тепла и выходами электроэнергии и тепла, а также реализацией функций этого энергетического хаба по преобразованию электроэнергии в тепло, газа в тепло и т.д.). С использованием указанных двух библиотек элементов и топологии электрической и трубопроводных (газ и тепло) сетей конструируется модель ИЭС.

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Среди задач управления функционированием ИЭС можно выделить следующие:

- Задача определения оптимальных режимов загрузки генерирующего оборудования;
- Задача управления экономичным распределением нагрузки;
- Задача определения оптимального потокораспределения.

Далее рассмотрим эти задачи и приведем для каждой из них некоторые актуальные научные работы, отражающий современный уровень достигнутых научных результатов.

Задача определения оптимальных режимов загрузки генерирующего оборудования заключается в получении оптимального графика пуска и останова генерирующего оборудования для удовлетворения ожидаемого спроса на энергию с учетом затрат, системных ограничений и ограничений генерирующего оборудования. В контексте ИЭС это относится к оптимальному запуску и останову каждого энергоблока для удовлетворения спроса на несколько видов энергии с минимизацией общих эксплуатационных затрат. Рассмотрим некоторые работы, в которых представлены результаты, связанные с решением этой задачи. В работе [31] разрабатывается новая методическая база для интервальной оптимизации при решении задачи определения оптимальных режимов загрузки генерирующего оборудования в ИЭС с учетом случайных событий в системе, неопределенности выработки энергии от возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и величины нагрузки. В статье [8] рассматривается взаимодействие между традиционной электроэнергетической системой и ИЭС уровня городского района для определения оптимальных режимов загрузки генерирующего оборудования. В рамках этого исследования энергообъединения типа газо-, электроснабжения и хладо-, тепло-, электроснабжения являются двумя рассматриваемыми типами ИЭС. В статье представлена математическая модель для решения поставленной задачи, в которой несколько ИЭС районного уровня подключены к электроэнергетической системе. Задача моделируется и решается с помощью смешанного целочисленного линейного программирования (СЦЛП). Результат моделирования показывает, что переход к ИЭС позволяет снизить стоимость обслуживания всей энергосистемы.

Математическая модель для решения задачи согласования работы системы аккумулирования электроэнергии с теплогенерирующим оборудованием для компенсации разрыва в распределении мощности, вызванного прерывистостью выработки электроэнергии на основе ветроэнергетических установок, представлена в статье [32]. Чтобы получить работоспособное и эффективное решение, в предложенной модели учитываются все эксплуатационные ограничения энергосистемы. Для решения этой задачи также применяется СЦЛП.

При решении задач управления функционированием широко применяются технологии искусственного интеллекта. Так, для решения задачи определения оптимальных режимов загрузки теплогенерирующего оборудования, интегрированного с системами ветровой и солнечной энергии, в работе [33] применяется усовершенствованный алгоритм оптимизации роя бинарных частиц, управляемый генетическим алгоритмом. Авторы продемонстрировали эффективность предложенного ими подхода в сравнении с другими уже известными подходами.

В работе [6] разработан подход, который позволяет учесть работу ВИЭ в рамках ИЭС, состоящей из систем электроснабжения и централизованного теплоснабжения. Этот подход позволяет преодолеть проблемы, связанные с изменчивым характером работы ВИЭ.

Одним из подходов, используемых для моделирования ИЭС, является построение смешанной логико-динамической (Mixed Logical Dynamical, MLD) системы [34], которая представляет собой описание взаимосвязи физических законов, логических правил и ограничений. Этот подход обеспечивает высокий уровень управления и оптимизации сложных энергетических систем. В работе [35] идеи MLD получили дальнейшее развитие, что позволило учесть потоки электрической и тепловой энергии, которые связаны через работу электростанций комбинированного цикла.

Следующей из рассматриваемых задач является задача управления экономичным распределением нагрузки, которая состоит в определении для каждого периода планирования работы ИЭС фактической выходной мощности используемых генерирующих блоков, необходимой для удовлетворения спроса на энергию при соблюдении всех физических ограничений в исследуемой ИЭС. Среди статей, посвященных решению этой задачи, можно выделить следующие.

В статье [36] предложена четырехуровневая математическая модель и оригинальный подход к решению задачи управления экономичным распределением нагрузки в ИЭС, состоящей из систем электро- и теплоснабжения. В этой модели учитываются факторы, которые влияют на тепловой комфорт конечных потребителей, включая параметры здания, погодные условия и поведение самих потребителей.

Одним из факторов, требующих учета при решении обозначенной задачи, является присутствие разнотипных аккумуляторов энергии в ИЭС. Применение метаэвристического метода является одним из подходов для моделирования таких систем [37]. Этот метод включает в себя эвристические правила, которые используются совместно с адаптивным генетическим алгоритмом для улучшения качества начальных возможных решений и новых решений на каждой итерации.

Рассмотрение современной энергетической системы требует учета ее влияния на экологию окружающей среды. В статье [17] предлагается модель ИЭС, которая состоит из региональной системы электро- и газоснабжения, а также районных энергетических узлов, включающих в себя ТЭЦ, установки получения газа с помощью электроэнергии, тепловые насосы, газовые печи и различные хранилища энергии; разработана математическая формулировка задачи, которая сведена к модели СЦЛП. Решение задачи управления ИЭС на основе этой модели позволяет снизить объемы выбрасываемых оксидов азота и затраты на квоты, связанные с выбросами СО₂.

ИЭС могут иметь в своем составе большое количество распределенных генераторов энергии, функционировать в режиме динамического изменения режимов потребления энергии. Для управления такими системами создается сложная информационнотелекоммуникационная инфраструктура. В одной из актуальных работ [38], где моделируется такая ИЭС, предложена скоординированная оптимизационная модель, учитывающая потери при передаче электроэнергии и тепла. Эта модель, в том числе, позволяет решить задачу обеспечения фактического баланса спроса и предложения на энергию и избежать значительных экономических потерь.

Последняя рассматриваемая задача управления функционированием ИЭС – это задача определения оптимального потокораспределения в ИЭС, которая сводится к распределению нагрузки между источниками энергии с минимизацией затрат на ее генерацию или потери мощности в сети с учетом ограничений системы передачи энергии. Решение указанной задачи требует учета потребности в нескольких видах энергии, которая удовлетворяется за счет использования различных источников энергии и устройств для преобразования энергии при соблюдении сетевых ограничений по каждому виду энергоносителя. В статье [4] предложена математическая модель для решения этой задачи, в которой дополнительно учитываются различные динамические характеристики систем электро- и газоснабжения. В статье [39] для определения оптимального потокораспределения в ИЭС предлагается метод на основе СЦЛП. Для определения оптимального потокораспределения также используются эвристические алгоритмы. Например, в статье [40] описывается алгоритм оптимизации, основанный на эвристическом алгоритме гравитационного поиска с изменяющимся во времени коэффициентом ускорения (Time Varying Acceleration Coefficients-Gravitational Search Algorithm, TVAC-GSA). Методы решения этой задачи систематизированы в работе [41], в которой они разделены на две группы (рис. 4).

Задача планирования работы энергосистемы на заданный временной горизонт связана с определением оптимального потокораспределения в этой системе. Авторы в работе [7] предлагают метод определения оптимального потокораспределения при планировании работы ИЭС, включающей в свой состав системы электро- и газоснабжения, с нестационарной моделью для потока природного газа. Выполнен ряд расчетов



Рис. 4. Методы, используемые для определения оптимального потокораспределения.

для сравнения решений, полученных на стационарных и нестационарных моделях систем транспорта природного газа.

В работе [42] представлена методика управления спросом на электро- и теплоэнергию в ИЭС с учетом наличия накопителей энергии, смещаемых во времени нагрузок отдельных потребителей, дополнительных источников энергии, а также суточных тарифов на энергию из систем централизованного энергоснабжения. В рамках этой методики используются динамические модели потокораспределения как в сети объектов, так и в сети систем централизованного энергоснабжения, позволяющих учесть зависимость ряда параметров от времени, наличие накопителей энергии и распределенной генерации.

Скоординированная работа аккумуляторов электроэнергии, тепла и газа в ИЭС рассматривается в статье [43]. В предлагаемом авторами подходе для моделирования работы ИЭС формируется модель энергетического хаба, и далее на ее основе определяется оптимальное потокораспределение в этой системе с учетом работы накопителей нескольких видов энергии.

В работе [44] разработан подход, в котором выделены четыре этапа в процессе взаимодействия централизованных систем электро- и теплоснабжения. Для каждого этапа, который представляет собой квазистационарное состояние, разработана математическая модель для оптимального распределения потоков энергии в ИЭС.



Рис. 5. Подходы к организации управления интегрированными энергетическими системами [46].

Подход к решению задачи формирования стратегии работы ИЭС с учетом организации оптимального потокораспределения, управления спросом и стохастической выработки энергии на основе ветра предложен в статье [5]. В рамках подхода моделируются газовая и электрическая инфраструктуры и учитываются эксплуатационные ограничения ИЭС, а также нелинейные характеристики, описывающие работу компрессоров и потоки газа в трубопроводной системе.

В статье [45] рассматриваемая задача управления ИЭС решается в рамках оптимального проектирования и при функционировании распределенных ИЭС. Предлагаемая в статье методическая основа использована для исследования возможности снижения негативного влияния распределенной генерации на работу распределительных сетей. Полученные авторами результаты позволяют избежать избыточных мер по реконструкции сети путем оптимального проектирования и определения операционных стратегий работы распределенной энергосистемы.

При управлении ИЭС необходимо обеспечить непрерывное энергоснабжение потребителей для своевременного удовлетворения спроса на энергию. Оптимальная стратегия управления обеспечивает экономически и энергетически эффективное энергоснабжение. Можно выделить два следующих подхода к организации управления ИЭС (рис. 5):

- централизованная структура управления;
- децентрализованная структура управления.

В [47] авторы предлагают подход к иерархическому централизованному управлению микросетевой интегрированной энергосистемой. В рамках этого подхода контроллер может одновременно управлять тепловыми, газовыми и электрическими системами. Для учета динамических характеристик различных систем он разделен на три уровня: медленный, средний и быстрый. Взаимодействие между тремя энергетическими сетями координируется в иерархической структуре управления, чтобы лучше координировать различные подуровни управления. При этом выполняется координированное управление различными типами систем энергоснабжения, в том числе в ситуациях, когда в ИЭС происходят значительные и внезапные изменения ее состояний, связанные с изменениями рабочих режимов, колебаниями выработки энергии от ВИЭ, пусками различного оборудования, такого как кондиционеры и микротурбины, реакцией на текущий спрос, а также с аккумулированием тепловой и электрической энергии. Далее результаты этого исследования получили развитие для управления городской ИЭС [48]. Подобный подход применяется к решению задачи планирования режимов [49], где оптимизация выполняется для временного периода, равного 24 ч, а стратегия управления в режиме реального времени компенсирует несоответствие между запланированной нагрузкой и реальной нагрузкой посредством реализации необходимых управляющих воздействий в ИЭС.

Несмотря на то, что централизованная структура управления может обеспечить наилучшую общую эффективность функционирования энергосистемы, сложность ограничивает ее широкое применение на практике. Распределенные структуры управления делят общую сложную задачу управления на ряд менее сложных подзадач. Однако локальное управляющее воздействие, которое необходимо выполнить, зависит от действий окружающих контроллеров и должно реализовываться согласованно. Например, в работе [38] предложена математическая модель для распределенного управления ИЭС. В монографии [46] предложена схема распределенного управления энергетическими хабами, которые моделируют ИЭС, с учетом динамики, связанной с работой аккумуляторов энергии. Подход к управлению ИЭС, использующих такие энергоносители как электроэнергия (переменного или постоянного тока), тепло, природный газ и водород, на основе распределенной структуры управления представлен в [50]. Этот подход обеспечивает минимизацию общих затрат и/или объема выбросов при соблюдении сетевых ограничений и ограничений, связанных с рыночными контрактами.

В современной энергетике активно применяются ВИЭ, что обусловлено ужесточением экологических требований и широким распространением современных технологий. Ряд исследований посвящен работе ВИЭ при интеграции энергетических систем. Так, рассматриваются технологии для производства водорода с использованием получаемой от ВИЭ энергии, который является перспективным энергоносителем в ИЭС [14, 51]. Применение существующих возможностей для преобразования избыточной электроэнергии от ВИЭ в другой вид энергии обусловлено высокими затратами на хранение энергии в энергосистеме. Финансовая привлекательность использования электролизеров для управления перегрузками в энергосистеме требует проведения тщательных исследований, т. к. в зависимости от стоимости оборудования и топлива производство энергии от ВИЭ даже с учетом имеющихся здесь ограничений может оказаться более предпочтительным вариантом.

Несмотря на то, что проводятся исследования различных типов ВИЭ, в опубликованных научных работах наиболее часто рассматривается ветровая генерация. Ветровая генерация — это весьма доступный вариант по сокращению выбросов СО₂ при выработке электроэнергии и тепла. В статье [52] представлено оптимальное планирование функционирования ИЭС с учетом эксплуатационных ограничений при детерминированных и стохастических условиях получения энергии от ветровой генерации. В работах [53, 54] показано, что затраты на производство электроэнергии и, в конечном итоге, эксплуатационные расходы ИЭС снижаются по мере увеличения использования ветровой генерации. В работе [55] отмечено, что следствиями низкого уровня использования энергии ветра в ИЭС являются большее применение газотурбинных электростанций, возрастающий импорт дорогостоящей электроэнергии, повышение загруженности газотранспортной сети, более низкая способность управлять режимом ее функционирования, большее энергопотребление компрессорных станций и, в конечном итоге, более высокие эксплуатационные расходы в ИЭС, особенно в условиях высокого спроса. С другой стороны, значительная неопределенность выработки энергии с помощью ветроэнергетических установок приводит к повышенным уровням неопределенности величины эксплуатационных затрат [56] и, следовательно, к более высоким затратам в

ИЭС [57]. Предложены следующие решения по повышению эффективности использования ветровой генерации:

1. Установки Р2G могут преобразовывать большую часть избыточной энергии ветра в газ и тепло [58]. Однако из-за высоких эксплуатационных затрат на Р2G необходимо обеспечить экономическую эффективность использования как ветроэнергетических установок, так и самой ИЭС; необходимо найти компромисс между стоимостью ветровой генерации и эксплуатационными затратами в ИЭС [59].

2. Производство водорода с помощью электроэнергии позволяет повысить эффективность использования ветровой генерации в случае избыточной энергии ветра и снизить эксплуатационные расходы, выбросы парниковых газов и объем сжигаемого природного газа. В работе [60] предложено размещать электролизеры для производства водорода в местах с избыточной энергией ветра.

3. Увеличение мощности устанавливаемых тепловых насосов постепенно приводит к повышению использования электроэнергии от ветровой генерации [61].

Кроме того, анализ влияния коэффициентов корреляции между различными ветроэнергетическими установками на эксплуатационные расходы ИЭС показал, что, если коэффициенты корреляции между ветроэнергетическими установками больше, то и эксплуатационные расходы в ИЭС также будут больше [62].

Существуют исследования ИЭС, включающих в свой состав разнотипные геотермальные источники для получения тепла, холода, электроэнергии и водорода [15]. Исследования показывают, что такие ИЭС имеют высокий уровень энергоэффективности в географических регионах с доступными геотермальными источниками энергии.

Одним из ключевых факторов, способствующих активному внедрению ВИЭ в ИЭС, является разработка и применение эффективных систем аккумулирования энергии. В работе [63] отмечено, что прогрессу в разработке систем возобновляемой генерации препятствует отсутствие рентабельных накопительных мощностей и технические ограничения существующих энергосетей. В свою очередь применение современных систем аккумулирования энергии позволяет повысить гибкость и надежность ИЭС, а также сократить эксплуатационные расходы. Системы накопления энергии способствуют удовлетворению пиковых нагрузок, сглаживают колебания нагрузок потребителей и компенсируют периодические колебания в выработке энергии от ВИЭ, обеспечивая эффективное управление энергопотреблением в ИЭС. В работе [64] показана важность использования газовых хранилищ для обеспечения поддержки работы ИЭС. Согласованная работа распределенных хранилищ природного газа и аккумуляторов тепловой энергии для повышения эффективности ИЭС рассматривается в статье [65]. Вопросы планирования накопления электроэнергии и тепла для оптимизации использования генерирующего оборудования исследуются в работе [66].

Результаты исследований, представленные в работе [67], показывают, что аккумулирование тепла снижает общие эксплуатационные расходы, повышает надежность системы и возможности по применению ВИЭ. Например, в Дании широкое практическое применение находят технологии аккумулирования тепловой энергии с электрическим подогревом, что обусловлено в том числе возрастающей долей ВИЭ в выработке энергии [68].

Накопление энергии является важной составляющей повышения стабильности работы ИЭС. В статье [69] представлена трехуровневая модель для минимизации снижения негативных воздействий на электро- и газоснабжение в ИЭС вследствие стихийных бедствий. Распределенная генерация и газовые хранилища рассматриваются как эффективные ресурсы для реагирования на чрезвычайные ситуации при обеспечении электроэнергией и газом потребителей во время стихийных бедствий. В работе [70] предложена модель, позволяющая минимизировать негативные воздействия на работу ИЭС, вызванные преднамеренными атаками на нее. При решении задач управления функционированием ИЭС необходимо обеспечить ее гибкость, под которой понимается способность системы реагировать на колебания потребительского спроса на энергию и нестабильность ее выработки. Необходимость обеспечения гибкости обусловлена широким применением ВИЭ, использованием одного типа энергоносителя для преобразования в другой вид энергоносителя и развитием электротранспорта. Рассмотрим некоторые научные работы, посвященные актуальным вопросам обеспечения гибкости ИЭС.

В статье [71] исследуется гибкость ИЭС с разной конфигурацией и учетом наличия связи с более крупной по масштабу энергосистемой. Когда ИЭС подключается к более крупной по масштабу энергосистеме, ее гибкость определяется, как способность адаптироваться к изменяющимся, неопределенным условиям, которые обусловлены выработкой энергии от ВИЭ и потребительским спросом. С другой стороны, при работе изолированно от крупной энергосистемы (в автономном режиме) свойство гибкости характеризуется минимальными потерями энергии при удовлетворении потребностей в различных ее видах, таких как электричество, тепло и холод. Проведен анализ нескольких конфигураций ИЭС, который показал разные уровни доступной гибкости и возможности следовать запланированному обмену на сутки вперед с остальной частью энергосистемы, а также позволил определить объемы потерь энергии в автономном режиме.

Методология оценки воздействия теплоснабжения на комплексную гибкость газовых и электрических сетей представлена в статье [72]. На примере сетей Великобритании приведены результаты исследований, демонстрирующих как в экстремально холодные дни может быть снижена гибкость системы газоснабжения, используемой для обеспечения топливом системы теплоснабжения, в то время как в дни с более высокой температурой наружного воздуха использование газовых турбин, применяемых для обеспечения электроэнергией теплогенерирующего оборудования, приводит к увеличению колебаний в заполняемости системы трубопроводов газом.

Подход к описанию поведения местного рынка услуг по обеспечению гибкости энергосистемы представлен в [73]. Этот подход позволяет исследовать взаимодействие между централизованной и децентрализованной системами, чтобы найти экономически оптимальный режим работы с исключением критических состояний сети.

В работе [74] отмечено, что переход к ИЭС, особенно включающих в свой состав аккумуляторы энергии, обеспечивают повышение гибкости энергосистемы при реагировании на спрос. В этой работе для повышения потенциальной гибкости ИЭС предложена стохастическая модель СЦЛП, которая описывает генерацию и хранение энергии с учетом локальных ограничений элементов сети. Практическое применение предложенной модели демонстрируется на примере умного района при исследовании различных вариантов обеспечения гибкости его энергосистемы. Рассматривается возможность подключения к этому району большего количества тепловых насосов с учетом ограничений по пропускной способности сети и максимизацией доходов множества субъектов рынка и услуг.

Очевидно, что в новой парадигме энергетических систем автостоянки электромобилей будут иметь важное значение для накопления электроэнергии и обеспечения гибкости энергосистемы. В этом контексте стратегия применения электромобилей в качестве систем хранения энергии в ИЭС исследуется в [75]. В этом исследовании предлагается стохастическая модель движения, учитывающая неопределенности, связанные с наличием транспортных средств на стоянках. Результаты этого исследования показывают, что наличие электромобилей может оказать существенное влияние на планирование работы ИЭС. В статье [76] также сделаны подобные выводы при решении задачи оперативного управления ИЭС, которая включает в свой состав установки совместной выработки электро- и теплоэнергии, ВИЭ, аккумуляторы тепловой энергии и электрокотлы. В целом электромобили повышают общую гибкость энергосистемы и таким образом снижают ее эксплуатационные расходы.

Перейдем к рассмотрению задач управления развитием ИЭС.

ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЕМ ИНТЕГРИРОВАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Математические модели, используемые при решении задач управления развитием ИЭС, можно разделить на следующие две группы: детерминированные модели и стохастические модели. В детерминированных моделях все необходимые переменные определены для расчета затрат в развитие ИЭС. Рассмотрим некоторые работы, в которых используются эти модели.

Модель совместного развития интегрированных газовых и электроэнергетических систем, направленная на минимизацию общих капитальных и эксплуатационных затрат, предложена в статье [77]. Для нелинейных целевых функций и ограничений вводятся линейные их аппроксимации.

Для решения задачи оптимального построения ИЭС, удовлетворяющей потребительские нагрузки на электричество, тепло и холод, в статье [9] представлена математическая модель, сформулированная как оптимизационная задача СЦЛП. Эта модель позволяет определить оптимальный набор технологий и их оптимальное размещение и обеспечить рациональное диспетчерское управление ИЭС. В разработанной модели используется подход многоузлового моделирования (в отличие от агрегированного одноузлового подхода), который включает уравнения, описывающие потокораспределение в подсистемах ИЭС, и, следовательно, обеспечивает возможность выполнять компоновку узлов в ИЭС с учетом физических и эксплуатационных ограничений систем электро-, тепло- и хладоснабжения.

В работе [78] представлена модель долгосрочной оптимизации для получения согласованных проектных решений по развитию систем электро- и газоснабжения. Математическая модель, отражающая содержание задачи, сводится к многоступенчатой целочисленной нелинейной оптимизации. Идея работы состоит в том, чтобы минимизировать капиталовложения и эксплуатационные расходы путем оптимального планирования мест включения новых установок P2G в единую ИЭС с определением параметров этих установок.

Оптимизационная модель развития ИЭС, состоящей из систем электро-, газо- и теплоснабжения представлена в [11]. В этой модели в качестве преобразователей одного вида энергии в другой рассматриваются ТЭЦ и газовые печи.

Стохастические модели используются для описания различных элементов неопределенностей при решении задач управления развитием ИЭС. В настоящее время по этим моделям публикуется наибольшее количество работ. Рассмотрим некоторые из них.

Решение задачи развития ИЭС, в которых одновременно используются разные энергоносители, такие как газ, электроэнергия, тепло и холод, может оказаться сложной задачей, особенно при наличии долгосрочной ценовой неопределенности в отношении различных энергоносителей. В статье [79] предлагается единая методология оптимизации развития и эксплуатации ИЭС с оценкой гибкости, заложенной как на этапе развития, так и обеспечиваемой при эксплуатации, с учетом долгосрочных неопределенностей в отношении цены на различные энергоносители.

В статье [80] представлена стохастическая децентрализованная модель для согласования развития газовых и электрических сетей. При решении этой задачи учитываются различные неопределенные факторы, такие как сила ветра, перспективный рост нагрузок потребителей, а также величина кредитной ставки. Используется алгоритм ADMM (Alternating Direction Method of Multipliers [81]) для получения рекомендаций по согласованному развитию газовых и электрических сетей с минимизацией объемов данных о параметрах этих сетей.

Метод оптимального проектирования ИЭС, состоящей из систем электро-, тепло-, хладо- и водоснабжения, представлен в статье [82]. Это метод используется в проекте Европейского Союза "Horizon 2020 MODER", ориентированном на глубокую модернизацию зданий и энергетической инфраструктуры. Задача оптимизации сформулирована как СЦЛП, при решении которой учитывается широкий набор современных технологий преобразования и хранения энергии, уровень эффективности при частичной нагрузке потребителей, а также влияние условий окружающей среды на возможности производства энергии в ИЭС. Предлагаемая в статье модель позволяет учесть характеристики накопителей энергии различных типов: электрохимические, тепловые и водяные. С использованием этого метода проведены исследования ИЭС аэропортов, расположенных в пятнадцати городах по всему миру, и определен оптимальный набор технологий, их мощность и режим работы.

Многоэтапный подход на основе стохастического программирования для согласованного планирования развития газотранспортных и электроэнергетических систем с учетом неопределенностей в изменении нагрузок потребителей предложен в работе [83]. Этот подход позволяет последовательно определять размер необходимых инвестиций с постепенным выявлением неопределенностей с течением времени.

В статье [84] развитие ИЭС рассматривается как задача двухуровневого многоступенчатого программирования, которая формулируется таким образом, чтобы минимизировать капитальные и эксплуатационные затраты. Для решения этой задачи предлагается гибридный алгоритм, сочетающий модифицированный алгоритм роя бинарных частиц (BPSO) и алгоритм, реализующий метод внутренних точек. BPSO используется для подзадачи верхнего уровня, а метод внутренних точек применяется для подзадачи нижнего уровня. Авторами статьи проведены практические исследования на примере одной из ИЭС, расположенной в западной части Дании.

Существует вероятностный подход к развитию ИЭС, состоящих из систем электрои газоснабжении при наличии неопределенного спроса на активную и реактивную мощность [85]. Этот подход основан на методе программирования с ограничениями по случайности [86] и позволяет минимизировать капитальные затраты на газовые генераторы, трубопроводы природного газа и эксплуатационные расходы на распределенные генераторы, работающие на природном газе, в течение длительного периода планирования.

В статье [87] представлены две математические модели для решения задачи оптимального проектирования ИЭС с выбором оптимальных параметров накопителей энергии. Задача сведена к задаче СЦЛП. Возможности моделей продемонстрированы на примере ИЭС, расположенной в окрестности Цюриха, Швейцария.

В статье [88] предлагается управляемая данными двухэтапная модель робастного стохастического программирования для планирования мощности энергетического хаба, который рассматривается в этой работе как интерфейс между различными энергетическими системами при производстве, преобразовании и хранении энергии в ИЭС. Эта модель позволяет минимизировать сумму затрат на строительство и ожидаемых эксплуатационных затрат в течение жизненного цикла энергетического хаба с учетом неопределенностей, связанных с производством энергии с помощью ВИЭ и изменением потребительских нагрузок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дано представление об ИЭС и показано, что текущие тенденции ведут к усилению взаимосвязей между различными типами систем энергоснабжения, в первую очередь, электро-, газо-, тепло-, хладоснабжения. Исследованию этих систем посвящается все

больше научных работ. Проведен обзор научных работ по актуальным вопросам управления ИЭС. На основе проведенного обзора можно сделать вывод, что вопросам управления развитием ИЭС уделено меньше внимания, чем вопросам управления функционированием этих систем.

На основе проведенного авторами анализа работ в области построения и исследования ИЭС можно сделать вывод, что текущее состояние в этой области характеризуется следующими положениями.

• Существующие системы энергоснабжения управляются разрознено, т.к., как правило, принадлежат и эксплуатируются разными организациями, имеют свои собственные системы управления (диспетчерские пункты) и при их управлении используются свои собственные стандарты, правила и подходы. Все указанное приводит к значительным затруднениям для объединения этих систем в единую систему. Необходимо исследовать новые нормативно-правовые механизмы и стандарты для обеспечения объединения систем и перехода к ИЭС.

• ИЭС состоят из множества подсистем (различные типы энергосистем имеют индивидуальные физические особенности), элементов, в том числе активных, обладающих своим собственным поведением, что необходимо принимать во внимание при разработке адекватных математических моделей для управления ИЭС.

• Организация работы нескольких разнотипных энергосистем в ИЭС требует активного применения новых технологий, перехода на новый технологический и технический уровень управления такими системами. В настоящее время некоторые технологии находятся на стадии опытной эксплуатации, а некоторые только исследуются. Эти технологии должны обеспечить интеграцию различных подсистем ИЭС и согласованное их функционирование.

• Изменение условий взаимодействия участников энергорынка и расширение возможностей потребителей по управлению своим энергопотреблением. Исследование преимуществ интеграции систем с обоснованием экономической целесообразности такого объединения для каждого из субъектов объединенной энергосистемы. Существующие стимулы для инвестиций недостаточны, могут потребоваться дополнительные меры по регулированию и государственные инвестиции.

• Активное развитие информационно-телекоммуникационных и интеллектуальных технологий приводит к изменению парадигмы взаимодействия участников энергорынка. В рамках этого процесса происходит переход к концепции "Интернета энергии", который связан с применением технологий сбора и хранения данных в инфраструктуре "Интернета вещей". Этот процесс приводит к повышению уровня интеграции энергетических систем и изменению подходов к построению и управлению ими.

• Широкое применение информационно-телекоммуникационных технологий в ИЭС приводит к появлению проблемы информационной безопасности. В состав ИЭС входят ключевые инфраструктурные системы и при целенаправленной атаке может быть нарушено функционирование жизненно важных объектов. Для повышения устойчивости функционирования ИЭС к преднамеренным атакам требуется постоянное совершенствование предпринимаемых мер и политики информационной безопасности.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-18-50320.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Воропай Н.И., Стенников В.А. Интегрированные интеллектуальные энергетические системы // Изв. РАН. Энергетика. 2014. № 1. С. 64–73.
- 2. Götz M., Lefebvre J., Mörs F., Koch A.M., Graf F., Bajohr S., Reimert R., Kolb T. Renewable Powerto-Gas: A technological and economic review // Renewable Energy. 2016. V. 85. P. 1371–1390.

- 3. Bakken B., Haugstad A., Hornnes K.S. Simulation and Optimization of Systems with Multiple Energy Carriers // Conference of the Scandinavian Simulation Society Linkoping, Sweden, 1999.
- 4. *Fang J., Zeng Q., Ai X., Chen Z., Wen J.* Dynamic Optimal Energy Flow in the Integrated Natural Gas and Electrical Power Systems // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2018. V. 9. № 1. P. 188–198.
- Bai L., Li F., Cui H., Jiang T., Sun H., Zhu J. Interval optimization based operating strategy for gaselectricity integrated energy systems considering demand response and wind uncertainty // Appl. Energy. 2016. V. 167. P. 270–279.
- 6. Zhou Y., Shahidehpour M., Wei Z., Li Z., Sun G., Chen S. Distributionally Robust Unit Commitment in Coordinated Electricity and District Heating Networks // IEEE Transactions on Power Systems. 2020. V. 35. № 3. P. 2155–2166.
- 7. *Liu B., Meng K., Dong Z.Y., Wei W.* Optimal Dispatch of Coupled Electricity and Heat System With Independent Thermal Energy Storage // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. V. 34. № 4. P. 3250–3263.
- 8. *Liu H., Zhou X., Yang X., Li Y., Li X.* Influence Evaluation of Integrated Energy System on the Unit Commitment in Power System // IEEE Access. 2020. V. 8. P. 163344–163356.
- Mashayekh S., Stadler M., Cardoso G., Heleno M. A mixed integer linear programming approach for optimal DER portfolio, sizing, and placement in multi-energy microgrids // Appl. Energy. 2017. V. 187. P. 154–168.
- Liu X., Mancarella P. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems // Appl. Energy. 2016. V. 167. P. 336–352.
- 11. Zhang X., Shahidehpour M., Alabdulwahab A., Abusorrah A. Optimal Expansion Planning of Energy Hub With Multiple Energy Infrastructures // IEEE Transactions on Smart Grid. 2015. V. 6. № 5. P. 2302–2311.
- 12. *Rakipour D., Barati H.* Probabilistic optimization in operation of energy hub with participation of renewable energy resources and demand response // Energy. 2019. V. 173. P. 384–399.
- 13. *Huang Y., Cong H., Yang J., Pang A., Lan L., Wang X.* Transmission Expansion Planning for Multienergy System with Integrated Demand Response // 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Beijing, China, 2018.
- Farahani S.S., Bleeker C., Wijk A., Lukszo Z. Hydrogen-based integrated energy and mobility system for a real-life office environment // Applied Energy. 2020. V. 264, P. 114695.
- Akrami E., Khazaee I., Gholami A. Comprehensive analysis of a multi-generation energy system by using an energy-exergy methodology for hot water, cooling, power and hydrogen production // Appl. Therm. Eng. 2018. V. 129. P. 995–1001.
- Jayasuriya L., Chaudry M., Qadrdan M., Wu J., Jenkins N. Energy Hub Modelling for Multi-Scale and Multi-Energy Supply Systems // 2019 IEEE Milan PowerTech, Milan, Italy, 2019.
- He L., Lu Z., Geng L., Zhang J., Li X., Guo X. Environmental economic dispatch of integrated regional energy system considering integrated demand response // International J. Electrical Power & Energy Systems. 2020. V. 116. P. 105525.
- Jin X., Mu Y., Jia H., Wu J., Xu X., Yu X. Optimal day-ahead scheduling of integrated urban energy systems // Appl. Energy. 2016. V. 180. P. 1–13.
- Sanjari M.J., Karami H., Gooi H.B. Micro-generation dispatch in a smart residential multi-carrier energy system considering demand forecast error // Energy Convers. Manage. 2016. V. 120. P. 90–99.
- Wu R., Mavromatidis G., Orehounig K., Carmeliet J. Multiobjective optimisation of energy systems and building envelope retrofit in a residential community // Appl. Energy. 2017. V. 190. P. 634–649.
- 21. Geidl M., Koeppel G., Favre-Perrod P., Klockl B., Andersson G., Frohlich K. Energy hubs for the future: A powerfull approach for next-generation energy systems // IEEE Power and Energy Magazine. 2007. V. 5. № 1. P. 24–30.
- 22. Almassalkhi M., Hiskens I. Optimization framework for the analysis of large-scale networks of energy hubs // 17th Power System Computation Conference, Stockholm, Sweden, 2011.
- 23. Sadeghi H., Rashidinejad M., Moeini-Aghtaie M., Abdollahi A. The energy hub: An extensive survey on the state-of-the-art // Applied Thermal Engineering. 2019. V. 161. P. 114071.
- 24. Voropai N., Stennikov V., Senderov S., Barakhtenko E., Voitov O., Ustinov A. Modeling of Integrated Energy Supply Systems: Main Principles, Model, and Applications // Journal of Energy Engineering. 2017. V. 143. № 5. P. 04017011.
- 25. Воропай Н.И., Стенников В.А., Барахтенко Е.А. Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология // Проблемы прогнозирования. 2017. № 5. С. 39–49.
- 26. Системные исследования в энергетике: Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ / отв. ред. Н.И. Воропай. Новосибирск: Наука, 2010. 686 с.
- 27. *Geidl M*. Optimal power flow of multiple energy carriers // IEEE Transactions on Power Systems. 2007. V. 22. № 1. P. 145–155.
- Geidl M. Integrated modeling and optimization of multi-carrier energy systems // PhD Dissertation. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 2007, 125 p.

- Koeppel G.A. Reliability considerations of future energy systems: Multi-carrier systems and effect of energy storage // PhD Dissertation. Swiss Federal Institute of Technology, Zurich, Switzerland, 2007, 139 p.
- 30. Voropai N.I., Gerasimov D.O., Serdyukova E.V., Suslov K.V. Development of a simulation model of an integrated multi-energy system based on the energy hub concept // Rudenko International Conference "Methodological problems in reliability study of large energy systems", Kazan, Russia, 2020.
- Liang J., Tang W. Interval based transmission contingency-constrained unit commitment for integrated energy systems with high renewable penetration // International J. Electrical Power & Energy Systems. 2020. V. 119. P. 105853.
- 32. Alqunun K., Guesmi T., Albaker A.F., Alturki M.T. Stochastic Unit Commitment Problem, Incorporating Wind Power and an Energy Storage System // Sustainability. 2020. V. 12. № 23. P. 10100.
- 33. Senjyu T., Chakraborty S., Saber A.Y., Toyama H., Yona A., Funabashi T. Thermal unit commitment strategy with solar and wind energy systems using genetic algorithm operated particle swarm optimization // 2nd International Power and Energy Conference, Johor Bahru, 2008.
- 34. Bemporad A., Morari M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints // Automatica. 1999. V. 35, № 3. P 407–427.
- 35. Krishnan A., Sampath L.P.M.I., Eddy F.Y.S., Patil B.V. Multi-Energy Scheduling Using a Hybrid Systems Approach // IFAC-PapersOnLine. 2018. V. 51. № 16. P. 229–234.
- 36. Lu S., Gu W., Meng K., Dong Z. Economic Dispatch of Integrated Energy Systems With Robust Thermal Comfort Management // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2021. V.12. № 1. P. 222–233.
- 37. *Liang T., Yin X., Ge Q.* A new meta-heuristic for economic dispatch of integrated energy system with multi-type energy storages // 2nd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation, Guangzhou, China, 2020.
- Liu J., Wang A., Wang X., Tao R. Coupled distributed control scheme for multi-energy systems with transmission losses based on event-triggered communication // J. Renewable and Sustainable Energy. 2020. V. 12. P. 055 302.
- 39. Shao C., Wang X., Shahidehpour M., Wang X., Wang B. An MILP-based optimal power flow in multicarrier energy systems // IEEE Trans. Sustainable Energy. 2017. V. 8. P. 239–248.
- Beigvand S.D., Abdi H., Scala La M. Optimal operation of multicarrier energy systems using time varying acceleration coefficient gravitational search algorithm // Energy. 2016. V. 114. P. 253–265.
- 41. Ebeed M., Kamel S., Jurado F. Optimal Power Flow Using Recent Optimization Techniques: Classical and Recent Aspects of Power System Optimization. Academic Press, 2018.
- 42. Воропай Н.И., Стенников В.А., Барахтенко Е.А., Войтов О.Н. Методика управления спросом на электро- и теплоэнергию в интегрированной энергосистеме с активными потребителями // Изв. РАН. Энергетика. 2020. № 4. С. 11–23.
- 43. *Ni L., Feng C., Wen F., Salam A.* Optimal power flow of multiple energy carriers with multiple kinds of energy storage // 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 2016.
- Pan Z., Guo Q., Sun H. Interactions of district electricity and heating systems considering timescale characteristics based on quasi-steady multi-energy flow // Applied Energy. 2016. V. 167. P. 230–243.
- 45. Morvaj B., Evins R., Carmeliet J. Optimization framework for distributed energy systems with integrated electrical grid constraints // Appl. Energy. 2016. V. 171. P. 296–313.
- 46. Arnold M., Negenborn R.R., Andersson G., De Schutter B. Distributed Predictive Control for Energy Hub Coordination in Coupled Electricity and Gas Networks // Intelligent Infrastructures. – Springer, 2010.
- Xu X., Jia H., Wang D., Yu D.C., Chiang H.-D. Hierarchical energy management system for multisource multi-product microgrids // Renewable Energy. 2015. V. 78. P. 621–630.
- Xu X., Jin X., Jia H., Yu X., Li, K. Hierarchical management for integrated community energy systems // Applied Energy. 2015. V. 160. P. 231–243.
- Ramírez-Elizondo L. M., Paap G.C. Scheduling and control framework for distribution level systems containing multiple energy carrier systems: Theoretical approach and illustrative example // International J. Electrical Power & Energy Systems. 2015. V. 66. P. 194–215.
- 50. Skarvelis-Kazakos S., Papadopoulos P., Unda I.G., Gorman T., Belaidi A., Zigan S. Multiple energy carrier optimisation with intelligent agents // Appl. Energy. 2016. V. 167. P. 323–335.
- 51. *Uyar T.S., Beşikci D.* Integration of hydrogen energy systems into renewable energy systems for better design of 100% renewable energy communities // International J. Hydrogen Energy. 2017. V. 42. № 4. P. 2453–2456.
- Pazouki S., Haghifam M.R. Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty // International J. Electrical Power & Energy Systems. 2016. V. 80. P. 219–239.

- Zhang Y., Le J., Zheng F., Zhang Y., Liu K. Two-stage distributionally robust coordinated scheduling for gas-electricity integrated energy system considering wind power uncertainty and reserve capacity configuration // Renew. Energy. 2019. V. 135. P. 122–135.
- 54. Alabdulwahab A., Abusorrah A., Zhang X., Shahidehpour M. Coordination of interdependent natural gas and electricity infrastructures for firming the variability of wind energy in stochastic day-ahead scheduling // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2015. V. 6. № 2. P. 606–615.
- 55. Qadrdan M., Chaudry M., Ekanayake J., Wu J., Jenkins N. Impact of wind variability on GB gas and electricity supply // IEEE international conference on sustainable energy technologies (ICSET). 2010.
- 56. Bai L., Li F., Cui H., Jiang T., Sun H., Zhu J. Interval optimization based operating strategy for gaselectricity integrated energy systems considering demand response and wind uncertain // Appl. Energy. 2016. V. 167. № 1. P. 270–279.
- 57. Fang X., Cui H., Yuan H., Tan J., Jiang T. Distributionally-robust chance constrained and interval optimization for integrated electricity and natural gas systems optimal power flow with wind uncertainties // Appl. Energy. 2019. V. 252, P. 113420.
- Zeng Q., Fang J., Zhang B., Chen Z. The coordinated operation of electricity, gas and district heating systems // Energy Procedia. 2018. V. 145. P. 307–312.
- Wang C., Dong S., Xu S., Yang M., He S., Dong X., et al. Impact of power-to-gas cost characteristics on power-gas-heating integrated system scheduling // IEEE Access. 2019. V. 7. P. 17654–17662.
- 60. Qadrdan M., Abeysekera M., Chaudry M., Wu J., Jenkins N. Role of power-to-gas in an integrated gas and electricity system in Great Britain // Int. J. Hydrogen Energy. 2015. V. 40. № 17. P. 5763–5775.
- 61. *Cao Y., Wei W., Wu L., Mei S., Shahidehpour M., Li Z.* Decentralized operation of interdependent power distribution network and district heating network: a market-driven approach // IEEE Transactions on Smart Grid. 2019. V. 10. № 5. P. 5374–5385.
- 62. *Zhang R., Jiang T., Li G., Chen H., Li X., Bai L., et al.* Day-ahead scheduling of multicarrier energy systems with multi-type energy storages and wind power // CSEE J. Power and Energy Systems. 2018. V. 4. № 3. P. 283–292.
- 63. DECC. 2012a. Electricity System: Assessment of Future Challenges-Summary [Online]. Available: https://www.gov.uk/government/publications/electricity-system-assessment-of-future-challenges
- 64. *Chaudry M., Jenkins N., Strbac G.* Multi-time period combined gas and electricity network optimization // Elec. Power. Syst. Res. 2008. V. 78. № 7. P. 1265–1279.
- 65. Zhang Y., He Y., Yan M., Guo C., Ding Y. Linearized Stochastic Scheduling of Interconnected Energy Hubs Considering Integrated Demand Response and Wind Uncertainty // Energies. 2018. V. 11. № 9. P. 2448.
- Ramirez-Elizondo L., Velez V., Paap G.C. A technique for unit commitment in multiple energy carrier systems with storage // 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Prague, Czech Republic. 2010.
- 67. *Liu B., Meng K., Dong Z.Y., Wei W.* Optimal Dispatch of Coupled Electricity and Heat System With Independent Thermal Energy Storage // IEEE Transactions on Power Systems. 2019. V. 34. № 4. P. 3250–3263.
- 68. *Meibom P., Hilger K.B., Madsen H., Vinther D.* Energy Comes Together in Denmark: The Key to a Future Fossil-Free Danish Power System // IEEE Power and Energy Magazine. 2013. V. 11. № 5. P. 46–55.
- 69. *He C., Dai C., Wu L., Liu T.* Robust Network Hardening Strategy for Enhancing Resilience of Integrated Electricity and Natural Gas Distribution Systems Against Natural Disasters // IEEE Transactions on Power Systems. 2018. V. 33. № 5. P. 5787–5798.
- Cong H., He Y., Wang X., et al. Robust optimization for improving resilience of integrated energy systems with electricity and natural gas infrastructures // J. Mod. Power Syst. Clean Energy. 2018. V. 6. P. 1066–1078.
- Holjevac N., Capuder T., Zhang N., Kuzle I., Kang C. Corrective receding horizon scheduling of flexible distributed multi-energy microgrids // Appl. Energy. 2017. 207. P. 176–194.
- 72. Clegg S., Mancarella P. Assessment of the impact of heating on integrated gas and electrical network flexibility // Power Systems Computation Conference (PSCC). Genoa. 2016.
- Kornrumpf T., Neusel-Lange N., Meese J., Zdrallek M., Roch M. Economic Dispatch of Flexibility Options for Grid Services on Distribution Level // Proc. of Power Systems Computation Conference (PSCC). 2016.
- 74. *Good N., Mancarella P.* Flexibility in multi-energy communities with electrical and thermal storage: a stochastic, robust approach for multi-service demand response // IEEE Trans Smart Grid. 2017. P. 1.
- 75. Yazdani-Damavandi M., Moghaddam M.P., Haghifam M.-R., Shafie-khah M., Catalão J.P. Modeling operational behavior of plug-in electric vehicles' parking lot in multienergy systems // IEEE Trans. Smart Grid. 2016. V. 7. P. 124–135.
- 76. Shafie-khah M., Vahid-Ghavidel M., Di Somma M., Graditi G., Siano P., Catalão J.P. Management of renewable-based multi-energy microgrids in the presence of electric vehicles // IET Renewable Power Generation. 2020. V. 14. P. 417–426.

- 77. Qiu J., Yang H., Dong Z.Y., Zhao J.H., Meng K., Luo F.J., Wong K.P. A linear programming approach to expansion co-planning in gas and electricity markets // IEEE Trans. Power Syst. 2016. V. 31. P. 3594–3606.
- Zeng Q., Fang J., Chen Z., Li J., Zhang B. A multistage coordinative optimization for sitting and sizing P2G plants in an integrated electricity and natural gas system // Energy Conference (ENER-GYCON). IEEE. 2016. P. 1–6.
- 79. Martínez Ceseña E.A., Capuder T., Mancarella P. Flexible Distributed Multienergy Generation System Expansion Planning Under Uncertainty // IEEE Transactions on Smart Grid. V. 7. № 1. P. 348–357.
- 80. *Khaligh V., Anvari-Moghaddam A.* Stochastic expansion planning of gas and electricity networks: A decentralized-based approach // Energy. 2019. V. 186, P. 115889.
- 81. Boyd S., Vandenberghe L. Convex Optimization. Cambridge: Cambridge University Press. 2004.
- Thiem S., Danov V., Metzger M., Schäfer J., Hamacher T. Project-level multi-modal energy system design-Novel approach for considering detailed component models and example case study for airports // Energy. 2017. V. 133. P. 691–701.
- 83. *Ding T*, *Hu Y*, *Bie Z*. Multi-stage stochastic programming with nonanticipativity constraints for expansion of combined power and natural gas systems // IEEE Trans. Power Syst. 2017. V. 33, P. 317–328.
- Zeng Q., Zhang B., Fang J., Chen Z. A bi-level programming for multistage co-expansion planning of the integrated gas and electricity system // Appl. Energy. 2017. V. 200. P. 192–203.
- 85. Odetayo B., MacCormack J., Rosehart W., Zareipour H. A chance constrained programming approach to integrated planning of distributed power generation and natural gas network // Electr. Power Syst. Res. 2017. V. 151. P. 197–207.
- 86. Charnes A., Cooper W.W. Chance-constrained programming // Management Science. 1959. V. 6. № 1. P. 73–79.
- Gabrielli P., Gazzani M., Martelli E., Mazzotti M. Optimal design of multi-energy systems with seasonal storage // Applied Energy. 2018. V. 219. P. 408–424.
- 88. Cao Y., Wei W., Wang J., Mei S., Shafie-khah M., Catalao J.P. Capacity planning of energy hub in multi-carrier energy networks: a data-driven robust stochastic programming approach // IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2020. V. 11. № 1. P. 3–14.

Study on the Current State of Research in the Field of Integrated Energy Systems Control

E. A. Barakhtenko^{*a*, *}, N. I. Voropai^{*a*}, and D. V. Sokolov^{*a*}

^a Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia *e-mail: barakhtenko@isem.irk.ru

The article aims to provide an analysis of the current state of research in the field of integrated energy systems control. The results of the analysis of publication activity on the research of integrated energy systems for the period 2016–2020 are presented. The general characteristic of the subtasks of operation control and expansion planning, separated from the general task of integrated energy systems control, is presented. An overview of current scientific publications is given, in which modern approaches to solving the subtasks are considered.

Keywords: integrated energy system, control tasks, operation control, expansion planning, modern approaches

УДК 621.316

МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕДКИХ СОБЫТИЙ ПРИ РАСЧЕТЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ БАЛАНСОВОЙ НАДЕЖНОСТИ ЭЭС

© 2021 г. В. П. Обоскалов^{1, 2, *}, А. С. Х. Абдель Менаем²

¹НИЦ "Надежность и ресурс больших систем и машин" УрО РАН, Екатеринбург, Россия ²Уральский федеральный университет, Екатеринбург, Россия *e-mail: vpo 1704@mail.ru

> Поступила в редакцию 07.04.2021 г. После доработки 02.08.2021 г. Принята к публикации 06.08.2021 г.

Рассматриваются процедуры моделирования редких событий, к числу которых относится дефицит мощности и энергии при анализе балансовой надежности электроэнергетических систем статистическими методами. Показано, что основным направлением здесь является использование итерационных методов формирования последовательности вложенных вероятностных подпространств с их убывающей вероятностью. Рассмотрены реализации метода подпространств. Предложена модификация энтропийного метода, заключающаяся в гладкой адаптации индикаторной функции. Выполнено сравнение обсуждаемых процедур.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, балансовая надежность энергосистем, моделирование редких событий, кросс-энтропийный метод **DOI:** 10.31857/S0002331021040087

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача анализа балансовой надежности (БН) электроэнергетической системы (ЭЭС) – оценить вероятностные показатели (вероятность, частота, математическое ожидание (МО) и др.) дефицита мощности (ДМ) в ЭЭС, наличие которого рассматривается как нарушение (отказ) нормального функционирования ЭЭС [1–3]. Аналогом упомянутых показателей балансовой надежности за рубежом являются: LOLP (Loss of load probability), LOLF (Loss of load frequency), EPNS (Expected power not supplied) [4]. Их сравнительная оценка, соответствие и формулы преобразования описаны в [5].

Случайное состояние системы, в основном, характеризуется вероятностным характером нагрузки $\mathbf{L} = \{L_i, i = 1, ..., n\}$, располагаемой генерации $\mathbf{G} = \{G_i, i = 1, ..., n\}$ и топологии электрической сети. При этом дефициты мощности могут иметь как локальный (в отдельных подсистемах), так и глобальный (по ЭЭС в целом) характер. Локальные ДМ определяются, в основном, состоянием (включен – отключен) и пропускной способностью элементов электрической сети.

В зависимости от степени детализации и целевой направленности решаемой задачи ЭЭС могут рассматриваться как: концентрированные; с ограниченной пропускной способностью (ПС) межсистемных связей (МСС); и в полной конфигурации, с учетом систем управления [6]. Упомянутые структурные уровни характеризуются специфическими математическими моделями, определяемыми степенью детализации систем, совокупностью ограничений и допущений. Структура 1 ориентирована, в основном, на определение оптимального резерва генерирующей мощности в задачах перспективного развития ЭЭС. Затраты на генерацию, как правило, существенно выше затрат на транспорт электроэнергии, поэтому задача развития ЭЭС часто решается поэтапно: развитие генерирующей подсистемы при условии достаточной пропускной способности электрической сети (концентрированная ЭЭС) и развитие электрической сети при условии заданной структуры генерирующей подсистемы.

На втором этапе ЭЭС рассматривается как система с ограниченной ПС МСС (структура 2). Здесь МСС с ограниченной ПС объединяют некоторое множество концентрированных ЭЭС, которые в России принято определять как зоны надежности [7] или зоны свободного перетока мощности [8]. Основной направленностью задач БН здесь является анализ возможности появления локальных дефицитов мощности, вызванных ограниченностью ПС МСС. Именно такая структура является объектом анализа в представленной работе.

Полная детализация ЭЭС с учетом систем управления режимами является предметом анализа режимной надежности; ориентирована на задачи развития систем автоматики и диспетчерского управления и в данной работе не рассматривается.

Следует отметить, что все технические системы, в том числе и ЭЭС, характеризуются малой (доли процента) вероятностью событий типа "отказ" (в БН ЭЭС – это дефицитное состояние ЭЭС). При этом, как правило, отказ проявляется при бесконечно большой комбинации внешних событий. Так в ЭЭС с двумя узлами нагрузки и фиксированной предельной мощностью электрических станций дефицит мощности может проявляться при недопустимо большом повышении нагрузки либо первого, либо второго, либо того и другого узлов. При этом величина превышения суммарной нагрузки над генерацией является непрерывной и отсюда бесконечно неопределенной в реализации величиной. Число узлов нагрузки и генерации реальных расчетных схем ЭЭС измеряется тысячами. Отсюда многократно возрастает неопределенность дефицитного состояния ЭЭС, становится затруднительным процесс идентификации наиболее значимых комбинаций событий, приводящих к отказу системы.

Основным математическим аппаратом при анализе надежности ЭЭС в настоящее время являются методы статистических испытаний и, в частности, метод Монте-Карло (ММК) [9–13 и др.]. Данные методы позволяют моделировать системы со сложными функциональными взаимосвязями, не поддающимися аналитическому описанию, в том числе учитывать стохастическую неопределенность, связанную с предложением, спросом и пропускной способностью межсистемных связей.

Известен основной недостаток ММК – для обеспечения точности результатов требуется достаточно большое число N испытаний, поскольку N обратно пропорционально вероятности моделируемых событий. В частности, при моделировании события с вероятностью 10^{-3} и погрешностью моделирования 1% требуется не менее 10⁵ статистических испытаний [14]. При анализе балансовой надежности реальных ЭЭС наиболее значимыми являются кратные отказы (одновременный отказ двух линий электропередачи (ЛЭП), одновременный отказ ЛЭП и энергоблока, отказ энергоблока в период пиковых нагрузок и др.), поскольку единичные отказы электрооборудования ЭЭС как правило не приводят к ограничению электропотребления – ЭЭС проектируются и сооружаются с учетом критерия N-1, при котором единичный отказ любого элемента ЭЭС не должен приводить к отказу процесса электроснабжения потребителей. Вероятность кратных независимых отказов равна произведению вероятностей отказа отказавших элементов. В результате вероятность кратных отказов принимает значения $10^{-6} - 10^{-8}$. При этом для идентификации, моделирования и анализа послеаварийных состояний ЭЭС методом ММК требуется число испытаний не менее 107-109. При меньшем числе испытаний идентификация таких редких событий становится маловероятной, что приводит к значимой погрешности результирующих показателей БН. С учетом того, что при каждом испытании требуется выполнение оптимизационных расчетов (оптимальное потокораспределение) анализ БН ЭЭС потребует несколько часов машинного времени. Следует отметить, что расчет показателей надежности, как правило, является составной частью более общих задач, например, выбор оптимальной конфигурации электрической сети при ее развитии. Отсюда длительность расчета надежности варианта развития ЭЭС как отдельного расчетного блока лимитируется по времени. Современная энергосистема требует все более сложной детализации и расширения учитываемых факторов, что нелинейно увеличивает сложность задачи оценки надежности ЭЭС. В совокупности это приводит к нецелесообразности, а иногда и невозможности использования стандартного ММК для оценки БН энергосистемы. Требуются модификации ММК, направленные на увеличение вычислительной эффективности статистических методов.

Одним из путей решения проблемы выполнения большого числа относительно однотипных расчетов, связанных с моделированием в многомерном вероятностном пространстве редких (с вероятностью отказов менее 10⁻⁵) событий является идея параллельных вычислений. Технология одновременного использования нескольких компьютеров (или процессоров) активно развивается в течение последних 30 лет [15–17]. Параллельные вычисления, безусловно, снижают вычислительную нагрузку ММК. Однако зависимость между количеством параллельных вычислительных ресурсов и временем вычислений близка к линейной функции [17]. Отсюда положительный эффект распараллеливания вычислений становится не столь очевидным при моделировании редких событий.

Другим направлением является использование методов паттернов, метамоделей, искусственного иммунитета, искусственной нейронной сети, опорных векторов наименьших квадратов [18–21] и др. Эти методы также показали снижение вычислительной нагрузки метода ММК. Однако, как правило, для задач БН ЭЭС они не апробированы, ориентированы на определенный класс задач, зачастую малоэффективны и не обеспечивают требуемую точность и надежность идентификации событий с вероятностью менее 10⁻⁴, что характерно для реальных систем энергетики. Отсюда проблема идентификации редких событий остается по-прежнему актуальной.

Более универсальный характер имеют итерационные методы, связанные с преобразованием анализируемых пространств, функций вероятностных распределений случайных переменных и критериальных функций. Наиболее распространенными в данном классе методов являются методы подпространств и значимой выборки [22–25], а также кросс-энтропийные методы [26–28].

В данной работе предлагаются и анализируются новые процедуры определения вероятностных параметров редких событий, основанные на методах вложенных множеств: моно и полицентры формирования промежуточной выборки значимых событий, а также модификация кросс-энтропийного метода, основанная на мягком преобразовании функции распределения мощности нагрузки.

ДЕФИЦИТ МОЩНОСТИ КАК РЕДКОЕ СОБЫТИЕ

Пусть $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{\mathbf{m}}$ — случайный вектор, который объединяет все вероятностные входные переменные L_i, G_i , и др. В простейшем случае, когда учитываются только располагаемая генерация и нагрузка и не учитываются случайные состояния элементов системы, температуры окружающей среды и др., $\mathbf{x} = \{L_i, G_i, i = 1, ..., n\}$, где i — номер узла электрической сети. С целью концентрации внимания на механизмах идентификации редких событий, связанных с отказами функционирования ЭЭС множество случайных, вероятностно определенных величин в данной работе ограничено только нагрузкой и располагаемой генерацией.

Дефицитность системы определяется разностью $D_{\Sigma} = L_{\Sigma} - G_{\Sigma} = \sum L_i - \sum G_i, \ L_{\Sigma} > G_{\Sigma}$. Ее можно оценить, например, с помощью функции избыточности системы, $S = G_{\Sigma} - L_{\Sigma}$ или (при учете пропускной способности электрической сети) $S = \min (G_i - L_i, \forall i)$. При независимости $\{L_i, G_i\}$ часто имеет смысл рассматривать обобщенную случайную величину – располагаемая генерирующая мощность узла, $r_i = G_i - L_i$. Ее МО и дисперсия: $\mu_{r_i} = \mu_{G_i} - \mu_{L_i}; \ \sigma_{r_i}^2 = \sigma_{G_i}^2 + \sigma_{L_i}^2$. В результате число управляющих стохастических переменных сокращается до числа узлов электрической сети. При этом $D_{\Sigma} = -r_{\Sigma} = -\sum r_i, \ r_{\Sigma} < 0$.

В общем случае при анализе локальных ДМ необходимо учитывать законы распределения мощности в электрической сети. Каждый узел характеризуется экспортом $u_i, i = 1, ..., n$ или импортом $(-u_i)$ мощности, определяемыми диспетчерским управлением ЭЭС и зависящими от располагаемой мощности узлов $u_i = u_i$ (**r**). При этом локальный ДМ $D_i = u_i - r_i = u_i - G_i + L_i$; $D_i > 0$. При локальных ДМ системный ДМ фиксируется, если хотя бы в одном из узлов имеет место локальный ДМ $D_{\Sigma} = \sum D_i$. Для более точного учета дефицитности ЭЭС необходимо учитывать потери активной мощности в сети, которые определяются распределением потоков мощности $\mathbf{z} = \{z_j, j = 1, ..., m\}$ в элементах электрической сети и имеют нелинейный (квадратичный) характер. Учет потерь мощности связан с появлением дополнительного условия $\pi_{\Sigma} = \sum u_i$. При этом $D_{\Sigma} = L_{\Sigma} - G_{\Sigma} + \pi_{\Sigma}$, $D_{\Sigma} \ge 0$.

Вектор **z** определяется решением задачи оптимального распределения мощности нагрузки между источниками питания. В простейшем случае, приемлемом в задачах оценки надежности, можно считать $\mathbf{z} = C\mathbf{u}$, где C – матрица потокораспределения [7]. В результате ДМ в ЭЭС представляет сложную (часто определяемую алгоритмически) функциональную зависимость от совокупности управляющих переменных, имеющих случайный характер.

Состояние дефицитности системы фиксируется, если некоторая заданная на множестве управляющих переменных критериальная функция $\psi(\mathbf{x})$ становится меньше заданного предельного значения ψ_{lim} : $\psi(\mathbf{x}) < \psi_{\text{lim}}$. В практике для идентификации дефицитности чаще используется функция с нулевым порогом, $S(\mathbf{x}) = \psi(\mathbf{x}) - \psi_{\text{lim}}$, которая при дефицитности системы принимает, например, отрицательное значение, $S(\mathbf{x}) < 0$. При этом область

$$H := \left\{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{\mathbf{m}} : S(\mathbf{x}) < 0 \right\}$$
(1)

определяет совокупность дефицитных состояний системы.

При учете локальных ДМ в ЭЭС критериальная функция имеет вид:

$$S(\mathbf{r}) = \min\left(\sum r_i - \pi_{\Sigma}; r_i - u_i(\mathbf{r}), \forall i\right).$$

Критериальной функции соответствует индикаторная функция:

$$J(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, \ S(\mathbf{x}) < 0; \\ 0, \ S(\mathbf{x}) \ge 0, \end{cases}$$

которая позволяет выразить многие логические конструкции в аналитическом виде. В частности, вероятность \mathbb{P}_H состояния отказа (наличие ДМ в ЭЭС) может быть опреде-

лена как МО индикаторной функции $J(\mathbf{x})$, принимающей в состоянии ЭЭС \mathbf{x} значение 1 при наличии отказа в ЭЭС и 0 при его отсутствии:

$$\mathbb{P}_{H} = \int J(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}) d\mathbf{x}, \tag{2}$$

где $f(\mathbf{x})$ – плотность распределения (ПР) определяющей рассматриваемое событие многомерной случайной величины **x**.

При заданной ПР $f(\mathbf{x})$ вероятность появления редкого события определяется областью H, удовлетворяющую критерию $S(\mathbf{x}) < 0$.

$$\mathbb{P}_{H} = \int_{S(\mathbf{x}) < 0}^{\cdots} f(\mathbf{x}) \, d\mathbf{x}.$$

Функцию $F(\mathbf{x})$ (или плотность $f(\mathbf{x})$) распределения случайного вектора \mathbf{x} состояний системы практически невозможно представить в виде аналитического выражения, поскольку она является результатом свертки разнотипных, с различающимися параметрами большого числа параметров системы (нагрузки, генерации, бинарные переменные, определяющие состояние элементов системы, солнечная радиация, скорость ветра и др.). Именно поэтому основным методом анализа надежности ЭЭС в настоящее время является метод статистических испытаний, позволяющий путем многократных испытаний и их статистической обработки получить достаточно точную оценку искомых величин. При этом в качестве исходных данных, как правило, задаются параметры маржинальных распределений исходных случайных величин (например, нагрузка узла *i* ЭЭС описывается нормальным (Гауссовским) распределением с математическим ожиданием μ_i и среднеквадратическим отклонением (СКО) σ_i , $L_i \sim N(x,\mu_i,\sigma_i)$.

МЕТОД ПОДПРОСТРАНСТВ СОСТОЯНИЙ

Эффективность метода Монте-Карло может быть повышена за счет применения методов уменьшения дисперсии, таких как выборка по значимости. Основная идея данной группы методов — формирование последовательности подмножеств $H_1 \supset H_2 \supset ... \supset H_m = H$ пространства состояний системы, где каждое последующее подпространство увеличивает вероятность идентификации редких событий и определяется на базе предыдущего, образуя последовательность цепи Маркова. При этом вероятность появления редкого события

$$\mathbb{P}_{H} = \Pr\left(H = \bigcap_{j=1}^{m} H_{j}\right) = \prod_{j=1}^{m} \Pr\left(H_{j} | H_{j-1}\right).$$

Каждое последующее подмножество выбирается так, чтобы вероятность условного события $\Pr(H_j|H_{j-1})$ была бы достаточно велика. В результате малая вероятность представляется произведением относительно больших вероятностей [23–25].

Одним из путей формирования $(H_j|H_{j-1})$ является отбор заданной доли p_0 наиболее значимых событий $X_b^j = (\mathbf{x}_1^j, \mathbf{x}_2^j, ..., \mathbf{x}_k^j)$, где $k = p_0 N$; N – объем выборки. Индекс b характеризует максимальный для множества X_b^{j-1} уровень критериальной функции $\psi(\mathbf{x})$. Его более детальное определение дано ниже). Значимость событий определяется по величине $\psi(\mathbf{x})$ – чем меньше $\psi(\mathbf{x})$, тем больше значимость \mathbf{x} (при $\psi(\mathbf{x}_i, i = 1, ...k) < 0$ вся область X_b^j состоит из значимых событий типа "отказ" (дефицитные состояния ЭЭС)). Дифференциация по значимости определяет механизм формирования множества X_b^j . Полная, полученная на основе данных этапа j-1 выборка H_{j-1} упорядочивается по возрастанию $\psi(\mathbf{x}): \psi(\mathbf{x}_1) \leq ... \leq \psi(\mathbf{x}_N)$. Первые p_0N событий ($p_0 \times 100$ перцентиль функции $\psi(\mathbf{x})$) определяют множество X_b^j и соответствующую ему максимальную величину критериальной функции, $b_j = \max(\psi(\mathbf{x}), \mathbf{x} \in X_b^j)$, которая, в свою очередь, является основой для формирования нового множества $H_j = \{\mathbf{x}: \psi(\mathbf{x}) < b_j\}$. При этом величину p_0 можно рассматривать как вероятность условного события $\Pr(H_j|H_{j-1}) = p_0$.

Представленный поэтапный процесс формирования множества редких событий характеризуется положительной величиной $b_j > 0$ на всех промежуточных этапах. Это означает, что множество X_b^j содержит как события-отказы, $\psi(\mathbf{x}) < 0$, так и не являющиеся отказами $\psi(\mathbf{x}) > 0$, т.е. принцип отбора событий сводится к исключению менее значимых событий и расширению области более значимых событий, $b_j < b_{j-1}$. Изначально $b_0 = \infty$, что означает, принадлежность зоне анализа всех сгенерированных на базе маржинальных ПР состояний системы. Однако на последующих этапах при генерации анализируемого множества псевдослучайных состояний системы вводится ограничение: $\psi(\mathbf{x}) < b_{j-1}$. Как правило, это реализуется заменой параметров ПР случайных переменных некоторыми новыми расчетными величинами.

На последнем этапе $b_j < 0$. Это означает, что все события в выделяемой по принципу усечения множества с долей p_0 являются отказами. Но отказами могут быть и события, не попавшие в определяемую перцентилем область, $b_j < \psi(\mathbf{x}) < 0$. Здесь условная вероятность определяется согласно соотношению: $\Pr(H_m|H_{m-1}) = N(\psi(\mathbf{x}) < 0)/N$, где $N(\psi(\mathbf{x}) < 0)$ – число элементов выборки объема N, удовлетворяющих требованию $\psi(\mathbf{x}) < 0$.

В зависимости от алгоритма полный объем выборки $N^{(j)}$ на промежуточных этапах может отличаться от заданного N, однако при этом сохраняется принцип отбора — к дальнейшему рассмотрению принимается только p_0 — часть сформированного для анализа множества состояний системы.

1.1. Моноцентр формирования промежуточной выборки

Относительно небольшая совокупность X_b^{j-1} является лишь базой для формирования H_j . Ее элементы определяются согласно типу и параметрам функции распределения генерации псевдослучайных чисел на этапе j - 1. На этапе j это должны быть иные параметры, с большей степенью идентификации редкого события. Одним из возможных вариантов формирования новой выборки предлагается генерация псевдослучайных чисел, распределенных по нормальному распределению с МО $\mu^j = \mathbb{E}(\mathbf{x}_1^{j-1}, \mathbf{x}_2^{j-1}, \dots, \mathbf{x}_k^{j-1})$ и дисперсией $\mathbf{D}^j = \mathbb{D}(\mathbf{x}_1^{j-1}, \mathbf{x}_2^{j-1}, \dots, \mathbf{x}_k^{j-1})$. На первом этапе в качестве $\mu^{(1)}, \mathbf{D}^{(1)}$ принимаются МО и дисперсии рассматриваемой совокупности исходных случайных величин. Поскольку вектор с параметрами (μ^j, \mathbf{D}^j) является наилучшим представителем области X^j , то именно этот вектор целесообразно рассматривать в качестве центра области H_j .

Новое, сгенерированное на этапе *j* множество псевдослучайных векторов с центром $(\mu^{j}, \mathbf{D}^{j})$, в общем случае содержит точки, не принадлежащее H_{j} по критерию

 $H_j \subset H_{j-1}$, т.е. не удовлетворяющие условию $\psi(\mathbf{x}) < b_{j-1}$. Решением данной проблемы является либо дополнение полученного множества до N элементов, удовлетворяющих условию $\psi(\mathbf{x}) < b_{j-1}$, либо выполняется простое удаление неудовлетворительных состояний системы. В последнем случае выборка сокращается с N до N_j элементов, но все элементы оставшегося множества при этом принадлежат H_j . Следует заметить, что число удаляемых элементов, как правило, относительно невелико и сокращение анализируемого множества слабо влияет на статистические оценки искомых параметров (в частности, на вероятность и МО дефицита мощности).

Расчеты показывают, что выбор (μ^{j} , \mathbf{D}^{j}) в качестве центра формирования множества F_{j} приводит к некоторому завышению вероятности редкого события в области очень малых вероятностей (порядок: 10^{-6} по отношению к 10^{-7}). Более точным является выбор центра в точке \mathbf{x}^{*j} , соответствующей максимальному на этапе j - 1 значению критериальной функции, $\psi(\mathbf{x}^{*j}) = b_{j-1}$. Здесь априори допускается, что не менее половины новой генерации состояний системы не будут удовлетворять условию $\psi(\mathbf{x}) < b_{j}$, однако при этом увеличивается вероятность учета тех состояний, которые не попадают в статистическую выборку с центром (μ^{j} , \mathbf{D}^{j}). Увеличение доли удаляемых событий неразрывно связано с требованием увеличением объема выборки N. Сдвиг центра ($\mu^{*j} = \mathbf{x}^{*j-1}$, \mathbf{D}^{*j}) выборки относительно МО приводит к необходимости коррекции дисперсии $\mathbf{D}^{*j} = \mathbf{D}^{j} + |\mathbf{x}^{*j-1} - \mu^{j}|^{2}$.

1.2. Метод опорных точек

Моноцентричный подход предполагает концентрацию выборки вокруг некоторого центра, например, согласно нормальному (Гауссовскому) распределению с МО в центре выборки. Однако принцип выделения периферийной области по вероятности p_0 и несимметрия области редкого события (чем больше нагрузка, тем больше дефицит мощности) заставляет усомниться в правомочности Гауссовского распределения на промежуточных этапах. Логически более оправданным здесь является вероятностное распределение, неизвестное по типу, но представленное определений на предшествующем этапе совокупностью (опорных) точек $C_{j-1} = (\mathbf{x}_1^{j-1}, \mathbf{x}_2^{j-1}, \dots, \mathbf{x}_k^{j-1})$. Статистическое моделирование данного распределения возможно путем представления множества H_j в виде объединения подмножеств с центрами в опорных точках $H_j = \bigcup H_{js}(\mathbf{x}_s^{j-1})$. В качестве СКО σ_j при формировании множества H_{js} можно рассматривать максимальное расстояние между точками множества C_{j-1} : $\sigma_j = \max |\mathbf{x}_k^{j-1} - \mathbf{x}_l^{j-1}|, (\mathbf{x}_k^{j-1}, \mathbf{x}_l^{j-1}) \in C_{j-1}$. Это позволяет обеспечить пересечение множеств точек, формируемых в многомерных сферах с центрами в точках $\mathbf{x}_k^{j-1} \in C_{j-1}$, а следовательно более полно и равномерно учесть область C_{j-1} .

Основная проблема методов вложенных подпространств состояний является зависимость результирующих данных от механизма формирования промежуточных множеств. При этом возможны ситуации, когда последующее подпространство практически не меняет критериальный порог $b_k \approx b_{k-1}$, что приводит к отсутствию сходимости вычислительного процесса за заданное число итераций. При этом результирующая вероятность редкого события становится сколь угодно малой. Отсюда основные направления исследований в этой области направлены на повышение робастности методов. Существует достаточно большое число предложений по формированию промежуточных множеств [22–25]. Наряду с описанными выше моноцентричными методами нами предложен и апробирован метод адаптивной выборки, сущность которого заключается в многократной адаптивной коррекции параметров (сдвиг и дисперсия) распределения промежуточной выборки.

АЛГОРИТМ АДАПТИВНОЙ ВЫБОРКИ

1. Инициализация: k = 1; $N_c = p_0 N$; $N_s = 1/p_0$; $\lambda = 0.6$.

2. Генерация по стандартному нормальному (Гауссовскому) распределению N псевдослучайных чисел: $U = \{\mathbf{u}_1, ..., \mathbf{u}_N\}$.

3. Преобразование множества *U* в матрицу $X = \{\mathbf{x}_1, ..., \mathbf{x}_N\}$ именованных случайных переменных (нагрузка, генерация, состояние элементов системы), согласно их маржинальным законам распределения $\mathbf{x}_i = \varphi_i(\mathbf{u}_i)$.

4. Определение вектора критериальных функций $\psi = \{\psi_i(\mathbf{x_i})\}$ и его сортировка по возрастанию функции: $\psi_i(\mathbf{x_i}) \ge \psi_{i-1}(\mathbf{x_{i-1}})$.

5. Определение на множестве ψ перцентиля ($p_0 \times 100$), соответствующему ему параметра $b_k \ge 0$ и множества именованных значимых состояний системы $H_{xk} = \{\mathbf{x}_i: \psi_i(\mathbf{x}_i) < b_k\}.$

6. Генерация новой выборки N случайных состояний системы на базе полученных в п. 5 опорных состояний системы согласно алгоритму адаптивной выборки, где после определенного числа генераций меняются MO и СКО нормального распределения, согласно которому осуществляется генерация случайных чисел.

7. Пп. 4–6 повторяются до тех пор, пока $b_k \ge 0$. При этом условная вероятность $\Pr(H_k | H_{k-1}) = p_0$. На последнем шаге *m*, при $b_m < 0$, определяется число N_m элементов, удовлетворяющих условию $\psi_{N_m}(\mathbf{x}_{N_m}) \le 0$, $\psi_{N_m+1}(\mathbf{x}_{N_m+1}) > 0$. Результирующая вероятность редкого события $\Pr(H) = p_0^{m-1} N_m / N$.

8. Определение остальных анализируемых вероятностных показателей (МО дефицита мощности и др.).

КРОСС-ЭНТРОПИЙНЫЙ МЕТОД

Кросс-энтропийный метод (КЭМ) [26–28] основан на замене реальной функции $f(\mathbf{x})$ плотности распределения анализируемой многомерной случайной величины, по которой делается выборка ММК, некоторой вспомогательной функцией плотности распределения (ВПР) $q(\mathbf{x})$, смещающей сферу анализа в область представляющего интерес редкого события. Данный подход широко известен при вычислении интегралов сложных функций статистическими методами, где подынтегральная функция умножается и делится на некоторую функцию ПР, полностью определенную на рассматриваемом интервале интегрирования:

$$\int_{a}^{b} f(x) dx = \int_{a}^{b} \frac{f(x)}{q(x)} q(x) dx = \mathbb{E}_{q}(W(x)) \cong \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} W(x_{i}),$$

где W(x) = f(x)/q(x); $\mathbb{E}[...]$ – оператор математического ожидания.

При этом возникает проблема выбора вспомогательной функции – необходимо, чтобы основанная на ней расчетная процедура была бы не только адекватной по направленности (смещения анализируемой области в сторону редкого события), но и эффективной по быстродействию и сходимости. При наличии ВПР вероятность дефицита мощности (2), может быть представлена в виде математического ожидания (MO) взвешенной индикаторной функции $J(\mathbf{x})W(\mathbf{x})$, определенной в многомерном пространстве случайных величин с плотностью распределения $q(\mathbf{x})$:

$$\mathbb{P}_{H} = \int J(\mathbf{x}) \frac{f(\mathbf{x})}{q(\mathbf{x})} q(\mathbf{x}) d\mathbf{x} = \int J(\mathbf{x}) W(\mathbf{x}) q(\mathbf{x}) dx = \mathbb{E}_{q} [J(\mathbf{x}) W(\mathbf{x})], \qquad (3)$$

где $W(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x})/q(\mathbf{x})$ – весовая функция, определяемая исходной ($f(\mathbf{x})$) и вспомогательной ($q(\mathbf{x})$) плотностями распределения.

Нетрудно видеть, что в выражении (3) $q(\mathbf{x})$ может быть любой функцией, лишь бы она удовлетворяла требования, предъявляемым к ПР. При этом не обязательно, чтобы она принадлежала к тому же классу ПР, что и $f(\mathbf{x})$. Как правило, в качестве $q(\mathbf{x})$ принимается ПР многомерного нормального распределения.

При моделировании случайных состояний системы { \mathbf{x}_i , i = 1, ..., N} методом Монте-Карло на базе плотности распределения $q(\mathbf{x})$ и набора дискретных состояний системы { \mathbf{x}_i } вероятность (3) редкого события трансформируется к виду:

$$\hat{\mathbb{P}}_{H} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} J(x_{i}) W(\mathbf{x}_{i}),$$
(4)

где $\{W(\mathbf{x}_i)\}$ может рассматриваться как совокупность весовых коэффициентов.

Дисперсия $\mathbb{V}(\hat{\mathbb{P}}_F)$ оценки вероятности определяется как средняя дисперсий случайной величины, распределенной по закону Бернулли:

$$\mathbb{V}(\hat{\mathbb{P}}_{H}) = \frac{1}{N} \mathbb{V}(J_{H}) = \frac{1}{N} \mathbb{P}_{H}(1 - \mathbb{P}_{H}).$$

Коэффициент вариации \mathbb{CV} , как мера ошибки оценки измеряемой случайной величины (вероятности $\hat{\mathbb{P}}_H$), определяется отношением стандартного отклонения к МО. В частности, для квадрата $\mathbb{CV}^2(\hat{\mathbb{P}}_H)$:

$$\mathbb{CV}^{2}(\hat{\mathbb{P}}_{H}) = \frac{\mathbb{V}[\hat{\mathbb{P}}_{H}]}{\mathbb{E}[(\hat{\mathbb{P}}_{H})]^{2}} = \frac{(1 - \mathbb{P}_{H})}{N\mathbb{P}_{H}}.$$

Отсюда видно, что коэффициент вариации (КВ) при моделировании по методу Монте-Карло обратно пропорционален $\sqrt{N\mathbb{P}_F}$ и поэтому для получения достаточно точной оценки вероятности рассматриваемого события при малых \mathbb{P}_F для обеспечения приемлемого $\mathbb{CV} = 0.1 - 0.2$ необходимо чрезвычайно большое количество N испытаний (~10⁵ при $\mathbb{CV} = 0.1$ и $\mathbb{P}_F = 0.001$).

В качестве критерия оптимизации при выборе наиболее эффективной в классе $\{q(\mathbf{x})\}$ функции $q^*(\mathbf{x})$ может служить минимум дисперсии \mathbb{P}_F :

$$\min_{q} \mathbb{V}_{q}\left[J\left(\mathbf{x}\right)W\left(\mathbf{x};q\left(\mathbf{x}\right)\right)\right]$$

Теоретически наилучшей функцией, приводящей к нулевой дисперсии искомой оценки вероятности \mathbb{P}_{H} , является функция [28]:

$$q^{*}(\mathbf{x}) = \frac{J(\mathbf{x})f(\mathbf{x})}{\int J(\mathbf{x})f(\mathbf{x})d\mathbf{x}} = \frac{J(\mathbf{x})f(\mathbf{x})}{\mathbb{P}_{H}}.$$
(5)

Поскольку оптимальная ВПР зависит от неизвестных величин \mathbb{P}_H и $J(\mathbf{x})$ непосредственное аналитическое определение $q^*(\mathbf{x})$ невозможно. Достаточно хорошее приближение позволяет получить КЭМ, основанный на последовательном уточнении параметров v многомерной плотности распределения $q(\mathbf{x}, \mathbf{v})$, и процедура определения результирующей величины представляется в виде цепи Маркова с выбором параметров ВПР на каждом шаге. Для оценки параметров v данный метод использует результаты промежуточных статистических испытаний. Вектор параметров v определяется путем минимизации кросс-энтропии (KL-дивергенции) [28].

КL-дивергенция определяет меру близости двух произвольных ПР $p_1(\mathbf{x}); p_2(\mathbf{x}):$

$$\mathbb{D}_{KL}\left(p_{1}\left(\mathbf{x}\right),p_{2}\left(\mathbf{x}\right)\right)=\mathbb{E}_{p_{1}\left(\mathbf{x}\right)}\left(\ln\left(\frac{p_{1}\left(\mathbf{x}\right)}{p_{2}\left(\mathbf{x}\right)}\right)\right)=\int_{R^{n}}^{:::}\left(\ln\left(p_{1}\left(\mathbf{x}\right)\right)-\ln\left(p_{2}\left(\mathbf{x}\right)\right)\right)dF_{1}\left(\mathbf{x}\right).$$

В данной работе в качестве $p_1(\mathbf{x})$; $p_2(\mathbf{x})$ принимаются соответственно оптимальная ПР $q^*(\mathbf{x})u$ ее текущая оценка $q(\mathbf{x}; \mathbf{v})$. КL-дивергенция $\mathbb{D}_{KL}(q^*(\mathbf{x}), q(\mathbf{x}; \mathbf{v}))$ определяет близость между этими функциями. В предлагаемой работе функция $q(\mathbf{x}; \mathbf{v})$ представляется плотностью многомерного нормального распределения с математическим ожиданием $\boldsymbol{\mu}_q$ и матрицей корреляционных моментов $\boldsymbol{\Sigma}_q$. В такой постановке степень оптимальности, по существу, определяет вектор параметров $\mathbf{v} = [\boldsymbol{\mu}_q; \boldsymbol{\Sigma}_q]$). При этом процедура оптимизации может быть представлена в виде:

$$\mathbf{v}^{*} = \underset{\mathbf{v}}{\operatorname{argmin}} \mathbb{D}_{KL}\left(q^{*}\left(\mathbf{x}\right), q(\mathbf{x}; \mathbf{v})\right) = \underset{\mathbf{v}}{\operatorname{argmax}} \mathbb{E}_{q^{*}}\left[\ln\left(q\left(\mathbf{x}; \mathbf{v}\right)\right)\right] =$$

$$= \underset{\mathbf{v}}{\operatorname{argmax}} \int \ln(q\left(\mathbf{x}; \mathbf{v}\right))q^{*}(\mathbf{x})d\mathbf{x}.$$
(6)

Подставляя для определения **v**^{*} наилучшую ПР (5) в полученное выражение и рассматривая \mathbb{P}_{H} как константу, получаем:

$$\mathbf{v}^* = \operatorname*{argmax}_{\mathbf{v}} \frac{1}{\mathbb{P}_H} \int J(\mathbf{x}) f(\mathbf{x}) \ln(q(\mathbf{x}; \mathbf{v})) d\mathbf{x} = \operatorname*{argmax}_{\mathbf{v}} \int J(\mathbf{x}) \ln(q(\mathbf{x}; \mathbf{v})) f(\mathbf{x}) d\mathbf{x}.$$

При использовании ВПР $q(\mathbf{x})$

$$\mathbf{v}^* = \underset{\mathbf{v}}{\operatorname{argmax}} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} J(\mathbf{x}_i) W(\mathbf{x}_i) \ln(q(\mathbf{x}_i; \mathbf{v})) \right], \tag{7}$$

где $W(\mathbf{x}) = f(\mathbf{x})/q(\mathbf{x}).$

КЭМ решает проблему оптимизации итеративно путем определения ряда промежуточных плотностей распределения { $q(\mathbf{x}; \mathbf{v}_k), k = 1, ..., NT$ }, которые, как показано на рис. 1, постепенно приближаются к целевой плотности $q^*(\mathbf{x})$, представляющей область существования редкого события.

На шаге *k* оптимальная ПР $q^*(\mathbf{x})$ может быть представлена оценкой $q(\mathbf{x}; \mathbf{v}_{k-1}^*)$ с полученными на предыдущем шаге оптимальными параметрами \mathbf{v}_{k-1}^* . При этом $W(\mathbf{x}; \mathbf{v}_{k-1}^*) = f(\mathbf{x})/q(\mathbf{x}; \mathbf{v}_{k-1}^*)$. Область H_k промежуточного множества состояний системы определяется порогом b_k :

$$H_{k} = \left\{ \mathbf{x}: \ \psi_{k}\left(\mathbf{x}\right) < b_{k} \right\}, \quad J_{k}\left(\mathbf{x}\right) = \begin{cases} 1, \quad \psi_{k}\left(\mathbf{x}_{k}\right) < b_{k}; \\ 0, \quad \psi_{k}\left(\mathbf{x}_{k}\right) \ge b_{k}. \end{cases}$$
(8)

Порог b_k вычисляется как θ -квантиль (например, дециль полученных в процессе статистических испытаний и отсортированных от наименьшего к наибольшему значе-



Рис. 1. Последовательность промежуточных распределений в процессе идентификации редкого события.

ниям пороговой функции $\psi_i(\mathbf{x}_i)$. При этом моделирование выполняется согласно плотности распределения $q(\mathbf{x}; \mathbf{v}_{k-1})$ с параметрами \mathbf{v}_{k-1} .

Полученный в результате решения задачи оптимизации на шаге k - 1 вектор **v*** рассматривается как новое значение вектора параметров оптимальной ПР $q^*(\mathbf{x})$, $\mathbf{v}_k = \mathbf{v}^*$. Начиная от исходного вектора параметров \mathbf{v}_0 , каждый последующий вектор \mathbf{v}_k определяется решением оптимизационной задачи (7), (9), приближаясь к оптимальной плотности распределения $q^*(\mathbf{x}) = \lim_{k \to \infty} (q(\mathbf{x}; \mathbf{v}_k))$, которая, в свою очередь, является наилучшей оценкой оптимальной в кросс-энтропийном методе вспомогательной ПР.

$$\mathbf{v}^* = \underset{\mathbf{v}}{\operatorname{argmax}} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (J_k(\mathbf{x}_i) W(\mathbf{x}_i; \mathbf{v}_{k-1}) \ln(q(\mathbf{x}_i; \mathbf{v}))) \right].$$
(9)

При этом $W(\mathbf{x}_i; \mathbf{v}_{k-1}) = f(\mathbf{x})/q(\mathbf{x}; \mathbf{v}_{k-1}).$

Процедура повторяется до тех пор, пока b_k не станет отрицательной, или, по крайней мере, $\theta \in [0.01, 0.1]$ испытаний не разместятся в искомой области редких событий [28]. Если число шагов до достижения критерия окончания итерационного процесса составляет *m*, то результирующая вероятность редкого события:

$$\hat{\mathbb{P}}_{F} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} J(\mathbf{x}_{i}) W(\mathbf{x}_{i}; \mathbf{v}_{m-1}).$$
(10)

Как было упомянуто, вектор v_0 принимается равным исходным параметрам вероятностных распределений анализируемых случайных величин, т.е. при заданном N и нулевом пороговом значении определяемая соотношением (8) область H_0 , может и не содержать ни единого редкого события, что приводит к вырожденности оптимизационной процедуры (9). Именно поэтому область H_k расширяется за счет ненулевого порогового значения *b_k*. В результате в число событий-отказов войдут "почти отказы". Отсюда отказы становятся менее редкими и идентифицируются в выборке.

Алгоритм СЕМ:

1. Ввод исходных данных (v_0 — параметры функций распределения случайных переменных). Инициализация переменных, k = 0; N — объем выборки Монте-Карло; θ — квантиль выборки;

2. На базе $q(\mathbf{x}; \mathbf{v}_{k-1})$ генерация (метод Монте-Карло) матрицы X псевдослучайных состояний системы, dim X = Nn, где n - число случайных переменных системы $\mathbf{x} = (\mathbf{x}_{i}, i = 1, ..., N), \mathbf{x}_{i} = (x_{ii}, j = 1, ..., n).$

3. Формирование векторов:

$$\boldsymbol{\Psi}(\mathbf{x}); \, \mathbf{J}(\mathbf{x}, b_k); \, f(\mathbf{x}, \mathbf{v}_0); \, q(\mathbf{x}, \mathbf{v}_{k-1}); \, \mathbf{W}(\mathbf{x}, \mathbf{v}_{k-1}) = f(\mathbf{x}, \mathbf{v}_0)/q(\mathbf{x}, \mathbf{v}_{k-1}).$$

4. Определение (либо через квантиль отсортированного массива ψ , либо статистически, через $\mu_{\psi}; \sigma_{\psi}$) порогового предела b_k критериальной функции $\psi(\mathbf{x})$.

5. Формирование области редкого события $H_k = \{\mathbf{x}: \mathbf{\psi}(\mathbf{x}) < b_k\}.$

6. Оптимизация:

$$\mathbf{v}_{k} = \underset{\mathbf{v}; \mathbf{x} \in H_{k}}{\operatorname{argmax}} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} J_{k}(\mathbf{x}_{i}) W(\mathbf{x}_{i}; \mathbf{v}_{k-1}) \ln(q(\mathbf{x}_{i}; \mathbf{v})) \right]$$

7. Пп. 2—6 повторяются до тех пор, пока $b_k > 0$, при k = k + 1.

8. Формирование: $J(x, 0), W(x, v_k), P_{\text{откл}}$.

9. Определение результирующих величин: вероятности $\Pr = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} J(\mathbf{x}_i) W(\mathbf{x}_i; \mathbf{v}_{m-1});$ МО дефицита мощности $\boldsymbol{\mu}_{\boldsymbol{\mu}} = -\frac{1}{N} \sum \boldsymbol{\Psi}(\mathbf{x}_i) J(\mathbf{x}_i) W(\mathbf{x}_i, \mathbf{v}_{m-1})$ и др.

1.3. Упрощенный кросс-энтропийный метод

Представленный выше классический КЭМ требует выполнения оптимизационной процедуры при определении параметров \mathbf{v}_k текущей ПР $q(\mathbf{x}, \mathbf{v}_k)$. При этом \mathbf{v}_k включает в себя МО $\mathbf{\mu}_k$ и матрицу корреляционных моментов Σ_k тех реализаций \mathbf{x} , которые относятся к области H_k , $\mathbf{x} \in H_k$. Выражение (10) можно рассматривать как среднее значение величин $J_F(\mathbf{x}_i)$ с весами $W(\mathbf{x}_i)$. Поскольку оно относится к вероятности, то каждая составляющая суммы может интерпретироваться как вероятность того, что реализация \mathbf{x}_i принадлежит текущей области H_k редкого события. Поскольку область H_k определена индикаторной функцией $J_k(\mathbf{x}_i)$, то МО располагаемой мощности узлов в области H_k

$$\boldsymbol{\mu}_r^{(k)} = \left(\sum_{x_i \in H_k} \mathbf{x}_i W_i\right) / \left(\sum_{x_i \in H_k} W_i\right).$$

Матрица корреляционных моментов

$$\Sigma_r^{(k)} = \left(\Sigma_{x_i \in H_k} W(\mathbf{x}_i) (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}_r^{(k)}) (\mathbf{x}_i - \boldsymbol{\mu}_r^{(k)})^T \right) / \left(\Sigma_{x_i \in H_k} W(\mathbf{x}_i) \right).$$

Данные параметры формируют вектор v_k . При таком подходе не требуется оптимизационная процедура, что существенно сокращает длительность расчетов без существенного снижения точности результатов.



Рис. 2. Аппроксимация индикаторной функции.

1.4. Модифицированный кросс-энтропийный метод

В традиционном КЭМ промежуточная область существования редкого события определяется дискретно через априори задаваемый квантиль, который формирует порог чувствительности b_k , что часто приводит к потере значимой информации (потере событий, связанных с дефицитом мощности). Это возможно из-за относительно небольшого (с целью ускорения расчетов) объема "тестовой" выборки на шаге k или достаточно грубого ограничения области H_m на последнем шаге. Нами предлагается более "мягкая" процедура идентификации области редкого события. Если в традиционном КЭМ изменение индикаторной функции от 0 к 1 происходит дискретно в точке b = 0, что позволяет интерпретировать индикаторную функцию как функцию распределения вырожденной случайной величины, то в модифицированном кросс-энтропийном методе (МКЭМ) принимается, что индикаторная функция как функция вероятностного распределения с МО в точке 0 обладает некоторой дисперсией, итеративно приближающейся к нулю (рис. 2). В результате в МКЭМ определяемая индикаторной функцией гладкого приближения. Это обеспечивает плавный переход от приблизи-

тельно оптимальной ПР $q_k^*(\mathbf{x})$ к оптимальной ПР с учетом практически всех дефицитных состояний ЭЭС.

Предельная индикаторная функция в МКЭМ представляется в виде:

$$J_{k}(\mathbf{x}) = \lim_{\delta_{k} \to 0} \Phi\left(-\frac{\Psi(\mathbf{x})}{\delta_{k}}\right)$$

При этом на промежуточных этапах величина $\delta_k > 0$.
$$J_{k}(\mathbf{x}; \boldsymbol{\delta}_{k}) = \begin{cases} 1, \ \Phi(-\psi(\mathbf{x})) < \Phi\left(-\frac{\psi(\mathbf{x})}{\boldsymbol{\delta}_{k}}\right); \\ 0, \ \Phi(-\psi(\mathbf{x})) \ge \Phi\left(-\frac{\psi(\mathbf{x})}{\boldsymbol{\delta}_{k}}\right), \end{cases}$$

где δ_k — управляющий параметр, определяющий ширину зоны неопределенности области редкого события; $\Phi(z)$ — интегральная функция стандартного нормального распределения.

При $\psi(\mathbf{x}) > 0$, $\delta_k \to 0$ индикаторная функция $J_k(\mathbf{x}; \delta_k) \to 0$, а при $\psi(\mathbf{x}) < 0$, $\delta_k \to 0$ индикаторная функция $J_k(\mathbf{x}; \delta_k) \to 1$, т.е. вырождается в единичный скачек первого рода, что соответствует требованиям идеальной идентификации редкого события. Цепь $\delta_0 > \delta_1 > \dots > \delta_m > 0$ определяет убывающую последовательность ширины зоны неопределенности решения (рис. 2). При учете нового представления индикаторной функции условие (9) трансформируется к виду:

$$\mathbf{v}_{k} = \underset{\mathbf{v}}{\operatorname{argmax}} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \Phi\left(-\frac{\Psi(\mathbf{x}_{i})}{\delta_{k}} \right) W(\mathbf{x}_{i}; \mathbf{v}_{k-1}) \ln(q(\mathbf{x}_{i}; \mathbf{v})) \right].$$
(11)

Величина δ_k определяется (корректируется) исходя из условия наилучшей аппрок-

симации ПР $q_k^*(x)$ по выборке, полученной на базе $q(\mathbf{x}; \mathbf{v}_{k-1})$. Данному условию соответствует минимум дисперсии функции $\varphi_k(x_i; \mathbf{v}_{k-1}, \delta_k) = \Phi(-\psi(\mathbf{x}_i)/\delta_k)W(\mathbf{x}_i; \mathbf{v}_{k-1}),$ i = 1, ..., N. Это достигается минимизацией разности между коэффициентами вариации \mathbb{CV} функции $\varphi_k(\mathbf{x}; \mathbf{v}_{k-1}, \delta_k)$ и априори заданного для обеспечения требуемой точности результатов коэффициента вариации \mathbb{CV}_{target} (в тестовых расчетах $\mathbb{CV}_{target} = 1.5$):

$$\delta_k = \operatorname*{argmin}_{\delta_k \in (0, \delta_{k-1})} \left| \mathbb{CV}_{\varphi_k} - \mathbb{CV}_{target} \right|.$$

Данный критерий является отражением следующих математических построений. В теории статистики рассматриваются взвешенные случайные величины (например, при определении МО взвешенной индикаторной функции (11)). При этом допускается (и в нашем случае это имеет место), что весовые коэффициенты могут изменяться в процессе итерационного процесса. Критерием, который позволяет максимально полно учесть вариацию весов, является эффективный размер выборки (ESS) (число проб с ненулевым весом), который приближенно оценивает необходимое количество статистических выборок. ESS часто используется в адаптивных последовательных реализациях Монте-Карло типа байесовских решений и может быть выражена через \mathbb{CV} весов [28, 29] как:

$$ESS_k = \frac{N}{1 + \mathbb{C}\mathbb{V}_{W_k}^2}.$$

Подбор эффективного размера выборки эквивалентен подбору коэффициента вариации весов $\mathbb{CV}_{W_{t}}$, как показано в этих уравнениях:

$$\delta_k = \operatorname*{argmin}_{\delta_k \in (0, \delta_{k-1})} \left| ESS_k - ESS_{target} \right| \cong \operatorname*{argmin}_{\delta_k \in (0, \delta_{k-1})} \left| \mathbb{CV}_{W_k} - \mathbb{CV}_{target} \right|.$$

Начиная с $\delta_0 = \infty$ и \mathbf{v}_0 , процедура повторяется итерационно и прекращается, когда коэффициенты вариации, \mathbb{CV} весов текущей мягкой аппроксимации ПР $q^*(\mathbf{x})$ ниже, чем \mathbb{CV}_{target} . При этом

$$W(x_i; \delta_k) = \frac{q^*(x_i)}{q_k^*(x_i)} = \frac{J_H(\psi(x_i))}{\Phi(-\psi(x_i)/\delta_k)}, \quad i = 1, ..., N\}.$$

Необходимое число итераций *m* здесь зависит от соотношения коэффициентов вариации и в качестве результирующей принимается ПР $q_k^*(x)$, полученная на последней итерации. Расчеты показывают, что использование \mathbb{CV} весов в качестве критерия остановки вместо параметрической плотности $q(x; v_{k-1})$ улучшает надежность (robustness) сходимости метода.

Возникает вопрос: почему $\mathbb{CV}_{target} = 1.5$? Действительно, в практических расчетах приемлемым считается KB, не превышающий 0.2–0.3. Здесь следует принять во внимание, что квадрат KB выборки равен среднему квадратов KB реализаций поскольку MO среднего по выборке равно MO рассматриваемой случайной величины, $\mathbb{E}(\bar{x} = (\sum x_i)/N) = \mu_x$, а дисперсия случайной величины $\bar{x} \mathbb{D}(\bar{x}) = D_x/N$. Отсюда

$$\mathbb{CV}^{2}(\overline{x}) = \mathbb{D}(\overline{x})/\mathbb{E}^{2}(\overline{x}) = \frac{1}{N}D_{x}/\mu_{x}^{2} = \frac{1}{N}\mathbb{CV}^{2}(x) = \frac{1}{N}\sum\mathbb{CV}^{2}(x_{i}).$$

Применительно к функции $\hat{\varphi}_k$ и вероятности $\hat{\mathbb{P}}_H$:

$$\mathbb{C}\mathbb{V}^{2}(\hat{\mathbb{P}}_{H}) = \frac{1}{N}\mathbb{C}\mathbb{V}^{2}(\hat{\varphi}_{k}) = \frac{1}{N}(\mathbb{C}\mathbb{V}_{\varphi_{k}})^{2}.$$

Если $\mathbb{CV}_{\varphi_k} = 1.5$, то при N = 1000 имеем $\mathbb{CV}(\hat{\mathbb{P}}_H) = 0.047$, что вполне удовлетворяет требованиям практики.

Алгоритм ЕСЕМ

1. Ввод исходных данных: \mathbf{v}_0 , \mathbb{CV}_{target} . Начальные присвоения k = 0, $\delta_k = \infty$.

2. k = k + 1. Генерация N реализаций состояний системы **x** на базе Гауссовского распределения с плотностью $q(\mathbf{x}, \mathbf{v}_{\mathbf{k}-1})$.

3. Формирование векторов: $\mathbf{J}(\mathbf{x}, \delta_{k-1}); q(\mathbf{x}, \mathbf{v}_{k-1}); \psi(\mathbf{x}),$ а также

$$\left\{ W\left(\mathbf{x}_{i}; \boldsymbol{\delta}_{k-1}\right) = \frac{q^{*}\left(\mathbf{x}_{i}\right)}{q_{k}^{*}\left(\mathbf{x}_{i}\right)} = \frac{J\left(\boldsymbol{\psi}\left(\mathbf{x}_{i}\right)\right)}{\Phi\left(-\frac{\boldsymbol{\psi}\left(\mathbf{x}_{i}\right)}{\boldsymbol{\delta}_{k-1}}\right)}, \quad i = 1, \dots, N \right\}.$$

4. Определение δ_k при оптимизации: $\delta_k = \underset{\delta_k \in (0, \delta_{k-1})}{\operatorname{argmin}} |\mathbb{CV}_{W_k} - \mathbb{CV}_{target}|.$

5. Определение v_k при оптимизации: $v_k = \operatorname*{argmax}_{v_k} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} W_k(x_i; v_{k-1}) \ln(q(x_i; v_k)) \right].$

6. Пп. 2—5 выполняются до тех пор, пока коэффициенты вариации \mathbb{CV} весов больше заданных \mathbb{CV}_{target} .

7. Расчет всех требуемых показателей надежности на базе полученных параметров области редких событий.

ПРОВЕРОЧНЫЕ РАСЧЕТЫ

Для сравнения описанных процедур были выполнены расчеты показателей балансовой надежности пяти-узловой электрической схемы. Результаты расчетов представлены в табл. 1, где обозначены методы: ММК — классический метод Монте-Карло (при 10⁷ испытаниях); Моноцентр — метод подпространств с одной точкой формиро-

Метод	Pr, 10 ⁻⁵	Pr, Cv	Pr_Eps, %	mD, 10 ⁻⁴	mD, Cv	mD_Eps, %	<i>t</i> , сек
Точное значение	2.23	0	0	1.21	0	0	0
ММК	2.23	0.07	0.1%	1.21	0.10	0.1%	19.02
Моноцентр	2.24	0.6	0.5%	1.48	0.90	22.1%	0.44
Полицентр	2.29	0.65	2.9%	1.52	0.92	25.7%	0.19
SubSet (ад.выб)	2.2	0.58	-1.4%	1.41	0.92	16.7%	3.21
CE	2.3	0.54	3.3%	1.24	0.03	2.5%	0.12
ECE	2.29	0.55	2.7%	1.14	0.03	-5.6%	0.95

Таблица 1. Проверочные расчеты

вания промежуточного подпространства; Полицентр – в качестве опорных точек формирования промежуточного подпространства H_k принимается множество H_{k-1} ; SubSet – метод вложенных пространств с изменяющимися параметрами вероятностных распределений при формировании промежуточного подпространства; СЕ – классический кросс-энтропийный метод; ЕСЕ – модифицированный кросс-энтропийный метод.

Во втором столбце представлена вычисленная вероятность суммарного дефицита мощности ЭЭС. Следует отметить, что все представленные методы показывают приемлемую для практических расчетов точность редкого события — максимальное отклонение 3.3% (столбец Pr_Eps, %, метод CE) при точном значении вероятности Pr = $= 2.23 \times 10^{-5}$ можно считать незначительным для малых вероятностей. Для сравнения можно упомянуть, что при таких вероятностях широко распространенная замена биномиального распределения распределением Пуассона имеет гораздо большую погрешность [29].

Последующие 3 столбца относятся к МО дефицита мощности. Здесь разброс (коэффициент вариации, столбец mD, Cv) результирующих величин значительно больше. Следует отметить, что относительная ошибка расчета МО дефицита мощности (коэффициент вариации, столбец mD, Cv)) превышает 25%. Увеличение точности возможно за счет увеличения объема промежуточной выборки. Однако это приводит к увеличению длительности расчетов (столбец *t*), которая в представленных расчетных процедурах зависит в основном от емких по времени преобразований вероятностных распределений (равномерное – Гауссовское – индивидуальное (маржинальное)). Если принять, что все случайные величины описываются одним и тем же нормальным распределением (с отличающимися параметрами), то это позволяет снизить длительность расчетов в несколько раз.

Полученные результаты позволяют рекомендовать для практического применения обеспечивающие наименьший разброс результирующих показателей кросс-энтропийные методы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанные методы идентификации редких в электроэнергетике событий относятся к тем событиям, для которых можно определить критериальную функцию, меняющую свою величину в зависимости от удаленности от искомых событий. К таким функциям (и событиям) в электроэнергетике можно отнести дефицит мощности, положительный при наличии дефицита и отрицательный при наличии резерва генерирующей мощности.

Основной технологией идентификации редких событий является использование марковских цепей, где каждое последующее событие определяется на множестве событий, выделенных на предыдущем этапе по некоторому критерию.

Из существующих подходов идентификации редких событий можно выделить два, наиболее приемлемых для технических систем: основанных на использовании технологии вложенных подпространств и преобразовании функций распределения случайных величин (в том числе, энтропийные методы).

Можно отметить, что все рассмотренные процедуры позволяют идентифицировать редкие события с точностью, приемлемой для практического применения. Некоторое предпочтение по критерию робастности можно отдать модифицированному кроссэнтропийному методу из класса преобразований функций распределения.

Точность расчетов во многом зависит от параметров настройки методов, в том числе от объема тестовой выборки на промежуточных этапах формирования значимых событий. При этом длительность расчетов определяется не только объемом выборки, но и необходимостью вероятностных преобразований функций распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Надежность систем энергетики и их оборудования. Спр. в 4 т. / Под общей ред. Ю.Н. Руденко. Т. 2. Надежность электроэнергетических систем. Справочник / Под ред. М.Н. Розанова. М.: Энергоатомиздат, 2000. 568 с.
- 2. *Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б.* Надежность и резервирование в энергосистемах. Новосибирск: Наука, 1974.
- 3. *Обоскалов В.П.* Надежность обеспечения баланса мощности электроэнергетических систем. Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2002.
- 4. *Воропай Н.И*. Надежность систем энергетики. (Сборник рекомендуемых терминов). М.: ИАЦ "Энергия," 2007. 192 с.
- 5. *Чукреев Ю.Я.* Сравнение отечественных и зарубежных вероятностных показателей балансовой надежности электроэнергетических систем / Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 6. С. 27–37.
- 6. Биллинтон Р., Аллан Р. Оценка надежности электроэнергетических систем: пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1988. 288 с.
- 7. Методические указания по проведению расчетов балансовой надежности: СТО 59012820.27.010.005-2018. М.: АО "СО ЕЭС", 2018. 25 с.
- 8. Приказ Министерства энергетики РФ от 6 апреля 2009 г. № 99 "Об утверждении Порядка определения зон свободного перетока электрической энергии (мощности)": https://base.garant.ru/195834/
- 9. Соболь И.М. Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.
- 10. Kroese D.P., Taimre T., Botev Z.I. Handbook of Monte Carlo Methods; John Wiley & Sons, Inc.: New Jersey, 2011.
- 11. *Чукреев Ю.Я.* Модели обеспечения надежности электроэнергетических систем. Сыктывкар: Изд-во Коми НЦ УрО РАН, 1995.
- 12. Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М. Надежность систем электроэнергетики. Новосибирск: Сибирская издательская фирма "Наука" Академиздатцентра "Наука," 2015.
- 13. Billinton R., Wenyan L. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods; 1st ed.; Springer: New York, 1994.
- 14. Обоскалов В.П., Валиев Р.Т. Риск превышения пропускной способности межсистемных связей в задаче балансовой надежности ЭЭС // Изв. РАН. Энергетика. 2018. № 5. С. 3–14.
- 15. Чукреев Ю.Я., Полуботко Д.В., Чукреев М.Ю. Применение современных средств параллельных вычислений в информационной системе оценки показателей балансовой надежности электроэнергетических систем // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики: Вып. 63. Баку: АзНИиПИИЭ, 2013. С. 422–432.
- Giuntoli M., Pelacchi P., Poli D. Parallel computing of sequential Monte Carlo techniques for reliable operation of Smart Grids. Proc. – EUROCON 2015, https://doi.org/10.1109/EUROCON.2015.7313707
- 17. *Martinez J.A., Guerra G.* A parallel Monte Carlo method for optimum allocation of distributed generation. IEEE Trans. Power Syst. 2014. V. 29. P. 2926–2933.
- Leite da Silva A.M., de Resende L.C., da Fonseca Manso L.A., Miranda V. Composite reliability assessment based on Monte Carlo simulation and artificial neural networks. IEEE Trans. Power Syst. 2007.

https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.901302

19. Singh C., Wang L. Role of artificial intelligence in the reliability evaluation of electric power systems. Turkish J. Electr. Eng. Comput. Sci. 2008.

- Pindoriya N.M., Jirutitijaroen P., Srinivasan D., Singh C. Composite reliability evaluation using Monte Carlo simulation and least squares support vector classifier. IEEE Trans. Power Syst. 2011. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2011.2116048
- Kalinina A., Spada, M., Vetsch D.F., Marelli S., Whealton C., Burgherr P., Sudret B. Metamodeling for Uncertainty Quantification of a Flood Wave Model for Concrete Dam Breaks. mdpi.com, https://doi.org/10.3390/en13143685
- 22. Hua B., Bie Z., Au S.K., Li W., Wang X. Extracting rare failure events in composite system reliability evaluation via subset simulation. IEEE Trans. Power Syst. 2015. V. 30. P. 753–762. https://doi.org/10.1109/TPWRS.2014.2327753
- 23. *Biondini G*. An introduction to rare event simulation and importance sampling. Big data analytics. Handbook of statistics, vol. 33. Elsevier; 2015. P. 29–68.222422.
- Wang Y., Guo C., Wu Q., Dong S. Adaptive sequential importance sampling technique for short-term composite power system adequacy evaluation. IET Gener. Transm. Distrib. 2014. V. 8. P. 730–741. https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2013.0279
- Papaioannou I., Papadimitriou C., Straub D. Sequential importance sampling for structural reliability analysis. Struct. Saf. 2016. V. 62. P. 66–75. https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2016.06.002
- 26. *de Boer P.T., Kroese D.P., Mannor S., Rubinstein R.Y.* A tutorial on the cross-entropy method. Ann Oper Res. 2005. V. 134(1). P. 19–67.
- 27. Yang D.Y., Teng J., Frangopol D.M. Cross-entropy-based adaptive importance sampling for timedependent reliability analysis of deteriorating structures. Struct Safety. 2017. V. 66. P. 38–50.
- Kroese D.P., Rubinstein R.Y., Glynn P.W. Chapter 2 The cross-entropy method for estimation. Handbook of statistics: machine learning: theory and applications. Handbook of Statistics, vol. 31. Elsevier; 2013. P. 19–34.
- 29. Обоскалов В.П., Кокин С.Е., Кирпикова И.Л. Применение вероятностно-статистических методов и теории графов в электроэнергетике / Уч. пособие. Екатеринбург: УрФУ, 2016. 271 с.

Simulation of Rare Events in Power Systems for Reliability Indices Asseement

V. P. Oboskalov^{a, b, * and A. A. Abdel Menaem^b}

^aSEC "Reliability and Safety of Large Systems and Machines" UB RAS, Yekaterinburg, Russia ^bUral Federal University, Yekaterinburg, Russia

*e-mail: vpo1704@mail.ru

The modeling techniques of rare events, which include power or energy shortage when evaluating the reliability of electric power systems by simulation methods, are considered. The main purpose is to investigate the use of iterative methods for forming a sequence of nested probability subspaces, with their decreasing probability. The procedure of the subspace method is realized. A modification of the cross-entropy method is proposed, which consists of a smooth adaptation of the indicator function. A comparison of the discussed techniques is performed. It is shown that the main disadvantage of the considered methods is their efficiency dependence on the proper specification of parametric constants. The means of improving the accuracy and the convergence of iterative procedures are outlined.

Keywords: multiaria power systems, balance reliability, adequacy, simulation of rare events, cross-entropy method

УДК 621.311.001.5+303.732.4

ПОДХОДЫ К УПРАВЛЕНИЮ РЕЖИМАМИ КРУПНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ ЕЕ СИСТЕМНЫХ СВОЙСТВ

© 2021 г. А. В. Малафеев*

ФГБОУ ВО "Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова", Магнитогорск, Россия

*e-mail: malapheev_av@mail.ru

Поступила в редакцию 25.05.2021 г. После доработки 02.08.2021 г. Принята к публикации 06.08.2021 г.

В работе рассмотрены современные проблемы в области управления режимами систем электроснабжения крупных промышленных предприятий. Выполнен анализ структуры промышленного энергетического узла на примере одного из крупных предприятий черной металлургии. Рассмотрена структура оперативно-диспетчерского управления энергохозяйством предприятия и ее взаимосвязи, а также взаимодействие с энергосбытовыми компаниями, смежными сетевыми компаниями и сторонними потребителями. Сформулированы свойства таких объектов, позволяющие отнести их к классу больших производственно-экономических систем. На их основе сделаны выводы о подходах, которые необходимо применять при решении задач управления режимами, а также требованиях к математическим методам расчета и оптимизации режимов крупных промышленных систем электроснабжения.

Ключевые слова: система электроснабжения, большая производственно-экономическая система, структурная сложность, двойственность, иерархичность, многовариантность, многокритериальность, организованность, управляемость, эргатичность **DOI:** 10.31857/S0002331021040075

ВВЕДЕНИЕ

Произошедший переход энергетической отрасли России из монопольной сферы в сферу конкурентных отношений вызвал пересмотр промышленными предприятиями структуры централизованного электроснабжения от электроэнергетических систем, что привело к развитию собственных источников электроэнергии, не зависящих от режимов работы энергосистем и вырабатывающих более дешевую электроэнергию. Это позволяет как снизить себестоимость готовой продукции предприятия за счет снижения доли энергоресурсов, так и повысить надежность функционирования сложных технологических процессов в аварийных и послеаварийных режимах работы энергосистемы.

Кроме того, действующие на настоящий момент правила деятельности рынков электроэнергии в Российской Федерации стимулируют потребителей к широкому использованию собственных генерирующих источников в процессе управления режимом системы электроснабжения, что обусловлено значительным разбросом цен на электроэнергию на рынке "на сутки вперед" в течение суток, а также возможностью участия потребителей с регулируемой нагрузкой в работе балансирующего рынка с целью влияния на равновесную цену. Это относит такие предприятия к классу активных

потребителей — понятие, широко используемое в рамках концепции создания и развития активно-адаптивных электрических сетей¹.

Для решения названных проблем многие предприятия, располагающие вторичными энергоресурсами, создают и расширяют собственную энергетическую базу, включающую тепловые электростанции и котельные, утилизирующие попутный газ, технологический пар и другие виды энергоносителей. В значительно меньшей мере для этого используется возобновляемая энергетика, что обусловлено как высокой стоимостью оборудования, так и зависимостью объема вырабатываемой электроэнергии от изменчивых климатических факторов и чрезвычайно плохой управляемостью.

Сооружение новых и расширение имеющихся заводских электростанций во многих случаях приводит к существенному усложнению энергохозяйства предприятия, а, следовательно, изменяются условия работы электрических сетей и подстанций, релейной защиты и автоматики, электрооборудования потребителей во всех видах эксплуатационных режимов. Усложняется и анализ режимов системы электроснабжения диспетчерской службой. Важно также то, что исторически сложилась структура, когда от электрических сетей крупного градообразующего предприятия получают питание другие предприятия, городские электрические сети, близлежащие мелкие населенные пункты и сельские районы; осуществляется транзит мощности в соседние энергосистемы. Это является причиной присвоения предприятию статуса территориальной сетевой организации (ТСО) и добавляет в перечень задач планирования деятельности электросетевого хозяйства вопросы, связанные с оказанием услуг по передаче электроэнергии сторонним потребителям и смежным сетевым компаниям.

В таких условиях от диспетчерского персонала энергохозяйства крупного предприятия требуется быстрое принятие решений, касающихся изменения текущего режима при проведении плановых мероприятий, аварийных отключениях, изменениях режима энергосистемы и ситуации на оптовом рынке электроэнергии и мощности. Это невозможно без оперативного анализа последствий планируемых режимов в условиях нормальной эксплуатации и вынужденных режимах, которое осуществимо лишь при соответствующем программном оснащении рабочего места диспетчера. Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение для этой цели разработано и широко применяется для планирования и управления режимами энергосистем различных уровней иерархии, системы электроснабжения же имеют ряд специфических особенностей и для них методическое и программное обеспечение является недостаточным. Задача усложняется, если на предприятии имеются собственные электростанции.

Все перечисленное говорит о необходимости разработки методологического подхода к управлению эксплуатационными режимами системами электроснабжения по противоречивым критериям экономичности, надежности, допустимости режимных параметров с учетом взаимосвязей с внешними подсистемами энергетики и внутренними подсистемами предприятия на основе неопределенных характеристик факторов, влияющих на режим.

СТРУКТУРА И ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРУПНОЙ ПРОМЫШЛЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

На выбор способов управления существующей системой электроснабжения наибольшее влияние оказывают задачи обеспечения ее наибольшей экономической эффективности при соблюдении требуемых условий связи с энергосистемой. Как правило, используется два способа управления — выбор рационального состава элементов и выбор параметров режима. При выборе рационального режима эти две задачи часто приходится решать совместно.

¹ Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью: ред. 5.0. – М., 2012. – По материалам официального сайта ПАО "ФСК ЕЭС" www.fsk-ees.ru.



Рис. 1. Упрощенная схема промышленного энергетического узла.

Упрощенная структурная схема промышленного энергетического узла показана на рис. 1. Утолщенными линиями выделена часть схемы, входящая в границы балансовой принадлежности градообразующего промышленного предприятия.

К характерным чертам такой схемы можно отнести следующее.

1. Источниками питания со стороны энергосистемы чаще всего являются системные подстанции 500/220 кВ и электростанции, осуществляющие выдачу мощности в основную сеть энергосистемы также на напряжениях 220 кВ и 500 кВ (для условий ОЭС Урала).

2. Основная доля нагрузки принадлежит крупным промышленным предприятиям, зачастую это одно-два градообразующих предприятия черной или цветной металлургии, машиностроения, нефтехимии и т.д. (Магнитогорский энергорайон – ПАО "ММК", Челябинский энергорайон – ПАО "ЧМК" и ПАО "ЧЭМК", Череповецкий энергорайон он – ПАО "Северсталь", Новокузнецкий энергорайон – ПАО "ЗСМК" и ПАО "КМК" и т.д.). Надо отметить, что доля электроэнергии в энергобалансе металлургических предприятий достаточно велика, так для ММК это около 10% от общего энергопотребления [1, с. 55–70]. С развитием электроемких производств (электросталеплавильное производство, производство холоднокатаного листа) эта величина будет расти. При этом доля в общем энергопотреблении электростанций достигает 17% (при оценке энергопотребления в гигаджоулях на тонну сырой стали).

3. Питающие линии 220 кВ принадлежат в большинстве случаев ПАО "ФСК ЕЭС" (или другой магистральной компании, такой, как АО "БЭСК", АО "Сетевая компания" и др.), в ряде случаев – какой-либо распределительной сетевой компании, как входящей, так и не входящей в группу компаний ПАО "Россети" (на схеме – РСК).

4. Верхний уровень системы электроснабжения сформирован кольцевыми либо сложнозамкнутыми сетями напряжением 110–220 кВ, которые полностью или частично находятся на балансе предприятия. Через эти сети, кроме питания собственной нагрузки, осуществляется транзит мощности в региональные сетевые компании. Возможно и обеспечение системного транзита вплоть до обеспечения связи между региональными энергосистемами (РЭЭС). Так через Магнитогорский энергетический узел (МЭУ или Магнитогорский энергорайон – МЭР) обеспечивается связь между Башкирской, Челябинской и Оренбургской энергосистемами, а также в целом между ОЭС Урала и ЕЭС Республики Казахстан.

5. Значительная часть нагрузки обеспечивается за счет местной генерации. Основная доля принадлежит электростанциям предприятия, которые могут работать как на покупных, так и на местных энергоресурсах, как правило, ВЭР предприятия (характерный пример — черная металлургия). Кроме того, в узле могут функционировать установки распределенной генерации относительно небольшой мощности, принадлежащие как потребителям, так и генерирующим компаниям.

6. Электростанции предприятия, как правило, выдают мощность как в сети 110–220 кВ, так и в сети генераторного напряжения. Соотношение между величинами выдачи зависит от степени близости электростанции к потребителям электрической и тепловой энергии; для технологических электростанций – схемными и технологическими особенностями цеха, энергообеспечение которого они осуществляют (например, паровоздуходувные и электровоздуходувные электростанции металлургических заводов, зачастую составляющие одно целое с доменным цехом); для ТЭЦ, ориентированных на теплоснабжение и электроснабжение городских районов – удаленность городских потребителей.

7. От сетей практически всех классов напряжения питаются сторонние потребители — как посредством сетей, принадлежащих региональным сетевым компаниям или муниципальным электрическим сетям, так и собственных линий (субабоненты). В связи с этим ряд промышленных предприятий с такими системами электроснабжения (СЭС) имеет статус территориальных сетевых организаций (ТСО), входящих в соответствующий реестр. Таким образом сети 110–220 кВ предприятия осуществляют питание собственно нагрузки предприятия, городских потребителей, а также ближайших городов, поселков и сельских районов, т.е. практически целиком энергоузла или энергорайона РЭЭС.

Сказанное в п. 7 обусловливает то, что многие объекты энергоузла находятся в оперативном управлении либо ведении диспетчерских служб энергохозяйства предприя-



Рис. 2. Структура оперативно-диспетчерского управления энергохозяйством промышленного предприятия и внешние взаимосвязи на примере ПАО "ММК".

тия; в ряде случаев диспетчерское управление объектами, подведомственными в оперативном отношении РДУ, реализуется опосредованно через указанные службы.

Следовательно, структура оперативно-диспетчерского управления объектами крупного промышленного энергоузла может иметь достаточно сложный вид. На рис. 2 показана такая структура в границах МЭУ (более подробно показаны подразделения ПАО "ММК"). На рисунке сплошными одиночными линиями показано оперативное взаимодействие по вопросам ведения режима, сплошными двойными линиями – оперативное взаимодействие при производстве оперативных переключений, пунктирными линиями – взаимодействие при обмене информацией.

Такая структура (в условиях указанного объекта) обладает рядом особенностей:

1) в оперативные функции центральной диспетчерской службы управления главного энергетика (ЦДС УГЭ) входит управление выработкой и распределением как электроэнергии, так и других энергоносителей на предприятии (природный и вторичные газы, пар, кислород и др. продукты разделения воздуха, сжатый воздух, вода); взаимодействие с Челябинским РДУ по вопросам ведения режима и вывода оборудования в ремонт, диспетчером энергосбытовой компании — МЭК, управление собственной генерацией и режимами сетей 110–220 кВ верхнего уровня (включая замкнутые);

2) в обязанности диспетчерской службы (ДС) цеха электрических сетей и подстанций (ЦЭСиП; подразделение, имеющееся на большинстве крупных предприятий) входит управление режимами сетей 35–220 кВ (кроме питающих), руководство оперативными переключениями на всех объектах, находящихся в ее оперативном управлении (сети напряжением 35–220 кВ, включая замкнутые; отдельные участки сетей 6–10 кВ, РУ 35–110 кВ электростанций при переключениях на линиях);

3) сменный оперативный персонал электростанций (применительно к ПАО "ММК" в условиях опосредованного диспетчерского управления) самостоятельно определяет почасовое распределение нагрузки между агрегатами в соответствии с почасовой суммарной выработкой станции, которая формируется производственной группой УГЭ на основе годовых и месячных планов производства электрической и тепловой энергии и ежесуточно сообщается ЦДС УГЭ начальнику смены станции); суточный график выработки ЦДС также сообщает диспетчеру МЭК, который передает эту информацию в Челябинское РДУ. В условиях же прямого диспетчерского управления РДУ задает почасовую нагрузку станций или отдельных их агрегатов (пример – ТЭЦ ЧМК). Переключениями на линиях, отходящих от РУ генераторного напряжения к другим потребителям, руководит оперативный персонал станции;

переключениями на питающих линиях 220 кВ руководит диспетчерский персонал ЧРДУ, 110 кВ – ОДС ПО "МЭС";

5) переключениями на линиях 35–110 кВ, принадлежащих ПО "МЭС", руководит диспетчер ОДС ПО "МЭС";

6) при получении распоряжения от ЧРДУ на вывод в ремонт оборудования его принимает ЦДС, но исполняет ДС ЦЭСиП, в которую ЦДС передает принятое распоряжение;

7) персонал цехов, сторонних потребителей и городских электрических сетей участвует в оперативных переключениях на питающих линиях соответствующего класса напряжения, находящихся в оперативном управлении ДС ЦЭСиП;

8) группа режимов по запросу диспетчера ЦЭСиП оценивает допустимость предполагаемого к реализации режима;

9) центр энергосберегающих технологий (ЦЭСТ) определяет требуемые энергетические показатели оборудования производственных цехов и цехов УГЭ, анализирует фактические показатели и предоставляет результаты анализа в УГЭ.

Производство электроэнергии собственными электростанциями промышленных потребителей Челябинской области² составляет существенную долю суммарной установленной мощности – 17.8%. Эта величина сравнима с вкладом Троицкой ГРЭС – крупнейшей электростанции области (23.05%). Электросетевой комплекс крупных промышленных предприятий (в первую очередь ПАО "ММК", ЧМК (АО "Электросеть"), АО "ЧЭМК") по масштабам также сопоставим с рядом сетевых компаний, что во многом обусловливает их статус ТСО. Наибольшей протяженностью линий напряжением 110 кВ характеризуются филиал "Челябэнерго" МРСК Урала (5355 км), ПАО "ММК" (327 км); линий 35 кВ – также "Челябэнерго" (2710 км), ПАО "ММК" (193.7 км), АО "Горэлектросеть" г. Магнитогорска (73.8 км), ФГУП "ПО "Маяк"" (65.3 км). Филиал "Челябэнерго" МРСК Урала включает в себя, кроме прочего, ПО "Челябинские городские электрические сети", охватывающее большую часть территории г. Челябинска.

² Схема и программа перспективного развития электроэнергетики Челябинской области на 2019–2023 годы. Утв. распоряжением Губернатора Челябинской области от 28.04.2018 г. № 503-р. – По материалам официального сайта Правительства Челябинской области https://pravmin74.ru/npa/rasporyazhenie-gubernatora-chelyabinskoy-oblasti-no-503-r-ot-28-aprelya-2018-goda-ob.



Рис. 3. Взаимодействие крупного градообразующего промышленного предприятия с энергосбытовыми компаниями, смежными сетевыми компаниями и сторонними потребителями.

По трансформаторной мощности лидируют (вслед за МРСК Урала и ФСК ЕЭС) ПАО "ММК" (5540 МВА), АО "Электросеть" (2787 МВА), ПАО "РЖД" (2191 МВА), АО "ЧЭМК" (1110 МВА) и АО "Горэлектросеть" г. Магнитогорска (1022 МВА). При этом к АО "Электросеть" (г. Челябинск) относится значительная часть электросетевого хозяйства Челябинского металлургического комбината. Сложность, загруженность и протяженность электрических сетей крупных промышленных предприятий обусловливают необходимость организации собственного оперативно-диспетчерского управления этими объектами.

Взаимодействие с энергосбытовыми компаниями крупного промышленного потребителя определяется тем, является ли он субъектом ОРЭМ РФ. Выход на оптовый рынок непосредственно для потребителей затруднен, поэтому довольно часто имеет место структура, показанная на рис. 3 (на примере ПАО "MMK").

В данном случае промышленное предприятие имеет границы балансового раздела с сетевыми компаниями ПАО "ФСК", ПАО "МРСК Урала", ООО "Башкирэнерго", АО "Горэлектросеть" и непосредственно с потребителями (например, метизно-калибровочный завод, цементный завод и т.д.). Поставки электроэнергии осуществляются на розничном рынке гарантирующим поставщиком ООО "МЭК", у которого приобретают электроэнергию промышленные (включая ПАО "ММК") и непромышленные (включая население) потребители г. Магнитогорска; кроме того, осуществляется покупка потерь ТСО – также ПАО "ММК", АО "Горэлектросеть" и др.

Компенсация потерь электроэнергии производится косвенным путем со стороны ООО "МЭК" за счет оплаты потребителями услуг по передаче электроэнергии. Например, АО "Горэлектросеть" приобретает у ООО "МЭК" электроэнергию для компенсации потерь, ООО "МЭК", в свою очередь, оплачивает ПАО "МРСК Урала" услуги по передаче электроэнергии своим потребителям, в т.ч. через сети смежных сетевых организаций (в Магнитогорском энергорайоне это АО "Горэлектросеть", ПАО "ММК", ПАО "ММК-МЕТИЗ" и ряд мелких компаний); ПАО "МРСК Урала" же оплачивает услуги по передаче электроэнергии потребителям ООО "МЭК", присоединенным к сетям АО "Горэлектросеть". Такая структура финансовых потоков справедлива для потребителей, заключивших с ООО "МЭК" договор энергоснабжения, в случае же наличия договора купли-продажи электроэнергии потребитель самостоятельно оплачивает сетевым организациям услуги по передаче электроэнергии. Так, ПАО "ММК" имеет договор на приобретение услуг по передаче электроэнергии с ПАО "ФСК ЕЭС". К сетям ММК присоединены потребители МЭК непосредственно и через смежные сетевые организации, вследствие чего МЭК компенсирует ММК (как TCO) затраты, связанные с передачей электроэнергии своим потребителям.

Поскольку наиболее крупный потребитель – ММК – владеет собственными электростанциями, позволяющими регулировать потребление как собственно предприятия, так и всего энергоузла, это облегчает разработку прогнозных графиков нагрузки со стороны МЭК при участии в торгах на РСВ и создает возможности по снижению узловой цены. Кроме того, появляется возможность участия с ценовыми заявками в торгах на балансирующем рынке.

Таким образом, можно выделить следующие характерные особенности крупных энергоемких промышленных предприятий с собственной генерирующей базой как объектов электроэнергетики:

1) значительная доля нагрузки предприятия в суммарной нагрузке энергорайона (энергоузла). Так, при суммарном максимуме нагрузки МЭУ, равном 1400 МВт, вклад собственно ММК составляет около 900 МВт;

2) высокая концентрация нагрузки на территории предприятия;

3) большой объем вторичных энергоносителей, используемых для производства электрической и тепловой энергии;

4) значительная доля покрытия нагрузки за счет собственных электростанций;

5) система электроснабжения предприятия обеспечивает электроэнергией большинство потребителей узла, в первую очередь это касается сетей 110–220 кВ; эти сети чаще всего присоединены непосредственно к сетям ФСК ЕЭС, передача электроэнергии сторонним потребителям, как правило, осуществляется через сети смежных сетевых организаций;

6) преобладание относительно коротких линий электропередачи и незначительная доля сетей замкнутой конфигурации;

7) сложная структура оперативно-диспетчерского управления энергохозяйством, предусматривающая управление выработкой и распределением всех видов энергоносителей на предприятии, включая электроэнергию. Диспетчерская служба управления главного энергетика находится в оперативном подчинении непосредственно Системного оператора ЕЭС (регионального диспетчерского управления) и взаимодействует с диспетчерскими службами энергосбытовой компании, смежных сетевых компаний, а также потребителей. Диспетчерская служба цеха электрических сетей и подстанций играет роль центра управления сетями и наделена широкими полномочиями в части операционных функций, взаимодействуя при этом с ДС УГЭ, а по ряду вопросов – со смежными сетевыми компаниями и потребителями;

8) первоочередное влияние технологического процесса предприятия на структуру и режимы электрических сетей (графики электрических нагрузок, требования по надежности электроснабжения) и станций (графики тепловых нагрузок и графики выработки вторичных энергоносителей); 9) предприятие может быть наделено правом (по соответствующему соглашению с Системным оператором ЕЭС) самостоятельно формировать программы производства и суточные графики нагрузки собственных электростанций;

10) качественная схожесть энергоузла или энергорайона с региональной энергосистемой по структуре баланса электроэнергии и мощности, конфигурации электрических сетей высших классов напряжения, структуре оперативно-диспетчерского управления, количеству действующих сетевых и энергосбытовых организаций, а в ряде случаев — и по суммарной нагрузке.

СВОЙСТВА СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КРУПНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ КАК БОЛЬШИХ СИСТЕМ

Перечисленные выше характерные свойства СЭС говорят, что им в той или иной мере присущи свойства больших производственно-экономических систем, а именно [2, с. 16–20], [3, с. 13–24]:

1) структурная и динамическая сложность; во многом определяется существенным влиянием на режим СЭС отдельных электроприемников, а не крупных узлов нагрузки. Режим работы электроприемников, в свою очередь, зависит от их технологической принадлежности, следовательно, как на цеховом, так и на заводском уровне СЭС нельзя рассматривать ее структуру и режим в отрыве от технологического процесса и оборудования. Динамическая сложность определяется большим количеством врашающихся машин с различным характером противодействующего момента, участвующих в переходных процессах; в ряде случаев единичные мощности высоковольтных двигателей соизмеримы с мощностями некоторых генераторов собственных электростанций. При рассмотрении установившихся режимов более важной представляется эволюционная сложность СЭС, которая будет связана с изменением объемов производства каждого из структурных подразделений предприятия по каждому из видов продукции, освоением новых рынков, ужесточением требований по экологичности, изменением цен как на сырье, товары и услуги, так и на готовую продукцию (в т.ч. энергоносители) и т.д. Следует отметить также преобладание сильных связей на уровне СЭС "электростанции – сети 110–220 кВ" вследствие высокой концентрации большинства объектов на территории предприятия;

2) организованность и управляемость (как системы, характеризующейся свойствами адаптивности и эргатичности); проявляется в наличии нескольких взаимосвязанных определенным образом, но различных по назначению подсистем — генерация, передача, распределение, защита и автоматика, учет и измерения, телемеханика и связь, оперативно-диспетчерское управление, планирование производства, ремонт и обслуживание, — а также в способности получать информацию от внешних систем технологической, экономической, транспортной подсистем предприятия, а также региональной электроэнергетической системы, и использовать ее для организации своей деятельности; СЭС, как и большинство искусственных человеко-машинных систем при решающей роли человека (эргатических), является самоорганизующейся; процесс самоорганизации в данном случае является результатом целенаправленной деятельности человека;

3) двойственность природы (в смысле, используемом Д.А. Арзамасцевым); проявляется как сочетание причинных свойств [4, с. 5–16], определяющих функционирование СЭС (география потребителей, технология и объем производства продукции, требования по надежности электроснабжения и качеству электроэнергии, режим энергосистемы, регламенты и условия действующих договоров на РРЭ и ОРЭМ, законодательство и иные нормативные акты в области энергосбережения и экологической политики, цены на энергоносители, планы по реконструкции и развитию производства, появление новых и усовершенствованных типов электротехнического и энергетического обору-

дования, появление новых технологий утилизации ВЭР основного производства и т.д.), с частично неопределенными свойствами, связанными с разнообразием технологических процессов и отклонениями их параметров, разновременностью их протекания, плановыми и внеплановыми ремонтными работами, неисполнением договорных обязательств (сбоями поставок и др.), неопределенностью объема заказов на различные виды продукции и т.д.; возможными отклонениями параметров режима энергосистемы; неопределенностью объема и характеристик вторичных энергоресурсов;

4) иерархичность и взаимосвязь с другими системами; проявляется также в тесной взаимосвязи с другими подсистемами промышленного предприятия – технологической, транспортной, финансовой, управления персоналом, в первую очередь, если предприятие является собственником всех объектов СЭС, включая электростанции; при выводе части объектов в дочерние общества такая взаимосвязь может проявляться слабее. Место СЭС в иерархии ЕЭС определяется ее влиянием на режим региональной энергосистемы и энергообъединения, а также транзитом мощности в смежные сетевые организации и сторонним потребителям (крупные ТЭЦ или замкнутые сети 110–220 кВ, принадлежащие предприятию и находящиеся в оперативном управлении его ДС УГЭ, могут находиться в оперативном ведении РДУ и ОДУ – ПАО "ММК"; ТЭЦ предприятия, принадлежащая дочерней структуре, может находиться в оперативном управлении РДУ – ПАО "ЧМК"; предприятие может быть субъектом ОРЭМ – ПАО "Северсталь" и т.д.);

5) многообразие свойств и состояний; при управлении режимами СЭС полная информация об их параметрах доступна, как правило, для сетей 35–220 кВ, трансформаторов 35-220/3–10 кВ, крупных энергоемких объектов 6–10 кВ (главные привода прокатных станов, турбокомпрессоры кислородных станций и т.д.) и главных схем электростанций. Сети 10 кВ и ниже частично или полностью ненаблюдаемы, имеются лишь графики нагрузки, в ряде случаев регистрируемые вручную, а также результаты зимних и летних контрольных замеров. При этом объем контрольных замеров определяется ЭСО, РДУ и др. структурами и не связан с потребностями ДС УГЭ или ЦЭСиП предприятия. Тем не менее коррелированность нагрузок технологически взаимосвязанных производств или агрегатов можно использовать при оценке недостающих данных, кроме того, использование информации об ожидаемых объеме производства и состоянии технологических агрегатов может упростить коррекцию режима при оперативном управлении им;

6) многовариантность функционирования; возможности управления режимом СЭС во многом ограничиваются особенностями технологического процесса собственных и сторонних потребителей (последнее – в случае выделения вспомогательных цехов в дочерние структуры), требованиями к надежности и бесперебойности электроснабжения, существующими на предприятии технологическими цепочками, договорами на услуги по передаче электроэнергии со сторонними потребителями и смежными сетевыми организациями;

7) многокритериальность; функционирование СЭС крупного градообразующего предприятия во многом определяется двумя критериями — надежным обеспечением электроэнергией собственных потребителей в зависимости от их технологических особенностей и надежным обеспечением транзита электроэнергии в смежные сетевые организации и сторонним потребителям (при заданных требованиях к качеству электроэнергии). При этом должна обеспечиваться экономичная работа энергохозяйства предприятия в целом. Затраты, связанные с выработкой и отдачей в цеха или сторонним потребителям тепловой энергии, химически очищенной воды, конденсата, горячего дутья и т.д., представляют собой дополнительные критерии управления, которые при решении ряда задач могут вырождаться в ограничения. Критерию надежности.

Устойчивый динамизм развития, характерный для электроэнергетических систем, в меньшей степени присущ СЭС крупных предприятий, развитие которых определяется модернизацией, реконструкцией и расширением производства, а в ряде случаев, закрытием устаревших цехов, что, в свою очередь, зависит от спроса на продукцию определенных видов, рыночной конъюнктуры, внешнеэкономической, а порой и внешнеполитической ситуации.

ПОДХОДЫ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ УПРАВЛЕНИЯ

Перечисленные свойства во многом определяют круг задач управления и подходы к их решению, в частности, виды информации и математический аппарат.

Структурная сложность, иерархичность и связь с другими системами своего класса в сочетании с относительно небольшим по сравнению с ЭЭС числом уровней иерархии, а также преобладанием разомкнутых сетей над замкнутыми, делают целесообразным распространение принципов эквивалентирования как на моделирование узлов примыкания к внешним системам (сторонние потребители, узлы примыкания к РЭЭС или транзита в смежные сетевые организации) с дальнейшим использованием эквивалентов в расчетах, так и на создание имитационных моделей собственно СЭС. При этом необходимо использование подходов теории оценивания состояния, что обусловлено, кроме необходимости выявления и коррекции ошибок измерений, решения прогнозных задач и др., недостаточной наблюдаемостью на цеховом уровне распределения и многообразием как режимов РЭЭС, так и режимов электропотребления технологических агрегатов предприятия.

Свойство двойственности определяет необходимость использования математического аппарата, позволяющего учитывать свойство неопределенности (в первую очередь, электрических нагрузок на различных уровнях СЭС) в различных задачах расчета параметров нормальных и аварийных режимов и их планирования, оптимизации распределения мощностей и уровней напряжения, анализа надежности, определения стоимости услуг по передаче электроэнергии для сторонних потребителей и ССО и т.д. Наиболее универсальным является подход, основанный на теории нечетких множеств, в частности, на использовании нечетких чисел и правил нечеткого вывода. Его использование позволяет моделировать электрические нагрузки, в условиях СЭС, как правило, не подчиняющиеся нормальному закону распределения, характеристики ущербов при оценке надежности и производственных рисков, характеристики генерирующего оборудования и энергоносителей, балансовые условия на границе раздела со смежными объектами энергетики и др.

Организованность, управляемость, многокритериальность определяют подходы, используемые при оптимизации режимов. Использование на собственных электростанциях разнородного генерирующего оборудования, нескольких видов топлива обусловливают применение методов, не предъявляющих требований к виду целевой функции и уравнений связи. Относительно небольшое (по сравнению с ЭЭС) количество генерирующих единиц делают достаточно удобным использование метода динамического программирования, с трудом применимого в условиях ЭЭС вследствие высоких требований к вычислительным ресурсам.

Эргатичность СЭС, являющейся по отношению к ЭЭС ее подсистемой, вызывает необходимость разработки системы поддержки принятия решений на всех уровнях управления СЭС (ДС УГЭ, ДС ЦЭСиП, сменный персонал электростанций, службы планирования УГЭ, ЦЭСТ, экономического управления), учитывающей тот факт, что СЭС является одной из производственных подсистем промышленного предприятия.

Системные свойства в целом СЭС приводят к необходимости широкого использования экспертных оценок [5, с. 73–110], а также методов и средств имитационного моделирования.



Рис. 4. Схема внутренних и внешних связей системы электроснабжения промышленного предприятия с собственной генерацией.

Можно выделить следующие внутренние подсистемы:

1) подсистема производства электроэнергии и тепловой энергии, а также сопутствующих энергоносителей — собственные электростанции предприятия;

 связана с подсистемами водоснабжения, теплоснабжения, газоснабжения, железнодорожного транспорта; связана с технологической подсистемой предприятия (отпуск пара на технологические нужды цехов, подача горячего дутья в доменные печи и т.д.);

- связана с Системным оператором ЕЭС, т.к. электростанции находятся в оперативном ведении РДУ (ОДУ), в ряде случаев – в оперативном управлении; оперативное взаимодействие может быть как прямым, так и опосредованным (через ДС УГЭ); на рис. 4 показан случай опосредованного диспетчерского управления;

2) подсистема приема, передачи и распределения электроэнергии — электрические сети (линии электропередачи, подстанции);

 – связана с региональной электроэнергетической системой, представленной ФСК и территориальными сетевыми организациями, с технологической подсистемой предприятия;

3) подсистема защиты, автоматики, сигнализации, дистанционного управления оборудованием электрических станций и сетей;

 связана с системой противоаварийной автоматики и релейной защиты РЭЭС как посредством параметров режима первичных цепей, так и при помощи каналов связи;

4) подсистема оперативно-диспетчерского управления;

 связана с подсистемами более высокого уровня иерархии (РДУ, ОДУ), с подсистемами диспетчерского управления водоснабжением, теплоснабжением, газоснабжением, железнодорожным транспортом (поставки угля), подсистемами телефонной связи и радиосвязи, обслуживания вычислительной техники, разработки и сопровождения программного обеспечения;

5) подсистема сбора, передачи, обработки, представления информации о параметрах режима и состоянии оборудования;

 связана с подсистемой телемеханики РЭЭС, подсистемами телефонной связи и радиосвязи, обслуживания вычислительной техники, разработки и сопровождения программного обеспечения;

6) подсистема финансовых расчетов с участниками электроэнергетических рынков;

– связана с Минэнерго (утверждение нормативов технологических потерь электроэнергии – НТПЭ), Федеральной службой по тарифам (утверждение тарифов на услуги по передаче электроэнергии), сетевыми компаниями (оплата услуг по передаче электроэнергии), Системным оператором ЕЭС (оплата услуг по диспетчерскому управлению), энергосбытовой компанией (оплата электроэнергии и мощности на собственные нужды; оплата электроэнергии для компенсации потерь – для предприятий с правами TCO); кроме того, связана с подсистемой финансовых расчетов на предприятии (финансово-экономическое управление, главная бухгалтерия);

7) подсистема анализа и планирования производственных показателей энергохозяйства;

– связана с аналогичными подсистемами других производственных процессов предприятия (производственное управление); с подсистемой обеспечения энергоресурсами (производственная группа УГЭ);

8) подсистема планирования и проведения ремонтов и профилактических испытаний оборудования;

– связана с подсистемой обеспечения оборудованием и материалами, с внешними подрядными организациями, с внешними подсистемами планирования и проведения ремонтов оборудования РЭЭС (Системный оператор ЕЭС, сетевые компании).

Схема внутренних и внешних связей показана на рис. 4.

На рисунке 4 наиболее сильные с точки зрения управления эксплуатационными режимами связи выделены утолщенными линиями и пронумерованы, соответствующие подсистемы также выделены. Связи 1, 2, 4, 15, 17 носят материальный характер и обусловлены физическими связями между элементами электрической системы, включая электроприемники (2) и теплопотребляющие установки (1). Связи 14 и 15 также являются материальными и связаны с финансовыми расчетами между предприятием и энергосбытовой компанией, а также между предприятием и сетевой компанией. Связи 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 15, 16, 17 являются информационными и связаны, в первую очередь, с оперативно-диспетчерским управлением СЭС, в т.ч. рассмотрением заявок на проведение ремонтов (10), выдачей и контролем выполнения производственного задания (11, 3). Большинство подсистем имеют собственную иерархическую структуру. Уровни иерархии и поперечные связи для основных подсистем показаны ранее на рис. 1, 2, 3. Связь с другими подсистемами обусловливает применение итеративных подходов.

ПРИМЕР ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ ПРЕДЛАГАЕМЫХ ПОДХОДОВ

В рамках практического использования предлагаемых подходов научным коллективом кафедры электроснабжения промышленных предприятий МГТУ им. Г.И. Носова при участии автора разработано математическое и алгоритмическое обеспечение, реализованное в программном комплексе (ПК) "КАТРАН" [6]. ПК включает в себя модули расчета установившегося режима и потерь активной мощности систем электроснабжения с прилегающими участками электроэнергетической системы, токов и остаточных напряжений в режиме короткого замыкания, структурной надежности, оптимизации распределения активных мощностей системы электроснабжения промышленного предприятия с собственными электростанциями и ряд других.

Модуль расчета установившегося режима основан на методе последовательного эквивалентирования [7] и обеспечивает хорошую сходимость (2–3 итерации) в схемах со значительной долей участков разомкнутой конфигурации при наличии местной генерации и при нескольких узлах примыкания к сетям РЭЭС (при задании части из них как PQ-узлов, части – как PU-узлов). При необходимости оценки неопределенности режимных параметров использовано представление нагрузок их в виде нечетких интервалов [8], что позволяет учесть несоответствие большинства нагрузок подразделений промышленного предприятия нормальному закону распределения. Модуль расчета структурной надежности основан на том же методическом подходе [9] и позволяет учесть распределение мощностей в схеме при оценке надежности электроснабжения какого-либо подразделения либо при оценке надежности выдачи мощности какойлибо местной электростанцией. В зависимости от решаемой задачи более высокий уровень иерархии (сети 110–220 кВ предприятия; энергосистема и т.д.) может детализироваться или задаваться одним или несколькими эквивалентами.

Модуль оптимизации распределения активных мощностей базируется на методе дискретного динамического программирования [10], что позволяет задавать в расчет технико-экономические характеристики агрегатов собственных электростанций промышленного предприятия, на которых зачастую используется одновременно несколько видов топлива, включая вторичные энергоресурсы. Зависимости затрат на генерацию от выработки активной мощности при этом имеют ступенчатый вид, что затрудняет применение других методов оптимизации. Предусматривается решение задачи оптимизации и на общезаводском, и на станционном уровне [11] с учетом условий связи с РЭЭС, что позволяет учесть свойство иерархичности.

На основе метода последовательного эквивалентирования разработана методика определения вклада сторонних потребителей предприятия, подключенных в различных точках, и его собственных электростанций с различной себестоимостью электроэнергии в потери мощности (в натуральном и в стоимостном выражении) в системе электроснабжения предприятия. Это позволяет более корректно оценить техникоэкономические показатели промышленных электрических сетей и обеспечить полноту компенсации стоимости потерь сторонними потребителями, совершенствуя тем самым систему взаиморасчетов с гарантирующим поставщиком и со смежными сетевыми организациями.

Созданный программный комплекс прошел промышленное внедрение и используется на ПАО "MMK" в группе режимов (во взаимодействии с центральной диспетчерской службой управления главного энергетика и диспетчерской службой цеха электрических сетей и подстанций) и в центре энергосберегающих технологий. С его помощью разработаны и внедрены мероприятия, направленные на уменьшение потерь электроэнергии в системе электроснабжения, сокращение затрат на покупные виды топлива на электростанциях, снижение ущерба при нарушениях электроснабжения, а в конечном счете — на снижение себестоимости готовой продукции и на повышение ее конкурентоспособности.

выводы

1. Системы электроснабжения крупных промышленных предприятий с собственными генерирующими источниками обладают свойствами больших систем и должны рассматриваться с позиций системного подхода.

2. Качественно такие системы электроснабжения схожи с электроэнергетическими системами, что обусловлено значительной суммарной нагрузкой, существенной долей ее покрытия собственными электростанциями предприятия, наличием сложноза-

мкнутых сетей напряжением 110—220 кВ, значительным влиянием со стороны системы электроснабжения на режим энергообъединения (ряд таких объектов находится в оперативном ведении объединенных диспетчерских управлений).

3. При создании математического и программного обеспечения управления режимами таких систем электроснабжения необходимо учитывать их специфические особенности, обусловленные тесной взаимосвязью с технологическим процессом предприятия, питанием от СЭС городской нагрузки и близлежащих населенных пунктов, зависимостью собственной генерации от выработки вторичных энергоресурсов (технологические газы, вторичный пар и т.д.).

4. Неопределенность режимных параметров для большинства узлов и ветвей обусловлена не функционированием большой совокупности электроприемников, а технологическими цехами, участками, иногда — отдельными агрегатами при отсутствии устойчивых статистических оценок, что делает невозможным использование нормального закона распределения.

5. Оценка экономических показателей режима СЭС должна учитывать разнородность технико-экономических характеристик объектов собственной генерации, динамику изменения цен на различные виды первичных и вторичных энергоресурсов, функционирование СЭС как зарегистрированной территориальной сетевой организации (что достаточно часто имеет место) и правильность взаиморасчетов с энергосбытовой организацией и региональной сетевой компанией, динамику цен на ОРЭМ и розничном рынке электроэнергии.

6. При разработке мероприятий по совершенствованию режимов работы СЭС необходим учет иерархической структуры оперативно-диспетчерского управления энергохозяйством и его взаимосвязь как с внутренними подсистемами предприятия (технологическая, финансово-экономическая, ремонтно-сервисная и т.д.), так и с внешними системами (оптовый и розничный рынки электроэнергии, смежные сетевые организации, Системный оператор ЕЭС, комплекс природных факторов и др.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Никифоров Г.В., Олейников В.К., Заславец Б.И., Шеметов А.Н.* Управление электропотреблением и энергосбережение. Теория и практика: монография. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. 422 с.
- 2. Арзамасцев Д.А., Липес А.В., Мызин А.Л. Модели оптимизации развития энергосистем. М.: Высш. шк., 1987. 272 с.
- 3. Воропай Н.И. Теория систем для электроэнергетиков. Новосибирск: Наука, Сибирская издательская фирма РАН, 2000. 273 с.
- 4. Мелентьев Л.А. Методология системных исследований в энергетике. М.: Наука, 1983. 289 с.
- 5. Макаров А.А. Системные исследования развития энергетики. М.: Изд. дом МЭИ, 2015. 280 с.
- 6. А.с. №2019610251 RU Программа для ЭВМ "Комплекс автоматизированного режимного анализа КАТРАН 10.0". 09.01.2019 / В.А. Игуменщев, А.В. Малафеев, Е.А. Панова, А.В. Варганова, О.В. Газизова, Ю.Н. Кондрашова, В.В. Зиновьев, А.И. Юлдашева, А.А. Крубцова, Н.А. Анисимова, А.Т. Насибуллин, М.А. Тремасов, В.С. Щербакова, В.К. Богуш // Оф. Бюл. "Программы для ЭВМ, базы данных, ТИМС". М.: ФИПС, 2019. 1 с.
- 7. Игуменщев В.А., Заславец Б.И., Малафеев А.В., Буланова О.В., Ротанова Ю.Н. Модифицированный метод последовательного эквивалентирования для расчета режимов сложных систем электроснабжения // Промышленная энергетика. 2008. № 6. С. 16–22.
- 8. *Малафеев А.В., Крубцова А.А.* Прогнозирование электрической нагрузки цехов // Главный энергетик. 2015. № 10. С. 14–18.
- 9. *Малафеев А.В.* Алгоритм расчета структурной надежности систем электроснабжения крупных промышленных предприятий на основе метода последовательного эквивалентирования // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 4. С. 62–72.
- 10. *Малафеев А.В.* Определение экономически целесообразной загрузки электростанций промышленного предприятия методом динамического программирования // Известия вузов. Электромеханика. 2004. № 2. С. 95–99.
- 11. Варганова А.В., Малафеев А.В. Энергоэффективное распределение тепла между котлоагрегатами промышленных электростанций с применением ЭВМ // Электрические станции. 2017. № 11. С. 23–27.

Approaches to Managing the Modes of an Large Industrial Power Supply System, Taking into Account Its System Properties

A. V. Malafeev*

FSBEI HE Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia *e-mail: malapheev av@mail.ru

The paper deals with modern problems in the field of control of the modes of power supply systems of large industrial enterprises. The analysis of the structure of an industrial power unit is carried out on the example of one of the large enterprises of ferrous metallurgy. The structure of the operational dispatch management of the enterprise's energy sector and its interconnection, as well as interaction with energy sales companies, related grid companies and third-party consumers, are considered. The properties of such objects are formulated, allowing them to be classified as large production and economic systems. On their basis, conclusions were drawn about the approaches that must be applied when solving problems of regime control, as well as the requirements for mathematical methods for calculating and optimizing the regimes of large industrial power supply systems.

Keywords: electric power supply system, large production and economic system, structural complexity, duality, hierarchy, multivariance, multi-criteria, organization, manageability, ergaticity

УДК 621.319.4+621.3.064

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ОСНОВЕ КАТУШКИ-КОНДЕНСАТОРА

© 2021 г. П. А. Бутырин^{1, *}, Г. Г. Гусев¹, Д. В. Михеев^{1, 2}, М. В. Карпунина^{1, 2}, А. А. Кваснюк¹, Ф. Н. Шакирзянов¹

 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "МЭИ", Москва, Россия
 Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)", Москва, Россия *e-mail: ButyrinPA@mpei.ru

> Поступила в редакцию 15.07.2021 г. После доработки 02.08.2021 г. Принята к публикации 06.08.2021 г.

В работе изложены результаты исследования переходных процессов при ограничении токов короткого замыкания устройством на основе каткона (катушки-конденсатора). Предлагаемое токоограничивающее устройство (ТОУ) имеет компактное конструктивное исполнение и улучшенные массогабаритные показатели в сравнении со стандартными резонансными ТОУ. Разработана математическая модель ТОУ на базе каткона для анализа переходных процессов, базирующаяся на применении синтезированной схемы замешения с эквивалентными сосредоточенными параметрами и понятий глобального и локального времени. Получено аналитическое решение для переходных напряжений и тока при скачкообразном изменении граничных условий на выходе ТОУ на основе каткона с учетом потерь в режиме резонанса при резистивной согласованной нагрузке. Выражения постоянных интегрирования в найденных решениях являются функциями моментов коммутаций и позволяют установить оптимальные моменты коммутации для достижения необходимого быстродействия устройства и снижения ударного значения тока. На основе аналитического решения анализируются колебательный и критический переходные процессы ограничения тока короткого замыкания. Из полученных результатов устанавливаются соблюдения законов коммутаций и проводится сравнение найденных значений со значениями, полученными при альтернативном построении решения. Представлены результаты экспериментального исследования переходных процессов в физической модели ТОУ на базе каткона. Корректность математической модели и достоверность полученных аналитических решений подтверждается совпадением теоретических расчетов и опытных данных.

Ключевые слова: катушка-конденсатор, каткон, переходные процессы, токи короткого замыкания, токоограничивающее устройство, быстродействие **DOI:** 10.31857/S0002331021040051

введение

Катушка-конденсатор (каткон) — это элемент электрической цепи, представляющий собой высокодобротный четырехполюсник со своеобразной зависимостью реактивного сопротивления от частоты — вплоть до его знакопеременности [1–5]. Конструктивно каткон выполняется в виде бифилярной катушки (рис. 1а), но со специфическим соединением двух из четырех выводов обмоток (рис. 16) [5] (выводы H₁ и K₂ – входные, а

Рис. 1. Схематичное изображение бифилярной катушки и каткона. (а) Бифилярная катушка Н. Теслы [6]. (б) Общий принцип построения каткона [5].

К₁ и Н₂ – выходные). Впервые бифилярную катушку в 1894 г. запатентовал Никола Тесла (патент № 512340 [6]). Он использовал подобные катушки для придания электрическим цепям большей емкости и снижения расходов на применение дорогостоящих конденсаторов.

Далее создавались иные конструкции данных элементов, которым давались новые названия: "индуктивно-емкостной гибрид" [7, 8], "индукон" [9], "декон" [10], "окон" [11], "спиральная полосковая линия" [12], "индуктор с самокомпенсацией реактивной мощности" [13], "многофункциональный интегрированный электромагнитный компонент" [14–18] и, непосредственно, "катушка-конденсатор (каткон)" [19].

Благодаря сочетанию индуктивно-емкостных свойств в едином техническом объекте сфера применения катконов достаточно широкая и разнообразная: электроиндукционные устройства с самокомпенсацией реактивной мощности [20], фильтры [21], фильтро-компенсирующие устройства [22–25], индуктивно-емкостные преобразователи [4, 9, 10, 26, 27], электротехнологические установки [28, 29], токоограничивающие устройства [30, 31], магнитные диполи, трансформаторы и др.

Вопросы работы устройств на базе каткона в установившихся режимах достаточно хорошо изучены [32–36]. В целом неплохо проработаны и вопросы математического моделирования поведения каткона в переходных процессах [37–39]. Иное дело – возможность коррекции этих процессов за счет использования каткона. Здесь результаты скромнее [40]. Особенно актуальной эта проблема становится при применении каткона в качестве резонансного токоограничивающего устройства (TOУ) [31], так как быстродействие является одним из важнейших требований, предъявляемых к TOУ [41]. Ранее предложенное авторами в [30, 42] устройство ограничения токов короткого замыкания на базе каткона позволяет существенно снизить массогабаритные показатели стандартного резонансного TOУ, но при этом не позволяет достичь желаемых результатов по критерию быстродействия.

В этой связи в настоящей работе ставятся следующие задачи:

• разработка функциональной схемы резонансного TOУ на базе каткона, применение которой позволит снизить длительность протекания процесса ограничения тока короткого замыкания, т.е. улучшить показатели быстродействия TOУ;

• разработка математической модели и формирование аналитического решения для расчета переходных процессов в электрических цепях с ТОУ на базе каткона, учитывающего моменты изменения граничных условий;

• экспериментальное исследование переходных процессов в физической модели резонансного ТОУ на базе каткона.

Рис. 2. Конструктивное исполнение токоограничивающего устройства на основе каткона: (а) Секция каткона, выполненная в виде спирально скрученных листов фольги 1 и 2, разделенных пленками диэлектрика Д₁ и Д₂ [42]; (б) Секция каткона, состоящая из проводников 1 и 2 с входными (H₁, K₂) и выходными (K₁, H₂) выводами, пленок диэлектрика Д₁ и Д₂, помещенная на сердечник 3 (вид сверху в разрезе) [37, 42]; (в) Функциональная схема двухсекционного токоограничивающего устройства на основе каткона с магнитопроводом с немагнитными зазорами с подключенным источником (к входным выводам) и нагрузкой (к выходным выводам) [38, 41].

І. ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ТОКООГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ КАТКОНА

При разработке резонансных токоограничивающих устройств на базе каткона наиболее эффективной является конфигурация устройства, приведенная в [38]. В этом случае секции каткона выполняют из спирально скрученных проводников (листов фольги) 1 и 2, изолированных пленками диэлектрика $Д_1$ и $Д_2$ (рис. 2а), и располагают на магнитном сердечнике 3 (рис. 26).

Для обеспечения надежности и устойчивости конструкции секции C_1 и C_2 , соединенные между собой последовательно согласно, располагают на двух П-образных участках магнитопровода M_1 и M_2 , отделенных друг от друга равными по длине немагнитными зазорами НЗ (рис. 2в). Источник питания подключается к входным выводам H_1

Рис. 3. Принципиально-условная схема соединения элементов устройства ограничения тока короткого замыкания на основе каткона с резистором согласования.

секции C_1 (проводник 1) и K_2 секции C_2 (проводник 2), а выходные выводы K_1 (проводник 1) и H_2 (проводник 2) могут быть разомкнуты, замкнуты или к ним может быть подключена нагрузка с произвольным сопротивлением [36]. Такое конструктивное исполнение TOУ на базе каткона позволяет снижать нелинейность его характеристик, варьировать значение эквивалентной индуктивности и достигать необходимых резонансных частот [38].

II. ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ УСТРОЙСТВА ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКОВ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ НА ОСНОВЕ КАТКОНА

На условно-принципиальной схеме, представленной на рис. 3, изображены источник питания ИП, выключатель QF, нагрузка НАГР и ТОУ на базе каткона с резистором согласования РС. ТОУ на основе каткона выполняется в соответствии со схемой, приведенной на рис. 2в, и содержит следующие элементы: магнитопровод М с немагнитными зазорами, проводники в виде листов фольги 1 и 2, пленки диэлектрика Д, изолирующие проводники 1 и 2 друг от друга. К входным выводам ТОУ H₁ и K₂ подключаются выключатель QF и нагрузка НАГР, обеспечивающие соединение входа устройства с источником питания ИП и образование соответствующего последовательного контура. К выходным выводам ТОУ K₁ и H₂ подключаются последовательно соединенные ключ К и резистор согласования РС.

На рисунке 4 приведена эквивалентная схема замещения ТОУ на базе каткона с резистором согласования, представляющая собой электрическую цепь с распределенными параметрами, содержащую совокупность элементарных ячеек на участке длиной *dx*. В каждой ячейке схемы первичные параметры R_0 (Ом/м) и G_0 (См/м) определяют соответственно потери в проводниках 1 и 2, магнитопроводе М и диэлектрике Д, первичные параметры C_0 (Ф/м) и L_0 (Гн/м) – значения емкости и индуктивности на единицу длины проводников *l*.

Граничные условия на выходе ТОУ определяются положением ключа К. При разомкнутом ключе К ($R_{\rm H} \rightarrow \infty$), т.е. в режиме холостого хода, относительно входных выводов H₁ и K₂ устройство представляется синтезированной схемой замещения с эквивалентными сосредоточенными параметрами ($R_{\rm x} = 2/3R_0l$; $C = C_0l$; $L = L_0l$; $G = G_0l$) [37]. В рассматриваемом режиме значение входного сопротивление ТОУ $Z_{\rm BX}$ при резонансной частоте f_0 с учетом пренебрежения потерями в диэлектрике Д ($G_0l \approx 0$) может быть вычислено по выражению [5]:

Рис. 4. Эквивалентная схема замещения устройства ограничения токов короткого замыкания на основе каткона с резистором согласования [41].

$$\underline{Z}_{\rm BX}\Big|_{f=f_0,R_{\rm H}\to\infty} = \frac{2}{3}R_0l + G_0l\frac{L_0}{C_0} \approx R_{\rm X}, \, {\rm OM}.$$
(1)

Таким образом, значение эквивалентного резистивного сопротивления R_x определяется потерями в проводниках 1, 2 и в магнитопроводе М.

Из условия $Im\{\underline{Z}_{BX}\} = 0$ определяется резонансная частота [5]:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0 l^2} - \frac{G_0^2}{C_0^2}} \approx \frac{1}{2\pi \sqrt{L_0 C_0 l^2}}, \ \Gamma_{\rm H}.$$
 (2)

При замыкании ключа К к выходным выводам ТОУ K_1 и H_2 подключается резистор согласования с чисто активным сопротивлением R_c , т.е. возникает режим безразличного резонанса [37]. Значение сопротивление резистора согласования R_c равно волновому сопротивлению ТОУ на базе каткона и определяется в соответствии с [37]:

$$R_{\rm C} = 2\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}, \, \mathrm{OM}. \tag{3}$$

В нормальном режиме в соответствии с приведенными схемами (рис. 3 и 4) выключатель QF замкнут, ключ К разомкнут, ТОУ настраивается в режим резонанса напряжений за счет выбора соответствующих значений эквивалентной емкости и индуктивности. Под действием источника питания ИП на резонансной частоте f_0 ток нагрузки проходит по замкнутому контуру, содержащему источника питания ИП, замкнутый выключатель QF, TOУ в режиме холостого хода ($R_{\rm H} \rightarrow \infty$) и нагрузку НАГР с сопротивление $Z_{\rm Harp}$. При этом входное сопротивление TOУ относительно выводов H₁ и K₂ $R_{\rm x}$ по модулю много меньше сопротивления нагрузки $Z_{\rm harp}$: $R_{\rm x} \ll Z_{\rm harp}$. Таким образом, потери в TOУ, определяющиеся значением эквивалентного сопротивления $R_{\rm x}$, минимальны, а напряжение между входными выводами H₁ и K₂ устройства существенно меньше напряжения источника питания ИП.

При возникновении короткого замыкания ($Z_{\text{нагр}} = 0$) в момент t = 0 в соответствии с приведенными схемами (рис. 3 и 4) напряжение источника питания ИП приложено ко входу ТОУ. Ток короткого замыкания циркулирует через замкнутый контур, содержащий источник питания ИП, замкнутый выключатель *QF* и ТОУ в режиме холостого хода ($R_{\text{H}} \rightarrow \infty$). С целью ограничения тока короткого замыкания в момент времени t_0 замыкается ключ K, обеспечивая подключение к выходным выводам ТОУ резистора согласования PC с сопротивлением R_{c} , что приводит к возникновению режима согласованной

нагрузки и безразличного резонанса. В этом случае входное сопротивление TOV без учета потерь теоретически должно быть равно сопротивлению резистора согласования R_c [37]:

$$\underline{Z}_{\rm BX}\Big|_{f=f_0,R_{\rm H}=R_{\rm c}} = \frac{1}{R_{\rm H}} \frac{C_0}{4L_0} = \frac{4\rho^2}{R_{\rm H}} = R_{\rm c}, \, {\rm OM}.$$
(4)

В реальности в режиме согласованной нагрузки входное сопротивление ТОУ R по значению немного меньше, чем сопротивление R_c , что обусловлено потерями в магнитопроводе и в проводниках устройства [37].

Таким образом в результате изменения граничных условий на выходе каткона ток короткого замыкания в контуре ограничивается из-за резкого увеличения входного сопротивления ТОУ со значения R_x до значения $R \approx R_c$. При этом в результате данной коммутации практически отсутствует переходной процесс в цепи [38, 39].

III. ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ ДЛЯ НАХОЖДЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОКА С ПОСТОЯННЫМИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ, УЧИТЫВАЮЩИМИ МОМЕНТЫ ИЗМЕНЕНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Для расчета переходного процесса в электрической цепи с ТОУ на базе каткона используется эквивалентная схема с сосредоточенными параметрами (рис. 5а). Для построения решения введено понятие локального (t') и глобального времени (t) (рис. 56). Под локальным временем понимается время после момента коммутации t_0 , тогда глобальное время выражается через время локальной системы $t = t' + t_0$.

Рассматривается режим работы электрической цепи рис. 5а при $t \ge t_0$. В установившемся режиме имеет место резонанс напряжений: $\omega L = 1/\omega C$.

Для определения в локальной системе независимых начальных условий (HHУ) предварительно приведем выражения для тока и напряжений на конденсаторе и индуктивной катушке в режиме до коммутации:

$$i(t) = I_{mx} \sin \omega t(t' + t_0) = \frac{U_m}{R_x} \sin \omega t(t' + t_0), \text{ A};$$
$$u_C(t) = -U_{Cmx} \cos \omega (t' + t_0) = -\frac{I_{mx}}{\omega C} \cos \omega (t' + t_0) = -\frac{U_m}{R_x \omega C} \cos \omega (t' + t_0), \text{ B};$$
$$u_L(t) = U_{Lmx} \cos \omega (t' + t_0) = I_{mx} \omega L \cos \omega (t' + t_0) = \frac{U_m \omega L}{R_x} \cos \omega (t' + t_0), \text{ B}.$$

Определим ННУ (t' = 0): $u_C(0) = -U_{Cmx} \cos \omega t_0$; $i(0) = I_{mx} \sin \omega t_0$. Составим характеристическое уравнение и определим его корни:

$$p^{2} + \frac{R}{L}p + \frac{1}{LC} = 0; \quad p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^{2}}{4L^{2}}} - \frac{1}{LC} = -\alpha \pm j\omega_{cB},$$

где α (1/c) – коэффициент затухания, а ω_{cB} (рад/с) – угловая частота собственных колебаний.

Так как сопротивление контура меньше критического ($R < R_c$), то корни характеристического уравнения — комплексно-сопряженные, а рассматриваемый переходный процесс имеет колебательный характер.

Решение для переходного напряжения на конденсаторе в общем виде находится в виде суммы установившейся (u_{Cycr}) и преходящей (u_{Cnpex}) составляющих:

$$u_C(t') = u_{Cycr} + u_{Cпреx} = -U_{Cmycr} \cos \omega(t' + t_0) + Ae^{-\alpha t} \sin(\omega_{cB}t' + \phi), B,$$
(5)
где $U_{Cmycr} = U_m/R\omega C.$

Рис. 5. Модель для анализа переходных процессов в цепи с ТОУ на базе каткона: (а) Эквивалентная расчетная схема замещения; (б) Системы глобального и локального времени.

Для определения постоянных *A* и ф учитываются найденные ранее ННУ. Дополнительное уравнение для производной:

$$\frac{du_C}{dt'} = \omega U_{Cmyct} \sin \omega (t' + t_0) - \alpha A \sin(\omega_{cB} t' + \phi) e^{-\alpha t'} + A \omega_{cB} \cos(\omega_{cB} t' + \phi) e^{-\alpha t'}, \text{ B/c.}$$
(6)

Значение напряжения на конденсаторе и производной в момент времени t' = 0:

$$u_C(0) = -U_{Cmyct} \cos \omega t_0 + A \sin \varphi, \mathbf{B}; \tag{7}$$

$$\frac{du_C}{dt'}\Big|_{t'=0} = \omega U_{Cmyct} \sin \omega t_0 - \alpha A \sin \varphi + A\omega_{cB} \cos \varphi, \ B/c.$$
(8)

Подставив в (7) и (8) ранее найденные ННУ, при этом учитывая, что $i(t') = C \frac{du_C}{dt'}$, получим:

получим.

$$-U_{Cmx}\cos\omega t_0 = -U_{Cmycr}\cos\omega t_0 + A\sin\varphi, \mathbf{B};$$
(9)

$$\frac{I_{m_{\rm X}}\sin\omega t_0}{C} = \omega U_{Cmycr}\sin\omega t_0 - \alpha A\sin\varphi + A\omega_{\rm cB}\cos\varphi, \ B/c.$$
(10)

Исходя из (9) и (10), запишем выражение для определения A и ϕ как функций от t_0 :

$$A(t_0) = \frac{(U_{CmycT} - U_{Cmx})\cos\omega t_0}{\sin\varphi} = (U_{CmycT} - U_{Cmx})\cos\omega t_0 \sqrt{1 + \left(\frac{\alpha}{\omega_{cB}} - \frac{\omega}{\omega_{cB}} tg\omega t_0\right)^2}, B; (11)$$

$$\varphi(t_0) = \operatorname{arcctg}\left(\frac{\alpha}{\omega_{_{CB}}} - \frac{\omega}{\omega_{_{CB}}} \operatorname{tg}\omega t_0\right), \,^{\circ}.$$
(12)

Тогда можно записать выражение для тока:

$$i(t,t_0) = \frac{U_m}{R_x} \sin \omega t - A(t_0) C \sqrt{\alpha^2 + \omega_{cB}^2} e^{-\alpha(t-t_0)} \sin \left[\omega_{cB}(t-t_0) + \varphi(t_0) + \psi \right], \text{ A.}$$
(13)

где $\psi = \operatorname{arctg}(-\omega_{cB}/\alpha)$.

Выражение для напряжения на конденсаторе будет иметь следующий вид:

$$u_C(t, t_0) = -U_{Cmyc_{\rm T}} \cos \omega t + A(t_0) e^{-\alpha(t-t_0)} \sin \left[\omega_{\rm c_B}(t-t_0) + \varphi(t_0) \right], \, \text{B}.$$
(14)

Таким образом, получено аналитическое выражение для тока в цепи и напряжения на конденсаторе с постоянными $A(t_0)$, $\phi(t_0)$ как функциями от момента коммутации t_0 (при $t \ge t_0$).

Далее представим результаты аналитического решения для переходного тока на входе ТОУ на базе каткона и переходных напряжений на конденсаторе и индуктивной катушке, учитывающие протекание переходных процессов до и после замыкания ключа К.

Выражение для тока до коммутации (*R*_x-*L*-*C*-цепь):

$$i(t) = I_{mx} \sin \omega t - \left[\frac{\omega}{\omega_{\text{CBX}}} I_{mx} e^{\alpha_x t} \sin(\omega_{\text{CBX}} t)\right], \text{ A.}$$
(15)

Выражение для тока после коммутации (*R*-*L*-*C*-цепь):

$$i(t,t_0) = \frac{U_m}{R}\sin\omega t + D_1(t_0)e^{\alpha(t-t_0)}\sin\left[\omega_{\rm CB}(t-t_0)\right] + D_2(t_0)e^{\alpha(t-t_0)}\cos\left[\omega_{\rm CB}(t-t_0)\right], \,\,\mathrm{A},$$
 (16)

где
$$D_1(t_0) = \frac{D(t_0)}{\omega_{cB}L} - \frac{I_{mX}\omega}{\omega_{cB}}\cos\omega t_0 - \frac{\alpha}{\omega_{cB}}D_2(t_0); D(t_0) = -U_C(t_0); D_2(t_0) = i(t_0) - \frac{U_m}{R}\sin\omega t_0.$$

Выражение для напряжения на конденсаторе до коммутации (R_x -*L*-*C*-цепь):

$$u_{C}(t) = -U_{CmycTx}\cos\omega t + A_{3}e^{\alpha_{x}t}\sin(\omega_{cBx}t) + A_{4}e^{\alpha_{x}t}\cos(\omega_{cBx}t), B,$$
(17)
$$\alpha_{x} = -U_{CmycTx}\cos\omega t + A_{3}e^{\alpha_{x}t}\sin(\omega_{cBx}t) + A_{4}e^{\alpha_{x}t}\cos(\omega_{cBx}t), B,$$
(17)

где $A_3 = \left(\frac{\alpha_x}{\omega_{\text{свx}}}\right) U_{Cmyctx}; A_4 = U_{Cmyctx}.$

Выражение для напряжения на конденсаторе после коммутации (*R*-*L*-*C*-цепь):

$$u_{C}(t,t_{0}) = -U_{Cmycr}\cos\omega t + A_{1}(t_{0})e^{\alpha(t-t_{0})}\sin(\omega_{cB}(t-t_{0})) + A_{2}(t_{0})e^{\alpha(t-t_{0})}\cos(\omega_{cB}(t-t_{0})), \text{ B},(18)$$

rge $A_{1}(t_{0}) = \frac{i(t_{0})}{\omega_{cB}C} - \frac{\omega}{\omega_{cB}}U_{Cmycr}\sin\omega t_{0} - \frac{\alpha}{\omega_{cB}}[U_{Cmycr}\cos\omega t_{0} - u_{C}(t_{0})];$
 $A_{2}(t_{0}) = U_{Cmycr}\cos\omega t_{0} + u_{C}(t_{0}).$

Выражения для напряжения на катушке до коммутации (R_x -*L*-*C*-цепь) и после коммутации (*R*-*L*-*C*-цепь) соответственно определяются с учетом найденных решений (15)—(18) для тока и напряжения на конденсаторе:

 $u_L(t) = U_m \sin \omega t - R_x i(t) - u_C(t)$ B; (19)

$$u_L(t,t_0) = U_m \sin \omega t - Ri(t,t_0) - u_C(t,t_0), \text{ B.}$$
(20)

В соответствии с полученными аналитическими решениями (15)–(20) на рис. 6 представлены результаты построения кривых переходного тока i(t), напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и напряжения на катушке $u_L(t)$ при подключении ТОУ на базе кат-кона (t = 0 мс) к источнику напряжения $u_m(t) = 0.45 \sin 1570t$ В и последующем замыкании его выходных выводов через ключ К на резистор R = 55.4 Ом ($t_0 = 50$ мс) с целью ограничения тока в цепи.

Следует отметить, что в условиях реальной работы ТОУ на базе каткона имеется возможным экспериментально наблюдать только входной ток ввиду того, что с конструктивной точки зрения каткон является единым техническим объектом, а конденсатор и катушка, изображенные на схеме рис. 5а, являются лишь эквивалентными элементами.

В рамках настоящей работы было также получено аналитическое решение для критического (предельно-апериодического) переходного процесса ($R = R_c$). При этом аналитическое решение, полученное для колебательного процесса [(5)–(20)], приводит к схожему результату для входного тока ТОУ на базе каткона (рис. 7).

Рис. 6. Кривые переходного тока i(t), напряжения на конденсаторе $u_C(t)$ и напряжения на катушке $u_L(t)$ при подключении ТОУ на базе каткона к источнику напряжения $u_m(t)$ (t = 0 мс) и последующем замыкании выходных выводов через ключ К на резистор $R(t_0 = 50$ мс).

На основе анализа полученных аналитических решений отметим, что при ограничении тока короткого замыкания оптимальным по уровню тока, напряжений и длительности протекания переходных процессов является момент коммутации, при котором мгновенная мощность на входе каткона равна нулю. Таким образом, применение предлагаемой математической модели (рис. 5а) позволяет корректно анализировать переходные процессы на входе рассматриваемого ТОУ при $R \approx R_c$, а также оптимизировать их протекание по критериям энергоэффективности и быстродействия за счет выбора момента коммутации.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТОКОГРАНИЧИВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА НА БАЗЕ КАКТОНА

Для проведения экспериментального исследования используется лабораторный комплекс, содержащий:

• источник синусоидального напряжения ИСН (амплитудное значение – $U_m = 0.45$ B; частота – $f \approx 250$ Гц);

• физическую модель каткона (рис. 8) с эквивалентными сосредоточенными параметрами: C = 22 мк Φ ; L = 18.4 мГн; $R_x = 3.6$ Ом; G = 0 (рассчитаны на основе [43]);

- коммутационный ключ с управляемым моментом коммутации (КК);
- измерительный резистор ($R_{\mu_{3M}} \approx 1 \text{ Om}$);
- резистор согласования (*R* ≈ 55 Ом);
- запоминающий цифровой осциллограф (ОСЦ).

Схема опыта представляет собой цепь, состоящую из последовательного соединения источника ИСН, измерительного резистора $R_{_{изм}}$ и физической модели каткона, которая подключается в цепь за счет соединения входных выводов H₁ секции C₁ и K₂ секции C₂ (рис. 2в) с источником и измерительным резистором. Резистор согласования *R* подключается к выходным выводам H₂ секции C₁ и K₁ секции C₂ (рис. 2в) физической модели через коммутационный ключ КК. Запоминающий цифровой осциллограф ОСЦ подключается параллельно к источнику ИСН и измерительному резистору $R_{изм}$ и фиксирует кривые напряжений $u_m(t)$ и $u_{Rизм}(t)$ соответственно. Характер изменения переходного тока в исследуемой цепи оценивается в соответствии со следующим выражением: $i(t) = u_m(t)/R_{изм}$.

Первоначально цепь настраивается в режим резонанса и рассматривается установившийся режим работы ТОУ при разомкнутых выходных выводах физической модели (непосредственно переходной процесс, возникающий при подключении каткона к

Рис. 7. Сравнение значений переходного тока в решениях для критического и колебательного переходных процессов при ненулевых начальных условиях: $i_{crit}(t, t_0)$ и $i_{osc}(t, t_0)$.

Рис. 8. Фотографии физических моделей каткона, используемых для проведения экспериментального исследования.

источнику, в опыте не рассматривается). Затем в момент времени t_0 для ограничения тока в рассматриваемой цепи осуществляется замыкание коммутационного ключа КК:

- в первом опыте выходные выводы модели замыкаются накоротко;
- во втором опыте к выходным выводам модели подключается резистор *R*.

Экспериментальные осциллограммы входного напряжения $u_m(t)$ и напряжения на измерительном резисторе $u_{Rизм}(t)$ для двух рассматриваемых опытов приведены на рис. 9 и рис. 10а. На рисунке 10б приведены теоретические кривые входного тока i(t) для второго опыта, построенные на основе приведенных ранее аналитических выражений.

Полученные экспериментальные и теоретические зависимости (рис. 9–10) свидетельствуют о следующем:

• в обоих опытах (рис. 9 и рис. 10a) обеспечивается ограничение тока в цепи за счет изменения граничных условий в физической модели устройства, что свидетельствует о работоспособности обеих функциональных схем ТОУ;

 подключение к выходным выводам ТОУ резистора согласования (второй опыт) позволяет повысить быстродействие устройства при ограничении тока в цепи и снизить проявление инерционности переходного процесса в режиме резонанса (рис. 10а);

Рис. 9. Экспериментальные осциллограммы входного напряжения $u_m(t)$ (сверху) и входного тока i(t) (снизу) при замыкании выходных выводов ТОУ на базе каткона накоротко при ограничении тока в цепи.

Рис. 10. Теоретические (а) и экспериментальные (б) кривые входного напряжения $u_m(t)$ и входного тока i(t) при подключении резистора согласования к выходным выводам ТОУ на базе каткона при ограничении тока в цепи.

• теоретическая кривая входного тока (рис. 10б) достаточно точно совпадает с экспериментальной кривой (рис. 10а), что свидетельствует о корректности полученного аналитического решения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Предложен новый принцип реализации устройства ограничения токов короткого замыкания на базе каткона. В сравнении с известными аналогами предлагаемое устройство имеет более простое схемотехническое решение и улучшенные массогабаритные показатели благодаря многофункциональному применению проводников и диэлектриков в едином техническом объекте. Использование в одном и том же устройстве режимов резонанса напряжений и режима согласования обеспечивает возможность компактного конструктивного исполнения токоограничивающего устройства.

2. Разработана математическая модель устройства ограничения токов короткого замыкания на основе каткона, базирующаяся на использовании расчетной синтезированной схемы замещения устройства с эквивалентными сосредоточенными параметрами и применении классического метода расчета переходных процессов. Отличительной особенностью модели является введение системы глобального и локального времени, а также возможность учета моментов изменения граничных условий в выражениях для постоянных интегрирования переходных напряжений и тока. Применение данной модели упрощает анализ переходных процессов в устройстве.

3. Получены аналитические решения для переходных напряжений и тока на интервалах короткого замыкания в цепи и режима ограничения тока короткого замыкания. Найденные в процессе решения постоянные интегрирования являются функциями моментов времени коммутаций как параметров, что упрощает исследование их влияния на переходный процесс. Определено условие для определения оптимального момента коммутации для ограничения тока короткого замыкания в цепи.

4. Результаты экспериментального исследования подтверждают работоспособность предлагаемой функциональной схемы ТОУ на базе каткона при ограничении токов короткого замыкания и корректность предложенной математической модели.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-08-00730 А.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Reeves R.* Choke-capacitor hybrid as a fluorescent-lamp ballast // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1975. V. 122. № 10. P. 1151–1152.
- 2. Kemp R.J., Murgatroyd P.N., Walker N.J. Self-resonance in foil inductors // Electronics Letters. 1975. V. 11. № 15. P. 337–338.
- Задерей Г.П. Многофункциональные магнитные радиокомпоненты // М.: Советское радио, 1980. 136 с.
- 4. Волков И.В., Закревский С.И. Преобразователь с распределенными параметрами для стабилизации тока в переменной нагрузке // Электричество. 1984. № 10. С. 40–43.
- 5. Демирчян К.С., Гусев Г.Г. Синтез схем замещения катушки индуктивности с самокомпенсацией реактивной мощности // Известия АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. 1987. № 2. С. 3–10.
- 6. *Tesla N*. Coil for electro-magnets. US Patent № 512340, cl. H01F41/098. 1894.
- 7. *Reeves R.* Inductor-capacitor hybrid // Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. 1975. V. 122. № 11. P. 1323–1326.
- Murgatroyd P.N., Walker N.J. Lumped-circuit model for inductor-capacitor hybrid // Electron. Lett. 1976. V. 12. P. 2–3.
- 9. Милях А.Н., Кубышин Б.Е., Волков И.В. Индуктивно-емкостные преобразователи источников напряжения в источники тока // Киев: изд-во Наукова думка, 1964. 299 с.
- Кашин Ю.А., Сибагатуллин Р.С., Тухватуллин Р.А., Хомяков И.М. Деконные системы преобразования электромагнитной энергии // Проблемы преобразовательной техники: тез. док. Всесоюз. науч.-техн. конф. Киев, 1983. 2 с.
- А.с. № 345601 СССР, МПК Н03К3/335. Генератор импульсов тока // Гейзер А.А., Чехлов В.Л., Чехлов Г.Л.; заявитель и патентообладатель НИИ ядерной физики, электроники и автома-

тики при Томском политехническом институте им. С.М. Кирова. № 1488149/26-9; заявл. 27.10.1970; опубл. 14.07.1972. Бюл. № 22.

- А.с. № 1492453 СССР, МПК Н03К3/53. Спиральный генератор импульсов напряжения // Конесев С.Г., Мельников В.И., Осинцев С.В., Тухватуллин Р.А.; заявитель патентообладатель УАИ им. Серго Орджоникидзе. № 4261577; заявл. 15.06.1987; опубл. 07.07.1989. Бюл. № 25.
- 13. *Кувалдин А.Б., Андрюшин Н.Ф., Захаров И.В.* Расчет электрических и энергетических параметров многослойного индуктора с самокомпенсацией реактивной мощности // Электричество. 1995. № 7. С. 47–53.
- 14. *Хазиева Р.Т.* Системы стабилизации тока на основе индуктивно-емкостных преобразователей: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Уфа, 2018. 190 с.
- Конесев С.Г. Многофункциональные интегрированные элементы для управляемых систем питания устройств специального назначения: дисс. канд. техн. наук: 05.09.03. УАИ, 1992. 182 с.
- Ehsani M., Stielau O.H., van Wyk J.D. Integrated reactive components in power electronic circuits // IEEE Trans. Power Electron. 1993. V. 8. P. 208–215.
- 17. Zhao L., Strydom J., van Wyk J. A planar multicell structure for advanced integrated reactive power modules // IEEE Transactions on Industry Applications. 2003. V. 39. № 6. P. 1656–1664.
- 18. *Liu W.* Alternative Structures for Integrated Electromagnetic Passives // Dissertation for PhD in Electrical Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006.
- Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Толчеев О.В., Шакирзянов Ф.Н., Кужман В.В. Катушка-конденсатор для фильтрокомпенсирующих устройств // Изв. РАН. Энергетика. 2013. № 4. С. 72–74.
- 20. А.с. 1683082 СССР. Электроиндукционное устройство, H01F27/28 // Волков И.В., Закревский С.И., Смолянский И.И.; заявитель и патентообладатель Институт электродинамики АН УССР. № 4708963/07; заявл. 22.06.1989; опубл. 07.10.1991. Бюл. № 37.
- 21. Neugebauer T.C., Phinney J.W., Perreault D.J. Filters and Components with Inductance Cancellation // IEEE Trans. on Ind. Applicat. 2004. V. 40. № 2. P. 483–491.
- 22. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В. Математическая модель фильтрокомпенсирующего устройства на основе катушки-конденсатора // Изв. РАН. Энергетика. 2014. № 2. С. 130–135.
- 23. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В., Михеев Д.В. Математическое и физическое моделирование фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона // Электричество. 2014. № 11. С. 58–62.
- 24. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н. Математическая модель фильтрокомпенсирующих устройств на основе гармонической линеаризации характеристики магнитопровода каткона // Вестник МЭИ. 2015. № 5. С. 79–84.
- 25. Патент 128033 Российская Федерация, МПК Н02Ј 3/01 (2006.01). Фильтрокомпенсирующее устройство // Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Кужман В.В., Толчеев О.В., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО "НИУ "МЭИ". № 2012145928/20; заявл. 29.10.2012; опубл. 10.05.2013. Бюл. № 13.
- 26. Конесев С.Г., Хазиева Р.Т. Математическое и физическое моделирование индуктивно-емкостных преобразователей // Электричество. 2020. № 1. С. 32–38.
- 27. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н. Катушка-конденсатор для индуктивно-емкостного преобразователя // Известия РАН. Серия физическая. 2018. Т. 82. № 8. С. 1017–1022.
- 28. Захаров И.В. Развитие теории, разработка методов и средств повышения эффективности индукторов с самокомпенсацией реактивной мощности: автореферат дисс. докт. техн. наук: 05.09.10. Алматы, 2007. 41 с.
- Ижикова А.Д. Индукторы с самокомпенсацией реактивной мощности систем электроснабжения электротехнологического назначения: дисс. ... канд. техн. наук: 05.09.03. Челябинск, 2007. 172 с.
- 30. Патент 2660177 Российская Федерация, МПК Н02Н 9/02 (2006.01). Устройство ограничения токов короткого замыкания // Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Сиренко В.В., Шакирзянов Ф.Н., заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ". № 2017131883; заявл. 12.09.2017, опубл. 05.07.2018. Бюл. № 19.
- 31. Mikheev D.V., Ryzhkova Y.N., Udaratin A.V., Salikhova R. Experimental study of the operating modes of the resonant current-limiting device // E3S Web of Conferences. V. 220 (2020). Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020). Saint-Petersburg, Russia, October 29–30, 2020. Art. № 01049. P. 1–5.
- 32. *Murgatroyd P.N.* Field and circuit models for the wound foil inductor // Electrocomponent Sci. Technol. 1976. V. 3. № 2. P. 97–102.
- Zhao L. Generalised Frequency Plane Model of Integrated Power Electromagnetic Power Passives // Dissertation for PhD in Electrical Engineering. Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004.
- 34. Демирчян К.С., Димитренко Б.И., Гусев Г.Г., Ефременко А.Л. Анализ согласования устройств с самокомпенсацией реактивной мощности // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. 1991. № 3. С. 47–53.
- 35. Кувалдин А.Б., Утегулов Б.Б., Захаров И.В., Ижикова А.Д. Анализ потерь активной мощности в многослойном индукторе с самокомпенсацией реактивной мощности // Электричество. 2005. № 2. С. 53–56.

- 36. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Сиренко В.В., Шакирзянов Ф.Н. Разработка математической модели и анализ особенностей режимов индуктивно-емкостного преобразователя на основе каткона // Вестник МЭИ. 2018. № 4. С. 81–88.
- 37. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Карпунина М.В., Кваснюк А.А., Шакирзянов Ф.Н. Моделирование переходных процессов в катушке-конденсаторе при импульсном воздействии // Изв. РАН. Энергетика. 2019. № 1. С. 109–122.
- 38. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н., Кваснюк А.А. Экспериментальное исследование переходных процессов в катушке-конденсаторе // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 2. С. 157–160.
- 39. Бутырин П.А., Михеев Д.В., Гусев Г.Г., Шакирзянов Ф.Н., Карпунина М.В. Математическое и физическое моделирование нестационарных электромагнитных процессов в элементах с самокомпенсацией реактивной мощности // Известия РАН. Серия физическая. 2020. Т. 84. № 5. С. 755–760.
- 40. *Михеев Д.В.* Математическое и физическое моделирование электротехнических комплексов на основе каткона (катушки-конденсатора): дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. М., 2019. 217 с.
- 41. Александров Г.Н., Смоловик С.В. Переходные процессы в сетях с резонансным токоограничивающим устройством // Электричество. 2002. № 1. С. 15–19.
- 42. Butyrin P.A., Gusev G.G., Mikheev D.V., Shakirzianov F.N. Coil-capacitor as a basis for creating efficient devices for distribution power networks // Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems NEIS 2018. September 20–21, 2018, Hamburg, Germany. P. 173–178.
- 43. Бутырин П.А., Гусев Г.Г., Михеев Д.В., Шакирзянов Ф.Н. Идентификация математической модели фильтрокомпенсирующего устройства на основе каткона с учетом нелинейной характеристики магнитопровода // Электричество. 2017. № 10. С. 55–60.

Fast Acting Short-Circuit Current Limiting Device Based on a Coil-Capacitor

P. A. Butyrin^{*a*}, *, G. G. Gusev^{*a*}, D. V. Mikheev^{*a*}, *b*, M. V. Karpunina^{*a*}, ^{*b*}, A. A. Kvasniuk^{*a*}, and F. N. Shakirzianov^{*a*}

^aNational Research University "MPEI", Moscow, Russia

^bBauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

*e-mail: ButyrinPA@mpei.ru

The paper presents the results of a study of transient processes when short-circuit currents are limited by a device based on a coilcap (coil-capacitor). The proposed current-limiting device (CLD) has a compact design and improved weight and dimensions in comparison with standard resonant CLD. The mathematical model based on the use of a synthesized equivalent circuit with equivalent lumped parameters and concepts of global and local time of CLD based on a coilcap for the analysis of transient processes is developed. An analytical solution is obtained for transient voltages and currents with a jump-like change in the boundary conditions at the output of a CLD based on a coilcap taking into account losses in the resonance mode with a resistive matched load. Expressions for integration constants in found solutions are functions of the switching moments and allow to set optimal switching moments to achieve the required speed of the device and reduce the surge current. On the basis of the analytical solution oscillatory and critical transients of the short-circuit current limitation are analyzed. The observance of the commutation laws is established and found values are compared with values received in the alternative construction of the solution from obtained results. The results of an experimental study of transient processes in a physical model of CLD based on a coilcap are presented. The correctness of the mathematical model and the reliability of obtained analytical solutions are confirmed by the coincidence of theoretical calculations and experimental data.

Keywords: coil-capacitor, coilcap, transient process, short-circuit currents, current-limiting device, high-speed performance

УДК 620.92

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИБРИДНОГО ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА, В СОСТАВ КОТОРОГО ВХОДЯТ НЕТРАДИЦИОННЫЕ И ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ РАЗНЫХ ТИПОВ

© 2021 г. Н. Н. Баранов^{1, *}, К. В. Крюков^{2, **}

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, Москва, Россия

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский университет "Московский энергетический институт", Москва, Россия

> *e-mail: nsmppve@iht.mpei.ac.ru **e-mail: jun7@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.04.2021 г. После доработки 03.08.2021 г. Принята к публикации 06.08.2021 г.

Решается актуальная научно-практическая задача современной энергетики, нацеленная на разработку универсальных гибридных электроэнергетических комплексов на основе нетрадиционных и возобновляемых источников энергии разных типов.

Ключевые слова: гибридная энергетическая установка, система автоматического управления, алгоритмы режимов работы

DOI: 10.31857/S0002331021040038

введение

Специалисты ОИВТ РАН и НИУ "МЭИ" в рамках проекта РФФИ ведут разработку интеллектуального гибридного электроэнергетического комплекса (ГЭК), в состав которого могут входить нетрадиционные и возобновляемые источники энергии разных типов.

Актуальность проекта определяется необходимостью развития и совершенствования автономной и распределенной энергетики, поскольку в связи с географическими особенностями нашей страны примерно 2/3 ее территории не охвачены сетями электропередач и находятся в зонах децентрализованной энергетики. В этих зонах значительная часть потребителей питается от дизель-генераторных установок (ДГУ), потребляющих дорогое дизельное топливо.

Именно в таких районах наиболее эффективно построение современного энергообеспечения с привлечением местных энергоресурсов, а также возобновляемых источников энергии (ВИЭ), среди которых наиболее доступными являются ветровая и солнечная виды энергии, преобразуемые в электроэнергию с помощью ветроэнергетических установок (ВЭУ) и фотоэлектрических генераторов (ФЭГ).

Проект имеет фундаментальный характер и нацелен на получение новых знаний, необходимых для разработки единой по структуре и составным частям гибридной системы децентрализованного энергоснабжения, реализуемой на основе разнородных энергоустановок.


Рис. 1. Гибридный энергетический комплекс на базе фотоэлектрической, ветроэнергетической и дизель-генераторной установок.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

При совместном использовании фотоэлектрического генератора (ФЭГ) и ветроэнергетической установки (ВЭУ) для электропитания потребителей и при одновременном введении в эту систему дизель-генераторной установки (ДГУ) формируется гибридный энергетический комплекс (ГЭК), обеспечивающий потребителей электроэнергией при любых отклонениях в режимах ВИЭ (рис. 1).

В литературе приводятся структурные схемы отдельных ГЭК, однако описания и алгоритмы функционирования систем управления таких комплексов, как правило, отсутствуют.

Алгоритмы и программы для микропроцессоров, входящих в состав систем управления преобразователями, являются коммерческой тайной фирм-изготовителей. Это обстоятельство затрудняет использование зарубежного опыта при разработке перспективных ГЭК, и вместе с тем стимулирует отечественные разработки импортозамещающих электротехнических устройств (в первую очередь силовых полупроводниковых преобразователей), обеспечивающих функционирование автономных энергокомплексов, реализуемых на базе разнородных первичных источников энергии.

Следует заметить, что полупроводниковые преобразовательные устройства (ППУ) являются основным структурным звеном в системах электроснабжения, использующих нетрадиционные и возобновляемые источники энергии разных типов. На них возлагаются функции регуляторов тока и напряжения, защиты источника и потребителя при возникновении аварийных ситуаций, обеспечение требуемого качества электроэнергии. При комбинированных схемах электроснабжения они согласуют выходные параметры автономного энергоисточника с сетью промышленной частоты. Именно с полупроводниковым преобразователем на выходе первичный источник энергии (будь то фотоэлектрический генератор, ветроэнергетическая установка или иной другой) представляет собой автономный блок энергоснабжения. Выбор оптимального преобразователя для конкретного источника (с обеспечением их электромагнитной совместимости) позволяет значительно повысить эффективность, качество и надежность энергоснабжения потребителей постоянным или переменным током.



Рис. 2. Схема электроснабжения с нетрадиционным энергоисточником и полупроводниковыми преобразовательными устройствами: ППУ1, ППУ2, ППУ3 – преобразовательные устройства; ППТ – преобразователь постоянного тока в постоянный; И – инвертор; ПЧ – преобразователь частоты; АБ – аккумуляторная батарея; Н₁, H₂, H₃ – распределенные потребители (нагрузка); АБЭ – автономный блок электроснабжения.

На рис. 2 схематично показаны различные типы силовых преобразовательных устройств, используемых в составе с нетрадиционными энергоустановками.

Как видно из рис. 2, в зависимости от рода тока, потребляемого нагрузкой, преобразовательное устройство может быть выполнено в виде инвертора с заданной частотой переменного тока на выходе или в виде конвертора – преобразователя постоянного тока в постоянный (ППТ) с варьированием (повышением или понижением) уровня напряжения.

Анализ показал, что при всем многообразии существующих силовых преобразовательных устройств, разрабатываемых в основном для различных технических приложений традиционной электротехники, для оптимального функционирования комбинированных блоков электропитания необходимо разрабатывать новые ППУ, учитывающие особенности работы возобновляемых источников энергии в их составе.

Требования к новым полупроводниковым преобразователям, предназначенным для работы с нетрадиционными источниками энергии (НИЭ), следующие:

– большая кратность уровня выходного напряжения по отношению к входному;

- высокий КПД;
- широкий диапазон изменения входного напряжения;
- малые пульсации выходного тока;
- малые габариты;

 возможность селективного отключения аварийного потребителя при многонагрузочной системе энергоснабжения.

Одновременно с перечисленными требованиями при разработке новых ППУ могут решаться следующие технические задачи:

получение максимальной мощности в рабочей точке;

 – обеспечение заданного графика нагружения нескольких НИЭ с различным уровнем выходного напряжения;

 обеспечение запуска системы управления при минимальном входном напряжении и подключенной нагрузке;

- уменьшение количества элементов преобразователя.

Сформулированным требованиям удовлетворяет ряд разработанных электрических схем преобразователей, предназначенных для работы с ВИЭ в составе ГЭК, на которые были получены патенты РФ [1-3].

Разработанные и запатентованные импульсные преобразователи могут повышать напряжение источника питания в 10 и более раз. При этом КПД ППУ достигает 85–95% в зоне длительной работы. Пульсации тока возможны на уровне от 0.01% до 0.5%.



Рис. 3. Разработанная структурная схема гибридного энергетического комплекса, использующего возобновляемые источники энергии.

Компьютерное моделирование электромагнитных процессов в разработанных ППУ с помощью программ MATLAB продемонстрировало их преимущества в сравнении с известными электротехническими аналогами.

При построении гибридного энергокомплекса на базе ВИЭ необходимо решить электротехническую задачу обеспечения эффективной совместной работы всех разнородных первичных энергоисточников, входящих в его состав. Фотоэлектрический генератор вырабатывает постоянный ток, ветроэнергетическая и дизель-генераторная установки поставляют в энергокомплекс трехфазный ток. Сложные электромагнитные процессы, сопровождающие совместную работу трех энергоисточников (особенно при переходе нагрузки с одного источника питания на другой), многократно усложняют систему управления и регулирования гибридного энергокомплекса и понижают ее надежность.

Задача обеспечения совместной работы трех разнородных источников питания упрощается при введении в ГЭК накопителя энергии в виде аккумуляторной батареи (АБ). В структурной схеме с накопителем нагрузка питается от аккумулятора однофазным или трехфазным переменным напряжением, вырабатываемым инвертором, который должен также обеспечивать стабильное напряжение переменного тока стандартного качества на выходе из системы энергоснабжения. Связь ФЭП с АБ осуществляется с помощью преобразователя постоянного тока (ППТ), а связь ВЭУ и ДГУ с аккумуляторной батареей – с помощью управляемых выпрямителей (рис. 3).

Одной из ключевых научно-технических задача при проектировании (и тиражировании) комбинированных систем энергоснабжения для конкретных условий эксплуатации является разработка системы автоматического управления и набора алгоритмов для ведения требуемых (заранее задаваемых) режимов работы ГЭК.

В качестве примера рассмотрим систему комбинированного электроснабжения с использованием фотоэлектрических генераторов (солнечных батарей) [4].



Рис. 4. Схема электроснабжения с ФЭП (солнечными батареями).

Для согласования выходных параметров фотоэлектрических преобразователей и входных параметров потребителей электроэнергии была предложена наиболее перспективная схема электроснабжения, представленная на рис. 4.

В этой схеме преобразователь постоянного тока в постоянный построен по **топологии мультиконвертера**. В каждый модуль фотоэлектрического преобразователя (ФЭП) встроен регулятор постоянного тока, далее регуляторы соединяются последовательно между собой для формирования шины высокого напряжения постоянного тока. Шина постоянного тока соединяется с сетью переменного тока при помощи инвертора (И). В системе электропитания предусмотрена аккумуляторная батарея **АБ**.

Последовательное включение преобразователей постоянного тока, работающих от модулей ФЭП, имеет следующие преимущества:

контроль точки максимальной мощности для каждого модуля;

– большая эффективность при работе с частично затененной солнечной батареей.

Основным достоинством этой топологии является реализация отбора максимальной мощности от ФЭП (например, от частично затененной солнечной батареи).

Здесь **инвертор (И)** выполнен по трехфазной мостовой схеме на полностью управляемых полупроводниковых приборах и выполняет следующие функции:

- генерирование активной мощности в сеть и в нагрузку;

- компенсацию реактивной мощности;
- фильтрацию высших гармоник тока.

Для данной схемы электроснабжения была предложена **система управления** (рис. 5), в которой можно выделить три структурных составляющих:

– контроллер рабочей точки с максимальной мощностью – МРР (от англ. – Maximum Power Point);

- контроллер режимов работы системы;

- устройство управления инвертором.

Контроллер МРР – обеспечивает отбор максимальной мощности от ФЭП и поддерживает требуемое значение напряжения на шине постоянного тока.

Устройство управления инвертором И – осуществляет регулирование режимов работы инвертора, обеспечивая компенсацию реактивной мощности сети, фильтрацию токов высших гармоник, а также передачу избыточной активной мощности в сеть или на нагрузку.

Контроллер режимов работы регулятора — осуществляет слежение за состоянием системы и обеспечивает основные режимы работы: автономный или режим работы от сети.



Рис. 5. Система управления.

Структурные схемы распределения потоков мощности при различных режимах работы системы электроснабжения с ФЭП (рис. 4) приведены на рис. 6.

— Автономный режим работы (рис. 6а). В этом режиме мощность, генерируемая $\Phi \Im \Pi$, используется для питания нагрузки $P_{\text{нагр}}$ и для подзарядки $P_{\text{зар}}$ аккумуляторных батарей *АБ*. В ночное время или когда мощность, генерируемая $\Phi \Im \Pi$ мала, питание нагрузки осуществляется от аккумуляторных батарей.

– Режим работы от сети (рис. 6б). При подключении нагрузки к сети инвертор переходит в режим компенсации реактивной мощности Q, повышая соѕф сети и обеспечивая синусоидальность потребляемого нагрузкой тока. Одновременно производится подзарядка аккумуляторной батареи AБ.

Разработанная схема комбинированного электроснабжения позволяет обеспечивать качественное и бесперебойное питание потребителей при использовании нетрадиционных источников энергии — солнечных батарей.

При построении системы управления гибридного энергокомплекса, содержащего наряду с ФЭП, также ВЭУ и ДГУ (схематически изображенного на рис. 3), ее целесообразно разбить на несколько локальных контроллеров (осуществляющих управление отдельными источниками) и один глобальный контроллер, осуществляющий выбор режимов работы ГЭК.

В общем случае, основные задачи для системы управления ГЭК можно сформулировать следующим образом:

• Снижение времени работы дизель-генераторной установки (экономия органического топлива);

• Отбор максимальной мощности от первичных источников (ВИЭ);

• Снижение энергопотребления нагрузки (уменьшение доли энергии, поступающей в нагрузку из сети);

• Сброс избыточной энергии при работе в автономном режиме (в аккумулятор или в сеть);



Рис. 6. Структурные схемы потоков мощности при работе системы комбинированного электроснабжения: (а) автономный режим работы (от ФЭП); (б) режим работы от сети.

• Стабилизация напряжения на нагрузке и обеспечение потребителей электроэнергией высокого качества.

Компьютерная модель гибридного энергокомплекса, включающая систему автоматического управления первичными источниками энергии — фотоэлектрической, ветроэнергетической и дизель-генераторной установками, представлена на рис. 7.

Компьютерное моделирование системы управления гибридного энергокомплекса позволило выбрать оптимальные комбинации режимов работы первичных источни-ков энергии – ФЭП, ВЭУ, ДГУ, а также силовых преобразовательных устройств, с учетом их электромагнитной совместимости.

При построении алгоритмов управления преобразователями в составе ГЭК были выделены частные цели для каждого из контроллеров.

Контроллер фотоэлектрической установки (ФЭУ):

- Работа в точке максимальной мощности;
- Стабилизация напряжения в звене постоянного тока.

Контроллер ветроэнергетической установки (ВЭУ):

- Работа в точке максимальной мощности;
- Стабилизация напряжения в звене постоянного тока.



Рис. 7. Разработанная компьютерная модель гибридного энергокомплекса.

Контроллер дизель-генераторной установки (ДГУ):

Стабилизация напряжения в звене постоянного тока (покрытие дефицита мощности в автономном режиме).

Контроллер инвертора:

- Стабилизация напряжения на нагрузке (автономный режим);
- Стабилизация напряжения в звене постоянного тока (работа с сетью);
- Повышение качества электроэнергии (при подключении к сети).

Центральный контроллер:

– Выбор режима работы.

В общем случае управление ГЭК осуществляется от центрального контроллера, который задает режимы работы локальных контроллеров, связанных с преобразователями различных первичных источников энергии. Функцией центрального контроллера является сбор информации от различных источников энергии и выбор режима управления потоками энергии от этих источников.

На рис. 8 представлена характерная структура алгоритмов управления при работе ГЭК в разных режимах: в автономном режиме (без связи с внешней электросетью), а также совместно с сетью.

Обозначения. Statechart – диаграмма состояний: Psum – текущая суммарная выходная мощность ФЭУ и ВЭУ; Pmax – максимальная требуемая мощность нагрузки; Pmin – минимальная допустимая мощность нагрузки.

Описание состояний: NormMode — нормальный режим работы; OverPow — работа с избытком мощности ФЭУ и ВЭУ; LowPow — работа с дефицитом мощности ФЭУ и ВЭУ.

РАССМОТРИМ АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИ РАБОТЕ ГЭК В АВТОНОМНОМ РЕЖИМЕ

В номинальном режиме работы ГЭК питание нагрузки осуществляется только за счет возобновляемых источников энергии (ВИЭ). ФЭУ работает в режиме отбора максимальной мощности, а ВЭУ работает в режиме стабилизации напряжения в звене постоянного тока. Инвертор при этом осуществляет функцию поддержания напряжения на нагрузке. ДГУ находится в отключенном состоянии.



Рис. 8. Алгоритмы управления гибридного энергокомплекса.

В режиме работы с избытком мощности ВЭУ и ФЭУ питание нагрузки осуществляется только за счет ВИЭ. ФЭУ и ВЭУ работают в режиме стабилизации напряжения в звене постоянного тока. Инвертор при этом осуществляет функцию поддержания напряжения на нагрузке. ДГУ находится в отключенном состоянии.

В режиме работы с дефицитом мощности ВЭУ и ФЭУ питание нагрузки осуществляется как за счет ВИЭ, так и за счет ДГУ. ФЭУ и ВЭУ работают в режиме отбора максимальной мощности. ДГУ переходит во включенное состояние и находится в режиме стабилизации напряжения звена постоянного тока. Переход в этот режим осуществляется, если напряжение на шине постоянного тока опускается ниже значения Vmin (соответствует Pmin). При повышении суммарной выходной мощности ФЭУ и ВЭУ выше Pmin, ГЭК переходит в нормальный режим. Инвертор при этом осуществляет функцию поддержания напряжения на нагрузке.

При совместной работе ГЭК с внешней электросетью — также можно выделить три характерных режима работы: номинальный режим; работа с избытком мощности ВЭУ и ФЭУ; работа с недостатком мощности ВЭУ и ФЭУ.

Номинальный режим. В этом режиме величина мощности, отдаваемой в сеть, ограничена, так как энергия, генерируемая ВИЭ, потребляется собственной нагрузкой ГЭК. Величина передаваемой в электросеть мощности может определяться исходя из условий договора на поставку электроэнергии или исходя из необходимости снижения нагрузки на энергосистему, например, в часы пикового энергопотребления. В номинальном режиме ФЭУ работает в точке максимальной мощности (TMM), а ВЭУ работает с учетом того, чтобы покрыть разницу между возможностями ФЭУ и требуемым для нагрузки значением мощности. При повышении мощности генерируемой ВИЭ до значения Ртах, подключаются балластные резисторы на выходах ВИЭ, либо система ГЭК переходит в режим работы с избытком мощности. Инвертор работает в режиме стабилизации напряжения на шине постоянного тока, а также выполняет роль кондиционера сети, повышая качество электроэнергии в точке подключения. ДГУ в этом режиме остается незадействованной.

Работа с избытком мощности ВЭУ и ФЭУ. В этом режиме в сеть передается максимально возможное количество энергии, вырабатываемой первичными энергоисточниками. Фотоэлектрическая и ветроэнергетическая установки работают в режиме поиска точки максимальной мощности (TMM). Инвертор осуществляет стабилизацию напряжения на шине постоянного тока, а также выполняет роль кондиционера сети, повышая качество электроэнергии в точке подключения. Дизель-генераторная установка находится в отключенном состоянии.

Работа с дефицитом мощности ВЭУ и ФЭУ. В этом режиме нагрузка гибридного энергокомплекса получает энергию как от ВЭУ и ФЭУ, так и от сети переменного тока. Сетевой инвертор работает в режиме стабилизации напряжения в точке подключения ГЭК и в режиме кондиционера сети. Для повышения эффективности ГЭК управление ФЭУ и ВЭУ осуществляется с учетом поиска и работы в точке максимальной мощности. ДГУ находится в отключенном состоянии.

выводы

Научно-прикладная значимость проводимых исследований и разработок заключается в создании теоретически обоснованной методологии построения структурных схем гибридных энергокомплексов в диапазоне мощностей от 1 до 100 кВт (наиболее востребованном распределенными потребителями), разработке алгоритмов управления различными структурами ГЭК в разных погодно-климатических условиях и методики выбора силовых полупроводниковых преобразователей, осуществляющих это управление [5].

Интеллектуальные электроэнергетические комплексы с использованием ВИЭ позволят обеспечивать надежным, бесперебойным энергоснабжением огромные территории РФ, не охваченные централизованным электроснабжением.

В то же время, при наличии в регионе размещения ГЭК линии электропередачи, разрабатываемая система управления ГЭК предусматривает возможность параллельной работы ГЭК с местной электросетью 380/220 В.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 19-08-00018.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Антонов Б.М., Баранов Н.Н. Универсальный преобразователь постоянного тока в постоянный. Патент РФ на полезную модель № 81013 от 27.02.2009.
- 2. Антонов Б.М., Баранов Н.Н. Преобразователь постоянного тока в постоянный с магнитносвязанными индуктивностями. Патент РФ на полезную модель № 89786 от 10.12.2009.
- 3. *Антонов Б.М., Баранов Н.Н.* Преобразователь постоянного тока в постоянный ток. Патент РФ на полезную модель № 102439 от 27.02.2011.
- 4. *Баранов Н.Н.* Нетрадиционные источники и методы преобразования энергии. М., Изд. дом МЭИ, 2012 г., 386 с.
- 5. Антонов Б.М., Баранов Н.Н., Крюков К.В., Розанов Ю.К. Гибридная система децентрализованного электроснабжения, реализуемая на основе возобновляемых источников энергии разных видов. // Электричество. 2018. № 1. С. 8–13.

Development of a Control System for a Hybrid Electric Power Complex, Which Includes Non-Traditional and Renewable Energy Sources of Various Types

N. N. Baranov^{*a*}, * and K. V. Kryukov^{*b*}, **

^aJoint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia ^bNational Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia *e-mail: nsmppve@iht.mpei.ac.ru **e-mail: jun7@yandex.ru

An urgent scientific and practical problem of modern energy is being solved, aimed at the development of universal hybrid electric power complexes based on non-traditional and renewable energy sources of various types.

Keywords: hybrid power plant, automatic control system, operating mode algorithms

УДК 629.786

ОСОБЕННОСТИ ОТКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ КАПЕЛЬ В БЕСКАРКАСНЫХ СИСТЕМАХ ОТВОДА НИЗКОПОТЕНЦИАЛЬНОГО ТЕПЛА В КОСМОСЕ

© 2021 г. А. А. Сафронов^{1, *}, А. А. Коротеев², А. В. Хлынов¹, Н. И. Филатов¹, А. Л. Григорьев¹

¹Акционерное общество Государственный научный центр Российской Федерации "Исследовательский центр имени М.В. Келдыша" (АО ГНЦ "Центр Келдыша"), Москва, Россия

² Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

*e-mail: a.a.safr@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.03.2021 г. После доработки 02.08.2021 г. Принята к публикации 06.08.2021 г.

Экспериментально и теоретически исследованы закономерности отключения генераторов капель в бескаркасных системах отвода низкопотенциального тепла в космосе. Показано, что определяющим механизмом, приводящим к формированию пленки жидкости на поверхности генератора, является расширение пузырей газа, присутствующих в гидросистеме. Предложена методика расчета времени остановки генератора и объема пленки, формируемой на его поверхности.

Ключевые слова: капельный холодильник-излучатель, генератор капель

DOI: 10.31857/S0002331021040129

Решение ряда задач, связанных с освоением космического пространства, требует значительного повышения мощности энергетических установок космических аппаратов. Для отвода низкопотенциального тепла, как правило, используются панельные холодильники—излучатели. С увеличением мощности площадь их поверхности, масса и метеоритная уязвимость быстро возрастают. Выходом представляется использование капельного холодильника—излучателя (КХИ), основанного на радиационном остывании специальным образом сформированного капельного потока [1] с последующим его улавливанием и замыканием гидравлического контура.

При включении и отключении генератора капель КХИ на его внешней поверхности формируется пленка жидкости, препятствующая ее истечению при повторном включении. Объем пленки не может быть возвращен в гидравлическую систему излучателя, а исследование ее формирования является актуальной задачей, решение которой необходимо для всестороннего понимания закономерностей функционирования КХИ.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассматриваются генераторы, создающие капли методом вынужденного капиллярного распада струй (рис. 1) вакуумного масла ВМ1-С, истекающего через капиллярные каналы длиной *I*, значительно превышающей их радиус *r*. Для описания расходной характеристики генератора использован закон Пуазейля:



Рис. 1. Гидросистема КХИ: *1* – емкость с рабочим телом; *2* – насос; *3* – электрогидроклапан; *4* – трубопровод; *5* – генератор капель; *6* – струи рабочего тела.

$$q = -n\frac{\pi r^4}{8\mu l}P = -\alpha P,\tag{1}$$

где q – объемный расход рабочего тела через каналы n каналов; μ – динамическая вязкость жидкости; P – давление во внутреннем объеме генератора; α – характеристика, определяемая соотношением (1). В дальнейшем принято n = 7; 2r = 0.5 мм; l = 12 мм.

При малых расходах из-за действия капиллярных сил справедливость (1) нарушается. Считалось, что при понижении давления до величины

$$P_{\rm K} = \frac{2\sigma}{r} \sim 10^{-3} \text{ atm.},\tag{2}$$

где σ – поверхностное натяжение, истечение жидкости из генератора прекращается. Формирование струй прекращается при скорости жидкости меньше V_{\min} , достаточной для преодоления капиллярных сил [2, 3]:

$$\frac{\sigma}{r} = \frac{\rho V_{\min}^2}{2}.$$
(3)

В рассматриваемом случае $V_{\min} \approx 0.25$ м/с. Согласно (1), такой скорости соответствует давление во внутреннем объеме генератора

$$P_* = \frac{8\mu l}{r^2} \sqrt{\frac{2\sigma}{r\rho}}.$$
(4)

При температуре 70°С – $P_* \approx 0.25$ атм., а при 18°С – $P_* \sim 1.5$ атм.

Рабочее тело подается в генератор насосом через трубопровод длиной L = 3 м. Суммарный объем трубопровода и генератора равен V_0 . Из экспериментальных наблюдений следует, что после перекрытия клапана 3 истечение жидкости из генератора продолжается некоторое время с уменьшением скорости до V_{\min} . В дальнейшем жидкость формирует пленку на поверхности фильеры генератора. Процесс прекращается при снижении давления в генераторе до P_{κ} .

В работе экспериментально и теоретически исследованы закономерности изменения давления в генераторе, а также зависимость объема пленки от параметров работы КХИ.

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Предполагается, что давление жидкости постоянно по длине питающего трубопровода и объему генератора капель. Вследствие поджатия объем жидкости в трубопроводе уменьшается на величину δV :

$$\delta V = \frac{P}{\rho c^2} V_0,\tag{5}$$

где c – скорость звука в жидкости. Если внутренний радиус трубы равен 4 мм, $V_0 \sim 1.5 \times 10^5$ мм³. При $P \sim 1$ атм. $\delta V \sim 10$ мм³. Изменение количества вещества за счет некоторого расширения трубопровода оказывается пренебрежимо малым.

В момент времени t = 0 клапан 3 (рис. 1) мгновенно закрывается, после чего жидкость может вытекать только через капиллярные отверстия фильеры генератора капель. Поскольку сжатие происходит линейно, зависимость δV от давления можно представить в виде:

$$P = P_0 \frac{\delta V}{\delta V_0},\tag{6}$$

где δV_0 — уменьшение объема жидкости при давлении P_0 . Дифференциальное уравнение, характеризующее уменьшения объема жидкости, имеет вид:

$$\dot{\delta V} = -n \frac{\pi r^4}{8\mu l} P_0 \frac{\delta V}{\delta V_0}.$$
(7)

Считая, что

$$\tau_0 = \frac{8\mu l}{n\pi r^4} \frac{1}{\rho c^2} V_0 \tag{8}$$

можно получить:

$$\delta V = -\frac{1}{\tau_0} \delta V. \tag{9}$$

Выражение для расчета τ_0 также можно записать в виде

$$\tau_{\rm o} = \frac{V_0}{q_0} \frac{P_0}{\rho c^2} = \frac{V_0}{\alpha \rho c^2},\tag{10}$$

где q_0 – расход через генератор капель при давлении P_0 .

Из представленных соотношений следует, что при остановке генератора давление в нем меняется по закону

$$P(t) = P_0 \exp\left(-t/\tau_0\right). \tag{11}$$

При температуре рабочего тела 70°С и скорости истечения из генератора 2 м/с, $\tau_o \approx 2 \times 10^{-3}$ с. По порядку величины это значение совпадает со временем, необходимым звуковой волне для распространения от клапана до генератора. Если температура рав-



Рис. 2. Зависимости давления от времени для различных значений объема пузырей газа в трубопроводе.

на 18°C $\tau_0 \approx 2 \times 10^{-2}$ с. Согласно (11), при выключении формирование пленки начинается через $t \approx 1.5 \tau_0$. К этому моменту в трубопроводе останется объем рабочего тела

$$\delta V = \delta V_0 e^{-1.5} \approx 0.2 \delta V_0. \tag{12}$$

Считая, что $\delta V_0 \approx 15 \text{ мм}^3$, нетрудно получить объем пленки $\delta V \approx 3 \text{ мм}^3$. На одно капиллярное отверстие приходится ~0.5 мм³ избыточной жидкости, соответствующий объему сферической капли радиусом ~0.5 мм.

Если при давлении P_0 в трубопроводе присутствуют пузыри газа суммарным объемом V_b , при истечении жидкости за счет их изотермического расширения, давление изменяется по закону

$$P(t) = P_0 \left(1 + \frac{2\alpha P_0}{V_b} t \right)^{-1/2} = P_0 \left(1 + \beta t \right)^{-1/2}.$$
(13)

Когда истечение жидкости из генератора происходит за счет совместного расширения пузырей и поджатой жидкости, уравнение состояния среды описывалось соотношением

$$\delta V(P) = \frac{V_b P_0}{P} - \frac{V_0}{\rho c^2} P.$$
 (14)

С его учетом уравнение изменения давления принимает вид:

$$\frac{dP}{dt} \left(\frac{V_0}{\rho c^2} + \frac{V_b P_0}{P^2} \right) = -q_0 P.$$
(15)

Данное уравнение аналитически решается с использованием специальных функций. Его численные решения представлены на рис. 2 для различных значений $\Delta = V_b/\delta V_0$ с использованием безразмерных времени и давления (обезразмеривание, соответственно по τ_0 и P_0). Наличие пузырей качественно меняет закономерность изменения дав-



Рис. 3. Гидросистема КХИ с дополнительной емкостью для сброса давления: *1* – емкость с рабочим телом; *2* – насос; *3*, *7* – электрогидроклапаны; *4* – трубопровод; *5* – генератор капель; *6* – струи рабочего тела; *8* – дополнительная емкость.

ления. При объеме пузыря несколько кубических миллиметров время остановки генератора увеличивается в сотни раз. Когда объем пузырей в несколько раз превышает δV_0 , время истечения жидкости и формирования пленки составит десятки минут.

При малых значениях Δ возможно выделение двух стадий уменьшения давления: сначала — по закону, близкому к экспоненциальному, а после уменьшения давления до некоторой величины P_1 — в соответствии с зависимостью, близкой к (13). Для P_1 возможна следующая оценка:

$$P_1 = P_0 \sqrt{\Delta}.$$
 (16)

Когда длина капиллярных отверстий в фильере генератора капель сравнима с их диаметром, расход жидкости зависит от давления по следующему закону:

$$q = \gamma \sqrt{P}$$
,

где ү – некоторая константа. Аналог уравнения (7) примет вид:

$$\dot{\delta V} = -n\pi r^2 \alpha \sqrt{P_0 \frac{\delta V}{\delta V_0}}$$

Из-за нелинейности расходной характеристики при равных скоростях истечения и диаметрах струй время выключения генератора с короткими каналами оказывается заметно большим.

Для рассмотрения возможности ускорения переходных процессов при выключении генератора за счет использования дополнительной емкости для сброса давления (рис. 3) считается, что открытие клапана 7 происходит одновременно с закрытием 3. Предполагается, что давление в емкости 8 равно нулю, а гидравлическое сопротивление трубопровода, соединяющего емкость 8 с генератором, описывается законом Пуазейля и составляет для расхода $q_0 \Delta P \sim 0.1$ атм. После перекрытия клапана 3 жидкость преимущественно будет истекать в емкость 8 по закономерностям, описываемым зависимо-



Рис. 4. Экспериментальная зависимость давления от времени для недегазированной жидкости.

стями (1)–(16). Для натурных значений параметров КХИ уменьшение давления при наличии дополнительной емкости происходит приблизительно на порядок быстрее, чем без нее. При $\Delta > 1$ истечение через генератор прекратится через несколько минут после перекрытия клапана 3, а объем сформировавшейся пленки будет на порядок меньше. Если давление $P_e \sim 0.1$ атм., отвод рабочего тела в емкость продолжается до достижения соответствующего значения в трубопроводе. В этом случае введение дополнительной емкости приведет к уменьшению объема пленки в 1.5–2 раза.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Модель КХИ находилась в вакуумной камере с давлением $\sim 10^{-3}$ атм. Использовался нормально закрытый клапан (время закрытия — менее 0.005 с). Рабочее тело с температурой 18°С хранилось в вакуумной камере в открытой емкости диаметром 0.2 м высотой 0.5 м и подавалось на вход шестеренного насоса под действием силы тяжести. Зависимость давления во внутреннем объеме генератора капель от времени измерялась кварцевым датчиком давления с интерфейсом токовой петли. Показания датчика снимались осциллографом.

Первый эксперимент проводился с предварительно недегазированной жидкостью. Зависимость ее давления в генераторе от времени после перекрытия клапана представлена на рис. 4. Сплошной линией изображена экспериментально измеренная зависимость, пунктиром – аппроксимация экспериментальных данных зависимостью (13). Из анализа графиков следует, что определяющим механизмом понижения давления было расширение пузырей газа. Апроксимационная зависимость не описывает начальную стадию падения давления. Отличие модели (13) от экспериментальных данных объясняется использованием локальных уравнений для теоретического описания. Лучшая аппроксимация соответствует значению $\beta = 11 \text{ c}^{-1}$. Используя эту величину, из зависимости (13) можно получить, что объем пузыря при стационарной работе генератора ($P_0 = 8.5 \text{ атм.}$) составляет $V_b \sim 0.5 \text{ см}^3$. Это значение хорошо согласуется с величиной, рассчитанной из соотношения (16) при $P_1 \approx 4$ атм. и $\delta V_0 \approx 130 \text{ мм}^3$.



Рис. 5. Экспериментальная зависимость давления от времени для дегазированной жидкости.



Рис. 6. Экспериментальная зависимость давления от времени для дегазированной жидкости.

Второй эксперимент проводился с предварительно дегазированной в течение двух суток жидкостью. Снижение давления происходит в два этапа. В течение ~0.03 с после выключения генератора давление снижается по закону, близкому к экспоненциальному, на ~2.5 атм. (рис. 5). Затем давление медленно снижается в соответствии с аппроксимацией (13) при $\beta = 4 \text{ c}^{-1}$ (рис. 6). Такой величине β соответствует объем пузыря равный $V_b \sim 0.3 \text{ см}^3$ при $P_0 = 4.5$ атм. Это значение хорошо согласуется со значением объема, рассчитанного с помощью (16). Первая стадия снижения давления в эксперименте описывается зависимостью (11). Расчет величины τ_0 проводился путем построения графика давления в логарифмических координатах (рис. 5). Экспериментально измеренное значение $\tau_0 \approx 0.022$ с хорошо согласуется с приведенной выше теоретической оценкой $\tau_0 \approx 2 \times 10^{-2}$ с.

выводы

Ключевым механизмом формирования пленки жидкости при выключении генератора капель является расширение пузырей газа, находящихся в его внутреннем объеме и питающем трубопроводе. Для предотвращения образования пленки необходима дегазация жидкости и вакуумирование гидросистемы перед запуском КХИ.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-19-00045).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Коротеев А.А., Сафронов А.А., Филатов Н.И. Влияние структуры капельной пелены на мощность бескаркасных космических излучателей и эффективность энергетических установок. Теплофизика высоких температур. 2016. Т. 54 № 5. С. 817–820.
- Sunol F., Gonzalez-Cinca R. Liquid jet breakup and subsequent droplet dynamics under normal gravity and in microgravity conditions. Physics of Fluids. 2015. V. 27, 077102. https://doi.org/10.1063/1.4927365
- Umemura A., Osaka J., Shinjo J. Coherent capillary wave structure revealed by ISS experiments for spontaneous nozzle jet disintegration. Microgravity Sci. Technol. 2020. V. 32. P. 369–397. https://doi.org/10.1007/s12217-019-09756-0

Features of Disconnecting Droplet Generators in Frame-Free Low-Potential Heat Removal Systems in Space

A. A. Safronov^a, *, A. A. Koroteev^b, A. V. Khlynov^a, N. I. Filatov^a, and A. L. Grigoriev^a

^aKeldysh Center, Moscow, Russia ^bMoscow Aviation Institute, Moscow, Russia *e-mail: a.a.safr@yandex.ru

The regularities of switching off droplet generators in frameless systems for removing lowgrade heat in space have been studied experimentally and theoretically. It is shown that the defining mechanism leading to the formation of a liquid film on the generator surface is the expansion of gas bubbles present in the hydraulic system. A method is proposed for calculating the stopping time of the generator and the volume of the film formed on its surface.

Keywords: liquid droplet radiator, drip generator

УДК 629.786.2.001.891.55

УЧЕТ УХОДЯЩЕГО ОТ ЗЕМЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ В МОДЕЛИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ РОССИЙСКОГО СЕГМЕНТА МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

© 2021 г. Д. Н. Рулев*

Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королёва (РКК "Энергия"), Москва, Россия *e-mail: dmitry.rulev@rsce.ru

> Поступила в редакцию 19.04.2021 г. После доработки 02.08.2021 г. Принята к публикации 06.08.2021 г.

Описывается методика использования характеристик уходящего от Земли излучения в модели системы электропитания Российского сегмента Международной космической станции (РС МКС), разработанная в рамках реализация на РС МКС космического эксперимента "Исследование характеристик излучения Земли и отработка использования их в модели системы электропитания РС МКС" – шифр "Альбедо". Представлены расчетные схемы определения характеристик эффективности солнечных батарей и моделирования прихода электроэнергии от солнечных батарей с учетом альбедо Земли и соответствующие рекомендации по использованию предложенных моделей. По результатам выполненной апробации получены обоснованные значения сформулированного контрольного параметра оценки эффективности солнечных батарей, использование которого позволяет осуществлять максимально точный контроль эффективности солнечных батарей модулей РС МКС. Расчетные схемы прогнозирования прихода электроэнергии позволяют выполнять как высокоточный прогноз прихода электроэнергии с точным моделированием потоков уходящего от Земли излучения, так и прогноз прихода электроэнергии без моделирования потоков уходящего от Земли излучения с получаемыми интегральными значениями прихода электроэнергии за виток, точность которых достаточна для штатного обеспечения полета РС МКС.

Ключевые слова: российский сегмент Международной космической станции, солнечные батареи, приход электроэнергии, оценка эффективности солнечных батарей, уходящее от Земли излучение, альбедо

DOI: 10.31857/S0002331021040117

ВВЕДЕНИЕ

В ходе реализации на Российском сегменте Международной космической станции (PC MKC) космического эксперимента "Исследование характеристик излучения Земли и отработка использования их в модели системы электропитания PC MKC" (шифр "Альбедо") [1] выполнена отработка методов учета излучения системы "атмосфера – земная поверхность" при моделировании работы системы электропитания (СЭП) служебного модуля (СМ) PC MKC. Объектами исследования в эксперименте являлись методы и алгоритмы целевой обработки измерений спектрометрической аппаратуры и данных телеметрической информации (ТМИ) тока солнечных батарей (СБ) PC MKC для учета уходящего от Земли излучения при анализе результатов сеансов оценки эффективности СБ и при прогнозировании прихода электроэнергии от СБ PC MKC.



Рис. 1. Расчетные схемы оценки эффективности СБ (блоки, обозначенные сплошной линий) и прогнозирования прихода электроэнергии (блоки без тени).

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

С учетом основных факторов, обуславливающих переменность измеряемого тока солнечных батарей (СБ) [2–4] (уменьшение генерации тока за счет повреждения и деградации СБ, увеличение генерации тока за счет освещения СБ уходящим от Земли излучением, уменьшение/увеличение генерации тока в зависимости от текущей интенсивности поступающего на МКС солнечного излучения), для оценки эффективности СБ СМ РС МКС используем параметр *EF*(B_const), определяемый как ток, который генерируют СБ за счет освещения лицевой поверхности СБ солнечным излучением эталонной яркости B_const под прямым углом к плоскости поверхности СБ. В качестве величины эталонной яркости солнечного излучения используем значение B_const = 1360.8 BT/м², соответствующее опубликованному в 2008 году значению солнечной постоянной 1360.8 \pm 0.5 BT/M² (данное значение ниже полученного в 1990-х годах значения 1365.4 \pm 1.3 BT/м²) [5]. Расчетная схема оценки эффективности СБ с учетом альбедо Земли представлена на рис. 1.

Ток СБ рассчитываем как сумму составляющих, генерируемых за счет освещения лицевой и тыльной сторон СБ излучением Солнца и излучением, уходящим от Земли:

$$\frac{\mathbf{B}_\mathrm{TeK}}{\mathbf{B}_\mathrm{const}} \sum_{j} K_{j} \Big\{ P_{j}^{S} \cos \alpha_{j}^{S} + K_{\mathrm{TJI}} P_{j}^{S^{*}} \cos \left(\pi - \alpha_{j}^{S}\right) + \sum_{k} \frac{\theta_{k} r_{k} \sin h_{k}}{\pi} \Big[P_{j}^{k} \cos \alpha_{j}^{k} + K_{\mathrm{TJI}} P_{j}^{k^{*}} \cos \left(\pi - \alpha_{j}^{k}\right) \Big] \Big\},$$

$$(1)$$

где B_тек, B_const – текущее и эталонное значения интенсивности солнечного излучения на орбите МКС; K_j – коэффициент генерации тока от освещения лицевой поверхности *j*-го элемента фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) СБ; $K_{TЛ}$ – коэффициент эффективности тыльной поверхности СБ относительно лицевой; P_i^S , P_i^{S*} –



Рис. 2. Аппаратура *SEVIRI* спутников *Meteosat*: (а) принцип съемки Земли (1 – вращение 100 об./мин; 2 – ось поворота зеркала, диапазон сканирования ±5.5°; 3 – калибровка и возврат 3 мин; 4 – сканирование "Восток-Запад" 30 мсек; 5 – сканирование "Юг–Север" 12 мин; 6 – шаг между трассами 0.6 с); (б) изображение канала *vis0.6*.

освещенная Солнцем площадь лицевой и тыльной поверхностей *j*-го элемента ФЭП СБ; α_j^S – угол между направлением на Солнце и нормалью к лицевой поверхности *j*-го элемента ФЭП СБ; θ_k – телесный угол, под которым *k*-ая ячейка Земли видна с МКС; r_k – коэффициент диффузного отражения *k*-ой ячейки Земли (значение двулучевой функции отражения BRF); h_k – угол высоты Солнца в *k*-ой ячейке Земли; P_j^k , $P_j^{k^*}$ – освещенная излучением от *k*-ой ячейки Земли площадь лицевой и тыльной поверхностей *j*-го элемента ФЭП СБ; α_j^k – угол между направлением от МКС на *k*-ую ячейку Земли и нормалью к лицевой поверхности *j*-го элемента ФЭП СБ.

Контроль точности расчетной интенсивности солнечного излучения [6] осуществляем по данным прибора *Total Irradiance Monitor (TIM)* [7], измеряющего полный поток излучения от Солнца, публикуемым на сайте https://lasp.colorado.edu/lisird/data/sorce_tsi_6hr_13/). Расчетные значения интенсивности солнечного излучения корректируем в соответствии с данными измерений, при этом расхождение расчетных значений от данных измерений на 10-летнем интервале не превышает 0.14% при средне-квадратичном отклонении 0.048%. Интенсивность уходящего от Земли излучения рассчитываем с учетом характеристик альбедо ячеек Земли, полученных по данным видимых каналов спектра *vis0.6* (560–710 нм), *vis0.8* (740–880 нм) аппаратуры *Spinning Enhanced Visible and IR Imager (SEVIRI)* геостационарных метеорологических спутников *Meteosat* в точках стояния 0 и 41.5° в.д. [8], [9], а при их отсутствии альбедо ячеек Земли принимается равным среднему альбедо Земли 0.29 [10]. На рис. 2 представлен принцип съемки Земли аппаратурой *SEVIRI* и пример получаемого изображения.

Коэффициенты генерации тока находятся из условия минимизации отличия расчетных данных тока СБ от данных ТМИ

$$\left\|\vec{F}(\vec{x})\right\|^2 = \sum_{i=1}^n \left(I_i^{\text{TMM}} - I_i(\vec{x})\right)^2 \to \min,$$
 (2)

где $I_i^{\text{ТМИ}}$ – измеренное значение тока СБ на момент t_i ; $I_i(\vec{x})$ – модельное значение тока СБ под воздействием прямого солнечного и уходящего от Земли излучений на момент t_i , \vec{x} – вектор определяемых параметров. Задачу решаем с использованием итерационного метода Ньютона–Гаусса [11]: начиная с начального значения \vec{x}_0 последовательные приближения \vec{x}_{l+1} , l = 0, 1, 2, ... рассчитываются по соотношению

$$\vec{x}_{l+1} = \vec{x}_l - \left(J^T\left(\vec{x}_l\right)J\left(\vec{x}_l\right)\right)^{-1}J^T\left(\vec{x}_l\right)\vec{F}\left(\vec{x}_l\right),$$
где $J\left(\vec{x}\right) = \left[\frac{\partial I_i(\vec{x})}{\partial x_j}\right]_{i=1,j=1}^{n,m}$ – матрица Якоби для

функции $\vec{F}(\vec{x})$.

ТМИ тока СБ СМ содержит данные тока по 12 генераторам СБ (ТМ параметры $1\div12$ СБ1,2) и данные суммарного тока (ТМ параметры ТСА, ТСБ: ТС – ток суммарный; А, Б – датчики А, Б). Оценка эффективности СБ осуществляется по данным суммарного тока, поскольку СЭП СМ имеет некоторое собственное в общем случае не всегда неизменное потребление и сумма токов от генераторов всегда меньше суммарного тока [4].

Отметим, что коэффициенты генерации тока K_j могут быть представлены в виде $K_j = K_{\Gamma\Gamma}K_{OPj}$, где K_{OPj} – относительный коэффициент работоспособности *j*-го элемента ФЭП, принимающий значения в диапазоне [0,1] и характеризующий относительную работоспособность элемента ФЭП (относительно других элементов ФЭП СБ); $K_{\Gamma\Gamma}$ – коэффициент генерации тока СБ.

Параметр *EF*(B_const) характеризует суммарную эффективность лицевой поверхности двух СБ СМ (СБ2, СБ4) и связан с коэффициентами генерации тока соотношением EF(B_const) = $\sum K_j P_j$, где P_j – площадь лицевой поверхности *j*-го элемента ФЭП СБ.

Определение параметра эффективности СБ осуществляем по ТМИ, полученной на интервале, когда составляющая тока СБ, генерируемая от освещения СБ уходящим от Земли излучением, минимальна, а именно — на интервале от прохождения вечернего терминатора до входа МКС в тень Земли при величине указанной расчетной составляющей тока не более 0.5% от тока СБ (1.1 A) [12].

Для определения эффективности тыльной поверхности СБ дополнительно выполняем режим ориентации СБ, при котором Солнце освещает тыльную поверхность СБ, при этом для определения эффективности отдельных СБ режимы ориентации лицевой и тыльной поверхностей СБ на Солнце выполняем отдельно для каждой СБ.

Сеансы оценки эффективности СБ рекомендуется выполнять над районами земной поверхности, находящимися в зоне охвата КА *Meteosat*, временные интервалы наличия измерений яркости подстилающей поверхности с КА *Meteosat* используются для контроля точности получаемых решений [13].

МЕТОДИКА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРИХОДА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Используем следующие модели прогнозирования прихода электроэнергии, отличающиеся особенностями учета альбедо Земли: А – учет альбедо Земли путем завышения коэффициентов генерации тока; В – учет среднего альбедо Земли; С – учет альбедо земли; С – учет альбедо земли; D – без учета альбедо Земли (альбедо Земли = 0).

Модель А – расчет тока СБ только с учетом освещения СБ прямым излучением Солнца, при этом применяются значения коэффициентов генерации тока, завышенные относительно точных фактических значений коэффициентов генерации тока и определяемые из условия получения расчетных значений тока СБ по модели А, максимально близких к расчетным значениям тока СБ по модели В.

Модель В — применяются характеристики среднего альбедо Земли ко всем ячейкам поверхности Земли.

Модель С – к ячейкам поверхности Земли применяются индивидуальные характеристики альбедо. В общем случае применяются: нулевая облачность – для расчета ми-

нимально-возможного прихода электроэнергии; прогнозируемый процент облачности — для расчета наиболее вероятного значения прихода электроэнергии; 100% облачность — для расчета максимально-возможного прихода электроэнергии.

Модель D — расчет тока CБ только от излучения Солнца с применением фактических значений коэффициентов генерации тока, определенных для моделей В и С.

Модели В и С обеспечивают высокоточный прогноз прихода электроэнергии с точным моделированием потоков уходящего от Земли излучения. Модели A и D обеспечивают прогноз прихода электроэнергии без моделирования потоков уходящего от Земли излучения с получаемыми интегральными значениями прихода электроэнергии за виток, точность которых достаточна для штатного обеспечения полета МКС, при этом модель A дает ожидаемый приход электроэнергии, а модель D дает гарантированный приход электроэнергии, заведомо меньше фактического прихода и меньше оценки гарантированного прихода, получаемой по модели C с использованием нулевой облачности.

Коэффициенты генерации тока для модели А определяются из условия минимизации отличия расчетных токов СБ, полученных по моделям А и В

$$\left\|\vec{F}\left(\vec{x}^{A}\right)\right\|^{2} = \sum_{i=1}^{n} \left(I_{i}^{A}\left(\vec{x}^{A}\right) - I_{i}^{B}\left(\vec{x}^{B}\right)\right)^{2} \to \min,\tag{3}$$

где $I_i^A(\bar{x}^A)$, $I_i^B(\bar{x}^B)$ – значения тока СБ на момент t_i по моделям А и В; \bar{x}^B – используемые в модели В фактические значения коэффициентов генерации тока от освещения лицевой и тыльной поверхностей СБ; \bar{x}^A – вектор определяемых параметров (коэффициенты генерации тока для модели А). Задача решается с использованием метода Ньютона-Гаусса.

РЕЗУЛЬТАТЫ АПРОБАЦИИ

На рис. 3 представлены результаты анализа данных замеров тока СБ, выполненных в сеансах оценки эффективности СБ СМ РС МКС [14] и полученные на интервале реализации эксперимента значения параметра EF(B const) (модели C, B).

Выполненный анализ включал пересчет измеренных значений тока СБ, величина которых соответствует текущей на момент выполнения замеров яркости Солнца В_тек, к условию освещения СБ солнечным излучением эталонной яркости B_const. На рис. 3 показаны верхняя и нижняя границы значений параметра *EF*(B_const), соответственно, кривая *EF_max* – кривая минимальных значений замеров тока СБ, полученных от начала полета до текущего момента; кривая *EF_min* – кривая максимальных значений замеров тока СБ, полученных от текущего момента до момента времени последнего замера тока СБ, уменьшенных на максимальное значение составляющей тока СБ, которая может быть сгенерирована за счет освещения тыльной поверхности СБ уходящим от Земли излучением и величина которой составляет 11% суммарного тока СБ (11% $\approx 0.38 \times 0.29 \times 100\%$, где 0.38 – номинальное (паспортное) значение относительной эффективности тыльной поверхности СБ СМ [4], 0.29 – среднее альбедо Земли).

В табл. 1 представлены значения параметров эффективности СБ СМ для рассмотренных моделей на интервале 03.04.2019–30.09.2020 г.

На рис. 4 представлены графики расчетного тока СБ и данные ТМИ в сеансе измерений 30.04.2020 г., в котором на интервале 54000–57000 с СБ СМ наведены на Землю.

Точная модель — Модель С — реализуется на интервале наличия измерений с КА *Meteosat* яркости всей видимой с МКС подстилающей поверхности (dt2 на рис. 4). В табл. 2 представлены значения коэффициента $K_{TЛ}$ и коэффициента эффективности СБ4 относительно СБ2 К_эф.СБ4/СБ2, полученные по результатам совместной обработки сеансов измерений 04.06.2020 г. и 01.08.2020 г. с раздельным наведением на Солнце



Рис. 3. Анализ данных замера тока СБ в сеансах оценки эффективности СБ СМ (сверху – весь период эксплуатации МКС; снизу – интервал реализации КЭ): $To\kappa$ (B_тек) – данные замера тока СБ (соответствуют текущей яркости Солнца B_тек); $To\kappa$ (B_const) – ток СБ, пересчитанный к эталонной яркости Солнца B_const; *EF_max/min/cp* – верхняя и нижняя границы *EF*(B_const) и их среднее значение.

лицевой и тыльной поверхностей CБ2,4 CM ($K_{TЛ}$ находится на верхней границе паспортного диапазона 0.38 ± 0.02). В табл. 2 и далее: N – количество точек измерений (точка объединяет 5 с), СКО и СИО – среднеквадратичное и среднее интегральное отклонения *Ток*2

от *Ток*1
$$\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}(Tok2 - Tok1)^2}$$
 A и 100 × $\sum_{k=1}^{N}(Tok2 - Tok1) / \sum_{k=1}^{N}Tok1\%$.

В табл. 3 приведены результаты сравнения расчетного тока СБ между моделями и с данными ТМИ: данные модели С получены на интервале наличия измерений с КА *Meteosat* всей видимой с МКС освещенной поверхности Земли в сеансе измерений

Параметры	Moj	MOTETLA/MOTETLC B.D.	
	C, B, D	А	Wodenb A Wodenb C, D, D
<i>EF</i> (B_const)	231.94 A	244.83 A	1.0554
К _{ТЛ}	0.4015	0.5643	1.4057

Таблица 1. Параметры моделей расчета тока СБ на интервале 03.04.2019-30.09.2020 г.



Рис. 4. Графики расчетного тока СБ и данные ТМИ в ceance 30.04.2020 г.: Модель А, В, С, D и ТМИ – ток СБ по моделям А, В, С, D и данные ТМИ; Снимки Meteosat – моменты снимков с КА *Meteosat* (точки стояния 0° и 41.5° в.д.); dt1 – интервал определения параметра *EF*(B_const); dt2 – интервал наличия измерений с КА *Meteosat* всей видимой с МКС освещенной поверхности Земли; dt3 – интервалы существенного затенения СБ СМ элементами конструкции АС МКС.

30.04.2020 г. (dt2 на рис. 4); для моделей В, А, D приведен диапазон min/max значений СКО, СИО и среднего тока СБ по сеансам измерений 03.04/07.06/31.08.2019 г., 30.04/04.06/01.08/29.08/30.09.2020 г.

Сравнение выполняется отдельно на временных интервалах:

- 1 интервалы определения параметра *EF*(B_const) (dt1 на рис. 4);
- 2 штатный полет (СБ ориентированы на Солнце);
- 3 интервалы ориентации тыльной поверхности СБ на Солнце.

Параметры	Сеансы данных				
Параметры	04.06.2020	01.08.2020	04.06 и 01.08.2020		
Ктл	0.4050	0.3973	0.4015		
К_эф.СБ4/СБ2	0.9694	1.0103	0.9956		
Ν	286	324	610		
СКО расчетного тока СБ от данных ТМИ	2.4069 A	1.2721 A	1.9659 A		

Таблица 2. Определение параметров *К*_{ТЛ} и К_эф.СБ4/СБ2

Интервал Оценка		Модель				Модель сравнения		
		С	В	А	D	название	п	Ср. ток, А
1	СКО	2.4 A	2.1/5.6 A	8.9 / 14.1 A	2.1 / 5.6 A	ТМИ	81	219
	СИО, %	-1.0	$-1.3/\pm0.7$	+4.0/+6.1	$-1.4/\pm0.6$		1936	218/227
		—	-0.1	+5.4	-0.1	С	81	219
		+0.1	_	+5.4/+5.4	-0.1/-0.1	В	1936	215/226
		-5.1	-5.2/-5.1	—	-5.2/-5.2	А		227/238
		+0.1	+0.1/+0.1	+5.5/+5.5	_	D		215/226
2	СКО	5.5 A	7.4/12.1 A	10.5/15.1 A	15.7/21.0 A	ТМИ	1304	223
	СИО, %	-1.5	$-1.9/\pm0.7$	-2.0/+0.6	-7.1/-4.7		21199	215/231
		-	+0.9	+0.3	-5.0	С	1304	220
		-0.9	—	-0.8/0.0	-6.0/-5.3	В	25500	216/227
		-0.3	0.0/+0.8	—	-5.2/-5.2	Α		215/227
		+5.2	+5.5/+6.4	+5.5/+5.5	_	D		204/215
3	СКО	5.6 A	8.9/21.7 A	11.4/20.7 A	22.8/43.4 A	ТМИ	408	89
	СИО, %	+4.5	-1.6/+19.9	-3.0/+9.2	-34.6/-12.9		3255	88/130
		-	+13.8	+4.8	-29.4	С	408	93
		-12.1	—	-12.2/+10.8	-40.8/-11.6	В	3263	101/130
		-4.6	-9.8/+13.9	—	-32.6/-20.3	Α		92/141
		+41.6	+13.1/+68.8	+25.4/+48.4	—	D		62/113

Таблица 3. Сравнение расчетного тока СБ между моделями и с ТМИ

Из сравнения исключены интервалы времени, на которых СБ СМ существенно затенены американским сегментом (AC) МКС и ошибки расчета тока СБ определяются существенными ошибками расчета сложно-моделируемого затенения СБ СМ элементами конструкции AC MKC (dt3 на рис. 4), вклад данных интервалов в генерацию тока СБ на витке не превышает 6%, а включение их в рассмотрение приведет к неверным оценкам точности получаемых решений.

Представленные в табл. 3 данные подтверждают теоретические положения о взаимосвязи моделей расчета тока СБ.

На интервале определения контрольного параметра оценки эффективности СБ: СИО между моделями С, В, D ~ 0.1%; СИО модели А от моделей С, В, D ~ 5.5%; СИО от ТМИ модели С ~ $\pm 1\%$ (СКО ~ 2.5 A), моделей В, D ~ $\pm 1.5\%$ (СКО ~ 2–6 A), модели А ~ 4–6% (СКО ~ 9–14 A).

В штатном полете: СИО между моделями С, В, А ~ 1%; СИО модели D от моделей С, В, А ~ -5-6%; СИО от ТМИ модели С ~ $\pm 1.5\%$ (СКО ~ 6 А), моделей В, А ~ $\pm 2\%$ (СКО ~ 7-15 А), модели D ~ -5-7% (СКО ~ 15-21 А).

При режимах ориентации СБ, когда Солнце под разными углами освещает тыльную поверхность СБ: СИО между моделями С, В, А до 15%; СИО модели D от моделей С, В, А ~ -10-40%; СИО от ТМИ модели С ~ $\pm 5\%$ (СКО ~ 6 А), моделей В, А ~ $\pm 20\%$



Рис. 5. Зависимость точности расчета тока СБ от шага разбиения поверхности Земли.

(СКО ~ 9–22 А), модели D ~ -12-35% (СКО ~ 22–44 А) (высокий процент СИО объясняется в т.ч. пониженными значениями тока СБ).

Анализ точности моделей С, В в зависимости от шага разбиения поверхности Земли на ячейки показал, что в штатном полете достаточная точность (CKO \leq 0.1 A, Max $|\Delta I| \leq 0.5$ A) достигается при шаге \leq 3° для модели В и \leq 2° для модели С. При отворотах СБ от Солнца указанная точность достигается с шагом \leq 2° для модели В, для модели С необходимо использовать шаг 1°. В табл. 4 и на рис. 5 представлены данные

		Штатнь	ій полет		Специальная ориентация СБ				
Шаг, град М		Модель В		Модель С		Модель В		Модель С	
	СКО	$\operatorname{Max} \Delta I $	СКО	Max $ \Delta I $	СКО	$\operatorname{Max} \Delta I $	СКО	$\operatorname{Max} \Delta I $	
2	0.03 A	0.09 A	0.09 A	0.43 A	0.04 A	0.21 A	0.22 A	1.20 A	
3	0.10 A	0.31 A	0.22 A	1.46 A	0.22 A	0.74 A	0.72 A	3.80 A	
4	0.30 A	1.38 A	0.50 A	3.01 A	0.69 A	3.00 A	1.23 A	5.55 A	
5	0.77 A	3.27 A	0.94 A	4.63 A	2.04 A	8.19 A	2.08 A	7.94 A	

Таблица 4. Зависимость точности моделей С, В от шага разбиения поверхности Земли



Рис. 6. Зависимость точности модели С от состава данных и вариантов совместного использования данных с 2-х КА *Meteosat* (точки стояния 0° и 41.5° в.д.): a(0/41.5) – углы между радиус-векторами МКС и КА *Meteosat*; *с* – угол между радиус-векторами КА *Meteosat*.

точности моделей С, В в зависимости от шага разбиения поверхности Земли на ячейки (в сравнении с использованием шага 1°).

Отметим, что максимумы $|\Delta I|$ получены без учета всплесков $|\Delta I|$ до 1 А, наблюдаемых при штатной ориентации СБ в конце светового участка (время \approx 51000 сек на рис. 5), когда нормаль к рабочей поверхности СБ направленна на узкую освещенную Солнцем полосу видимого с МКС горизонта Земли (яркость данной полосы существенно изменятся при изменении размера ячеек).

Анализ точности модели С в зависимости от состава данных с КА *Meteosat* (канал *vis0.6*, канал *vis0.8*, среднеарифметическое двух каналов, средневзвешенное двух каналов) и варианта совместного использования данных с 2-х КА *Meteosat* в точках стояния 0° и 41.5° в.д. (рассмотрены варианты совместного использования данных, в которых вклад каждого КА *Meteosat* в результат определяется соотношением углов между радиус-векторами МКС и КА *Meteosat*, на рис. 6 дана графическая иллюстрация вариантов: вар. 1 – ближнее значение, вар. 2 – пропорциональное изменение, вар. 3 – среднеарифметическое значение) показал, что наименьшее СКО расчетного тока СБ от данных ТМИ дает использование средних данных каналов *vis0.6* и *vis0.8* и средних данных с 2-х КА *Meteosat*.

Анализ точности модели С в зависимости от количества используемых снимков с KA *Meteosat* показал, что достаточная точность (CKO ≈ 0.1 A, max $|\Delta I| \approx 0.5$ A) достигается при использовании 3 снимков с каждого из 2-х KA *Meteosat* на световой части витка с интервалом между крайними снимками 45 мин.

В табл. 5 показана зависимость точности модели С от количества используемых снимков с каждого из 2-х КА *Meteosat* в сравнении с максимальным количеством снимков, формируемых каждые 15 мин (приведены СКО и максимальная разность Max $|\Delta I|$ сравниваемых токов).

На рис. 7а представлены графики разности ΔI сравниваемых токов для двух вариантов выборок по 1, 2 и 3 снимкам с каждого КА *Meteosat* на световой части витка. На рис. 76 приведены графики получаемых текущих максимумов модулей разности токов $|\Delta I|$ для 1, 2, 3 снимков с каждого из 2-х КА *Meteosat* на световой части витка.



Рис. 7. Зависимость точности расчета тока СБ по модели С от количества используемых снимков на световой части витка с каждого из 2-х КА *Meteosat* (точки стояния 0° и 41.5° в.д.): (а) графики разности ΔI сравниваемых токов для двух вариантов выборок по 1, 2 и 3 снимкам с каждого КА *Meteosat* (снимки 1-го и 2-го вариантов выборок обозначены соответственно квадратами и кругами); (б) графики текущих максимумов модулей разности токов | ΔI | для 1, 2, 3 снимков с каждого КА *Meteosat*.

Таблица 5. Зависимость точности расчета тока СБ по модели С от количества используемых снимков с каждого из 2-х КА *Meteosat* (точки стояния 0° и 41.5° в.д.)

Кол-во снимков	CKO, A	$\max \Delta I $, A
1 снимок в середине светового участка	0.13-0.87	0.42-3.03
2 снимка с интервалом 30-45 мин	0.03-0.35	0.08-1.17
3 снимка на интервале 45 мин	0.02-0.13	0.08-0.55

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом в результате реализации эксперимента разработана методология учета альбедо Земли при анализе результатов проведения сеансов оценки эффективности СБ модулей РС МКС и при прогнозировании прихода электроэнергии от СБ РС МКС, разработаны рекомендации по режимам управления СЭП РС МКС с учетом возможностей генерации электроэнергии под воздействием уходящего от Земли излучения. По результатам анализа полученных данных и выполненной апробации предложенных расчетных схем получены обоснованные значения сформулированного параметра оценки эффективности СБ, при этом наряду с получением оценки суммарной эффективности СБ СМ представленная методика обеспечивает получение оценок эффективности отдельно для каждой СБ. Использование сформулированного параметра оценки эффективности СБ позволит в дальнейшем осуществлять максимально точный контроль эффективности СБ модулей РС МКС.

Предложенные расчетные схемы прогнозирования прихода электроэнергии позволяют выполнять как высокоточный прогноз прихода электроэнергии с точным моделированием потоков уходящего от Земли излучения (такой прогноз востребован, когда необходимо точно понимать, на какую дополнительную генерацию тока СБ можно рассчитывать при выполнении критических по энергопотреблению полетных операций), так и прогноз прихода электроэнергии без моделирования потоков уходящего от Земли излучения с получаемыми интегральными значениями прихода электроэнергии за виток, точность которых достаточна для штатного обеспечения полета РС МКС. Описанная методология применима для СБ КА на околоземной или окололунной орбите. Отметим, что при решении задач управления энергобалансом АС МКС альбедо Земли не учитывается, что обосновывается, по-видимому, наличием конструктивного запаса суммарной производительности СБ АС МКС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Рулев Д.Н., Черемисин М.В., Новиченков К.А., Лупян Е.А., Мазуров А.А., Бурцев М.А. Учет уходящего от Земли излучения при моделировании энергобаланса РС МКС в КЭ "Альбедо" // Международная научно-практическая конференция "Научные исследования и эксперименты на МКС", 9–11 апреля 2015, Москва, ИКИ РАН, с. 218–219.
- Рулев Д.Н., Стажков В.М., Корнеев А.П., Пантелеймонов В.Н. Программный комплекс моделирования электроприхода российского сегмента Международной космической станции // Труды XXXVII Чтений, посвященных разработке научного наследия и развитию идей К.Э. Циолковского (Калуга, 17–19 сентября 2002 г.). Секция "Проблемы ракетной и космической техники". – Казань: Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина. 2003. с. 71–75.
- Стажков В.М., Брюханов Н.А., Беляев М.Ю., Рулев Д.Н., Мельник И.В. Использование математического моделирования при оценке энергобаланса на российском сегменте МКС. Сборник статей под редакцией Н.А. Брюханова, М.Ю. Беляева. Ракетно-космическая техника. Сер. XII. Вып. 1, РКК "Энергия" им. С.П. Королева, Королев, 2008, с. 65–74.
- 4. Зернов А.С., Николаев В.Д. Опыт эксплуатации солнечных батарей служебного модуля Международной космической станции // Космическая техника и технологии. 2016. № 1(12). С. 29–38.
- Kopp G., Lean J.L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance, Geophys. Res. Lett., 38, L01706. 2011. https://doi.org/10.1029/2010GL045777
- 6. Поток энергии Солнца и его изменения, под ред. О. Уайта, пер. с англ. М.: Мир, 1980. 559 с.
- 7. Kopp G., Lawrence G., Rottman G. The Total Irradiance Monitor (TIM): Science results, Sol. Phys. 2005. V. 230. P. 129–139. https://doi.org/10.1007/s11207-005-7433-9
- EUMETSAT. MSG Level 1.5 Image Data Format Description. EUM/MSG/ICD/105 v7, 4 December 2013. 129 p.
- 9. EUMETSAT. Conversion from radiances to reflectances for SEVIRI warm channels. EUM/MET/TEN/12/0332 v4, 25 October 2012. 8 p.
- 10. Stephens G.L., O'Brien D., Webster P.J. et al. The albedo of Earth // Reviews of Geophysics. 2015. V. 53. № 1. P. 141–163. https://doi.org/10.1002/2014RG000449
- 11. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация: Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 509 с.

- 12. Патент 2706643 РФ, МПК В64G 1/44 (2006.01). Способ контроля производительности солнечной батареи космического аппарата с инерционными исполнительными органами / Д.Н. Рулев, А.И. Спирин; заявитель и патентообладатель ПАО "РКК "Энергия" им. С.П. Королёва" № 2016134118; заявл. 19.08.2016; опубл. 19.11.2019, Бюл. № 32. 16 с.
- 13. Патент 2662372 РФ, МПК В64G 1/44. Способ контроля системы энергопитания снабженного солнечными батареями космического аппарата / А.И. Спирин, Д.Н. Рулев, Н.Д. Рулев; заявитель и патентообладатель ПАО "РКК "Энергия" им. С.П. Королёва" № 2017119306; заявл. 01.06.2017; опубл. 25.07.2018, Бюл. № 21. 11 с.
- 14. Спирин А.И. Анализ полетных данных как основа для принятия операционных решений по эксплуатации долговременных орбитальных станций // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 2. С. 139–151.

Accounting Coming from the Earth Radiation in the Model of Power Supply System of the Russian Segment of the International Space Station

D. N. Rulev*

S.P. Korolev Rocket and Space Corporation Energia (RSC Energia), Moscow, Russia *e-mail: dmitry.rulev@rsce.ru

The paper describes a method of using characteristics of radiation coming from the Earth in the model of the power supply system of the Russian Segment of the International Space Station (ISS RS) developed as part space experiment "Study of the Earth radiation characteristics and validation of using the ISS RS power supply system model" – code "Albedo" implemented on the ISS RS. Computational patterns for determining the solar array performance characteristics and modeling the electric power input from the solar arrays taking into account the albedo of the Earth, and appropriate guidelines for using the proposed models are provided. On completion of validation obtained are valid values of the formulated control parameter for the solar array performance estimate, which use allows for the utmost accurate performance control for the solar arrays of the ISS RS modules. The computational patterns predicting the electric power input enable to perform both a highly-accurate forecast of the electric power input without modeling of radiation fluxes coming from the Earth, and a forecast of the electric power input without modeling of radiation fluxes coming from the Earth with obtained integral values of electric power input with-

Keywords: Russian Segment of the International Space Station, solar arrays, electric power input, solar array performance estimate, radiation coming from the Earth, albedo

УДК 662.6/.9

КИНЕТИКА ТЕРМОХИМИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ ТВЕРДОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ТОПЛИВА ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАГРЕВЕ

© 2021 г. Е. А. Бойко^{1, *}, А. В. Страшников^{1, **}

¹ФГАОУ ВО "Сибирский федеральный университет", Красноярск, Россия *e-mail: EBoiko@sfu-kras.ru **e-mail: savtr@mail.ru

> Поступила в редакцию 24.05.2021 г. После доработки 03.08.2021 г. Принята к публикации 11.08.2021 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса термохимического превращения твердого органического топлива при его термической обработке и сжигании в лабораторных условиях с сопоставлением полученных данных по определению видимых констант скоростей горения угля. Экспериментальные исследования проведены на экспериментальной установке с вертикальной реакционной камерой при высокоскоростном нагреве $(10^4 - 10^6 \text{ град./c})$, соответствующему условиям реальных теплотехнологических процессов и устройств. Установка обеспечивает термообработку пылеугольных частиц в различных газовых средах в диапазоне от 200 до 1500°С при времени пребывания в реакционном пространстве от 0.5 до 4.5 с. Полученные экспериментальные данные в виде зависимостей $\lg k = f(1/T)$ используются для оценки кинетических характеристик различных стадий термохимического превращения топлива (сушки, термической деструкции и горения нелетучего остатка). Установлено, что при соблюдении определенных условий можно рекомендовать комплексный метод термического анализа твердого органического топлива в неизотермических условиях при низких скоростях нагрева ($\beta = 5-20$ град./мин) для объективной и адекватной оценки реакционной способности энергетических углей.

Ключевые слова: кинетика, термохимические превращения, твердое органическое топливо, высокоскоростной нагрев, лабораторный эксперимент **DOI:** 10.31857/S000233102104004X

ВВЕДЕНИЕ

Согласно "Энергетической стратегии России на период до 2035 года", утвержденной распоряжением Правительства РФ № 1523-р от 09.06.2020 г., твердое органическое топливо рассматривается в качестве основного сырьевого источника для производства энергии на длительную перспективу. Совершенствованию технологии производства и потребления энергии, вырабатываемой на твердом органическом топливе, уделяется значительное внимание в энергетической, углехимической, металлургической и других отраслях промышленности [1]. Создание новых и повышение эффективности существующих технологических приемов термохимической обработки, сжигания и газификации твердых горючих ископаемых основано на всесторонней оценке их состава и свойств. Технологии производств, так или иначе связанных с использованием процессов испарения влаги, термического разложения и взаимодействия топлива с окислителем, предусматривают, в качестве непременного условия, оценку его реакционной способности [2]. При этом необходимо учитывать специфические, для каждой марки угля, сложные кинетические механизмы большого класса недостаточно исследованных явлений термохимического превращения органической и минеральной части пылевидного твердого топлива. Значительный разброс и неполнота экспериментальных значений кинетических параметров, определяющих реакционную способность, а также отсутствие обобщающих методических работ по определению этих параметров применительно к основным этапам термохимического превращения твердого органического топлива в условиях реальных теплотехнологических процессов и установок, предопределили основные положения исследований в рамках самостоятельного научного направления "Реакционная способность углей" [3].

Достаточно эффективным средством исследования механизма и кинетики процессов термохимического превращения твердого органического топлива является использование методов комплексного термического анализа и математического моделирования [4]. Перечисленные методы нашли широкое применение в практике научных исследований, однако, сложность исследуемых процессов требует их дальнейшего совершенствования. Следует отметить, что имеет место необъективность при оценке и интерпретации получаемых результатов, а иногда и явно ошибочные гипотезы. Феноменологическое описание нуждается в дополнительной информации, главным образом структурного характера, что особенно важно при исследовании динамики процессов.

Разработка комплексного метода оценки реакционной способности энергетических углей, математических моделей и методик расчета степени термохимического превращения твердого органического топлива и обоснование на их основе технических и технологических решений по повышению эффективности энергетического использования углей имеет существенное значение для ускорения научно-технического прогресса в топливно-энергетическом комплексе страны и являются важными народно-хозяйственными задачами [5].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

В этой связи значительный практический интерес представляет сопоставление результатов, полученных при низких скоростях нагрева ($\beta = 5-20$ град./мин), присущих условиям комплексного термического анализа с экспериментом по термохимическому превращению твердого топлива при высокоскоростном нагреве ($\beta = 10^4-10^6$ град./с). Если полагать, что кинетические параметры индивидуальных реакций, составляющих процесс горения угля, не изменяются в широком диапазоне скоростей нагрева, то увеличение скорости нагрева топлива должно привести лишь к смещению максимума скорости реакции в область более высоких температур в соответствии с уравнением неизотермической кинетики [6]:

$$\frac{k_0}{\beta} = \frac{E}{RT_{\text{max}}^2} \exp\left(\frac{E}{RT_{\text{max}}}\right).$$
(1)

Пересчет значений T_{max} термического анализа реакций с кинетическими параметрами, приведенными в работе [2] на высокоскоростной нагрев, соответствующий условиям реальных топливоиспользующих процессов и установок ($\beta = 10^4 - 10^6$ град./с) по уравнению (1), показал, что в этом случае величины T_{max} возрастут до значений, приведенных в табл. 1 и 2. В табл. 1 и 2 приведены также значение полуширины дифференциальной кривой скорости реакции и длительность выделения газообразных компонентов, рассчитанных по методике [6] при высокоскоростном нагреве. Полученные результаты подтверждают существенную зависимость характера исследуемых кинетических процессов от скорости изменения температуры газовой среды. Как видно из табл. 1 и 2 увеличение скорости нагрева парогазовой среды приводит к значительному сокращению длительности протекания индивидуальных стадий по

Газовая компонента	Марка угля	№ стадии	Температура максимума реакции, T_{\max} , °С	Полуширина дифференциальной кривой, <i>ΔT</i> , °C	Длительность выделения, т, с
H ₂	Бородинский	1	1205-1680	321-535	0.0642-0.001
		2	1530-1950	255-530	0.05-0.00170
		3	1150-1490	220-455	0.044 - 0.0009
	Березовский	1	1040-1400	240-625	0.047-0.0012
		2	910-1100	120-165	0.024-0.0030
	Назаровский	1	1320-1720	255-590	0.051-0.0011
		2	755-1290	140-325	0.027 - 0.0007
		3	915-1345	120-205	0.023-0.0004
CO	Бородинский	1	1225-2200	260-640	0.052-0.0012
		2	1425-1730	190-255	0.038 - 0.0050
		3	960-1395	285-875	0.057-0.0017
		4	960-1600	430-845	0.086-0.0038
	Березовский	1	945-1760	210-560	0.041-0.0012
		2	895-1085	120-165	0.024-0.0032
		3	1090-1590	310-935	0.062-0.0018
		4	610-1595	230-780	0.046-0.0015
	Назаровский	1	860-1620	195-515	0.039-0.0010
		2	1105-1490	205-450	0.041-0.0009
		3	1010-1565	340-860	0.068-0.0023
CO ₂	Бородинский	1	850-1495	165-360	0.033-0.0007
		2	380-630	65-135	0.013-0.0003
	Березовский	1	700-1350	165-410	0.033-0.0008
	Назаровский	1	1110-1415	265-440	0.053-0.0008
		2	890-1120	145-205	0.029-0.0004
		3	1110-1495	240-570	0.047-0.0011
CH ₄	Бородинский	1	795-1175	260-860	0.051-0.0017
		2	920-1315	255-715	0.050-0.0014
	Березовский	1	860-1430	150-320	0.030-0.00063
		2	625-1030	110-225	0.021-0.00050
	Назаровский	1	1180-1665	140-230	0.027 - 0.00050
		2	840-1675	210-585	0.042-0.00110
		3	1055-1390	210-465	0.041-0.00090
Смола	Бородинский	1	650-1150	130-295	0.026-0.00060
	Березовский	1	905-1845	225-590	0.045-0.00110
	Назаровский	1	415-690	70-150	0.014-0.00030

Таблица 1. Расчетные значения индивидуальных реакций газовыделения при термическом разложении канско-ачинских углей со скоростью нагрева (10⁴–10⁶) град./с

мере повышения скорости нагрева, что как следствие приводит к их смещению относительно друг друга.

Результаты расчетной оценки T_{max} послужили основанием для выбора конечной температуры нагрева ($T_k = 900^{\circ}$ С) в эксперименте с высокоскоростным нагревом. При этом строго должно обеспечиваться условие $T_k \leq T_{\text{max}}$ [7].

Газовая компонента	Марка угля	№ стадии	Температура максимума реакции, T _{max} , °C	Полуширина дифференциальной кривой, <i>ΔT</i> , °C	Длительность выделения, т, с
H ₂	Кузнецкий Г	1	1215-1800	160-300	0.032-0.00060
		2	970-1450	135-250	0.026-0.00050
		3	820-1230	115-210	0.023-0.00040
	Кузнецкий СС	1	820-1180	100-180	0.020-0.00035
		2	675-985	85-155	0.016-0.00030
	Кузнецкий Т	1	1275-1820	170-315	0.034-0.00060
		2	855-1250	110-200	0.021 - 0.00040
		3	630-925	80-145	0.016-0.00030
CO	Кузнецкий Г	1	915-1150	65-95	0.013-0.00020
		2	840-1420	155-335	0.035 - 0.00070
		3	595-915	90-165	0.018-0.00030
	Кузнецкий СС	1	960-1175	65-90	0.013-0.00020
		2	890-1325	120-225	0.023-0.00040
		3	1070-1540	125-205	0.025 - 0.00040
		4	1250-1610	255-595	0.050-0.00120
	Кузнецкий Т	1	890-1100	60-90	0.012 - 0.00020
		2	890-1440	145-310	0.029-0.00060
		3	590-945	95-190	0.019-0.00040
CH ₄	Кузнецкий Г	1	810-910	25-35	0.005-0.00010
		2	760-860	25-35	0.005-0.00010
		3	720-835	30-40	0.006-0.00010
		4	690-835	40-55	0.008 - 0.00010
		5	660-885	60-100	0.012 - 0.00020
		6	590-780	55-85	0.011 - 0.00020
	Кузнецкий СС	1	775-880	25-35	0.005 - 0.00010
		2	750-895	40-55	0.007 - 0.00010
		3	665-870	55-90	0.011 - 0.00020
		4	755-1045	80-140	0.016-0.00030
	Кузнецкий Т	1	760-860	25-35	0.005-0.00010
		2	690-830	35-50	0.007 - 0.00010
		3	550-685	30-50	0.006-0.00010
		4	595-775	50-80	0.010-0.00015
		5	590-770	50-80	0.010-0.00016
Смола	Кузнецкий Г	1	590-865	75-135	0.015-0.00030
	Кузнецкий СС	1	680-910	70-105	0.013-0.00020
	Кузнецкий Т	1	885-1470	150-310	0.030-0.00060

Таблица 2. Расчетные значения индивидуальных реакций газовыделения при термическом разложении кузнецких углей со скоростью нагрева ($10^4 - 10^6$) град./с

Экспериментальные работы выполнялись на бурых канско-ачинских и каменных кузнецких углях. Быстротекущий процесс газовыделения расчленялся во времени (отбор газов осуществлялся в газовые пипетки, предварительно вакуумированные и заполняющиеся газообразными продуктами поочередно) и хроматографически оцени-

валось содержание в суммарном газе отдельных газовых компонентов – CO, CO₂, H₂ и CH₄. Скорость нагрева угольной пыли ($\delta < 100$ мкм) в реакционной камере обеспечивалась порядка $10^4 - 10^6$ град./с.

Оценка скорости нагрева (град./с) пылеугольных частиц в реакционном пространстве выполнялась по уравнению [8]

$$\beta = \frac{a_{\rm T} \lambda_{\rm r}}{\lambda_{\rm T}} \frac{\Delta T_{\rm r-q}}{20r^2},\tag{2}$$

где $\Delta T_{r-q} = T_r - T_q^{cp}$ – разность температур между температурой газов и средней температуры пылеугольной частицы; α_r , λ_r – коэффициенты температуропроводности и теплопроводности топлива, определяемые по температуре частицы T_q^{cp} ; λ_r – тепло-

теплопроводности топлива, определяемые по температуре частицы $I_{\rm q}$; $\lambda_{\rm r}$ – теплопроводность газов.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальная установка для исследования процессов термохимического превращения пылевидного твердого топлива в условиях высокоскоростного нагрева с вертикальной реакционной камерой представлена на рис. 1. Несмотря на значительное многообразие существующих лабораторных установок и методических подходов по исследованию процесса горения угля [9, 10] отсутствуют экспериментальные установки, обеспечивающие весь комплекс условий и режимных факторов термохимической обработки топлива, присущих реальным топливоиспользующим и теплотехнологическим устройствам (со скоростью нагрева более 10^3 град./с). Также особенностью разработанной экспериментальной установки является то, что она позволяет в рамках единого методического подхода выполнять раздельные исследования как процессов термического разложения, так и горения пылеугольных частиц в широком диапазоне изменения температур от 20 до 1500° С, коэффициентов избытка воздуха от 0.2 до 2.0 концентрации пылегазовоздушной смеси от 0.3 до 0.6 кг/кг и времени пребывания пылеугольных частиц в реакционной зоне от 0.5 до 5 с.

Основной частью экспериментальной установки является вертикальная цилиндрическая реакционная камера (10) длиной 2100 мм и диаметром 50 мм с электрическим компенсационным обогревом, что позволяет проводить исследования в стационарном режиме.

Угольная пыль поступает в реакционное пространство через тангенциальную горелку (9) из аэромеханического питателя пыли (8). Транспорт пыли к горелке осуществляется в зависимости от целей эксперимента либо инертным газом (аргон), либо воздухом предварительно нагретыми в теплообменнике (6). Расход газа определяется по ротаметру (5) марки РМ 0.04Ж.

Инертный газ для исследования процесса термической деструкции пылевидного топлива подается из газового баллона (1) через регулятор расхода (2) и реактор для удаления кислорода (3) из линии подачи инертного газа. Для исследования процессов горения угля в качестве первичного и вторичного воздуха используются воздух, нагнетаемый вентилятором (4). Расход воздуха и соответственно коэффициент избытка воздуха (α) в реакционной камере регулируются изменением положения шибера, расположенного на всасе вентилятора.

Температурный режим работы реакционной камеры определяется величиной подаваемого напряжения, регулирование значения которого осуществляется РНО (19). Уголь, прошедший термическую обработку, поступает в хвостовую часть (11) реакционной камеры, охлаждается и накапливается в приемном бункере (12) инерционного



Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки для высокотемпературной обработки твердого пылевидного топлива: 1 - 6аллон с инертным газом; 2 - регулятор расхода инертного газа; <math>3 - реактордля удаления кислорода на линии подачи инертного газа; 4 - вентилятор для подачи воздуха; <math>5 - ротаметр; 6 - теплообменник; 7 - распределительный тройник; <math>8 - аэромеханический пылепитатель; <math>9 - пылеугольная горелка; <math>10 - реакционная камера; <math>11 - хвостовая часть; 12 - приемный бункер; 13 - газоход; <math>14 - золоуловитель; 15 - дымосос; 16 - тягонапоромер; 17 - самописец (КСП-4); 18 - самописец (КСП-3); 19 - регулятор напряжения (РНО); <math>20 - устройство для отбора газообразных продуктов; <math>21 - обогреваемый пылеулавливающий циклон; <math>22 - водоохлаждаемый циклон для конденсации жидких продуктов деструкции;<math>23 - многоходовой кран; 24 - штатив газовых пипеток; 25 - газоанализатор; 26 - кран дозатор; 27 - перистальтический насос; <math>28 - газометр.

типа, из которого при необходимости осуществляется отбор нелетучих остатков и золовых частиц на анализ.

Газообразные продукты далее поступают в газоход (13), в котором остаточная дисперсная фаза улавливается в золоуловителе (14) с тканевым фильтром, после чего удаляются в атмосферу дымососом (15). Разряжение, создаваемое дымососом, измеряется тягонапоромером марки ТНЖ-Н (16) с классом точности 1.5 и поддерживается порядка 0.1–0.2 мм рт. ст.

Для исследования процессов термического разложения топлива по длине реакционной камеры на равном расстоянии (через 350 мм) организовано пять газозаборных точек (20). Выделяющие из угля парогазовые продукты обеспыливаются в обогреваемом фильтре-циклоне (21) и поступают на водоохлаждаемый циклон (22), в котором происходит конденсация жидких продуктов (смол) и быстрое охлаждение газа-пиролиза. Для отвода и сброса в атмосферу газообразных продуктов из реакционного пространства и организации рециркуляции солевого раствора из газометра (28) предусмотрен многоходовой кран (23).
109

С целью количественной оценки газообразных продуктов реакции многоходовой кран может быть переведен в позицию, при которой происходит переключение линии отвода газа от перистальтического насоса (27) на линию подачи газа на штатив газовых пипеток (24), заполненных солевым раствором. При этом рециркуляция солевого раствора переводится на отсос раствора из газовых пипеток. Газ из циклона (22) за счет разряжения создаваемого дымососом и уменьшения уровня солевого раствора в газовых пипетках заполняет освободившееся пространство. Выбор пипетки для заполнения газом осуществляется открытием кранов пипетки. Далее газ из газовых пипеток с помощью крана дозатора подается на хроматографический газоанализатор (26) марки 3700 (ЛХМ-80).

Регистрация температурного режима работы реакционной камеры осуществляется с помощью платино-платиновых термопар ($\Pi\Pi_{68}$), соединенных с регистрирующим прибором КСП-4 (18). Слежение за температурой вторичного воздуха и температурой газов в газоходе выполняется с помощью хромель-алюмелевых термопар (ХА) соединенных с регистрирующим прибором КСП-3 (17).

Пылеугольная горелка установлена в верхней части реакционной камеры (5) экспериментальной установки. Корпус горелки (3) изготовлен из нержавеющей стали. Нижняя часть корпуса выполнена в виде расширяющегося конуса, что обеспечивает равномерное распределение пылегазовоздушной смеси по сечению реакционной камеры. Угольная пыль в смеси с первичным транспортирующим газообразным агентом из аэромеханического питателя поступает в горелку по пылепроводу (1). Подогретый инертный газ (для организации процесса термического разложения) или вторичный воздух (для организации процесса термооокислительной деструкции (горения)) подводятся тангенциально, что обеспечивает хорошее перемешивание топлива с газом и, как следствие, приводит к увеличению времени пребывания пылегазовоздушной смеси в зоне горелке. В конусной части горелки вращательное движение пылеугольного потока интенсивно изменяется на прямолинейное, что существенно упрощает расчет времени пребывания угольной частицы в реакционной зоне установки. Расход топлива через горелку определялся с помощью предварительной тарировки пылепитателя и контролировался объемно-весовым методом [9]. Расчетное значение расхода топлива составляло в среднем 0.2-0.3 г/с.

При оценке времени пребывания угольных частиц в камере термообработки при заданной температуре и плотности среды учитывалась скорость витания частиц, которая определялась по формуле

$$w_{\rm B} = \frac{d^2 \rho_{\rm T} g}{18\mu},\tag{3}$$

где *d* – размер пылеугольных частиц, м; $\rho_{\rm T}$ – действительная плотность топлива, кг/м³; *g* – ускорение свободного падения, м/с²; μ – динамическая вязкость среды, кг/(м · с).

Общая скорость частицы определялась как сумма скорости витания $w_{\rm B}$ и скорости потока $w_{\rm m}$

$$w = w_{\rm B} + w_{\rm T}.\tag{4}$$

Расчет скорости потока производился при подаче газов в камеру термообработки в количестве 1×10^{-4} м³/с.

Расчетные значения скорости витания и времени пребывания пылеугольных частиц в камере термообработки приведены в табл. 3.

Исследования проводились на полифракции и на монофракциях узких диапазонов размера частиц d = 0-63 мкм; d = 63-100 мкм; d = 100-160 мкм угля.

Размер	Температура	Скорость	Общая	Время
частиц, мкм	обработки, °С	витания, м/с	скорость, м/с	пребывания, с
63	100	0.102	0.171	12.28
	140	0.093	0.170	12.35
	170	0.086	0.169	12.43
	200	0.081	0.171	12.28
	300	0.067	0.177	11.86
	400	0.057	0.187	11.23
	500	0.050	0.210	10.40
	600	0.044	0.235	9.45
	700	0.038	0.266	8.34
	800	0.034	0.304	7.07
	900	0.031	0.346	5.64
100	100	0.256	0.325	6.46
	140	0.231	0.308	6.82
	170	0.216	0.299	7.02
	200	0.202	0.292	7.19
	300	0.167	0.277	7.58
	400	0.140	0.270	7.78
	500	0.123	0.258	8.04
	600	0.108	0.250	8.21
	700	0.095	0.244	8.36
	800	0.083	0.239	8.49
	900	0.073	0.234	8.61
160	100	0.641	0.710	2.96
	140	0.579	0.656	3.20
	170	0.540	0.623	3.37
	200	0.506	0.596	3.52
	300	0.417	0.527	3.98
	400	0.355	0.485	4.33
	500	0.312	0.446	4.49
	600	0.273	0.416	4.68
	700	0.241	0.391	4.83
	800	0.213	0.369	4.96
	900	0.189	0.350	5.08

Таблица 3. Расчетные значения скорости витания и времени пребывания частиц угля

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ КОМПЛЕКСНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО АНАЛИЗА И ЛАБОРАТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ВЫСОКОСКОРОСТНОГО НАГРЕВА ПЫЛЕВИДНОГО ТОПЛИВА

Для обоснования методики определения кинетических параметров различных процессов термохимической обработки по результатам комплексного термического анализа твердого органического топлива, изложенной в работе [2], были выполнены исследования процессов сушки, термического разложения и горения нелетучего коксового остатка пылевидного угля в условиях высокоскоростного нагрева (10^4-10^6 град./с). Решение данной задачи позволит обосновать применимость комплексного термического анализа для получения данных о реакционной способности различных стадий термохимического превращения угля в пылевидном состоянии, а также скорректировать и оптимизировать условия его проведения при низких скоростях нагрева (5-20 град./мин) и температур (до 1500° С). Исследование процесса испарения влаги осуществлялось при следующих условиях: варьировались размер пылеугольных частиц: 0–63 мкм, 63–160 мкм и полифракция, а также температура термообработки: 200, 250, 300 и 400°С и время пребывания в реакционном пространстве экспериментальной установки от 1 до 4.5 с. Так как на настоящий момент отсутствует стандартная методика определения химически связанной влаги в топливе, то при высокоскоростном нагреве у нелетучих продуктов термообработки производили оценку содержания только гигроскопической влаги. Остаточная влажность пылеугольных частиц определялась в сушильном шкафу по ГОСТ 8719-90.

Полученные экспериментальные данные по изменению содержания влаги в топливе при постоянных температурах и различном времени пребывания угольных частиц в камере термообработки позволяют выполнить количественную оценку кинетических характеристик процесса испарения влаги из топлива.

С этой целью результаты обработки экспериментальных данных представлялись в форме следующей зависимости: $\ln\left(\frac{W}{W-\Delta W}\right) = k\tau$ или $W_i = W\exp(-k\tau)$, где W – начальная влажность исходного топлива, %; ΔW – изменение влажности при термообработке, %; W_i – текущее значение влажности угля, %; k – константа скорости процесса сушки топлива, 1/с; τ – время термической обработки, с.

Из данной зависимости видно, что в координатах $\ln\left(\frac{W}{W-\Delta W}\right) = f(\tau)$ экспериментальные точки должны подчиняться линейному закону. На рис. 2 на примере термообработки полифракции бородинского угля приведены зависимости $\ln\left(\frac{W}{W-\Delta W}\right)$ от времени пребывания в камере термообработки при различных значениях температуры. Как видно из рисунка, экспериментальные точки удовлетворительно описываются прямыми линиями в рассматриваемых координатах.

Для определения энергии связи (*E*) влаги с топливом и предэкспоненциального множителя (k_0) по опытным данным выполнялось построение графических зависимостей ln*k* от обратной абсолютной температуры процесса термообработки (1/*T*), при различных фиксированных значениях времени пребывания частиц в камере термообработки τ .

На рис. 3 приведена зависимость $\ln k = f(1/T)$ для полифракции бородинского угля со средним размером частиц d = 100 мкм. Из рисунка видно, что для рассматриваемых моментов времени τ экспериментальные точки удовлетворительно описываются уравнением прямой линии, а энергия связи процесса испарения влаги может быть найдена как тангенс угла наклона этой линии к оси абсцисс, $E = tg\alpha$.

Определяемая по рис. 3 энергия связи имеет значение E = 18.083 кДж/моль. Предэкспоненциальный множитель k_0 измеряется в единицах обратного времени 1/с и находится из закона Аррениуса. Применительно к данным рис. 3 значение k_0 составляет 22.5 1/с.

Для детального анализа протекания процесса испарения влаги из пылеугольных частиц в условиях высокоскоростного нагрева были проведены исследования монофракций на примере бородинского угля. Конечной целью данного исследования являлось определение кинетических параметров процесса испарения влаги из пылеугольных частиц разного размера.

На рис. 4 и 5 представлены зависимости в координатах $\ln\left(\frac{W}{W-\Delta W}\right) = f(\tau)$ для фракций с размером частиц d = 0-63 мкм и d = 63-160 мкм. Данные зависимости используются для оценки кинетических характеристик процесса испарения влаги. Анализ полученных зависимостей (см. рис. 4 и 5) показывает, что значения энергии связи влаги с топливом (*E*) фактически не зависят от размера пылеугольных частиц, так как



Рис. 2. Зависимость изменения $\ln\left(\frac{W}{W-\Delta W}\right)$ от времени термообработки для полифракции бородинского угля; температура обработки, °C: $\bigcirc -200$; $\triangle -250$; $\diamondsuit -300$; $\Box -400$.



Рис. 3. Зависимость изменения ln *k* процесса испарения влаги бородинского угля от обратной температуры процесса; размер пылеугольных частиц, мкм: $\Delta - 63 - 160$; $\diamond -$ полифракция; $\bigcirc -0-63$.

графики, построенные в координатах $\ln k = f(1/T)$ для различных фракций, проходят параллельно друг другу, т.е. с одинаковыми углами наклона (tg α = const).

Несовпадение экспериментальных данных и их параллельное расположение указывает на различные значения предэкспоненциального множителя k_0 . Более низкое значение k_0 характерно для крупных частиц и объясняется наличием у угольных частиц этих фракций капиллярного испарения, которое протекает с более медленными скоростями, чем поверхностное испарение [10]. Наличие капиллярного испарения в мелких фракциях d < 100 мкм имеет незначительное влияние на общую картину процесса испарения влаги и поэтому k_0 для этих частиц принимает максимальное значение.

Сопоставление констант скоростей процесса испарения влаги из канско-ачинских углей в условиях комплексного термического анализа [2] и высокоскоростного нагрева представлено в табл. 4. Анализ полученных данных по исследованию кинетики



Рис. 4. Изменение $\ln\left(\frac{W}{W-\Delta W}\right)$ от времени термообработки для монофракций ирша-бородинского угля с размером частиц от 0 до 63 мкм: температура обработки, °C: $\bigcirc -200$; $\triangle -250$; $\diamond -300$.



Рис. 5. Изменение $\ln\left(\frac{W}{W-\Delta W}\right)$ от времени термообработки для монофракций ирша-бородинского угля с размером частиц от 63 до 160 мкм: температура обработки, °C: $\bigcirc -200$; $\Delta - 250$; $\diamond -300$.

сушки в различных условиях термообработки топлива позволяет констатировать, что реакционный механизм и профиль кривых процесса сушки пылевидного топлива остаются неизменными при варьировании соответственно скорости нагрева.

Для проверки адекватности принятой в работе кинетической модели исследуемого процесса испарения влаги проведено статистическое сопоставление результатов ком-

Марка	Константа скорости сушки, <i>К</i> ₉₀₀ , 1/мин			
топлива	5 град./мин [2]	10 ⁴ —10 ⁶ град./с		
Березовский сажистый	0.39	0.51		
Березовский окисленный	0.31	0.60		
Березовский рядовой	0.92	1.10		
Бородинский	0.79	0.92		
Назаровский	0.88	1.04		

Таблица 4. Константы скоростей процесса испарения влаги при термической обработке полифракции канско-ачинских углей ($t_{\rm K} = 900^{\circ}{\rm C}$)

плексного термического анализа и высокоскоростного нагрева топлива. Установлено, что их относительная погрешность при 95%-ном доверительном интервале (по Стьюденту) составляет не более 2–3%.

При высокоскоростном нагреве пылеугольной частицы скорость выхода, *W*, отдельных газовых компонентов для произвольного порядка реакции, *n*, определяется выражением [2]:

$$W = \frac{dC}{d\tau} = k \left[\frac{C_0^{n-1}}{1 + (n-1)C_0^{n-1}k\tau} \right]^{\frac{n}{n-1}},$$
(5)

или в более удобном для графической обработки виде:

$$\frac{1}{W^{\frac{n}{n-1}}} = (n-1)k^{\frac{1}{n}\tau} + \frac{1}{C_0^{n-1}k^{\frac{n-1}{n}}}.$$
(6)

В уравнениях (5) и (6): C_0 – суммарное количество выделяющегося при $T_{\rm k}$ рассчитываемого газового компонента за весь период изотермической выдержки; C – текущая концентрация газового компонента к расчетному моменту времени τ ; k – константа скорости процесса. 1/мин. В общем слушае, зарисимость $\frac{1}{2} = f(\tau) =$ прямая

станта скорости процесса, 1/мин. В общем случае, зависимость $\frac{1}{W^{\frac{n}{n-1}}} = f(\tau) - прямая$

линия, тангенс угла наклона которой определяется величиной k.

Применимость выражений (5) и (6) для оценки скорости реакций газовыделения обеспечена достижением условий проведения эксперимента в строго кинетической области при отсутствии диффузионных осложнений, когда количества прореагировавшего вещества на единице поверхности в единицу времени ("поток реакции") существенно превышает диффузионной поток через слой продукта [6].

Кривые динамики выделения индивидуальных компонентов суммарного газа при термическом разложении бородинского угля приведены на рис. 6 и 7. Здесь и во всех последующих графиках представлены экспериментальные зависимости, полученные при температуре процесса от 500 до 1000°С с интервалом через 100°С.

Полученные экспериментальные данные по динамике термического разложения бородинского угля в условиях высокоскоростного нагрева отражают сложный характер зависимостей выхода индивидуальных компонентов суммарного газа как от времени, так и от температуры протекания процесса. При этом характер соответствующих закономерностей различен для каждого из компонентов. Например, в первые 1.5-2 с массовый выход CO₂ (рис. 6а) снижается с повышением температуры, а у CO, CH₄ и H₂ (рис. 66, 6в и рис. 7а) возрастает.



Рис. 6. Динамика выделения индивидуальных газовых компонентов при термическом разложении бородинского угля в условиях высокоскоростного нагрева: (a) CO₂; (b) CO; (b) CH₄; температура обработки: $\diamond - 500^{\circ}$ C; $\Box - 600^{\circ}$ C; $\Delta - 700^{\circ}$ C; $\star - 800^{\circ}$ C; $* - 900^{\circ}$ C; $\circ - 1000^{\circ}$ C.

Конечные выходы CO, CO₂, CH₄ и H₂, как иллюстрируют рис. 8 и 9 возрастают с повышением температуры процесса термообработки.

На рисунках 10 и 11 представлена расчетная динамика (по уравнению 5) суммарного выхода индивидуальных газообразных компонентов (CO, H₂ и CH₄) на примере термического разложения бородинского и кузнецкого Г углей в эксперименте с высокоскоростным нагревом ($t_{\rm k} = 900^{\circ}$ C). Здесь же приведены результаты выделения из суммарных кривых индивидуальных реакций 1-го порядка. В табл. 5 представлено сопоставление кинетических констант, определенных в условиях комплексного термического анализа ($\beta = 5$ град./мин) и в опытах с высокоскоростным нагревом ($\beta = = 10^4 - 10^6$ град./с).

Так, при высокоскоростном нагреве в большинстве случаев отмечены две индивидуальные реакции, ответственные за выделение CH₄, да и то с несовпадающими с медленным нагревом численными значениями их констант скоростей.

Выделение H_2 и CO характеризуется, в отличие от CH₄, практически постоянным реакционным механизмом при изменении скорости нагрева на 5–6 порядков. Основной причиной аномалии по CH₄ с большой долей вероятности следует считать вторичные процессы, сопутствующие смоловыделению, с которым связан выход углеводородных газов и CH₄ в первую очередь [11].



Рис. 7. Динамика выделения индивидуальных газовых компонентов при термическом разложении бородинского угля в условиях высокоскоростного нагрева: (а) H₂; (б) суммарный выход газовых компонентов ($\sum C_i$); температура обработки: $\diamond - 500^{\circ}$ C; $\Box - 600^{\circ}$ C; $\Delta - 700^{\circ}$ C; $\times - 800^{\circ}$ C; $* - 900^{\circ}$ C; $\bigcirc - 1000^{\circ}$ C.



Рис. 8. Конечный выход индивидуальных газовых компонентов при термическом разложении бородинского угля в условиях высокоскоростного нагрева: $\diamond - CO_2$; $\Box - CO$; $\Delta - CH_4$; $\times - H_2$.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Из приведенного выше сопоставления результатов комплексного термического анализа при медленном нагреве (~5 град./мин) [2] с экспериментальными данными высокоскоростного (~ 10^4-10^6 град./с) нагрева, следует важный вывод неизменности механизма термической деструкции угольного вещества при экстремальных значениях скоростей нагрева. Обнаруженное в эксперименте отклонение по значению констант скорости выделения метана (CH₄), на наш взгляд, не может являться основанием для пересмотра этой концепции при термическом разложении органической массы угля.

Для определения кинетических констант процесса выгорания нелетучих остатков термического разложения канско-ачинских и кузнецких углей пробы коксовых частиц различного фракционного состава: полифракция; 63–100 мкм; 100–1000 мкм; 1000–3000 мкм сжигались при четырех значениях температуры: 1040, 1180, 1315 и



Рис. 9. Конечный выход летучих веществ при термическом разложении бородинского угля в условиях высокоскоростного нагрева: \Box – выход летучих веществ; \diamond – сумма индивидуальных газообразных компонентов; Δ – смоловыделение.

1455°С. Время пребывания коксовых частиц в реакционном пространстве экспериментальной установки составляло 0.85 с. Температурно-временной режим обработки коксовых частиц, а также коэффициент избытка воздуха в реакционном пространстве выбирались исходя из условий проведения экспериментальных исследований максимально близких к условиям реальных топливоиспользующих устройств, в частности топочных камер современных котельных агрегатов.

Типичные результаты интенсивности выгорания коксовых частиц на примере бородинского и кузнецкого газового углей представлены на рис. 12.

Результаты обработки экспериментального материала по интенсивности выгорания коксовых частиц различного фракционного состава представлены в координатах $\lg k = f\left(\frac{1}{T}10^3\right)$, которые затем использовались для нахождения видимых кинетических констант. Данные зависимости на примере выгорания коксовых остатков бородинского угля и кузнецкого газового угля представлены на рис. 13.

Сопоставление констант скоростей процесса выгорания коксовой основы из канско-ачинских и кузнецких углей в условиях комплексного термического анализа и высокоскоростного нагрева представлено на рис. 14 и 15, в табл. 6.

Анализ полученных данных по исследованию кинетики выгорания нелетучих остатков в различных условиях термообработки топлива позволяет констатировать, что реакционный механизм и профиль кривых процесса выгорания коксового остатка пылевидного топлива остаются неизменными при варьировании соответственно скорости нагрева в широком диапазоне.

Относительная погрешность при 95%-ном доверительном интервале (по Стьюденту) составляет не более 5–7%, что свидетельствует об адекватности принятой в работе кинетической модели исследуемого процесса выгорания нелетучих (коксовых) остатков в условиях комплексного термического анализа и высокоскоростного нагрева топлива.

К совокупности качественных и количественных характеристик продуктов термообработки можно отнести теплотехнические и реакционные характеристики полукокса, физико-химические свойства его минеральной части, состав газообразных продуктов термического разложения [14].



Рис. 10. Динамика газовыделения при термическом разложении бородинского угля в условиях высокоскоростного нагрева ($\beta = 10^4 - 10^5$ град./с) до $t_{\rm K} = 900^{\circ}$ С: (a) CO; (b) H₂; (b) CH₄.



Рис. 11. Динамика газовыделения при термическом разложении кузнецкого угля марки Γ в условиях высокоскоростного нагрева ($\beta = 10^4 - 10^5$ град./с) до $t_{\rm K} = 900^{\circ}$ С: (a) CO; (b) H₂; (b) CH₄.

		Константа скорости, <i>К</i> ₉₀₀ , 1/мин					
Марка топлива	№ стадии	СО		H ₂		CH ₄	
		5 град./мин	10 ⁴ —10 ⁶ град./с	5 град/мин	10 ⁴ —10 ⁶ град./с	5 град./мин	10 ⁴ —10 ⁶ град./с
Бородин-	1	3.63	4.55	1.49×10^{-1}	3.3×10^{-1}	8.8×10^{-1}	_
ский	2	_	_	_	_	1.87	2.12
	3	—	—	1.27×10^{-1}	2.7×10^{-1}	—	_
	4	—	—	—	—	—	—
Березов-	1	4.18	3.97	2.28	2.81	4.06×10^{1}	5.3×10^{1}
ский	2	—	—	3.48×10^{-1}	—	2.45	2.15
	3	2.42	2.66	—	—	—	_
	4	—	_	—	—	—	—
Назаров-	1	4.15×10^{-1}	4.01×10^{-1}	1.79	1.65	3.45×10^{-1}	5.07×10^{-1}
ский	2	1.72×10^{-1}	—	7.07	6.89	1.9	2.1
	3	1.78	2.44	—	—	—	—
	4	—	-	—	—	—	—
Кузнец-	1	1.31×10^2	1.22×10^2	-	—	2.3×10^{3}	-
кий Г	2	—	_	5.89×10^{1}	7.15×10^{1}	0.3×10^{3}	0.5×10^2
	3	2.92	4.6	—	—	2.3×10^{3}	0.11×10^3
	4	—	—	8.47	8.00	5.0×10^{3}	_
	5	—	_	—	—	3.6×10^{3}	—
	6	—	_	—	—	4.7×10^2	—
Кузнец-	1	—	-	—	—	1.6×10^{3}	8.9×10^2
кий СС	2	2.05×10^{-1}	1.61×10^{-1}	6.73×10^{1}	5.59×10^{1}	5.1×10^2	—
	3	2.42	2.38	—	—	4.9×10^2	5.0×10^2
	4	—	-	7.38	7.15	0.3×10^2	_
Кузнец-	1	9.0×10^{1}	8.8×10^{1}	1.37×10^2	1.11×10^2	2.7×10^{3}	_
кий Т	2	1.91	_	4.21	3.99	2.9×10^{3}	9.5×10^2
	3	5.1	6.4	—	—	5.3×10^4	4.2×10^4
	4	—	—	—	—	2.8×10^{3}	_
	5	—	—	—	—	2.6×10^{3}	_

Таблица 5. Константы скоростей индивидуальных реакций, ответственных за выделение индивидуальных летучих компонентов при термическом разложении канско-ачинских углей и кузнецких углей ($t_{\rm K} = 900^{\circ}{\rm C}$)

Обобщение полученных реакционных характеристик от содержания углерода на горючую массу *C*^{*daf*} представлено на рис. 16 и 17.

Обращает на себя внимание существенные изменения значений энергии активации (E) и вероятностного фактора (k_0) как основного периода выхода летучих веществ (периода смоловыделения), так и горения коксовых остатков от качества исходного угля, в частности, главным образом от содержания углерода в топливе C^{daf} .

Из приведенных на рис. 16 и 17 данных следует, что влияние степени метаморфизма на кинетические параметры в случае выхода летучих веществ и горения коксовых остатков канско-ачинских углей носит экстремальный характер с точкой экстремума $C^{daf} = 82\%$. Характер изменения реакционной способности (*E* и k_0) энергетических углей различной стадии метаморфизма подтверждает предположение о том, что реакционный механизм и профиль кинетических кривых остаются неизменными при экстремальных скоростях нагрева (в пределах 10^{-2} — 10^6 град./с).

При определении кинетических параметров основного периода выделения летучих веществ и горения кокосового остатка энергетических углей выявлена связь энергии



Рис. 12. Интенсивность выгорания коксовых частиц (размер 63–100 мкм) бородинского (а) и кузнецкого Γ (б) углей при различной температуре обработки, °C: $\bigcirc -1040$; $\square -1180$; $\triangle -1315$; $\diamond -1455$.



Рис. 13. Видимая константа скорости горения различных фракций коксовых частиц бородинского (а) и кузнецкого Г (б) углей: \bigcirc – полифракция; \square – 63–100 мкм; \triangle – 100–1000 мкм; \diamond – 1000–3000 мкм.



Рис. 14. Видимая константа скорости горения коксовых частиц (полифракция) канско-ачинских углей в условиях высокоскоростного нагрева: ○ – Бородинский; □ – Березовский; Δ – Назаровский.



Рис. 15. Видимая константа скорости горения коксовых частиц (полифракция) кузнецких углей в условиях высокоскоростного нагрева: ○ — Кузнецкий Г; □ — Кузнецкий СС; Δ — Кузнецкий Т.

активации этих процессов с размерами элементарных структурных единиц ($R_{\text{лок}}$, A°). Этой зависимостью подтверждается влияние молекулярного строения исходного угольного вещества на характер образования и выделения летучих веществ, а также горения кокосовых остатков твердых органических топлив. Отмечается тенденция возрастания величины энергии активации (E) исследуемых процессов с увеличением размеров элементарных структурных единиц.

Несмотря на значительное многообразие вычислительных программ для обработки результатов термоаналитического эксперимента, каждая из них является носителем тех методических подходов, которые положены в основу расчетного алгоритма. При этом мощный математический аппарат таких вычислительных комплексов, их возможности ограничены необходимостью учета наличия специфических особенностей выполнения термоаналитического эксперимента в силу существенного различия технических, теплофизических и реакционных свойств испытуемого топлива. Данная связь находит свое отражение как в изменении измерительной схемы и конструкции экспериментальной установки, так и в методиках проведения анализа и обработки получаемых результатов. В связи с тем, что в реальном эксперименте всегда присутствует случайная составляющая погрешности измерения, целесообразно при проведении экспериментальных работ выполнить проверку устойчивости экспериментально-рас-

Марка топлива	Константа скорости выгорания коксовой основы, <i>К</i> ₉₀₀ , м/мин			
тарка топлива	5 град./мин [2]	10 ⁴ —10 ⁶ град./с		
Березовский рядовой	2.44×10^{2}	2.74×10^{2}		
Березовский окисленный	7.86×10^2	8.22×10^2		
Березовский сажистый	3.74×10^2	3.51×10^2		
Бородинский	9.95×10^{1}	1.92×10^{2}		
Назаровский	3.68×10^2	4.03×10^2		
Кузнецкий Г	2.42×10^2	2.32×10^2		
Кузнецкий СС	5.36×10^2	5.84×10^2		
Кузнецкий Т	5.97×10^{2}	6.45×10^2		

Таблица 6. Константы скоростей процесса выгорания коксовой (нелетучей) основы полифракции канско-ачинских и кузнецких углей ($t_{\rm K} = 900^{\circ}{\rm C}$)



Рис. 16. Кинетические параметры основного периода выхода летучих веществ (смоловыделения) энергетических углей: \bigcirc – энергия активации (*E*); \triangle – вероятностный фактор (k_0).



Рис. 17. Кинетические параметры горения коксового остатка энергетических углей: $\bigcirc -E$; $\Delta - k_0$ канскоачинских углей; \bullet и \blacktriangle – кузнецких углей.

четного алгоритма к воздействию случайного шума с целью получения предельных оценок погрешностей расчета кинетических параметров. Случайный шум моделировался программно с помощью генератора случайных чисел. Результаты обработки более чем 450 вычислений с различным уровнем шума приведены на рис. 18 и 19.

На рис. 18 показаны зависимости математического ожидания относительной погрешности определения энергии активации (δE) от математического ожидания уровня шума в процентах (m_x) к максимальной степени превращения. Параметром оценки кривых выступает коэффициент дискретности ($k_{\rm g}$) численно равный отношению величины температурного интервала протекания процесса к периоду регистрации информации при проведении комплексного термического анализа (темп нагрева фиксированный – $\beta = 5$ град./мин).

Из представленных результатов следует, что для выбранного темпа нагрева (исходя из принципа идентичности экспериментальным условиям проведения комплексного термического анализа) существует область коэффициентов дискретности, соответствующая устойчивому решению задачи с минимальными погрешностями расчета ки-



Рис. 18. Зависимость погрешности определения энергии активации от уровня случайного шума ($\beta = 5$ град./мин): $\bigcirc -k_{\pi} = 13.2$ град./с; $\Box - k_{\pi} = 9.8$ град./с; $\Delta - k_{\pi} = 3.2$ град./с; $\times -k_{\pi} = 6.5$ град./с.



Рис. 19. К определению области устойчивого решения обратной кинетической задачи.

нетических параметров. Обобщение этих результатов на произвольные темпы нагрева показано на рис. 19, где заштрихованная область соответствует области устойчивого решения обратной кинетической задачи. Все приведенные результаты получены с использованием предварительного интерполяционного сглаживания исходных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Сопоставлением значений видимых констант скорости термохимического превращения угля, полученных при низких скоростях нагрева ($\beta = 5-20$ град./мин), присущих условиям комплексного термического анализа, с экспериментом при высокоскоростном нагреве топлива ($\beta = 10^4 - 10^6$ град./с) в лабораторных условиях, присущих условиям реальных топливоиспользующих установок, показана неизменность механизмов отдельных стадий процесса горения угольного вещества (сушки, термической деструкции и горения нелетучего остатка) при экстремальных изменениях значений скорости нагрева, что позволяет рекомендовать комплексный метод термического анализа твердого органического топлива в неизотермических условиях для объективной и адекватной оценки реакционной способности энергетических углей. Относительная погрешность реакционных характеристик, полученных методом комплексного термического анализа угля и на установках его высокоскоростного нагрева при 95%-ном доверительном интервале (по Стьюденту), составляет не более 5–7%.

2. Установлено, что основная масса летучих веществ канско-ачинских углей представлена смолами (соотношение "смола–газ" составляет 0.6–2.4). Значение кажущихся констант горения коксовой основы E и k_0 сопоставимы с таковыми для микрокомпонентов группы витринита каменных углей с содержанием углерода на горючую массу ~72% и составляют соответственно: $E_{\rm CM} = 50.3-83.8$ кДж/моль; $k_{0\,\rm CM} = 4 \times 10^2 - 3 \times 10^5$ 1/мин и E = 104.8-217.9 кДж/моль; $k_0 = 3 \times 10^4 - 5 \times 10^{14}$ м/ч. Влияние размера угольных частиц на значения E и k_0 ощутимо сказывается при увеличении размера более 250–300 мкм (смоловыделение) и при размерах частиц более 2000 мкм (горение нелетучего остатка) и определяется диффузионным осложнением. Предельный размер буроугольных частиц, вокруг которых образуется фронт горючих летучих, составляет ~250 мкм. Длительность выделения летучих веществ сопоставима с временем пребывания газов в зоне активного горения топочных камер паровых котлов, что указывает на необходимость уточнения теплового расчета топочных камер при сжигании бурых углей с раздельной оценкой длительности выделения летучих веществ и горения коксового остатка.

3. Соответствие значений E и k_0 , полученных методом комплексного термического анализа результатам обработки испытаний лабораторной установки по высокоскоростному нагреву пылевидного топлива, позволяет использовать кинетические характеристики, отражающие реакционную способность твердого органического топлива в расчетах выгорания пылеугольного факела. При расчете длительности выделения и выгорания горючих компонентов летучих веществ (метана, оксида углерода), а также при определении длительности выгорания коксовой основы угля, данные лабораторных исследований по кинетике высокоскоростного нагрева совместно с кинетическими характеристиками (результаты комплексного термического анализа) могут быть использованы для объяснения и обоснования природы тепловых потерь с химическим и механическим недожогом.

4. Исследование кривых выгорания коксовых остатков показывает, что при скоростях нагрева менее 10^3 град./с выгорание кокса завершается в период прогрева частицы. При больших скоростях нагрева время выгорания коксовых частиц складывается из неизотермической и изотермической составляющих. Анализ экспериментальных данных по исследованию кинетики различных этапов термохимического превращения пылевидного топлива позволяет констатировать, что реакционный механизм и профиль кривых остаются неизменными при экстремальных скоростях нагрева (в пределах 10^{-2} — 10^6 град./с), что позволяет рекомендовать комплексный термический анализ для оценки реакционной способности энергетических углей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. *Глинина О.И*. Второй международный форум "Российская энергетическая неделя" // Уголь. 2019. № 2. С. 4–10.
- 2. Бойко Е.А. Реакционная способность энергетических углей // Красноярск: ИПЦ СФУ, 2011. С. 606.
- 3. *Федорова Н.И., Хицова Л.М., Исмаеилов З.Р.* Термогравиметрическое исследование инертинитовых фракций каменных углей // Химия в интересах устойчивого развития. 2019. Т. 27. № 4. С. 421–429.

- 4. *Моисеева К.М., Крайнов А.Ю*. Моделирование распространения пламени аэровзвеси угольной пыли с учетом выхода летучих компонентов // Горение и взрыв. 2018. Т. 11. № 4. С. 29–35.
- 5. Козлов А.Н., Свищев Д.А., Худякова Г.И., Рыжков А.Ф. Кинетический анализ термохимической конверсии твердых топлив (обзор) // Химия твердого топлива. 2017. № 4. С. 12–21.
- Бойко Е.А., Страшников А.В. Теоретическое обобщение и развитие математического аппарата неизотермической кинетики // Известия РАН. Энергетика. 2021. № 2. С. 97–118.
- Ponomareva A.A., Tcoi K.A., Mokrin S.N., Shtym K.A. A laboratory setup based on porous burner for coal particles combustion investigation // Journal of Physics: Conference Series. 5th International Workshop on Heat/Mass Transfer Advances for Energy Conservation and Pollution Control, IWHT 2019. 2019. P. 12–41.
- Liu Y., Qi H., Huo P., Li X. Numerical study of coal gasification dual-CFB plant based on the generalized drag model // Fuel Processing Technology. 2020. V. 203. P. 10–63.
- Silva R.C., Krautz H.J. Experimental studies on heat transfer of oxy-coal combustion in a largescale laboratory furnace // Applied Thermal Engineering. 2015. V. 82. P. 82–97.
- Pang L., Shao Y., Zhong W., Liu H., Jiang P. Experimental Investigation of Oxy-coal Combustion in a 15 kWth Pressurized Fluidized Bed Combustor // Energy Fuels. 2018. V. 33. P. 1694–1703.
- 11. Кузнецов П.Н., Федорчак М.А., Тарасова Л.С., Колесникова С.М., Каменский Е.С. Реакционная способность бурых углей в условиях термоокислительной деструкции // Химия твердого топлива. 2012. № 1. С. 1–12.
- Glushkov D.O., Kuznetsov G.V., Strizhak P.A., Syrodov S.V. A mathematical model for processes in coal water slurries containing petrochemicals under heating // Energy and Fuels. 2018. V. 32. № 8. P. 8789–8802.
- Бойко Е.А., Пачковский С.В. Диффузионно-кинетическая модель горения и тепломассообмена пылеугольных частиц в газовом потоке // Химия твердого топлива. 2008. № 6. С. 3–13.
- 14. Михайлов А.С., Пиралишвили Ш.А., Степанов Е.Г., Спесивцева Н.С. Экспериментальное исследование теплофизических свойств торфяного топлива // Инженерно-физический журн. 2017. Т. 90. № 2. С. 521–527.

Kinetics of Thermochemical Transformation of Solid Organic Fuel under High-Speed Heating

E. A. Boiko^{*a*}, * and A. V. Strashnikov^{*a*}, **

^aSiberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia *e-mail: EBoiko@sfu-kras.ru **e-mail: savtr@mail.ru

The results of experimental studies of the thermochemical transformation of solid organic fuel during its heat treatment and combustion under laboratory conditions are presented, with a comparison of the data obtained for determining the visible constants of the coal combustion rates. Experimental studies were carried out on an experimental installation with a vertical reaction chamber at high-speed heating $(10^4-10^6 \text{ deg/s})$, corresponding to the conditions of real heat-technological processes and devices. The unit provides heat treatment of pulverized coal particles in various gas environments in the range from 200 to 1500°C with a residence time in the reaction space from 0.5 to 4.5 s. The experimental data obtained in the form of the $\lg k = f(1/T)$ dependences are used to estimate the kinetic characteristics of various stages of the thermochemical transformation of fuel (drying, heat destruction, and combustion of the non-volatile residue). It is established that, under certain conditions, it is possible to recommend a comprehensive method of thermal analysis of solid organic fuels under non-isothermal conditions at low heating rates ($\beta = 5-20 \text{ deg/min}$) for an objective and adequate assessment of the reactivity of energy coals.

Keywords: kinetics, thermochemical transformations, solid organic fuel, high-speed heating, laboratory experiment

УДК 533.6,536.3

МЕТОДИКА РАСЧЕТА РАДИАЦИОННО-КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОМ ДВУХФАЗНОМ ПОТОКЕ В КАНАЛЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ

© 2021 г. А. М. Руденко¹, В. В. Миронов¹, А. В. Колпаков^{1, *}

¹Государственный научный центр Российской Федерации — федеральное государственное унитарное предприятие "Исследовательский центр им. М.В. Келдыша", Москва, Россия *e-mail: a.v.klp@mail.ru

> Поступила в редакцию 19.04.2021 г. После доработки 02.08.2021 г. Принята к публикации 06.08.2021 г.

Разработана алгоритмически единая методика расчета, и на ее основе создана комплексная программа для численного моделирования радиационно-конвективного теплопереноса в высокоэнтальпийном двухфазном потоке продуктов сгорания в осесимметричном канале энергетической установки со сложной геометрией разрушающейся стенки при наличии областей дозвукового и сверхзвукового течения. Приведены примеры расчета теплового потока с учетом вязкости, теплопроводности, турбулентности течения, поглощения и анизотропного рассеяния теплового излучения.

Ключевые слова: численное моделирование, методика, теплоперенос, излучение, поглощение, рассеяние, высокоэнтальпийный, двухфазный, полидисперсный, поток **DOI:** 10.31857/S0002331021040105

ВВЕДЕНИЕ

Скорость нагрева и разрушения стенки канала энергетической установки с заданными термохимическими свойствами определяется суммарным конвективным и радиационным потоком, который является практически наиболее важным параметром радиационно-конвективного взаимодействия и поэтому в первую очередь исследуется при создании современных энергетических установок.

Численное моделирование высокоэнтальпийных излучающих двухфазных потоков связано со значительными трудностями, поэтому исследователи часто рассматривают задачу радиационно-конвективного взаимодействия в упрощенной постановке, когда влиянием того или иного фактора на решение можно пренебречь.

В [1] для простой геометрии (плоская стенка) предложена методика расчета и получено численное решение для радиационного прогрева и разрушения теплозащитного композиционного материала в вакууме при наличии радиационно-конвективного взаимодействия в сверхзвуковом осесимметричном двухфазном эрозионном факеле, содержащем поглощающие и рассеивающие частицы. Показано, что учет дивергенции потока излучения в уравнении энергии приводит к перестройке расчетного поля течения, в частности, поглощение излучения приводит к сильному нагреву двухфазного потока, однако, это практически не влияет на поток излучения в разрушающуюся стенку и на скорость ее прогрева.

В [2] получены численные оценки радиационных потерь в перспективном алюмоводородном реакторе для рабочих температур на уровне 3000 К и выше. В рабочей зоне такого реактора присутствуют частицы водяного пара и алюминия, которые активно участвуют в радиационном теплообмене, так что радиационные потери на стенках реактора могут быть сопоставимы с генерируемой мощностью, и поэтому возможность практической реализации генератора становится не очевидной, а оценки радиационных потерь критически важными. Задача о радиационно-конвективном взаимодействии в данном случае также решалась в простой одномерной постановке для однородной среды, свойства которой не зависят от координат и являются задаваемым параметром.

В [3] исследовано влияние столкновений частиц на расчетный поток излучения при натекании сверхзвукового двухфазного потока на препятствие. Также рассматривалась простая геометрия — натекание на шар. Решение аналогичной задачи для потока в канале сложной геометрии при наличии разрушающейся под действием теплового потока стенки связано, очевидно, с существенно большими трудностями.

Методические основы организации численного моделирования теплопереноса в высокоэнтальпийных, неравновесных по температуре и по скорости турбулентных двухфазных потоках при наличии областей дозвукового и сверхзвукового течения с целью определения теплового потока в разрушающуюся стенку энергетического канала сложной геометрии были даны в ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша" (см. [4–6]). Эти исследования получили затем развитие в [7–9]. Влияние поглощения и рассеяния теплового излучения частицами дисперсной фазы в этих работах не учитывалось.

В [5, 6] предложен метод расчета трехмерных двухфазных вязких течений вблизи затупленных тел или при вдуве поперечных струй со скачками уплотнения и дозвуковыми зонами, приведены примеры расчета трехмерных вихревых течений, выполнено сравнение с экспериментов по давлению, плотности и геометрии скачков. Тестирование программы выполнялось путем сопоставления с известными решениями для течения Прандтля—Майера и для натекания потока на клин. Использовались метод установления, нестационарные уравнения Навье—Стокса для идеального газа и двухслойная модель турбулентности Болдуина—Ломакса—Ван Дриста.

Результаты [5] были развиты в [6] для случая трехмерных течений в соплах ракетных двигателей, было выполнено сравнение с экспериментом по локальным и интегральным параметрам, которое показало хорошее согласие с расчетными данными. Нестационарные уравнения записывались в прямоугольной системе координат, для коэффициента турбулентной вязкости использовались разные соотношения во внутренней и внешней областях, решение находилось в результате применения метода крупных частиц и разностной схемы с механизмом диссипации для сглаживания разрывов, использование адаптивных сеток было признано не целесообразным. Указывается, что традиционные методы характеристик и установления в рассмотренном случае течения не применимы, потому что не позволяют моделировать до- и трансзвуковые течения при наличии в потоке областей с сильными разрывами.

Целью данной работы является создание на основе результатов и опыта численных исследований [4—9], выполненных в ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша", единой методики расчета и соответствующей программы для численного моделирования радиационно-конвективного теплопереноса в высокоэнтальпийном двухфазном потоке продуктов сгорания с областями до- и сверхзвукового течения. Рассматриваются энергетические каналы сложной, изменяющейся со временем геометрией при наличии широкого спектра взаимосвязанных физических процессов в двухфазном потоке продуктов сгорания: вязкости, теплопроводности, турбулентности, излучения и поглощения теплового излучения стенками, поглощения и рассеяния полидисперсными частицами конденсированной фазы, деструкции и химической абляции.

Схема расчетной области показана на рис. 1. Двухфазный поток движется слева направо, разгоняясь от дозвуковой скорости до скорости, которая в несколько раз превы-



Рис. 1. Схема расчетной области.

шает скорость звука. Перед входом в сужающуюся часть канала имеется "карман" со сложной геометрией границы, течение в котором происходит с дозвуковой скоростью.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОЙ СРЕДЫ

Полная система уравнений для численного моделирования радиационно-конвективного прогрева стенки энергетического канала включает:

— уравнения нестационарной газовой динамики для совершенного газа в цилиндрической системе координат в двумерной постановке;

- уравнения движения частиц продуктов сгорания;
- уравнения сжимаемого турбулентного пограничного слоя в интегральной форме;
- уравнение переноса излучения в двухфазной смеси продуктов сгорания;
- уравнение теплопроводности для стенки сопла;

— уравнения, описывающие унос массы материала стенки из-за взаимодействия с продуктами сгорания и термодеструкции связующего материала.

Законы сохранения массы, компонент импульса и энергии для газовой фазы:

$$\frac{\partial(\boldsymbol{y}\boldsymbol{\rho})}{\partial t} + \boldsymbol{\nabla}(\boldsymbol{y}\boldsymbol{\rho}\mathbf{U}) = 0, \tag{1}$$

$$\frac{\partial(y\rho u)}{\partial t} + \nabla(y\rho u\mathbf{U}) + \frac{\partial(yP)}{\partial x} = y\sum_{i=1}^{l} \rho_i Cr_i \ (u_i - u), \tag{2}$$

$$\frac{\partial(y\rho v)}{\partial t} + \nabla(y\rho v \mathbf{U}) + \frac{\partial(yP)}{\partial y} = y \sum_{i=1}^{l} \rho_i C r_i \ (v_i - v), \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\mathbf{y}\mathbf{\rho}E)}{\partial t} + \nabla(\mathbf{y}\mathbf{\rho}E\mathbf{U}) = \mathbf{y}\sum_{i=1}^{l} a_i C(T_i - T) + Cr_i(u_i(u_i - u) + v_i(v_i - v)), \tag{4}$$

$$E = h + (u^2 + v^2)/2.$$
(5)

Законы сохранения массы, компонент импульса и энергии для конденсированной фазы (лагранжево представление процессов коагуляции и дробления частиц):

$$\nabla(y\rho_i\mathbf{U}_i) = y\left(n_i\sum_{j=1}^{i-1}K_{ji}\Phi_{ji}\rho_j - \rho_i\sum_{j=i+1}^{l}K_{ij}\Phi_{ij}n_j\right),\tag{6}$$

$$\nabla(yn_i\mathbf{U}_i) = -yn_i\sum_{j=i+1}^l K_{ij}\Phi_{ij}n_j,\tag{7}$$

$$\nabla(y\rho_{i}u_{i}\mathbf{U}_{i}) = y\rho_{i}Cr_{i}(u-u_{i}) + yn_{i}\left(\sum_{j=1}^{i-1}(K_{ji}\rho_{j}(u_{j}-u_{i}) + \Phi_{ji}u_{i}) + y\rho_{i}\times \left(\sum_{j=i+1}^{l}K_{ij}n_{j}(1-\Phi_{ij})(u_{j}-u_{i}) - \Phi_{ji}u_{i}\right),$$

$$(8)$$

$$\nabla(y\rho_{i}v_{i}\mathbf{U}_{i}) = y\rho_{i}Cr_{i}(v-v_{i}) + yn_{i}\left(\sum_{j=1}^{i-1}(K_{ji}\rho_{j}(v_{j}-v_{i}) + \Phi_{ji}v_{i}\right) + y\rho_{i}\left(\sum_{j=i+1}^{l}K_{ij}n_{j}(1-\Phi_{ij})(v_{j}-v_{i}) - \Phi_{ji}v_{i}\right),$$
(9)

$$\nabla(y\rho_{i}C_{s}T_{i}\mathbf{U}_{i}) = y\rho_{i}\left(a_{i}C(T-T_{i}) - Cr_{i}\left(u_{i}\left(u_{i}-u\right) + v_{i}\left(v_{i}-v\right)\right)\right) + yn_{i}\sum_{j=1}^{i-1}K_{ji}\times$$

$$\times \rho_{j}\left(E_{j} - (1-\Phi_{ji})E_{i}\right) - y\rho_{i}\sum_{j=i+1}^{l}K_{ij}n_{j}\left(E_{i} - (1-\Phi_{ij})E_{j}\right) + \nabla\mathbf{q}_{rad},$$

$$E_{j} = C_{s}T_{j} + \mathbf{U}_{j}^{2}/2.$$
(11)

Соотношения для коэффициента коагуляции, эффективности столкновений и для коэффициента захвата частиц:

$$\begin{split} K_{ij} &= \pi (r_i + r_j)^2 \left| \mathbf{U}_i - \mathbf{U}_j \right| \mathfrak{B}_{ij}, \\ \mathfrak{B}_{ij} &= \frac{60 \hat{\mathfrak{g}}_{ij} + \operatorname{Re}_j \check{\mathfrak{B}}_{ij}}{60 + \operatorname{Re}_j}, \\ \hat{\mathfrak{B}}_{ij} &= \left(1 + \frac{0.75 \ln \left(4.5 t_{ij} \right)}{2.5 t_{ij} - 1.214} \right)^{-2} \text{ при } S t_{ij} > 0.607, \\ \check{\mathfrak{B}}_{ij} &= \left(\frac{\operatorname{St}_{ij}}{\operatorname{St}_{ij} + 0.125} \right)^2 \text{ при } \operatorname{St}_{ij} > 0.0417, \\ \mathfrak{U}_{LCDO} \operatorname{CTOKCa} \operatorname{St}_{ij} &= \frac{\left| \mathbf{U}_i - \mathbf{U}_j \right| d_i^2 \rho_{\mathrm{B}i}}{9 d_j \mu_g} \text{ при } r_j > r_i, \\ \Phi_{ij} &= 1 - \left(0.247 \operatorname{Re}_{ij}^{0.434} \operatorname{Lp}_j^{-0.133} \left(\frac{r_i}{r_j} \right)^{0.273} + 0.18 \operatorname{Re}_{ij}^{0.395} \operatorname{Lp}_j^{0.117} \left(\frac{r_i}{r_j} \right)^{2.27} \operatorname{We}_i^{0.67} \right) \\ &= \operatorname{При} r_j > r_i, \end{split}$$

Число Рейнольдса
$$\operatorname{Re}_{ij} = \frac{|\mathbf{U}_i - \mathbf{U}_j| d_i \rho_{Bi}}{\mu_{Bi}},$$

Число Вебера $\operatorname{We}_i = \frac{|\mathbf{U}_i - \mathbf{U}_j|^2 d_i \rho_g}{\sigma_{Bi}},$
Число Лапласа $\operatorname{Lp}_j = \left(\frac{\mu_B^2}{d_j \rho_{Bj} \sigma_{Bj}}\right)^{-1}.$

Соотношения для коэффициентов сопротивления и теплообмена:

$$C_{i} = \frac{3\rho |\mathbf{U} - \mathbf{U}_{i}|}{4\rho_{\text{в}i}d_{i}} \frac{24}{\text{Re}_{i}} \varphi_{40},$$

$$\varphi_{40} = 1 + 0.15\text{Re}_{\text{Wi}}^{0.687},$$

$$\text{Re}_{wi} = \text{Re}_{i}(1 + 0.03\text{We}_{i}),$$

$$\text{We}_{i} = \frac{|\mathbf{U} - \mathbf{U}_{i}|^{2}d_{i}\rho_{i}}{\sigma_{i}},$$

$$\varphi_{4} = \frac{\varphi_{40}}{1 - 0.1615\sqrt{k}\frac{\text{Re}_{wi} - 24}{\text{Re}_{i}}\varphi_{40}M_{i}} \quad \text{для } \text{Re}_{wi} < 24,$$

$$\varphi_{4} = \varphi_{40} + 0.00299\frac{(\text{Re}_{wi} - 24)\text{Re}_{i}}{24}M_{i} \quad \text{для } 24 < \text{Re}_{wi} < 100,$$

$$\varphi_{4} = \varphi_{40} + 0.00079\frac{(\text{Re}_{wi} + 187.6)\text{Re}_{i}}{24}M_{i} \quad \text{для } \text{Re}_{wi} > 100,$$

$$M_{i} = \frac{|\mathbf{U} - \mathbf{U}_{i}|}{a} - \text{число } \text{Maxa } Ca_{i} = 6\text{Nu}_{i}\frac{\lambda}{d_{i}^{2}}$$

$$\text{Nu}_{i} = \frac{\text{Nu}_{0}}{1 + 3.42M_{i}\text{Nu}_{0}/(\text{Re}_{i}\text{Pr})},$$

$$\text{Nu}_{0} = 2 + 0.459\text{Re}_{i}^{0.55}\text{Pr}^{0.33}.$$

Выражение для Φ_{ij} справедливо в широком диапазоне параметров:

$$35 < \text{Re}_{ii} < 385; \ 0.00167 < \text{Lp}_i < 0.2; \ 0.083 < (r_i/r_i) < 0.5$$

Аэродинамическое дробление частиц определяется числом Вебера. Применяется модель дробления на два равных осколка при достижении числом Вебера критического значения We = 17. Диаметр частиц данной фракции в результате дробления уменьшается в $\sqrt[3]{2}$ раз, а концентрация удваивается.

УРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА ТЕПЛОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

При необходимости поток теплового излучения к стенке канала энергетической установки может быть определен с использованием точных методов, одним из которых является метод статистических испытаний Монте-Карло [8–10]. Примеры использования метода Монте-Карло для расчета потока излучения от продуктов сгорания ракетных двигателей приведены в [8, 9]. Такие расчеты, как и в случае применения других "точных" методов [10], занимают значительное время.

Когда перенос тепла излучением является, наряду с теплопроводностью и конвекцией, одним из способов комбинированного теплопереноса, и для численного решения полной системы уравнений теплообмена требуется большое количество компьютерного времени, используются относительно простые приближенные методы расчета, одним из которых является P₁-приближение [11, 12].

Точность расчета переноса излучения в P_1 -приближении достаточно высока в областях медленного, дозвукового движения высокоэнтальпийного двухфазного потока, там, где параметры медленно меняются в зависимости от координат, среда является оптически толстой, а поток излучения сопоставим с конвективным тепловым потоком (см. [10]). В областях сверхзвукового движения оптическая толщина среды относительно мала, и погрешность расчета потока излучения в P_1 -приближении становится больше, но при этом конвективный тепловой поток значительно превышает поток излучения, так что погрешность расчета суммарного потока энергии, которым определяется нагрев, унос и деструкция материала канала (см. [10]), не велика. Время расчета в P_1 -приближении относительно мало, что, вместе с приемлемой для практических задач точностью, делает это приближение востребованным при численном моделировании радиационно-конвективного взаимодействия.

Решение уравнения P₁-приближения с соответствующим граничным условием сводится к решению граничной задачи переноса тепла теплопроводностью. Использование транспортного приближения для индикатрисы рассеяния позволяют учесть анизотропное рассеяние, поглощение и тепловое излучение частицами.

$$-\nabla (D\nabla g) + K_{abs}g = 4K_{abs}\sigma T^4, \quad D = 1/(3(K_{abs} + K_{sca})). \tag{12}$$

Коэффициенты поглощения и транспортного ослабления частиц рассчитываются по известной функции распределения по радиусу [3]:

$$K_{abs} = 0.75 \frac{f_v}{a_{30}} \int_0^\infty Q_{abs} a^2 F(a) \, da, \quad K_{sca} = 0.75 \frac{f_v}{a_{30}} \int_0^\infty Q_{sca} a^2 F(a) \, da, \tag{13}$$

$$\int_{0}^{\infty} F(a) da = 1, \quad f_{v} = \frac{4\pi}{3} N_{p} \int_{0}^{\infty} a^{3} F(a) da, \quad a_{ij} = \frac{\int_{0}^{0} a^{i} F(a) da}{\int_{0}^{\infty} a^{j} F(a) da}.$$
(14)

Характерная функция распределения частиц по размерам показана на рис. 2.

Для экономии времени расчета спектральные и температурные зависимости действительной и мнимой частей показателя преломления Al₂O₃, а также факторов эффективности поглощения и транспортной экстинкции определяются по инженерным формулам [3]. Коэффициенты поглощения газовой фазы определяются как в [13–16].

В осесимметричной постановке:

$$\frac{\partial \left(D\frac{\partial g}{\partial x}\right)}{\partial x} + \frac{\partial \left(D\frac{\partial g}{\partial r}\right)}{\partial r} + \frac{D}{r}\frac{\partial g}{\partial r} - K_a g = -4K_a \sigma T_p^4.$$
(15)

Для перехода к прямоугольной расчетной области используется замена переменных:

$$\begin{cases} \eta = x \\ \zeta = \frac{r}{R(x)}; \end{cases} \begin{cases} x = \eta \\ r = \zeta R(\eta); \end{cases} \begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial \eta} - \frac{\zeta}{R} \frac{dR(x)}{dx} \frac{\partial}{\partial \zeta} \\ \frac{\partial}{\partial r} = \frac{1}{R(x)} \frac{\partial}{\partial \zeta}. \end{cases}$$



Рис. 2. Функция распределения частиц по радиусу (мкм).

НАЧАЛЬНОЕ И ГРАНИЧНЫЕ УСЛОВИЯ

На входном сечении задается условие скоростного и температурного равновесия между газовой фазой и частицами. На твердой границе используется условие равенства нулю всех компонент скорости, на оси симметрии – условие равенства нулю нормальной компоненты скорости. На открытых границах, через которые поток вытекает, используется, в соответствии с выводами [2], линейная интерполяция. На границе, через которую втекает сверхзвуковой поток, задаются параметры, соответствующие этому потоку, которые остаются неизменными в ходе вычислений. Для дозвукового потока задаются направление скорости, давление и температура торможения. Если направление потока заранее не известно, или потоки малы по величине, то на открытой границе в фиктивные ячейки на каждом шаге по времени заносятся значения параметров из соседних ячеек.

В результате решения задачи переноса излучения определяется радиационный тепловой поток в стенку. В качестве граничного условия используется текущее расчетное распределение температуры стенки T_w .

Граничное условие для P₁-приближения:

$$-D\frac{\partial g}{\partial n} = \gamma_w \left(g_w - 2\sigma T_w^4 \right), \tag{16}$$

производная берется по внешней нормали, T_w – температура границы, $\gamma_w = \frac{\varepsilon_w}{(2 - \varepsilon_w)}$,

 ε_w – степень черноты границы.

В качестве начальных условий могут быть использованы известные аналитические решения для одномерного течения в канале.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Решение для смешанного невязкого и нетеплопроводного течения продуктов сгорания определяется при помощи метода установления. Используется стационарный

аналог нецентральной конечно-разностной схемы Мак-Кормака второго порядка точности. Для сверхзвуковых областей течения уравнения записываются в дивергентной форме и решаются методом сквозного счета с использованием явной двухшаговой разностной схемы и сглаживания.

Интегрирование системы уравнений для частиц конденсированной фазы осуществляется с помощью неявной разностной схемы, имеющей второй порядок точности. Расчет движения частиц производится с использованием схемы второго порядка точности типа с адаптивным выбором шага интегрирования, в предположении о равномерном предиктор-корректор распределении частиц по радиусу на входе в сопло, по известному газовому полю. Интегральные параметры движения и траектории находятся по экспериментальному спектру массового распределения частиц по размерам. Для интегрирования системы дифференциальных уравнений, описывающих движение частиц, их правые части на каждом шаге линеаризуются и определяется их аналитическое решение, что позволяет сохранить высокую точность результата для мелких частиц, когда уравнения движения содержат члены с малым коэффициентом при производной высшего порядка.

Расчет параметров турбулентного пограничного слоя, энтальпии восстановления, а также нестационарного теплового состояния и уноса материалов стенки выполняются сопряженно для найденного предварительно поля течения невязкого газа с частицами.

Вычисления организуются в следующей последовательности:

 из решения системы уравнений течения двухфазной среды при заданной температуре стенки для стационарного режима определяются поля течения и конвективный тепловой поток в стенку;

 по известному полю концентрации частиц и полю температуры частиц конденсированной фазы определяется поток излучения в стенку (решение уравнения переноса излучения);

 – определяются распределения температуры в сечениях по длине стенки и параметры разрушения материала для заданных моментов времени (коэффициент тепломассообмена пересчитывается в зависимости от текущей температуры поверхности стенки);

 температура поверхности с предыдущего приближения используется для расчета параметров течения двухфазной среды и радиационного потока в последующих приближениях.

ТЕСТИРОВАНИЕ

Тестирование блока расчета течения осуществлялось путем сравнения с решениями для осесимметричного сопла, полученными методом крупных частиц, Мак-Кормака и методом характеристик, для распределения числа Маха по стенке сопла. Отличие составило менее 3%. Заметная разница в результатах расчета имела место лишь в области резкого разгона потока сразу за критическим течением. Также выполнено сравнение с известными решениями для течения Прандтля–Майера и для натекания на клин и с результатами эксперимента. Для истечения из сопла в диффузор продемонстрировано качественное совпадение картины течения с наблюдаемой экспериментально, при этом расчетная зависимость давления от осевой координаты отличается от экспериментальных данных не более чем на 25–30%.

Тестирование решения в P₁-приближении осуществлялось путем сравнения с аналитическим решением для двумерной осесимметричной задачи и с решением по методу Монте Карло, подробное описание результатов сравнения можно найти в [8, 11, 12].

На рис. За и 3б приведены примеры сравнения расчета в P_1 -приближении методом конечных разностей с аналитическими решениями для коэффициента поглощения 1 1/м при отсутствии рассеяния. Видно, что отличие не превышает 1%. (Линия $Q1_N$ соответствует DP_0 -приближению).



Рис. 3. Сравнение расчета в Р₁-приближении с аналитическими решениями.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Приведем примеры расчета радиационно-конвективного теплообмена применительно к задаче прогрева соплового блока ракетного двигателя высокотемпературным двухфазным потоком продуктов сгорания твердого топлива.

Функция распределения частиц по радиусу показана на рис. 2. Коэффициенты поглощения и рассеяния определялись по полям концентрации и температуры частиц, найденным в результате газодинамического расчета для известной функции распределения, с использованием соотношений теории Ми или инженерных формул, аппроксимирующих эти соотношения. Расчетное распределение коэффициента диффузии излучения *D* представлено на рис. 4.



Рис. 4. Пример распределения расчетных значений коэффициента диффузии излучения.

В дозвуковой зоне, где плотность частиц конденсированной фазы велика, коэффициент диффузии излучения мал — находится на уровне 0.003 м, что соответствует коэффициенту ослабления ~100 1/м, поток излучения в этой части канала также мал. За критическим сечением, в сверхзвуковой зоне концентрация частиц в потоке уменьшается, и коэффициент излучения увеличивается почти на 2 порядка до 0.3–0.5 м соответственно, поток излучения также увеличивается. В пристеночной области, в которой частицы практически отсутствуют, коэффициент диффузии возрастает до значений существенно больше 1.

(a)



Рис. 5. Распределение температуры в стенке канала (t = 12 с).



Рис. 6. Расчетные зависимости радиационного и конвективного тепловых потоков вдоль образующей канала.

Пример расчетного распределения температуры в некоторый момент времени в стенке соплового блока показано на рис. 5.

Результаты расчета величин конвективного и радиационного теплового потока вдоль образующей канала для разных моментов времени показаны на рис. 6.

Как видно по рис. 6, конвективный поток в стенку канала максимален в области критического сечения, там, где он составляет $11-15 \text{ MBt/m}^2$ и в 2–2.5 раза превышает

поток излучения, так что максимальная тепловая нагрузка реализуется в области критического течения и определяется, в основном, конвективным подводом энергии к стенке. В области дозвукового течения тепловая нагрузка определяется излучением: поток излучения в 6–7 раз больше конвективного потока, находится на уровне 6 MBT/м² и слабо зависит от времени. В области сверхзвукового течения поток излучения отрицателен, т.е. имеет место отток энергии от стенки посредством излучения, причем величина этого оттока составляет 20–30% от конвективного потока к стенке (радиационное охлаждение).

выводы

Разработана алгоритмически единая методика расчета, и на ее основе создана комплексная программа для численного моделирования радиационно-конвективного теплопереноса в высокоэнтальпийном двухфазном потоке продуктов сгорания в осесимметричном канале энергетической установки со сложной геометрией разрушающейся стенки при наличии областей дозвукового и сверхзвукового течения. В расчетной модели учитывается широкий спектр взаимосвязанных физических процессов: вязкость, теплопроводность, турбулентность, излучение и поглощение теплового излучения стенками и полидисперсными частицами конденсированной фазы, деструкция и химическая абляция. Приведены примеры расчетов теплового потока с учетом вязкости, теплопроводности, турбулентности течения, поглощения и анизотропного рассеяния теплового излучения.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

 u_i, v_i – компоненты вектора скорости U_i частиц *i*-й фракции; *u*, *v* – компоненты вектора скорости U газа; *x*, *y* – осевая и радиальная координаты; *C*, *C_i* – удельные теплоемкости газа и материала частиц *i*-й фракции; ρ – плотность газа; *P* – давление газа; *h* – энтальпия газа; *T* – температура газа; E – полная энергия газа; γ – показатель адиабаты газа; *n_i* – число частиц *i*-й фракции в единице объема; *r_i* – радиус частиц *i*-й фракции; *M_i* – число Маха; L_{pi} – число Лапласа; Nu_i – число Нуссельта; We_i – число Вебера; Re_{ij} – число Рейнольдса; Cr_i – коэффициент сопротивления; K_{ij} – константа коагуляции; \Im_{ij} – коэффициент эффективности соударений (коэффициент захвата); Φ_{ij} – коэффициент коагуляции; $\rho_{\rm B}$ – плотность материала частиц конденсированной фазы; *μ* – вязкость газовой фазы; $\mu_{\rm B}$ – вязкость материала конденсированной фазы; *F*(*a*) – функция распределения частиц по радиусу; *Q_a*, *Q_{sca}*, *Q_{ext}* – факторы эффективности поглощения, транспортного рассеяния и ослабления; *D* – коэффициент диффузии излучения; *g* – плотность энергии излучения; **q***_{rad}* – вектор потока излучения; ∇ – векторный дифференциальный оператор набла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Dombrovsky L.A., Yukina E.P., Kolpakov A.V., Ivanov V.A. Procedure for calculating the thermal destruction of phenolic carbon under the effect of intensive infrared radiation. – High Temperature. 1993. T. 31. № 4. C. 566.
- 2. *Bityurin V.A., Galaktionov A.V., Kolpakov A.V.* Reducing radiative losses in aluminum–hydrogen MHD generators. Technical Physics Letters. 2010. V. 36. № 11. P. 1046–1048.
- 3. *Reviznikov D.L., Sposobin A.V., Dombrovsky L.A.* Computational analysis of radiative heat transfer from supersonic flow with suspended polydisperse particles to a blunt body. Proceedings of CHT-15 ICHMT International Symposium on Advances in Computational Heat Transfer May 25–29, 2015, Rutgers University, Piscataway, USA.

- 4. Губертов А.М., Миронов В.В., Борисов Д.М. и др. Газодинамические и теплофизические процессы в ракетных двигателях твердого топлива. М.: Машиностроение, 2004.
- 5. Борисов Д.М., Горшков В.Е. Метод расчета трехмерных двухфазных вязких течений вблизи затупленных тел или при вдуве поперечных струй. Математическое моделирование. 1996. Т. 8. № 6. С. 38–46.
- 6. Борисов Д.М., Васютичев А.С., Лаптев И.В., Руденко А.М. Численное моделирование трехмерных смешанных вязких течений с ударными волнами. — Математическое моделирование. 2007. Т. 19. № 11. С. 112–120.
- 7. Борисов Д.М., Шураев Ю.А., Миронов В.В., Руденко А.М. Метод расчета теплового состояния сопловых насадков энергодвигательных установок. Известия РАН. Энергетика. 2012. № 5. С. 104–109.
- 8. Ковалкин С.С., Колпаков А.В., Миронов В.В. Применение метода Монте-Карло для расчета переноса энергии излучением в каналах энергетических установок. Известия Российской академии наук. Энергетика. 2012. № 4. С. 90–98.
- 9. Гурина И.Н., Волкова Л.И., Волков Н.Н., Ковалкин С.С., Колпаков А.В., Миронов В.В. Использование численного моделирования радиационно-конвективного теплообмена для оценки применимости экспериментальных результатов, полученных в установке для высотных испытаний современных жидкостных ракетных двигателей, к реальным условиям их работы. В сборнике: Труды Шестой Российской национальной конференции по теплообмену 2014. С. 1198–1201.
- Viskanta R., Menguc M.P. Radiation heat transfer in combustion systems. Prog. Energy Combust. Sci. 1987. V. 13. P. 97–160.
- 11. Домбровский Л.А., Баркова Л.Г. Решение двумерной задачи переноса теплового излучения в анизотропно рассеивающей среде. ТВТ. 1986. Т. 24. Вып. 4. С.762–769.
- 12. Kolpakov A.V., Dombrovsky L.A., Surzhikov S.T. An approximate method for calculating the transfer of directional emission in an absorbing and anisotropically scattering medium. Teplofizika vysokih temperatur. 1990. V. 28. № 5. (In Russian)
- 13. Bohren C.F., Huffman D.R. Absorption and Scattering of Light by Small Particles. N.Y.: Wiley, 1983. 530 p.
- 14. Каменщиков В.А.; Пластинин Ю.А.; Николаев В.М. и др. Радиационные свойства газов при высоких температурах. М.: Машиностроение, 1971. 440 с.
- 15. *Суржиков С.Т.* Оптические свойства газов и плазмы. Изд. МГТУ им. Н.Э.Баумана. 2004. 576 с.
- 16. https://www.cfa.harvard.edu/hitran/

Computation Method for Radiation-Convective Heat Transfer in a High Enthalpic Two-Phase Flow in a Power Plant Channel

A. M. Rudenko^a, V. V. Mironov^a, and A. V. Kolpakov^a, *

^aState Research Center of the Russian Federation – Federal State Unitary Enterprise "Research Center named after M.V. Keldysh", Moscow, Russia *e-mail: a.v.klp@mail.ru

An algorithmically unified computation method was developed and, on its basis, a complex program was created for numerical simulation of radiation-convective heat transfer in a high-enthalpy two-phase flow of combustion products in an axe symmetric channel of a power plant with a complex geometry of a destructing wall in the presence of subsonic and supersonic flow regions. Examples of calculations of heat flux with allowance for viscosity, thermal conductivity, flow turbulence, absorption and anisotropic scattering of thermal radiation are given.

Keywords: numerical simulation, technique, heat transfer, radiation, absorption, scattering, high-enthalpy, two-phase, polydisperse, flow

УДК 536.24

СОПРЯЖЕННАЯ ЗАДАЧА "ИСПАРЕНИЕ – ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ"

© 2021 г. Ю. Б. Зудин^{1, *}, Д. С. Уртенов¹, В. С. Устинов¹

¹Национальный исследовательский центр "Курчатовский институт", Москва, Россия *e-mail: yzudin@gmail.com

> Поступила в редакцию 28.02.2021 г. После доработки 23.04.2021 г. Принята к публикации 26.04.2021 г.

Проведено аналитическое исследование сопряженной задачи "испарение-теплопроводность" с учетом конечной скорости распространения тепла. Для расчета потока испарения использованы результаты линейной кинетической теории. Методом интегрального преобразования Лапласа получено аналитическое решение краевой задачи для гиперболического уравнения теплопроводности в случае нестационарных граничных условий первого и второго рода. Построено обобщенное аналитическое решение сопряженной задачи, учитывающее влияние параметра релаксации на развитие процесса теплопереноса во времени. Проведен анализ влияния коэффициента конденсации на интенсивность испарения. Выполнена двухзонная аппроксимация решения, позволившая выделить характерные параметры сопряженной задачи.

Ключевые слова: аналитическое исследование, сопряженная задача, кинетическая теория, преобразование Лапласа, гиперболическое уравнение теплопроводности, параметр релаксации, коэффициент конденсации

DOI: 10.31857/S0002331021030110

ВВЕДЕНИЕ

Настоящая работа, выполненная в продолжение работы [1], посвящена аналитическому исследованию сопряженной задачи "испарение—теплопроводность" с учетом конечной скорости распространения тепла.

Как известно, большинство задач гидродинамики и теплообмена описываются дифференциальными уравнениями в частных производных. Так, уравнения Навье-Стокса и уравнение энергии представляют собой квазилинейные дифференциальные уравнения, решение которых для практических приложений выполняется с помощью численных методов. Однако прямые численные методы являются эффективными далеко не во всех случаях. В частности, численные алгоритмы не дают возможности обобщить полученное частное решение на широкий диапазон параметров. Это наиболее заметно проявляется при исследовании многопараметрических задач, к которым относится большинство прикладных проблем. Поэтому в настоящее время продолжают играть важную роль аналитические решения задач гидродинамики и теплообмена, которые обладают следующими преимуществами.

 Аналитические решения имеют общий характер, позволяющий проводить параметрические исследования путем варьирование начальных и краевых условий задачи.

• Для тестирования численных решений полных уравнений необходимы базовые аналитические решения упрощенных уравнений.

• Аналитические решения используются для проверки корректности постановки и валидации результатов численных исследований.

• Ярким примером достоинств аналитического подхода служат монографии [2–4], где представлен широкий спектр аналитических решений задач теория теплопроводности и термоупругости.

В работе [1] проведен анализ сопряженной задачи, состоящей из двух взаимосвязанных частей: а) краевой задачи для классического уравнения теплопроводности в твердом теле (мишени); б) молекулярно-кинетической модели испарения с поверхности мишени. В настоящей работе развитый в [1] подход обобщается на случай конечной скорости распространения тепла в облучаемой мишени. Для этого осуществляется переход от параболической модели теплопроводности к более общей гиперболической модели, учитывающей инерционность теплового потока [3, 4].

В технических приложениях задача теплопроводности, как правило, является сопряженной с некоторой внешней задачей: краевой задачей термоупругости, обратной задачей теплопроводности, задачей оптимального управления. Практически важная сопряженная задача возникает при взаимодействии лазерного излучения с мишенью. При этом осуществляется "лазерная абляция" – совокупность сложных физико-химических процессов, результатом которых является удаление вещества с поверхности раздела фаз. Лазерное облучение мишени сопровождается интенсивным процессом испарения на поверхности, взаимосвязанным с внешним газодинамических приложений лазерной абляции посвящены тысячи журнальных публикаций и многие международные конференции. Результатом первого периода этих исследований стала тепловая модель лазерного испарения, в рамках которой мишень и сублимированный материал находятся в локальном термодинамическом равновесии. Исчерпывающее описание процесса лазерной абляции представлено, в частности, в монографии [5] и обзоре [6].

Настоящая работа базируется на тепловой модели, описывающей основные физические черты процесса испарения и в своей основе сохранившейся до настоящего времени. При этом не учитываются экстремальные явления — образование лазерной плазмы, ее взаимодействие с излучением, механизм взрывного кипения. Тем не менее, даже в таких (сравнительно простых) условиях к настоящему времени не прояснены некоторые важные особенности наносекундной лазерной абляции. В частности, в различных работах неоднозначно анализируется испарение с поверхности мишени как определяемые испарением граничные условия (ГУ), так и характерное время его развития [5, 6].

ПАРАБОЛИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Сопряженная задача. Базовым условием сопряженной задачи "теплопроводность — испарение" является баланс теплового потока на поверхности мишени, включающий две составляющие (рис. 1) — поток теплопроводности q_{λ} , идущий на нагрев тела, и поток испарения с его поверхности q_{μ} :

$$q = q_{\lambda} + q_u = \text{const.} \tag{1}$$

Основная цель настоящего анализа состоит в определении развития во времени интенсивности испарения после начала облучения поверхности. Важно отметить, что в процессе лазерной абляции происходит облучение мишени короткими периодическими импульсами. Физически это означает, что происходящие в мишени процессы нагревания/охлаждения будут развиваться в тонком поверхностном слое твердого тела. Это позволяет использовать для расчета q_{λ} нестационарное одномерное уравнение теплопроводности в полуограниченном теле ($0 \le x < \infty$):



Рис. 1. Схема сопряженной задачи "испарение – теплопроводность".

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}.$$
(2)

Здесь t — время; a — коэффициент температуропроводности; y — координата, отсчитываемая от поверхности вглубь мишени; $\vartheta = T - T_0$ — разность температур; T_0 — температура на бесконечности тела.

В начальный момент времени в твердом теле задается однородное распределение температур: $\vartheta = 0$ при $t = 0(0 \le y < \infty)$. ГУ для уравнения (2) в общем виде имеет вид: $\vartheta = \vartheta(t)$ при y = 0(t > 0). Уравнение (2) представляет собой классическое параболическое уравнение теплопроводности (ПУТ). В соответствие с [1] будем использовать интегральный метод решения, основанный на концепции теплового слоя. В рамках этого метода дифференциальное уравнение tenлопроводности заменяется на интеграл теплового баланса для слоя толщиной $\delta(t)$, монотонно продвигающегося от поверхности вглубь твердого тела [2–4]. Использование такого подхода приводит к аналитическим решениям, которые точно удовлетворяют начальному и граничным условиям и приближенно – исходному дифференциальному уравнению. При этом поток теплопроводности может быть записан в виде:

$$q_{\lambda} = 2\frac{\lambda\vartheta}{\delta},\tag{3}$$

где λ – коэффициент теплопроводности твердого тела.

После ряда элементарных преобразований, подробно изложенных в [1], из (2), (3) выводится линейное неоднородное дифференциальное уравнение первого порядка относительно $\delta(t)$. Его общее решение имеет вид:

$$\delta^2 = \frac{12a}{\vartheta^2} \int_0^t \vartheta^2 dt.$$
(4)

Вычисление квадратуры (4) для классических ГУ дает: $\delta = \sqrt{12at} - для$ ГУ первого рода ($\vartheta = \text{const}$); $\delta = \sqrt{6at} - для$ ГУ второго рода (q = const).

Параметр испарения. Согласно линейной кинетической теории [7] поток испарения q_u и разность температур ϑ связаны соотношением:

$$\vartheta = \sqrt{2\pi} \left(\frac{1 - 0.4\beta}{\beta} \right)^2 \frac{R_g^{1/2} T_s^{3/2}}{\rho_v r^2} q_u.$$
(5)

Здесь *r* – теплота фазового перехода; ρ_v – плотность пара; R_g – индивидуальная газовая постоянная; β – коэффициент конденсации, который зависит от состояния поверхности и физической природы конденсированной фазы и может изменяться в диапазоне $0 < \beta \leq 1$.

При выводе соотношения (5) использовалось также уравнение Клапейрона–Клаузиуса, связывающее температуру и давление пара на линии насыщения [7]. В последующих выкладках используются следующие величины:

• "параметр испарения"

$$\Psi = \frac{q_u}{q},\tag{6}$$

обозначающий долю падающего на мишень лучистого потока, которая идет на парообразование;

• масштаб времени

$$t_0 = \frac{2\pi}{3} \frac{1 - 0.4\beta}{\beta} \frac{aR_s c_p^2 T_s^3}{r^4};$$
(7)

• безразмерное время $\tau = t/t_0$.

Опуская промежуточные выкладки, запишем полученное в работе [1] аналитическое решение параболической сопряженной задачи (рис. 2):

$$\tau = \frac{\psi(2-\psi)}{2(1-\psi)^2} + \ln(1-\psi).$$
(8)

Рассмотрим асимптотики решения (8). В начальный момент доля теплового потока, идущего на испарение, является пренебрежимо малой, и практически весь теплоподвод к твердому телу идет на его нагрев:

$$\tau \to 0$$
: $q = q_{\lambda}, \quad \psi = \sqrt{\tau}$

Устремляя время облучения к бесконечности, приходим ко второму предельному случаю. Мишень полностью прогревается, весь подводимый к поверхности тепловой поток расходуется на испарение:

$$\tau \to \infty$$
: $q = q_u, \quad \psi = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\tau}}$

При этом в соответствии с (5) температура поверхности будет стремиться к своему постоянному максимальному значению:

$$\vartheta_{\max} = \sqrt{2\pi} \frac{1 - 0.4\beta}{\beta} \frac{R_g^{1/2} T_s^{3/2}}{\rho_v r^2} q.$$

Коэффициент теплоотдачи. Представим поток теплопроводности в виде: $q_{\lambda} = \alpha \vartheta$, где α – коэффициент теплоотдачи. Из теории теплопроводности [2] известно, что коэффициент теплоотдачи для полуограниченного тела может изменяться в диапазоне



Рис. 2. Зависимость параметра испарения от безразмерного времени для параболического уравнения теплопроводности.

 $\alpha_{\vartheta} \leq \alpha \leq \alpha_q$. Здесь нижние индексы обозначают соответствующие термические ГУ: " ϑ " – первого рода (ϑ = const); "q" – второго рода (q = const). Для дальнейшего анализа целесообразно ввести безразмерные коэффициенты теплоотдачи, определяемые соотношениями:

$$\tilde{\alpha} = \alpha \sqrt{\frac{t_0}{\lambda c \rho}}, \quad \tilde{\alpha}_{\vartheta} = \alpha_{\vartheta} \sqrt{\frac{t_0}{\lambda c \rho}}, \quad \tilde{\alpha}_q = \alpha_q \sqrt{\frac{t_0}{\lambda c \rho}}.$$
(9)

При этом выполняется двойное неравенство: $1/\sqrt{3\tau} \le \tilde{\alpha} \le \sqrt{3/(4\tau)}$. С учетом (9) формулу (6) для параметра испарения можно представить в виде:

$$\Psi = \left(1 + \sqrt{3}\tilde{\alpha}\right)^{-1}.$$

Как показывает анализ асимптотик решения (8), в процессе облучения твердого тела термическое состояние его поверхности будет эволюционировать между двумя предельными вариантами — от $q = \text{const} \ \kappa \ \vartheta = \text{const}$. Согласно (9), для указанных случаев будем иметь следующие асимптотики:

$$\begin{aligned} \tau &\to 0: \; \tilde{\alpha} = \sqrt{8/9} \tilde{\alpha}_q = \sqrt{\frac{3}{4\tau}}, \\ \tau &\to \infty: \; \tilde{\alpha} = \tilde{\alpha}_\vartheta = \frac{1}{\sqrt{3\tau}}. \end{aligned}$$

С учетом этого решение (8) можно представить в виде:

$$\Psi = \left\{ 1 + \left[\sqrt{3}\tilde{\alpha}_{\vartheta} + \left(\sqrt{8/3}\tilde{\alpha}_{q} - \sqrt{3}\tilde{\alpha}_{\vartheta} \right) \varphi \right] \right\}^{-1}.$$
 (10)

Соотношение (10) представляет собой явную форму записи решения (8) для параметра испарения. Здесь
$$\phi = \left(1 + \tau^{1/2}\right)^{-1/2}$$
 -

переходная функция, описывающая развитие во времени составляющих теплового потока, которая имеет следующие асимптотики:

$$\begin{aligned} \tau &\to 0: \ \varphi = 1, \quad \psi = \left(\sqrt{8/3} \tilde{\alpha}_q\right)^{-1}, \\ \tau &\to \infty: \ \varphi = 0, \quad \psi = \left(\sqrt{3} \tilde{\alpha}_\vartheta\right)^{-1}. \end{aligned}$$

Для эталонного случая ПУТ выражение (10) принимает вид:

$$\Psi = 1 + \tau^{-1/2} \left[1 + \left(\sqrt{2} - 1\right) \left(1 + \tau^{1/2}\right)^{-1/2} \right].$$
(11)

ГИПЕРБОЛИЧЕСКОЕ УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Гипотеза теплопроводности Фурье. Аналитическая теория теплопроводности берет свое начало от доклада Фурье (Fourier) "О распространении тепла в твердом теле", с которым он выступил в Париже в 1807 г. В законченном виде Фурье представил свою теорию в 1822 г. в работе "Аналитическая теория тепла (Théorie analytique de la chaleur), которую Кельвин (Kelvin) назвал "великой математической поэмой". Фундаментальный результат, который носит имя закона Фурье (или гипотезы теплопроводности Фурье), гласит, что поток тепла *q* пропорционален градиенту температуры¹:

$$q(x,t) = -\lambda \frac{\partial \vartheta(x,t)}{\partial x}.$$
(12)

Для полного описания процесса распространения тепла в неподвижной среде необходимо привлечь также закон сохранения энергии:

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} = -\frac{1}{c\rho} \frac{\partial \vartheta}{\partial x},$$

где *с* – удельная теплоемкость твердого тела.

Отсюда следует параболическое уравнение (2). Рассмотрим принадлежащее Кельвину классическое решение ПУТ о точечном тепловом источнике. Пусть в момент t = 0 в точке x = 0 мгновенно выделяется количества тепла Q. Решением уравнения (2) с начальным условием $\vartheta(x, 0) = 0$ при $-\infty < x < \infty$ будет:

$$\vartheta(x,t) = \frac{Q}{2\sqrt{\pi t}} \exp\left(-\frac{x^2}{4at}\right).$$

Решение Кельвина описывает затухающую во времени тепловую диффузию и характеризуется мгновенным распространением теплового сигнала:

$$t > 0, -\infty < x < \infty$$
: $\vartheta(x,t) > 0.$

Эта свойство ПУТ наглядно иллюстрирует известный "парадокс Фурье": тепловое возмущение в какой-либо точке тела приводит к мгновенному изменению температуры во всех других его точках. Исследуя парадокс Фурье, Риман (Riemann) показал, что различным видам изотермических поверхностей соответствуют различные дифференциальные операторы теплопроводности (в частности, линейный оператор параболического типа). Следовательно, гипотеза Фурье является неполной, так как она не содержит параметров, ограничивающих скорость распространения тепла. Необходимость введения таких параметров обусловлена механизмом переноса тепла элементарными частицами ве-

¹ Здесь и ниже рассматривается одномерная задача теплопроводности.

щества — электронами, молекулами, ионными решетками. Поэтому результат теплопереноса — формирование поля температур в твердом теле — также должен определяться процессами, связанными с периодическими колебаниями этих частиц. Отсюда следует, что закон распространения тепла должен иметь волновой характер, определяемый параметрами движения частиц (скоростью, длиной и временем свободного пробега, взаимодействием при соударении).

Традиционно полагается, что для большинства задач теплопроводности влияние конечной скорости распространения тепла пренебрежимо мало. Поэтому для описания теплопереноса в твердом теле практически всегда используется ПУТ. Конечная скорость распространения тепловых возмущений учитывается лишь при исследовании процессов с экстремальными тепловыми воздействиями и со сверхбыстрым изменением температурных полей. Характерным примером таких явлений служит воздействие на поверхность мишени мощных импульсных тепловых потоков при лазерной обработке материалов, время протекания которых составляет нано- или фемтосекунды. К числу других относятся процессы, связанные с нагреванием при трении с аномально высокой скоростью, а также при "тепловом ударе".

Гипотеза теплопроводности Каттанео—**Вернотте**. В 1958 г. Каттанео (Cattaneo) [8] и Вернотте (Vernotte) [9] независимо предложили обобщение классического закона теплопроводности путем учета в соотношении (12) времени тепловой релаксации *t_r*:

$$q(x,t+t_r) = -\lambda \frac{\partial \vartheta(x,t)}{\partial x}.$$
(13)

Раскладывая левую часть (13) в ряд Тейлора по *t*_r, получаем в нулевом приближении – гипотезу Фурье (12), в первом приближении – гипотезу Каттанео–Вернотте:

$$q(x,t) + t_r \frac{\partial q(x,t)}{\partial t} = -\lambda \frac{\partial \vartheta(x,t)}{\partial x}.$$
(14)

Использование формулы (14) в уравнении сохранения энергии приводит к гиперболическому уравнению теплопроводности (ГУТ):

$$\frac{\partial \vartheta}{\partial t} + t_r \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial t^2} = a \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2}.$$
(15)

Уравнение (15) учитывает запаздывание реакции неравновесной системы на термическое возмущение. Этот эффект является следствием инерционности теплового потока, который откликается на изменение температурного градиента не мгновенно (как в равновесной системе), а через конечное время t_r . При $t_r \to 0$ уравнение (15) сводится к классическому параболическому уравнению (2).

Важные задачи нестационарной теплопроводности для гиперболической моделей переноса детально рассмотрены в работах Карташова [10–12]. В них развит аналитический подход, приводящий к новым интегральным соотношениям, которые могут непосредственно использоваться для проведения численных расчетов. Автор [10–12] дал исчерпывающе описание волнового механизма нестационарной теплопроводности с учетом конечной скорости распространения тепла. В работе [13] получено точное аналитическое решение ГУТ для бесконечной пластины при ГУ первого рода. Показано, что прогрев (охлаждение) твердого тела может быть описан как движение теплового слоя, на границе которого имеет место скачок температуры.

Пространственно-неоднородные структуры. В большинстве исследований полагается, что скорость переноса тепла по порядку величины совпадает со скоростью звука w. Это означает, что время релаксации является характеристикой вещества, которую можно оценить как $t_r \approx a/w^2$. Для твердых тел, жидкостей и газов это дает диапазон величин: $t_r \approx 10^{-12} \dots 10^{-8}$ с. Отсюда делается вывод о пренебрежимо малой роли тепловой релаксации в подавляющем числе практических задач.

В резкое противоречие с такими оценками вступили результаты экспериментов [14] по измерению нестационарной температурной функции в засыпках (мокрый песок, пищевая сода, стеклянные шарики) в воздушной сплошной среде. Обработка опытных данных [14] дала огромные (по сравнению с общепринятыми) времена релаксации в диапазоне от 10 до 54 с. Сопоставимые с этими значения ($t_r \approx 15$ с) были получены также в опытах [15] по измерению нестационарного поля температур при контакте двух образцов биологической ткани. С другой стороны, в экспериментах [16, 17] с засыпкой из песка и биологической ткани не был зарегистрирован сколь-нибудь заметный эффект запаздывания теплового потока. Авторы [16, 17] описывали свои опытные данные с помощью классического ПУТ.

Сравнительный анализ методик проведения эксперимента и обработки опытных данных [14–17], выполненный в работе [18], привел к следующим выводам.

• Автор [14] при определении коэффициента эффективной температуропроводности сыпучей среды a_e применял решение параболического уравнения (2). Это значение далее использовалось для расчета времени релаксации, входящего в гиперболическое уравнение (15), что является некорректным. Кроме того, при описании экспериментальных данных в [14] допущена терминологическая путаница (связанная с определением коэффициентов теплопроводности и температуропроводности), ставящая под сомнение достоверность полученных результатов.

• В работе [15] с высокой точностью измерялось поле температур в образце, а также проводились тарировочные опыты с нагревом алюминиевой пластины. К недостаткам методики [15] следует отнести измерение каждого теплофизических параметров среды (теплопроводности λ_e , теплоемкости c_e и плотности ρ_e) в отдельных независимых опытах. Это могло повлечь за собой существенные погрешности определения эффективного коэффициента температуропроводности $a_e = \lambda_e/(c_e\rho_e)$ и как следствие – времени релаксации.

• В экспериментах [16] с засыпкой из мокрого песка методически спорно проводилось определение a_e . Кроме того, подвод тепла к образцу осуществлялся путем электрообогрева, что соответствует ГУ второго рода. При этом температура поверхности определялась как средняя за период нагрева, что существенно снижает точность полученных результатов.

• Также, как и в работах [14, 16], применяемая в работе [17] методика определения *a_e* представляется спорной. Кроме того, используемый в опытах [17] способ обогрева образца за счет циркуляции теплоносителя соответствует ГУ третьего рода. Наконец, измерение нестационарного поля температур в образце с опросом одной термопары в секунду не позволяло корректно оценивать время релаксации.

С целью разрешения противоречий, возникших при систематизации опытных данных [14–17], авторы [18] провели специальные опыты, в ходе которых одновременно измерялись эффективная температуропроводность среды a_e и время релаксации t_r . Использовались различные виды засыпки: искусственный песок; порошок (гидроксида натрия и оксида алюминия); свинцовые шарики с медным покрытием. Для воспроизведения условий экспериментов [15, 17] исследовалась также биологическая ткань.

Рабочим телом в экспериментах [18] служила цилиндрическая засыпка диаметром 40 мм и высотой 80 мм. В качестве газового наполнителя использовались воздух, гелий, азот, аргон. Опыты проводились для различных значений давления и температуры газового наполнителя. Гармонические пульсации температуры генерировались на поверхности образца с помощью элемента Пельтье. Распределение температур по оси образца измерялось шестью термопарами, расположенными с шагом 10 мм. Измеряв-

Материал	$a_e \times 10^6$, m ² /c	<i>t_r</i> , c	Источник
Песок	0.226	2.26	[18]
Песок	0.408	20	[14]
Песок	0.218	0	[16]
Песок	0.169	0	[17]
Пищевая сода	0.185	0.66	[18]
Пищевая сода	0.310	28.7	[14]
Биологическая ткань	0.132	1.77	[18]
Биологическая ткань	0.140	15.5	[15]
Биологическая ткань	0.130	0	[17]

Таблица 1. Сопоставление значений эффективной температуропроводности a_e и времени релаксации t_r , измеренных в экспериментах [14–18]

шиеся в опытах фазовый сдвиг пульсаций и декремент затухания их амплитуды использовались совместно с результатами аналитического решения ГУТ для полуограниченного тела. Найденные таким образом значения a_e, t_r сопоставлялись с результатами работ [14—17] (табл. 1). Как видно из таблицы, полученные в [18] значения t_r оказались примерно на порядок меньшими, чем в работах [14, 15]. Была также установлена сильная зависимость t_r от характерного размера частиц в засыпке и от температуры среды.

Оценка времени релаксации. Проведем оценку времени тепловой релаксации в телах с пространственно-неоднородной структурой на основе приведенных в [18] экспериментальных данных. Логично предполагать, что причиной сильного запаздывания теплового сигнала в сыпучих средах является их ячеистая структура, препятствующая распространению тепла. Механизм теплопроводность здесь затруднен в силу точечно-го контакта соприкасающихся частиц, поэтому теплоперенос будет осуществляться путем свободной конвекции в газовом наполнителе. Следовательно, эффективная теплопроводность образца должна зависеть от размера частиц, характера их упаковки в засыпке, а также от рода используемого газа и его температуры. Так, в серии экспериментов [18] для засыпки из свинцовых шариков диаметром 4.4 мм с газовым наполнителем из смеси аргона и азота было получено: $a_e \approx 8 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{c}; t_r \approx 14 \text{ c}.$

Для проведения оценок воспользуемся аналитическим решением [19] задачи о скачке температур на поверхности шара, полученным с помощью интегрального метода теплового баланса:

$$\Delta = \exp\left(-27.9\frac{at}{d_0^2}\right).$$

Здесь $\Delta = (\vartheta_s - \vartheta_0)/\vartheta_s$; $\vartheta_s = \text{const} - \text{температура поверхности}; \vartheta_0(t) - \text{температура в центре шара; } d_0 - \text{диаметр шара. Сделаем следующие допущения.}$

• Диаметр условной ячейки засыпки (включающей собственно шарик и окружающий его газ) равен удвоенному диаметру шарика в засыпке $d_0 = 8.8$ мм.

• Время релаксации равно промежутку времени, в течении которого центр шара прогреется на 95%: $\vartheta_0 = 0.95 \vartheta_x$; $\Delta = 0.05$.

Заменяя температуропроводность шара a на ее эффективное значение a_e для ячейки неоднородной среды, будем иметь: $t_r \approx 0.107 d_0^2 / a_e$. Для приведенных выше условий опытов [18] отсюда получаем близкую к измеренной величину: $t_r \approx 10.4$ с. Проведенные оценки свидетельствуют в пользу корректности полученных в эксперименте [18] значений времени релаксации.

Другим ярким примером проявления существенной тепловой релаксации в среде являются результаты работы [20], полученные при экспериментальном исследовании переходного термического процесса в пластине из полиметилметакрилата. Было установлено, что при внезапном погружении в горячую дистиллированную воду температура в центре пластины в течение определенного времени остается неизменной. Затем пластина начинает нагреваться со скоростью, значительно меньшей, чем это предсказывает решение ГУП с ГУ третьего рода. Для обработки экспериментальных данных авторы [20] использовали уравнение теплопроводности, выведенное Лыковым [21] из системы дифференциальных уравнений Онзагера. В отличие от стандартного ГУТ это уравнение содержит дополнительный член со смешанной третьей производной от температуры (по времени и по поперечной координате), а также новую физическую константу t_T – "время демпфирования температуры"². В итоге авторы [20] получили: t_r = 3.5 с, t_T = 2.45 с. Для настоящего анализа важно, что рассчитанное в [20] значение t_r весьма близко к полученным в [18] значениям для случаев песка и биологической ткани.

ПОСТРОЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО РЕШЕНИЯ

Интегральное преобразование Лапласа. Как известно [10-12], основным инструментом нахождения аналитических решений краевых задач нестационарной теплопроводности в областях канонического типа (пластина, цилиндр, шар) является операционный метод. В его основе лежит процедура интегральных преобразований Лапласа и Фурье, позволяющая перевести дифференциальные уравнения в частных производных в класс обыкновенных дифференциальных уравнений. Последние, в свою очередь, сводятся к алгебраическим (операторным) уравнения. Важно отметить, что операционный метод применим только для линейных уравнений теплопроводности с постоянными коэффициентами и линейными граничными условиями. Как известно [10-12], преобразование Лапласа переводит оригинал f(x,t) в изображение F(p,t) путем интегрирования с весовой функцией:

$$F(p,t) = \int_{0}^{\infty} f(x,t) e^{-pt} dt.$$

Ниже мы будем символически обозначать эту процедуру как $f(x,t) \Rightarrow F(p,t)$.

Автор [10, 11] подчеркивает особенность краевых задач гиперболической модели теплопроводности: несмотря на свое сравнительно простое математическое описание они в большинстве случаев не позволяют получить замкнутое аналитическое решение. Это делает нахождение точных решений задач для ГУТ существенно более трудоемким по сравнению с параболическим случаем. Использование операционных методов приводит в этом случае к сложным функциональным конструкциям в пространстве изображений (по Фурье или по Лапласу). Вследствие этого справочники по операционному исчислению [12, 23] содержат сравнительно небольшую часть оригиналов исследованных к настоящему времени конструкций. В подавляющем большинстве случаев эти оригиналы не могут быть найдены в аналитическом виде, поэтому решение записывается в виде весьма сложных квадратур. Тем большую ценность приобретают в этой связи те немногочисленные случаи, которые допускают аналитическое решение.

² Подробное исследование уравнения Лыкова и его модификаций содержится в работе [22].

Граничное условие первого рода. В работе [24] было получено аналитическое решение ГУТ со стационарным ГУ первого рода для полуограниченного тела с помощью интегрального преобразования Лапласа:

$$x = 0$$
: $\vartheta(0, t) = \vartheta_0 = \text{const.}$

Ниже приводится обобщение решения [24] на случай, когда температура поверхности тела является произвольной функцией времени: $\vartheta_0(t)$. Зададим однородные начальные условия в виде:

$$\vartheta(x,0) = 0, \quad \frac{\partial \vartheta(x,0)}{\partial t} = 0, \quad q(x,0) = 0.$$

На бесконечности должно выполняться условие затухания температурных возмущений:

$$x \to \infty : \vartheta(\infty, t) = 0.$$

Для этого случая интегрирование уравнения (15) с учетом гипотезы Каттанео–Вернотте (14) дает выражение для теплового потока в следующем виде:

$$q(x,t) = -\frac{\lambda}{t_r} \int_0^t \frac{\partial \vartheta(x,\xi)}{\partial x} \exp\left(-\frac{t-\xi}{t_r}\right) d\xi.$$

По этой квадратуре при известной температурной функции $\vartheta(x,t)$ можно рассчитать тепловой поток в любой точке тела в произвольный момент времени.

Для преобразований Лапласа температуры и граничного условия будем писать:

$$\vartheta(x,t) \Rightarrow T(x,p); \quad \vartheta_0(t) \Rightarrow T_0(p).$$

Решением в области изображений будет:

$$T(x, p) = T_0(p) \exp\left(-\varepsilon x \sqrt{p^2 + \frac{p}{t_r}}\right)$$

Обращаясь к таблицам [12, 23], восстанавливаем оригинал и находим решение исследуемой краевой задачи в виде:

$$\vartheta(x,t) = H(\gamma) \bigg\{ \vartheta_0(\gamma) \exp\left(-\frac{x}{2\sqrt{at_r}}\right) + \frac{x}{2\sqrt{at_r}} J_1 \bigg\}.$$

Здесь введены следующие обозначения:

$$H(\gamma) = \begin{cases} 0, \ x < 0\\ \frac{1}{2}, \ x = 0 - e$$
диничная функция Хевисайда;
1, $x > 0$

$$J_1 = \int_0^{\gamma} T_0(\tau) \frac{I_1(s/2)}{s} \exp\left(-\frac{t-\xi}{2t_r}\right) d\xi; \quad \gamma = t - \varepsilon x; \quad \varepsilon = \sqrt{\frac{t_r}{a}}; \quad s = \sqrt{(t-\xi)^2 - \varepsilon^2 x^2}$$

Граничное условие второго рода. По аналогии с полученным выше решением будем использовать операционный метод для случая нестационарного ГУ второго рода:

$$x = 0: q(0,t) = q_0(t),$$

где $q_0(t)$ — произвольная функция времени. На бесконечности должно выполняться условие затухания градиента температур:

$$x \to \infty: \frac{\partial \vartheta(\infty, t)}{\partial t} = 0.$$

Это условие можно заменить на эквивалентное условие:

$$-\lambda \frac{\partial \vartheta(0,t)}{\partial x} = q_0^*(t); \quad q_0^*(t) = q_0(t) + t_r \frac{\partial q_0(t)}{\partial t}.$$

Преобразования Лапласа для рассматриваемого случая пишем в виде:

$$q(x,t) \Rightarrow Q(x,p); \quad q_0(t) \Rightarrow Q_0(p); \quad q_0^*(t) \Rightarrow Q_0^*(p).$$

Будем иметь следующее решение в области изображений:

$$T(x,p) = Q_0(p) \exp\left(-\varepsilon x \sqrt{p^2 + \frac{p}{t_r}}\right) / \left(\lambda \varepsilon \sqrt{p^2 + \frac{p}{t_r}}\right).$$

Возвращаясь к таблицам оригиналов [12, 23], получаем:

$$\vartheta(x,t) = H(\gamma) \left\{ \frac{t_r}{\varepsilon \lambda} q_0(\gamma) \exp\left(-\frac{x}{2\sqrt{at_r}}\right) + \frac{1}{2\varepsilon \lambda} J_2 \right\}.$$

Здесь величина J_2 обозначает следующий интеграл:

$$J_{2} = \int_{0}^{\gamma} q_{0}(\tau) \left[I_{1}(s/2) + (t-\tau) \frac{I_{2}(s/2)}{s} \right] \exp\left(-\frac{t-\xi}{2t_{r}}\right) d\xi.$$

Относительные коэффициенты теплоотдачи. Введем коэффициент теплоотдачи, связывающий тепловой поток и температуру на поверхности твердого тела:

$$\alpha(t) = \frac{q(0,t)}{\vartheta(0,t)}.$$

Из полученных выше аналитических решений следует:

$$\alpha_{\vartheta} = \sqrt{\frac{\rho\lambda c_p}{t_r}} \exp\left(-\tilde{t}\right) I_0\left(\tilde{t}\right),$$

$$\alpha_q = \sqrt{\frac{\rho\lambda c_p}{t_r}} \exp\left(\tilde{t}\right) \left\{ I_0\left(\tilde{t}\right) + 2\tilde{t} \left[I_0\left(\tilde{t}\right) + I_1\left(\tilde{t}\right) \right] \right\}^{-1}.$$
(16)

Здесь $I_0(\tilde{t}), I_1(\tilde{t})$ — модифицированные функции Бесселя первого рода соответственно нулевого и первого порядка [25]; $\tilde{t} = t/2t_r$ — безразмерное время³; нижний индекс обозначает тип ГУ: соответственно первого (ϑ) и второго (q) рода.

Если время релаксации пренебрежимо мало $(t_r \to 0)$, будем иметь $\tilde{t} \to \infty$, и формулы (16) будут описывать коэффициент теплоотдачи для параболического случая:

$$\alpha_{\vartheta^{*}} = \sqrt{\frac{\rho\lambda c_{p}}{\pi t}}, \\
\alpha_{q^{*}} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \sqrt{\frac{\rho\lambda c_{p}}{t}}.$$
(17)

Опираясь на эталонные значения (17), введем относительные коэффициенты теплоотдачи, позволяющие выразить влияние конечной скорости передачи тепла:

$$\Psi_{\vartheta} = \frac{\alpha_{\vartheta}}{\alpha_{\vartheta^*}}, \quad \Psi_q = \frac{\alpha_q}{\alpha_{q^*}}.$$

³ Здесь для удобства в качестве масштаба используется удвоенное время релаксации 2*t_r*.



Рис. 3. Относительный коэффициент теплоотдачи: 1 – граничное условие первого рода; 2 – граничное условие второго рода.

Для ГУ первого и второго рода из (16), (17) получаем:

$$\Psi_{\vartheta} = \sqrt{2\pi \tilde{t}} \exp\left(-\tilde{t}\right) I_{0}\left(\tilde{t}\right),$$

$$\Psi_{q} = \sqrt{(8/\pi)\tilde{t}} \exp\left(\tilde{t}\right) \left\{ I_{0}\left(\tilde{t}\right) + 2\tilde{t} \left[I_{0}\left(\tilde{t}\right) + I_{1}\left(\tilde{t}\right) \right] \right\}^{-1}.$$
(18)

Рассмотрим асимптотики (18). При $t_r \rightarrow 0$ оба выражения (18) сводятся к эталонному параболическому случаю:

$$\tilde{t} \to \infty$$
: $\Psi_{\vartheta} = \Psi_a = 1$.

При $t_r \to \infty$ будем иметь случай максимального влияния гиперболичности:

$$\tilde{t} \rightarrow 0: \Psi_{\vartheta} \rightarrow \sqrt{2\pi \tilde{t}}, \ \Psi_q = \sqrt{8/\pi \tilde{t}},$$

описывающий максимальное снижение теплопереноса за счет инерционного запаздывания теплового потока. Результаты расчета по зависимостям (18) представлены на рис. 3.

Как видно из рисунка, при увеличении \tilde{t} функция Ψ_q монотонно возрастает от 0 до 1. В то же время зависимость Ψ_{ϑ} обнаруживает локальный максимум с координатами: $\tilde{t} = 1.58$, $\Psi_{\vartheta} = 1.175$. Из (16) следует, что в начальный момент времени коэффициенты теплоотдачи для обоих ГУ описываются соотношением:

$$t = 0: \alpha_{\vartheta} = \alpha_q = \sqrt{\frac{\rho \lambda c_p}{t_r}}.$$

Сопоставление этой асимптотики с эталонными значениями (17) демонстрирует радикальное различие параболической и гиперболической моделей теплопроводности.

• ϑ = const. В параболическом случае начальный тепловой поток принимает бесконечно большое значение, в гиперболическом случае — остается конечным.

• q = const. B начале обогрева перепад температур на поверхности для ПУТ равен нулю, а для ГУТ — скачкообразно возрастает до некоторого фиксированного значения.

ОБОБЩЕННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ

Безразмерные коэффициенты теплоотдачи. Введем безразмерное время релаксации: $\tau_r = t_r/t_0$ и перейдем в (16) к безразмерным коэффициентам теплоотдачи, определяемым формулой (9):

$$\tilde{\alpha}_{\vartheta} = \tau_r^{-1/2} \exp\left(-\tilde{t}\right) I_0\left(\tilde{t}\right),$$

$$\tilde{\alpha}_q = \tau_r^{-1/2} \exp\left(\tilde{t}\right) \left\{ I_0\left(\tilde{t}\right) + 2\tilde{t} \left[I_0\left(\tilde{t}\right) + I_1\left(\tilde{t}\right) \right] \right\}^{-1}.$$
(19)

Соотношения (19) содержат два различных безразмерных времени – $\tau = t/t_0$, $\tilde{t} = t/2t_r - и$ поэтому неудобны для последующего анализа. С погрешностью менее 1% их можно аппроксимировать формулами:

$$\tilde{\alpha}_{\vartheta} = \left(\frac{3\tau_r + \tau}{3\tau_r^2 + 4\tau_r\tau + 3\tau^2}\right)^{1/2},$$

$$\tilde{\alpha}_q = \left(\frac{3(3\tau_r + \tau)}{9\tau_r^2 + 12\tau_r\tau + 4\tau^2}\right)^{1/2}.$$
(20)

Здесь введены унифицированные безразмерные величины: $\tau = t/t_0$, $\tau_r = t_r/t_0$. В пределе при $t \to \infty$ безразмерные коэффициенты теплоотдачи имеют "параболический" вид, зависящий только от времени:

$$\mathfrak{r}_r = 0: \ \tilde{\alpha}_{\vartheta} = \frac{1}{\sqrt{3\tau}}; \ \ \tilde{\alpha}_q = \sqrt{\frac{3}{4\tau}}.$$

В свою очередь, в "гиперболическом пределе" $t \to 0$ эти величины определяются только временем релаксации:

$$\tau_r \to \infty$$
: $\tilde{\alpha}_{\vartheta} = \tilde{\alpha}_q = \frac{1}{\sqrt{\tau_r}}$.

Запишем конструкцию аналитического решения сопряженной задачи, обобщающее эталонный параболический вариант (10):

$$\Psi_* = \left\{ 1 + \left[\sqrt{3}\tilde{\alpha}_{\vartheta} + \left(\sqrt{8/3}\tilde{\alpha}_q - \sqrt{3}\tilde{\alpha}_{\vartheta} \right) \varphi_* \right] \right\}^{-1}.$$
(21)

В (21) входит переходная функция:

$$\varphi_* = \left(1 + \tau_*^{1/2}\right)^{-1/2}$$

которая содержит неизвестное безразмерное время τ_* . Будем искать эту величину как обобщение текущего времени на случай ГУТ. Анализ соотношения (20), включающего комбинации безразмерных величин τ , τ_r , дает в наше распоряжение два предельных варианта: либо $\tau_* \approx 1/3\tilde{\alpha}_{\vartheta}^2$, либо $\tau_* \approx 3/4\tilde{\alpha}_q^2$. Расчеты, проведенные в диапазоне $0 < \tau_r < 1$ для указанных двух величин, показали, что их различие не превышает десятых долей процента. Для определенности ниже мы будем использовать переходную функцию для ГУ ϑ = const:

$$\varphi_* = 3^{1/4} \left(\frac{\tilde{\alpha}_{\vartheta}}{1 + \sqrt{3}\tilde{\alpha}_{\vartheta}} \right)^{1/2}.$$
 (22)

1/2



Рис. 4. Зависимость параметра испарения от времени для различных значений времени релаксации: 1 – $\tau_r = 0$; 2 – $\tau_r = 10^{-3}$; 3 – $\tau_r = 10^{-2}$; 4 – $\tau_r = 10^{-1}$; 5 – $\tau_r = 10^0$.

Соотношения (19)–(22) представляют собой приближенное аналитическое решение сопряженной задачи "теплопроводность – испарение" для общего случая конечной скорости распространения тепла. На рис. 4 представлены функции $\psi_*(\tau)$ для различных значений τ_r . Как видно из рисунка, обобщенные зависимости представляют собой протяженные пологие участки в окрестности $\tau = 0$, плавно переходящие в эталонную зависимость (8) для случая $t_r = 0$ (рис. 2). Важной особенностью общего решения для ГУТ является выход величины ψ_* при $\tau = 0$ на фиксированную "гиперболическую полку":

$$\Psi_{*\min} = \left(1 + \sqrt{\frac{3}{\tau_r}}\right)^{-1}.$$
(23)

На рис. 5 приведена зависимость $\psi_{*\min}(\tau_r)$. При $\tau_r = 0$ имеем предельный случай, описываемый ПУТ: $\psi_{*\min} = 0$. При увеличении времени релаксации $\psi_{*\min}$ монотонно возрастает и при $\tau_r \to \infty$ достигает предельного значения: $\psi_{*\min} = 1$. Эта асимптотика соответствует полному выключению механизма теплопроводности: $\psi_* = \psi_{*\min} = 1$. Физически это означает, что во всем интервале $0 < \tau < \infty$ излучаемый тепловой поток полностью затрачивается на испарение: $q_u \to q = \text{const.}$

Двухзонная аппроксимация решения. Для проведения прикладных расчетов, а также приближенных физических оценок целесообразно использовать приближенную аппроксимацию решения (21). Для этого заменим пологие участки на рис. 3 на горизонтальные участки ("полки") в интервале $0 \le \tau \le \tau_0$, ширина которых равна (рис. 6):

$$\tau_0 = \frac{2\tau_r \left(5 + 3\sqrt{\tau_r}\right)}{15\left(1 + \sqrt{\tau_r}\right)}.$$
(24)



Рис. 5. Зависимость минимального значения параметра испарения от параметра релаксации.

Как видно из формулы (24), время запаздывания τ_0 оказывается пропорциональным времени релаксации: $\tau_0 = 2/3\tau_r$ при $\tau_r = 0$; $\tau_0 = 2/5\tau_r$ при $\tau_r \to \infty$. Согласно (23), высота "гиперболической полки" зависимости $\psi_*(\tau)$ однозначно определяется параметром релаксации:

$$\tau_r = \frac{t_r}{t_0} = \frac{3}{2\pi} \frac{\beta}{1 - 0.4\beta} \frac{r^4 t_r}{a R_r c_p^2 T_s^3}$$

В итоге можно записать двухзонную аппроксимацию аналитического решения:

$$\Psi = \begin{cases} \Psi_{*\min}, & 0 < \tau < \tau_0 \\ \Psi(\tau), & \tau_0 \le \tau < \infty \end{cases}$$
(25)

Двухзонная аппроксимация дает наглядную картину влияния параметра релаксации на интенсивность испарения. Как видно из рис. 6, учет конечной скорости распространения тепла отсекает от предельной параболической кривой, описываемой формулой (8), "гиперболическую зону" протяженностью τ_0 . Физически это означает, что в тепловом балансе (1) поток испарения при $\tau = 0$ скачкообразно возрастает от нуля до значения $q_u = \psi_{*\min} q$. Далее на протяжении гиперболической зоны ($0 < \tau < \tau_0$) составляющие теплового баланса остаются неизменными. Начиная с момента $\tau = \tau_0$, реализуется "параболическая зона", подчиняющаяся соотношению (8). С увеличением времени релаксации высота гиперболической полки увеличивается.

Приведенная двухзонная аппроксимация качественно подтверждает отмеченную в работах [10–13] тенденцию вырождения влияния времени релаксации на теплоперенос. На рис. 7 приведены предельные ситуации двухзонной аппроксимации. Так, значению $\psi_{*\min} = 0.05$ соответствует время запаздывания $\tau_0 \approx 5.5 \times 10^{-3}$. Здесь мы имеем протяженную параболическую зону, в течение которой происходит нарастание потока испарения. Значению $\psi_{*\min} = 0.95$ отвечает $\tau_0 \approx 400$. При этом процесс теплопровод-



Рис. 6. Двухзонная аппроксимация решения (21): $1 - \tau_r = 0$; $2 - \tau_r = 10^{-3}$; $3 - \tau_r = 10^{-2}$; $4 - \tau_r = 10^{-1}$; $5 - \tau_r = 10^0$.

ности практически перестает влиять на теплоперенос, так что на протяжении всей гиперболической зоны происходит рост потока испарения лишь на 5%.

Влияние коэффициента конденсации. Полученное выше решение (19)–(22) является компактным и удобным для проведения расчетов. Однако для наглядного выявления влияние коэффициента конденсации на параметр испарения целесообразно представить решение в параметрическом виде. Введем для этого вместо соотношения (7) новый масштаб времени:

$$t_1 = \frac{2\pi}{3} \frac{aR_g c_p^2 T_s^3}{r^4}.$$
 (26)

С учетом (26) будут переопределены также параметр релаксации ($\tau_{r1} = t_r/t_1$) и безразмерное время ($\tau_1 = t_1/t_0$). В результате в задаче возникает дополнительный параметр β . Как видно из рис. 8, при том же значении параметра релаксации при уменьшении β кривые $\psi_*(\tau)$ смещаются вниз и вправо. Физически это означает две взаимосвязанные тенденции: перевод сопряженной задачи из гиперболической в параболическую; затягивание процесса испарения.

Дальнейшие рекомендации. Полученные в [14–18] экспериментальные и теоретические результаты являются дискуссионными и требуют проведения специальных исследований, которые выходят за пределы настоящей статьи. Перспективной представляется направление, намеченное в работе [26]. Было построено решение кинетического уравнения Больцмана для случая многомасштабной функции распределения молекул по скоростям. С помощью обобщенного метода Энскога–Чепмена авторы [26] получили, что в уравнениях переноса молекулярных потоков импульса и энергии появляются дополнительные члены, описывающие релаксационные эффекты. Их



Рис. 7. Двухзонная аппроксимация решения (30): $1 - \tau_r = 0$; $2 - \tau_r = 10^{-3}$; $3 - \tau_r = 10^{-2}$; $4 - \tau_r = 10^{-1}$; $5 - \tau_r = 10^0$.

учет приводит к появлению добавочных слагаемых в выражениях для тензора вязких напряжений и вектора потока тепла.

Представленные результаты показывают важность учета эффекта релаксации теплового потока, являющегося составной частью механизма нестационарной теплопроводности. Полученное общее аналитическое решение позволяет проследить тенденции влияния физических факторов на параметр испарения и провести корректный анализ предельных вариантов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведено аналитическое исследование сопряженной задачи "испарение – теплопроводность" с учетом конечной скорости распространения тепла. Базовым условием является баланс теплового потока на поверхности облучаемого твердого тела (мишени), включающее две составляющие: поток теплопроводности и поток испарения. Для решения одномерного нестационарного параболического уравнения теплопроводности в полуограниченном теле применяется интегральный метод теплового слоя. Для расчета искомого параметра испарения используются результаты линейной кинетической теории. На основе анализа имеющихся экспериментальных и теоретических данных проведена оценка времени релаксации теплового потока в среде с пространственно-неоднородной структурой. Методом интегрального преобразования Лапласа получено аналитическое решение краевой задачи для гиперболического уравнения теплопроводности в случае нестационарных граничных условий первого и второго рода. Построено обобщенное аналитическое решение сопряженной задачи, учитывающее влияние параметра релаксации на развитие процесса теплопереноса во времени. Проведен анализ влияния коэффициента конденсации на интенсивность испарения. Выполнена двухзонная аппроксимация аналитического решения, позволяющая выде-



Рис. 8. Влияние коэффициента конденсации на параметр испарения: $1 - \beta = 1$; $2 - \beta = 0.6$; $3 - \beta = 0.3$; $4 - \beta = 0.15$; $5 - \beta = 0.06$; $a - \tau_r = 10^{-2}$; $6 - \tau_r = 10^{-1}$; $B - \tau_r = 10^0$.

лить характерные параметры сопряженной задачи: время запаздывания, высота гиперболической полки, гиперболическая и параболическая зоны процесса испарения.

ОБОЗНАЧЕНИЯ

a – коэффициент температуропроводности; c – удельная теплоемкость; q – тепловой поток; q_{λ} – поток теплопроводности; q_u – поток испарения; t – время; t_0 – масштаб времени; t_r – время тепловой релаксации; α – коэффициент теплоотдачи; $\tilde{\alpha}$ – безразмерный коэффициент теплоотдачи; δ – толщина теплового слоя; ϑ – температура; λ – коэффициент теплопроводности; ψ – параметр испарения; ψ_* – обобщенный параметр испарения; Ψ – относительный коэффициент теплоотдачи; ρ – плотность, τ – безразмерное время.

НИЖНИЕ ИНДЕКСЫ

 ϑ – граничное условие первого рода; q – граничное условие второго рода.

СОКРАЩЕНИЯ

ГУ – граничные условия; ГУТ – гиперболическое уравнение теплопроводности; ПУТ – параболическое уравнение теплопроводности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Зудин Ю.Б., Уртенов Д.С., Устинов В.С. Анализ сопряженной задачи испарение-теплопроводность. Изв. РАН. Энергетика. 2020. № 1 С. 138-158.
- Карташов Э.М. Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел. М. Высшая школа, 2001. 540 с.
- Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитическая теория теплопроводности и прикладной термоупругости. М. URSS. 2012. 653 с.
- Карташов Э.М., Кудинов В.А. Аналитические методы теории теплопроводности и ее приложений. М.: URSS. 2018. 1080 с.
- 5. Bäuerle D.W. Laser Processing and Chemistry. Springer. 2011. 851 p.
- 6. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции. УФН. 2002. 172:3. С. 301–333.
- 7. *Муратова Т.М., Лабунцов Д.А.* Кинетический анализ процессов испарения и конденсации // ТВТ. 1969. Т. 7. № 5. С. 959–967.
- 8. *Cattaneo C.A.* Form of heat conduction equation which eliminates the paradox of instantaneous propagation. Compt. Rend. 1958. V. 247. P. 431–433.
- 9. Vernotte P. Les paradoxes de la théorie continue de l'equation de la chaleur. Compt. Rend. 1958. V. 246. P. 3154–3155.
- 10. *Карташов Э.М.* Краевые задачи для гиперболических моделей переноса. Вестн. МИТХТ. 2008. Т. 3. № 3. С. 20–22.
- 11. *Карташов Э.М.* Аналитические решения гиперболических моделей нестационарной теплопроводности. Тонкие химические технологии. 2018. Т. 13. № 2. С. 81–90.
- 12. Карташов Э.М. Оригиналы операционных изображений для обобщенных задач нестационарной теплопроводности. Тонкие химические технологии. 2019. Т. 14. № 4. С. 77–86
- 13. Кудинов В.А., Кудинов И.В. Получение и анализ точного аналитического решения гиперболического уравнения теплопроводности для плоской стенки. ТВТ. 2012. Т. 50. Вып. 1. С. 118–125.
- 14. *Kaminski W*. Hyperbolic heat conduction equation for materials with a non-homogeneous inner structure. ASME J. Heat Transfer. 1990. V. 112. P. 555–560.
- Mitra K., Kumar S., Vedavarz A., Moallemi M.K. Experimental evidence of hyperbolic heat conduction in processed meat. J. Heat Transfer, Trans. ASME. 1995. V. 117. P. 568–573.
- Graβmann A., Peters F. Experimental investigation of heat conduction in wet sand. Heat Mass Transfer. 1999. V. 35. P. 289–294.
- Herwig H., Beckert K. Experimental evidence about controversy concerning Fourier or non-Fourier heat conduction in materials with nonhomogeneus inner structure. Heat Mass Transfer. 2000. V. 36. P. 387–392.

- 18. *Roetzel W., Putra N., Das S.K.* Experiment and analysis for non-Fourier conduction in materials with non-homogeneous inner structure. Int J Thermal Sci. 2005. V. 42. P. 541–552.
- 19. Антимонов М.С., Кудинов В.А., Стефанюк Е.В. Аналитические решения задач теплопроводности для цилиндра и шара на основе определения фронта температурного возмущения". Журн. вычисл. матем. и матем. физ. 2008. Т. 48. № 4. С. 681–692.
- 20. Кирсанов, Ю. А. Кирсанов А.Ю., Юдахин А. Е. Измерение времени тепловой релаксации и демпфирования температуры в твердом теле. ТВТ. 2017. Т. 55. № 1. С. 122–128.
- 21. *Лыков А.В.* Применение методов термодинамики необратимых процессов к исследованию тепло- и массообмена. ИФЖ. 1965. Т. 9. № 3. С. 287–304.
- 22. *Кудинов В.А., Кудинов И.В.* Исследование теплопроводности с учетом конечной скорости распространения теплоты. ТВТ. 2013. Т. 51. № 2. С. 301–310.
- 23. Бейтмен Г., Эрдейи А. Таблицы интегральных преобразований. Том 1. Преобразования Фурье, Лапласа, Меллина. М.: Наука, 1969. 344 с.
- 24. Баумейстер К., Хамилл Т. Гиперболическое уравнение теплопроводности. Решение задачи о полубесконечном теле. Теплопередача. 1969. № 4. С. 112–119.
- Бейтмен Г., Эрдейи А. Функции Бесселя, функции параболического цилиндра, ортогональные многочлены. Т. 2. Высшие трансцендентные функции. М.: Наука, 1974. 296 с.
- 26. Синкевич О.А., Семенов А.М. Решение уравнения Больцмана методом разложения функции распределения в ряд Энскога по параметру Кнудсена в случае наличия нескольких масштабов зависимости функции распределения от времени и координат. ЖТФ. 2003. Т. 73. № 10. С. 1–5.

The Conjugate Problem "Evaporation – the Hyperbolic Heat Conduction Equation"

Yu. B. Zudin^{a, *}, D. S. Urtenov^a, and V. S. Ustinov^a

^aNational Research Centre "Kurchatov Institute", Moscow, Russia *e-mail: yzudin@gmail.com

Analytical study of the conjugate problem "evaporation – the hyperbolic heat conduction equation" for the hyperbolic model of thermal conductivity is carried out. The evaporation flow is calculated using the linear kinetic theory. The relaxation time of the heat flow is estimated by analyzing experimental and theoretical results. The analytical solution of the boundary-value problem for the hyperbolic heat equation in the case of nonstationary boundary conditions of the first and second kind is obtained by the Laplace integral transformation method. A generalized analytical solution of the conjugate problem is constructed with due account of the influence of the relaxation parameter on the development of the heat transfer process in time. A two-zone approximation of the solution for the evaporation parameter is performed, which allowed us to identify the characteristic parameters of the conjugate problem: the delay time, the height of the hyperbolic shelf, and the hyperbolic and parabolic zones of the evaporation process.

Keywords: analytical study, conjugate problem, Laplace transform, hyperbolic heat conduction equation, generalized solution, relaxation parameter, condensation coefficient