



# Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

2022 / Вып. 1

Учредитель: ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

## РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

**С.В. Тарарыкин**, д-р техн. наук (Иваново)  
(главный редактор)

**Е.Р. Пантелеев**, д-р техн. наук (Иваново)  
(зам. главного редактора)

**Е.Н. Бушуев**, д-р техн. наук (Иваново)

**А.Р. Гайдук**, д-р техн. наук (Таганрог)

**В.П. Жуков**, д-р техн. наук (Иваново)

**Ю.Б. Казаков**, д-р техн. наук (Иваново)

**С.В. Ключина** (Иваново)

**А.Р. Колганов**, д-р техн. наук (Иваново)

**С.В. Косяков**, д-р техн. наук (Иваново)

**В.В. Курейчик**, д-р техн. наук (Таганрог)

**В.Е. Мизонов**, д-р техн. наук (Иваново)

**М.Ш. Мисриханов**, д-р техн. наук (Москва)

**В.Ф. Очков**, д-р техн. наук (Москва)

**А.И. Тихонов**, д-р техн. наук (Иваново)

**В.А. Шуин**, д-р техн. наук (Иваново)

## МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:

**D. Antić**, профессор (Сербия)

**H. Berthiaux**, профессор (Франция)

**H. Otwinowski**, доктор (Польша)

**K. Tannous**, профессор (Бразилия)

**J.-C. Vannier**, профессор (Франция)

### Над номером работали:

Ответственные за выпуск: Е.Н. Бушуев, В.А. Шуин,  
А.И. Тихонов, А.Р. Колганов, В.Е. Мизонов, С.В. Косяков

Начальник УИУНЛ  
Технический редактор  
Редактор

**С.В. Ключина**  
**Н.В. Королева**  
**С.М. Коткова**

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

**В.А. Горбунов, Г.А. Перевезенцев, С.С. Теплякова, М.Н. Мечтаева.** Методика определения коэффициентов эффективной теплопроводности при нагреве пористых тел на основе использования фракталоподобных структур.....**5**

**С.А. Банникова.** Математическое моделирование теплопереноса в непроходных каналах тепловых сетей.....**12**

**Э.А. Тюрина, А.С. Медников, П.Ю. Елсуков, П.В. Жарков, Е.В. Зубова.** Использование газа подземной газификации угля для совместного производства электроэнергии и синтетического жидкого топлива.....**22**

### ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

**В.П. Голов, Д.Н. Кормилицын, О.С. Суханова.** Анализ влияния управляемой линии высокого напряжения и автоматического регулирования возбуждения генераторов на колебательную устойчивость электроэнергетической системы.....**38**

**С.В. Деркачев.** Микропроцессорная защита группы электродвигателей от обрыва фаз в сети внешнего электроснабжения.....**46**

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

**С.А. Нестеров, И.С. Егоров.** Анализ процессов в магнитожидкостном герметизаторе с учетом деформации магнитной жидкости.....54

## МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Д.С. Процко, С.Ю. Панов, А.А. Хвостов, Е.А. Шпилова.** Разработка математической модели тангенциальной регенерации фильтровальных перегородок малогабаритных пылеулавливающих аппаратов энергетических установок.....64

*Журнал «Вестник Ивановского государственного энергетического университета» включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, утвержденных ВАК Министерства образования и науки РФ для публикации основных научных результатов диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук и ученой степени доктора наук по следующим группам специальностей: 05.09.00 – Электротехника; 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление; 05.14.00 – Энергетика.*

*Предоставляется информация об опубликованных статьях в систему РИНЦ согласно договору № 580-12/2012 ЛО от 13 декабря 2012 г. с ООО «Научная электронная библиотека».*

*Журнал зарегистрирован в базе данных Ulrich's (США).*



# Ivanovo State Power Engineering University

## Bulletin of the Ivanovo State Power Engineering University (Bulletin ISPEU)

The Journal has been published since 2001

ISSN 2072-2672

2022 / Issue 1

Founder: Federal State-Financed Educational Institution of Higher Professional Education  
«Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin»

### EDITORIAL BOARD:

**S.V. Tararykin**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
(Chief Editor)  
**E.R. Pantelev**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
(Chief Editor Assistant)  
**E.N. Bushuyev**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**A.R. Gaiduk**, Doctor of Engineering (Taganrog)  
**V.P. Zhukov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**Yu.B. Kazakov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**S.V. Klyunina** (Ivanovo)  
**A.R. Kolganov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**S.V. Kosyakov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**V.V. Kureychik**, Doctor of Engineering (Taganrog)  
**V.E. Mizonov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**M.Sh. Misrikhanov**, Doctor of Engineering (Moscow)  
**V.F. Ochkov**, Doctor of Engineering (Moscow)  
**A.I. Tikhonov**, Doctor of Engineering (Ivanovo)  
**V.A. Shuin**, Doctor of Engineering (Ivanovo)

### INTERNATIONAL EDITORIAL BOARD:

**D. Antić**, Professor (Serbia)  
**H. Berthiaux**, Professor (France)  
**H. Otwinowski**, Doctor (Poland)  
**K. Tannous**, Professor (Brazil)  
**J.-C. Vannier**, Professor (France)

### The issue is prepared by:

Responsible people for the issue: E.N. Bushuyev,  
V.A. Shuin, A.I. Tikhonov, A.R. Kolganov, V.E. Mizonov,  
S.V. Kosyakov

Chief of Educational and Scientific  
Literature Publishing Office  
Technical Editor  
Editor

**S.V. Klyunina**  
**N.V. Koroleva**  
**S.M. Kotkova**

### CONTENT

#### HEAT AND POWER ENGINEERING

**V.A. Gorbynov, G.A. Perevezentsev, S.S. Teplyakova, M.N. Mechtaeva.** Methodology to determine coefficients of effective thermal conductivity when heating porous bodies using fractal-like structures.....**5**

**S.A. Bannikova.** Mathematical simulation of heat transfer in nonaccessible channels of heat supply system network.....**12**

**E.A. Tyurina, A.S. Mednikov, P.Y. Elukov, P.V. Zharkov, E.V. Zubova.** Use of underground coal gasification gas for co-production of electric power and synthetic liquid fuel.....**22**

#### ELECTRICAL POWER ENGINEERING

**V.P. Golov, D.N. Kormilitsyn, O.S. Sukhanova.** Analysis of influence of controlled high voltage line and automatic excitation control generators on oscillatory steady-state stability of electric-power system.....**38**

**S.V. Derkachev.** Microprocessor protection of electrical motors against phase failure in external power supply network.....**46**

#### ELECTROMECHANICS

**S.A. Nesterov, I.S. Egorov.** Analysis of processes in magnetorheological sealer considering for magnetic fluid deformation.....**54**

**METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION**

**D.S. Protsko, S.Y. Panov, A.A. Khvostov,  
E.A. Shipilova.** Development of mathematical

model of tangential regeneration of filter partitions  
of small-sized dust collecting devices of power  
plants.....**64**

*The Journal «Vestnik of Ivanovo State Power Engineering University» is included in the List of Leading Reviewed Scientific Journals and Publications, which are approved by the State Commission for Academic Degrees and Titles for publishing the main scientific results of the dissertations on the candidate and doctoral degrees for the following groups of specialities: 05.09.00 – Electrical Engineering; 05.13.00 – Informatics, Computer Science and Management; 05.14.00 – Power Engineering.*

*Information about published articles is sent to the Russian Science Citation Index by agreement with «Scientific Electronic Library» Ltd. No. 580-12/2012 LO of December 13, 2012.*

*The journal is registered in the foreign database Ulrich's Periodicals Directory.*

## ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

---

УДК 699.042

**Владимир Александрович Горбунов**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: gorbynov.w@mail.ru

**Григорий Александрович Перевезенцев**

ООО «Ковровские котлы», инженер-конструктор, Россия, Ковров, e-mail: mkandy@mail.ru

**Светлана Сергеевна Теплякова**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: svetlana20212120@mail.ru

**Мария Николаевна Мечтаева**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры атомных электрических станций, Россия, Иваново, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

### Методика определения коэффициентов эффективной теплопроводности при нагреве пористых тел на основе использования фракталоподобных структур

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** В энергетической сфере активно используются теплоизоляционные, пористые композитные, керамические, шихтовые материалы. Для улучшения структуры и придания материалам заданных свойств, необходимых для конкретных условий производства, выполняется их термическая обработка. Актуальной задачей является оценка влияния геометрических параметров фракталоподобной структуры и радиационного теплообмена на теплофизические свойства пористых тел.

**Материалы и методы.** Для численного описания пористых тел значимой является методика замены геометрии пористого тела на тела с фракталоподобной структурой, имеющие свойства самоподобия. Исследуемым объектом выбран массив расположенных хаотично заготовок, представляющий собой структуры, называемые насыпными садками. Реальное пористое тело заменено фрактальной структурой куба 2-го ранга разбиения. Моделирование выполнено в программном комплексе COMSOL Multiphysics на основе трехмерной модели ковры Серпинского. Поскольку распределение теплоты может быть неравномерным по структуре объекта, рассмотрено три варианта сечения фракталоподобной кубической структуры.

**Результаты.** Разработана методика определения эффективных коэффициентов теплопроводности на основе использования фракталоподобных структур. Получены одномерные расчетные модели, обладающие достаточной для инженерного анализа точностью, для различных сечений. Определены эффективные коэффициенты теплопроводности. Анализ данных показал, что геометрические пара-

метры структуры и радиационный теплообмен значительно влияют на эффективный коэффициент теплопроводности при высоких температурах.

**Выводы.** В отличие от существующих подходов, предложенная методика позволяет решить задачу определения теплофизических свойств без физических экспериментов. Используемая методика может применяться для математического моделирования процессов теплообмена теплоэнергетических объектов при расчете температурных полей и определения режимов нагрева.

**Ключевые слова:** фракталоподобный элемент, кондуктивный теплообмен, радиационный теплообмен, ковер Серпинского, губка Менгера, коэффициент теплопроводности, методика определения эффективных коэффициентов теплопроводности

**Vladimir Alexandrovich Gorbynov**

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: gorbynov.w@mai.ru

**Grigori Alexandrovich Perevezentsev**

"Kovrovskie kotly" Co., Design Engineer, Russia, Kovrov, e-mail: mkandy@mail.ru

**Svetlana Sergeevna Teplyakova**

Ivanovo State Power Engineering University, Post Graduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: svetlana20212120@mail.ru

**Maria Nikolaevna Mechtaeva**

Ivanovo State Power Engineering University, Post Graduate Student of Nuclear Power Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: maria.mechtaeva@mail.ru

## Methodology to determine coefficients of effective thermal conductivity when heating porous bodies using fractal-like structures

### Abstract

**Background.** Thermal insulation, porous composite, ceramic, charge materials are frequently used in the energy industry. The materials are heat treated to improve the structure and give them the desired properties required for specific production conditions. The important task is to assess the influence of geometric parameters of the fractal-like structure and radiation heat transfer on the thermophysical properties of porous bodies.

**Materials and methods.** For numerical description of porous bodies, the technique of replacing geometry of porous body with the bodies with a fractal-like structure having self-similarity properties is significant. The object under study is an array of blanks arranged chaotically, the structures that are called bulk cages. The porous body is replaced by a fractal cube structure of the 2<sup>nd</sup> rank of partitioning. The simulation has been performed in the COMSOL Multiphysics software based on a three-dimensional model of the Sierpinski carpet. Since the distribution of heat can be non-uniformed over the structure of the object, three variants of the fractal-like cubic structure cross section are considered.

**Results.** A method to determine the effective thermal conductivity coefficients based on the use of fractal-like structures has been developed. Depending on the cross sections, one-dimensional computational models with sufficient accuracy for engineering analysis are obtained. The effective thermal conductivity coefficients are determined. The results of data analysis have shown that the geometric parameters of the structure and radiation heat transfer significantly affect the effective coefficient of thermal conductivity at high temperatures.

**Conclusions.** In comparison to the currently available approaches, the developed method allows solving the problem of determining thermophysical properties without physical experiments. The technique used in the study may be used for mathematical modeling of heat exchange processes of heat-power facilities when calculating temperature fields and determining heating modes.

**Key words:** fractal-like element, conductive heat transfer, radiative heat transfer, Sierpinski carpet, Menger sponge, thermal conductivity coefficient, method to determine effective thermal conductivity coefficients

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2022.1.005-011

**Введение.** Пористые материалы применяют в энергетике, машиностроении, авиационной, химической, нефтяной, пи-

щевой, металлургической и других отраслях промышленности [1].

В энергетической сфере активно используются теплоизоляционные, пористые композитные, керамические, шихтовые материалы и порошки. На основе порошков изготавливаются таблетки тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), которые являются основной составляющей активной зоны реакторов на АЭС [2, 3].

Для улучшения структуры и придания материалам заданных свойств, необходимых для конкретных условий производства, выполняется их термическая обработка.

При термической обработке металлов заготовки помещаются в термические печи в виде хаотично расположенных элементов. Массив таких заготовок представляет собой структуры, называемые насыпными садками.

Насыпные садки характеризуются рядом параметров, среди которых важнейшим является порозность, определяемая как доля объема пор в общем объеме пористого тела. Поры могут быть открытыми и закрытыми. Рассмотрим тела с закрытыми порами.

В процессе нагрева пористого тела теплопередача осуществляется следующими путями:

- теплопроводностью через твердый «скелет», состоящий из тел простейшей формы (шаров, цилиндров и т.д.);
- теплопроводностью через среду, заполняющую поры;
- излучением через поверхности пор;
- конвекцией при движении газа в порах [4].

Расчет процессов теплообмена в насыпных садках сводится к поиску эффективных теплофизических свойств, приведению тела к условно однородному. Поиск эффективной плотности и теплоемкости не доставляет проблем, а определение эффективной теплопроводности затруднительно [5].

На практике для определения эффективного коэффициента теплопроводности решают обратную задачу на основе физического эксперимента по определению температурного поля пористого тела. Недостатком этого метода является то, что при изменении размеров заготовок нужно вновь проводить физический эксперимент.

В настоящее время универсального метода нахождения эффективных теплофизических свойств не найдено. В зависимости от определенных структур

садок, формируемых элементами заданной канонической формы, предлагаются различные методики [1, 5, 6].

Построение геометрии насыпной садки (рис. 1) вызывает сложности. В [5] предлагается замена геометрии пористого тела на тела с фракталоподобной структурой, имеющие свойства самоподобия. Замена позволяет решить задачу определения теплофизических свойств насыпных садок без физических экспериментов.

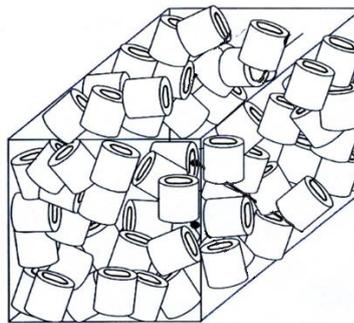


Рис. 1. Контейнер с насыпной садкой

Для унификации насыпных садок сложных форм предлагается применять геометрическую модель, построенную на основе структуры фрактальной геометрии, в частности «губки Менгера», т.е. трехмерной модели ковра Серпинского [1, 7–9]. Для точного описания необходимо подобрать ранг разбиения. Для начала заменим реальное пористое тело фрактальной структурой [10]. В соответствии с реальным значением порозности насыпной садки предлагается предварительно выбрать фрактальную модель 2-го ранга разбиения.

Общий вид предлагаемой фрактальной модели представлен на рис. 2.

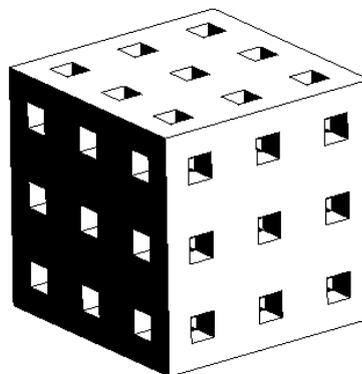


Рис. 2. Фрактальная модель 2-го ранга разбиения

Подобная структура фрактальной модели позволяет проводить численные эксперименты процессов, происходящих в

насыпных садках, со значением порозности, лежащим в пределах от 0,15 до 0,9 [10].

**Материалы и методы исследования.** В качестве методов исследования фракталоподобной структуры «губки Менгера» используются численные пакеты теплофизического моделирования. Для построения моделей и исследования особенностей тепловыделения использован программный комплекс COMSOL Multiphysics [11, 12].

Материалом фракталоподобного элемента принимается сталь 40, структура которой состоит из металла и воздушного пространства, называемого порой [6].

Для исследования фракталоподобной структуры была выбрана геометрическая фигура куб и определены его параметры. Сторона куба равна  $L_1 = 0,09$  м. Размер поры равен  $\ell_1 = 0,01$  м.

Поскольку фракталоподобная структура является условно однородной, распределение теплоты может быть неравномерным. Рассмотрено три геометрических параметра куба при различных вариантах сечения: 1 – по средней линии; 2 – по малой диагонали; 3 – по большей диагонали (рис. 3).

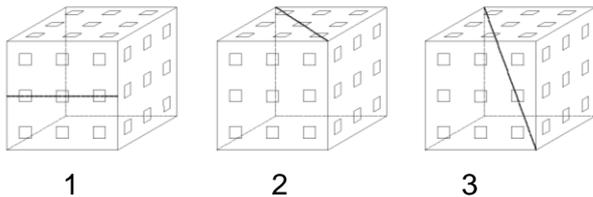


Рис. 3. Исследуемые варианты сечения куба

Значения параметров куба и размеры пор указаны в табл. 1.

Таблица 1. Значения исследуемых параметров куба и соответствующие им размеры пор

Длина, м		Размер поры, м	
$L_1$	0,0900	$\ell_1$	0,01000
$L_2$	0,1273	$\ell_2$	0,01414
$L_3$	0,1559	$\ell_3$	0,01732

На основе геометрических параметров куба необходимо построить одномерные модели сечений фракталоподобных элементов.

Процессы в расчетных моделях фракталоподобной структуры описаны основным уравнением теплопроводности в стационарном режиме нагрева, а также

начальными и граничными условиями, которые показаны на рис. 4.

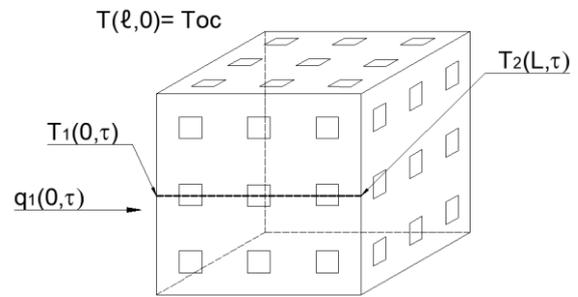


Рис. 4. Начальные и граничные условия пластины фракталоподобной структуры

Начальное температурное поле соответствует температуре окружающей среды:

$$T(\ell, 0) = T_{oc} = 273 \text{ K}, \ell \in [0, L], \quad (1)$$

где  $T(\ell, 0)$  – температура точек фракталоподобной структуры при  $\tau = 0$ ;  $L$  – длина сечения куба, м.

Граничные условия второго рода на левой стороне фракталоподобной структуры имеют вид

$$q_1(0, \tau) = q_0, \quad (2)$$

где  $q_1(0, \tau)$  – тепловой поток на левой стороне при  $\tau = \infty$ , Вт/м<sup>2</sup>;  $T_1(0, \tau)$  – температура на левой стороне при  $\tau = \infty$ , К.

Граничные условия первого рода на правой стороне фракталоподобной структуры имеют вид

$$T_2(L, \tau) = T_0, T_0 \in [273 \text{ K}, 1173 \text{ K}], \quad (3)$$

где  $T_2(L, \tau)$  – температура на правой стороне при  $\tau = \infty$ , К;

К левой стороне фракталоподобной структуры подается тепловой поток, который повышает температуру материала  $T_1(0, \tau)$ . На правой стороне задается температура  $T_2(L, \tau)$ . На основе одномерной модели, построенной в программном комплексе Comsol Multiphysics, рассчитывается эффективный тепловой поток с достижением интервала температур  $\Delta T = 100$  °С.

По полученным результатам рассчитывается эффективный коэффициент теплопроводности

$$\lambda_{эф} = \frac{q_0 L}{\Delta T}, \quad (4)$$

где  $\lambda_{эф}$  – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

**Результаты исследования. Оценка влияния вида сечения фракталоподобного элемента на эффективный коэффициент теплопроводности без учета радиационного теплообмена.** В ходе исследования в программном пакете Comsol Multiphysics были определены значения эффективных коэффициентов теплопроводности в зависимости от параметров сечения куба. Результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Расчетные значения эффективных коэффициентов теплопроводности в зависимости от сечения куба

Диапазон температур, °С	Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)			
	воздух	$L_1$	$L_2$	$L_3$
0–100	0,0283	0,0847	0,0848	0,0848
100–200	0,0357	0,1069	0,1071	0,1071
200–300	0,0427	0,1278	0,1281	0,1281
300–400	0,0491	0,1470	0,1472	0,1472
400–500	0,0548	0,1638	0,1640	0,1640
500–600	0,0599	0,1789	0,1791	0,1791
600–700	0,0647	0,1933	0,1934	0,1934
700–800	0,0695	0,2073	0,2074	0,2074
800–900	0,0741	0,2209	0,2210	0,2209
900–1000	0,0785	0,2341	0,2342	0,2342

Наибольшее расхождение значений при кондуктивном теплообмене в зависимости от сечения фракталоподобного элемента составляет 0,18 %. Следовательно, анизотропность эффективных коэффициентов теплопроводности находится в пределах погрешности (не более 5 %).

**Оценка влияния вида сечения фракталоподобного элемента на эффективный коэффициент теплопроводности с учетом радиационного теплообмена.** Газ является прозрачной средой, в которой надо учитывать два вида теплообмена: конвективный и радиационный. Предварительные исследования показали, что учет конвективного теплообмена в закрытых порах находится в пределах погрешности [2, 3].

В ходе исследования был учтен механизм передачи теплоты радиационным теплообменом от поверхности к окружающему пространству согласно методике, описанной в COMSOL Multiphysics [3, 11, 12].

В результате расчетов были получены значения эффективных коэффициентов теплопроводности с учетом радиационного теплообмена, которые представлены в табл. 3.

Таблица 3. Расчетные значения эффективных коэффициентов теплопроводности с учетом радиационного теплообмена

Диапазон температур, °С	Эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)			
	воздух	$L_1$	$L_2$	$L_3$
0–100	0,0283	0,0849	0,0853	0,0856
100–200	0,0357	0,1075	0,1081	0,1086
200–300	0,0427	0,1288	0,1300	0,1309
300–400	0,0491	0,1485	0,1503	0,1518
400–500	0,0548	0,1662	0,1687	0,1710
500–600	0,0599	0,1825	0,1859	0,1893
600–700	0,0647	0,1981	0,2029	0,2075
700–800	0,0695	0,2137	0,2202	0,2264
800–900	0,0741	0,2293	0,2377	0,2458
900–1000	0,0785	0,2449	0,2556	0,2660

В зависимости от сечения фракталоподобного элемента с учетом радиационного теплообмена наибольшее расхождение расчетных значений составляет 8 %. Следовательно, при расчете температурного поля трехмерного тела следует учитывать анизотропность эффективного коэффициента теплопроводности.

На основе полученных параметров построены графики изменения эффективного коэффициента теплопроводности в зависимости от температуры нагрева фракталоподобного элемента и различных видов сечения (рис. 5).

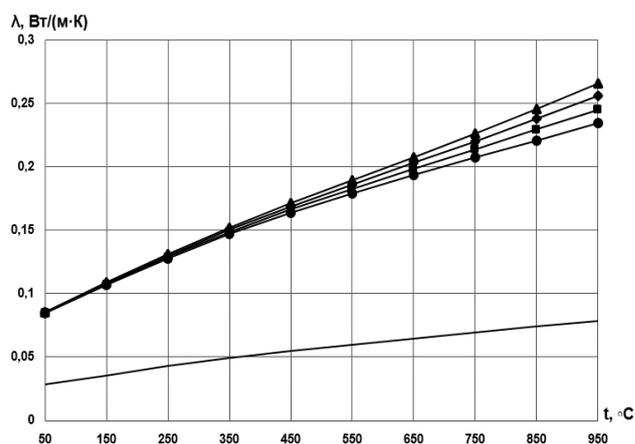


Рис. 5. Зависимость эффективного коэффициента теплопроводности от температур, находящихся в различных диапазонах: — — для воздуха; ● — без учета радиационного теплообмена с сечением по средней линии  $L_1$ ; с учетом радиационного теплообмена с сечением: ■ — по средней линии  $L_1$ ; ◆ — по малой диагонали куба  $L_2$ ; ▲ — по большей диагонали  $L_3$

Анализ данных табл. 3 показал, что при высоких температурах влияние радиационного теплообмена возрастает. Наибольшее расхождение значений эффективного коэффициента теплопроводности без учета радиационного теплообмена и с его учетом превышает 12 %.

При относительно невысоких температурах до 400 °С радиационный теплообмен слабо влияет на эффективный коэффициент теплопроводности. При температурах свыше 400 °С он начинает оказывать существенное влияние [6].

**Выводы.** Полученные в программном пакете Comsol Multiphysics одномерные расчетные модели обладают достаточной точностью для инженерного анализа.

Результаты расчета и расчетные модели, полученные с использованием предложенной методики определения эффективного коэффициента теплопроводности на основе фракталоподобной структуры, показывают, что при высоких температурах наблюдаются значительные отличия значений эффективных коэффициентов теплопроводности от справочных (экспериментальных). Радиационный теплообмен в порах необходимо учитывать через эффективные коэффициенты плотности, теплоемкости, теплопроводности.

Использованная методика может применяться для математического моделирования процессов теплообмена теплоэнергетических объектов при расчете температурных полей и определении режимов нагрева. Эффективность методики заключается в снижении времени расчетов и затрат на проведение физических экспериментов.

Представленные результаты могут применяться в энергетической сфере, на ТЭС и АЭС, в частности в таблетках тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) активной зоны реактора, где присутствуют высокие температуры.

### Список литературы

1. **Мандельброт Б.** Фрактальная геометрия природы. – М.: Ин-т компьютерных исследований, 2002. 656 с.
2. **Разработка** модели по определению температурного поля ТВЭЛ в двумерной постановке задачи / В.А. Горбунов, Н.Б. Иванова, Н.А. Лоншаков, Я.В. Белов // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2019. – № 2. – С. 174–184.

3. **Горбунов В.А., Андрианов С.Г., Коновальцева С.С.** Оценка влияния радиационного теплообмена на параметры температурных полей ТВЭЛ различного конструктивного исполнения // Вестник ИГЭУ. – 2021. – Вып. 2. – С. 23–31. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.023-031

4. **Головин Н.Н., Зарубин В.В., Кувыркин Г.Н.** Оценки эффективного коэффициента теплопроводности композита, модифицированного фуллеренами // Композиты и наноструктуры. – 2012. – № 4. – С. 15–22.

5. **Перевезенцев Г.А., Горбунов В.А., Колибаба О.Б.** Метод фрактального моделирования насыпной садки при ее нагреве в термической печи // Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия». – 2017. – № 1. – С. 84–87.

6. **Перевезенцев Г.А., Колибаба О.Б., Горбунов В.А.** Фрактальная модель насыпной садки при ее нагреве в термической печи // Труды VIII Междунар. науч.-практич. конф. «Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования печей». – М.: Изд. дом МИСиС, 2016. – С. 141–146.

7. **Поляков А.Ф.** Теплообмен в пористой металлической оболочке // Тепловые процессы в технике. – 2010. – № 10. – С. 466–470.

8. **Божокин С.В., Паршин Д.А.** Фракталы и мультифракталы. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 128 с.

9. **Кроновер Р.М.** Фракталы и хаос в динамических системах. – М.: Постмаркет, 2000.

10. **Экспериментальное** исследование влияния фильтрации на температурное поле насыпной садки / Г.А. Перевезенцев, В.А. Горбунов, О.Б. Колибаба, А.Е. Потехин // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 5. – С. 37–41. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.037-041.

11. **Тихомиров В.П., Горленко О.А., Измеров М.А.** Протекание через фрактальную пористую среду // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Т. 13. – № 4–3. – С. 879–883.

12. **Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 5.4.** – 2018. – 702 с. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.he at/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>

### References

1. Mandel'brot, B. *Fraktal'naya geometriya prirody* [Fractal geometry of nature]. Moscow: Institut komp'yuternykh issledovaniy, 2002. 656 p.
2. Gorbunov, V.A., Ivanova, N.B., Lonshakov, N.A., Belov, Ya.V. *Razrabotka modeli po opredeleniyu temperaturnogo polya tvela v dvumernoy postanovke zadachi* [Development of model for determination of temperature fields of fuel rods in two-dimensional formulation of the problem]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika*, 2019, no. 2, pp. 174–184.

3. Gorbunov, V.A., Andrianov, S.G., Konoval'tseva, S.S. Otsenka vliyaniya radiatsionnogo teploobmena na parametry temperaturnykh poley tvelov razlichnogo konstruktivnogo ispolneniya [Assessment of radiation heat transfer influence on parameters of temperature fields of various design fuel rods]. *Vestnik IGEU*, 2021, issue 2, pp. 23–31. DOI: 10.17588/2072-2672.2021.2.023-031.

4. Golovin, N.N., Zarubin, V.V., Kuvyrkin, G.N. Otsenki effektivnogo koeffitsienta teploprovodnosti kompozita, modifitsirovannogo fullerenami [Estimates of the effective coefficient of thermal conductivity of a composite modified with fullerenes]. *Kompozity i nanostruktury*, 2012, no. 4, pp. 15–22.

5. Perevezentsev, G.A., Gorbunov, V.A., Kolibaba, O.B. Metod fraktal'nogo modelirovaniya nasypnoy sadki pri ee nagreve v termicheskoy pechi [Method of fractal modelling of the bulk tank heated in a heat-treating furnace]. *Byulleten' nauchno-tekhnicheskoy i ekonomicheskoy informatsii «Chernaya metallurgiya»*, 2017, no. 1, pp. 84–87.

6. Perevezentsev, G.A., Kolibaba, O.B., Gorbunov, V.A. Fraktal'naya model' nasypnoy sadki pri ee nagreve v termicheskoy pechi [Fractal model of a bulk tank when it is heated in a thermal furnace]. *Trudy VIII Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Energoeffektivnye i resursosberegayushchie tekhnologii v pro-myshlennosti. 100 let otechestvennogo proektirovaniya pechey»* [Proceedings of the VIII International scientific-practical

conference “Energy-efficient and resource-saving technologies in industry. 100 years of domestic design of furnaces”]. Moscow: Izdatel'skiy Dom MISiS, 2016, pp. 141–146.

7. Polyakov, A.F. Teploobmen v poristoy metallicheskoj obolochke [Heat transfer in a porous metal shell]. *Teplovye protsessy v tekhnike*, 2010, no. 10, pp. 466–470.

8. Bozhokin, S.V., Parshin, D.A. *Fraktaly i mul'tifraktaly* [Fractals and multifractals]. Izhevsk: NITs «Regulyarnaya i khaoticheskaya dinamika», 2001. 128 p.

9. Kronover, R.M. *Fraktaly i khaos v dinamicheskikh sistemakh* [Fractals and chaos in dynamic systems]. Moscow: Postmarket, 2000.

10. Perevezentsev, G.A., Gorbunov, V.A., Kolibaba, O.B., Potekhin, A.E. Eksperimental'noe issledovanie vliyaniya fill'tratsii na temperaturnoe pole nasypnoy sadki [Experimental study of filtration influence on temperature field of bulked batch]. *Vestnik IGEU*, 2015, issue 5, pp. 37–41. DOI: 10.17588/2072-2672.2015.5.037-041.

11. Tikhomirov, V.P., Gorlenko, O.A., Izmerov, M.A. Protekanie cherez fraktal'nuyu poristuyu sredu [Flow through a fractal porous medium]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN*, 2011, no. 4–3, vol. 13, pp. 879–883.

12. *Heat Transfer Module User's Guide, Version COMSOL 5.4*. 2018. 702 p. URL: <https://doc.comsol.com/5.4/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf>

УДК 621.577.42

**Светлана Андреевна Банникова**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики, Россия, Иваново, e-mail: sabannikova\_pte@mail.ru

## Математическое моделирование теплопереноса в непроходных каналах тепловых сетей

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Высокие значения нормируемых тепловых потерь в тепловых сетях централизованных систем теплоснабжения говорят о высоком потенциале повышения их энергетической эффективности. Существующие математические модели работы тепловых сетей, описанные в исследованиях В.Ю. Половникова, Г.В. Кузнецова, Е.И. Тарасевича, не решают задачу оценки изменения состояния тепловых сетей с применением энергосберегающих мероприятий. Целью работы является определение допустимого тепловосприятия коллектора предлагаемого устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы на основе разработки и исследования математических моделей процессов теплообмена в сети теплоснабжения.

**Материалы и методы.** Для поиска допустимых режимов работы предложенного устройства выбран метод математического моделирования, способный адекватно определять изменения в работе тепловой сети. При моделировании процессов теплообмена в тепловой сети использована описательная математическая модель с распределенными параметрами, основанная на дифференциальных уравнениях в частных производных и реализованная с помощью метода конечных элементов.

**Результаты.** Предложено устройство по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. Разработаны математические модели процессов теплопереноса в тепловых сетях подземной канальной прокладки в непроходных каналах в традиционном исполнении с применением теплоотражающего экрана и при совместной работе сети с устройством по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы. На основе сравнения результатов расчета было определено допустимое тепловосприятие коллектора устройства по утилизации тепловых потерь, равное 90 % от первоначальных тепловых потерь. Математические модели верифицированы путем сравнения полученных результатов с экспериментальными данными с погрешностью менее 6 %.

**Выводы.** Разработанные математические модели позволяют исследовать влияние тепловосприятия коллектора устройства и теплоотражающего экрана на режим работы тепловой сети и могут быть использованы при определении геометрических параметров коллектора устройства.

**Ключевые слова:** математическая модель тепловой сети, теплоперенос, непроходные каналы тепловых сетей, эффективность теплоотражающего экрана, тепловые потери

**Svetlana Andreevna Bannikova**

Ivanovo State Power Engineering University, Senior lecturer of Industrial Heat Power Engineering Department, Russia, Ivanovo, e-mail: sabannikova\_pte@mail.ru

## Mathematical simulation of heat transfer in nonaccessible channels of heat supply system network

### Abstract

**Background.** High values of standard heat losses in the heating networks of central heat supply systems indicate an opportunity to increase their energy efficiency. Currently available mathematical models of heat networks are described in the scientific studies of Polovnikov V.Yu., Kuznetsov G.V., Tarasevich E.I. But they do not solve the problem of assessing changes of the thermal networks state when energy-saving measures are used. The purpose of the study is to determine the permissible heat perception of the device collector for utilization of heat losses in the heating main channel. The study is based on the development and research of mathematical models of heat exchange processes in the heat supply network.

**Materials and methods.** A mathematical modeling method is chosen to search for acceptable operating modes of this device. The method can help to determine properly changes in the operation of the heat network. A descriptive mathematical model with distributed parameters based on differential equations with partial derivatives is used in modeling heat transfer processes in the heat network. The model is implemented using the finite element method.

**Results.** The authors propose a device for the utilization of heat losses in the heating channel. The authors have developed mathematical models of heat transfer processes in heat networks of underground trench laying in nonaccessible channels in a traditional design with the use of a heat-reflecting screen and combined action of the network and the device for the utilization of heat losses in the heat channel. Based on the comparison of the calculation results, the permissible heat perception value of the device collector for the utilization of heat losses has been determined. It equals to 90 % of the initial thermal losses. Mathematical models have been verified by comparing the results obtained and the experimental data with an error of less than 6 %.

**Conclusions.** The developed mathematical models allow us to study the influence of heat perception of the device collector and the heat-reflecting screen on the operating mode of the heat network. It can be used to determine the geometric parameters of the collector of the device.

**Key words:** mathematical model of the heat network, heat transfer, nonaccessible channel of heat network, efficiency of the heat-reflecting screen, heat losses

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2022.1.012-021

**Состояние вопроса.** К большим энергетическим потерям в тепловых сетях в России приводят как высокие значения нормируемых линейных тепловых потерь, так и неудовлетворительное состояние сетей. Одним из возможных путей модернизации систем теплоснабжения является реконструкция тепловых сетей на основе инновационных, высокоэффективных технологий и оборудования, способных свести к минимуму энергетические потери.

При прогнозировании состояния теплового режима работы сетей теплоснабжения прибегают к математическому моделированию. Вопросам моделирования тепловых сетей посвящены работы В.Ю. Половникова [1], Г.В. Кузнецова [2], Е.И. Тарасевича [3]. Данные исследования проводились в целях анализа штатного и аварийного режимов работы двухтрубных тепловых сетей с подземной канальной прокладкой трубопроводов.

Для повышения энергетической эффективности тепловых сетей систем теплоснабжения промышленных предприятий рассматривается устройство для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы, описанное в [4]. Основными элементами устройства являются коллектор и теплоотражающий экран, расположенные в канале теплотрассы, и тепловой насос. Принципиальная схема устройства показана на рис. 1. Коллектор предназначен для сбора тепловой энергии, теряющейся с трубопроводов тепловой сети, и передачи ее в тепловой насос, повышающий потенциал данной энергии до требуемых пара-

метров. При этом теплоотражающий экран служит для ограничения отбора тепловой энергии от сети и, следовательно, сохранения теплового режима ее работы.

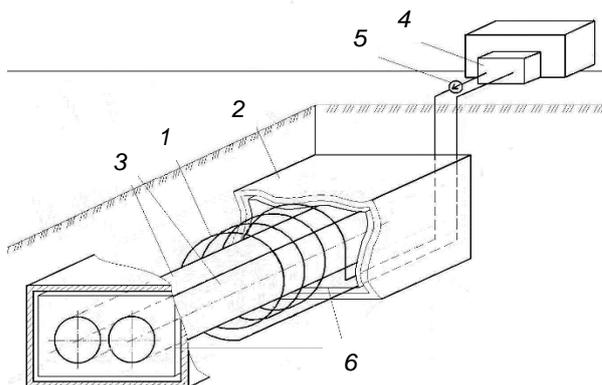


Рис. 1. Принципиальная схема устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы: 1 – коллектор; 2 – канал теплотрассы; 3 – трубопроводы тепловой сети; 4 – испаритель теплового насоса; 5 – циркуляционный насос; 6 – теплоотражающий экран

**Материалы и методы.** Для оценки влияния различных энергосберегающих мероприятий на параметры работы тепловых сетей выбран метод математического моделирования.

Целью работы является определение допустимого тепловосприятия коллектора устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы на основе разработки и исследования математических моделей процессов теплообмена в сети теплоснабжения в традиционном исполнении с применением теплоотражающего экрана и при совместной работе сети с

устройством по утилизации тепловых потерь.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- составить дифференциальные уравнения, описывающие процесс теплообмена в тепловой сети;
- сформулировать граничные условия;
- разработать и реализовать численные модели для исследования сложного радиационно-конвективного теплообмена в тепловых сетях системы теплоснабжения;
- верифицировать разработанную математическую модель;
- выбрать место расположения теплоотражающего экрана;
- исследовать влияние работы устройства по утилизации тепловых потерь на тепловой режим работы однотрубной и двухтрубной тепловой сети с канальной подземной прокладкой в непроходных каналах.

Математическое моделирование позволит определить поля температур в твердых элементах сети теплоснабжения (стальном трубопроводе, изоляции, стенках канала), а также поля температур и скоростей воздуха в канале теплотрассы.

Построение математических моделей процессов теплообмена производится в следующих вариантах тепловой сети:

- без дополнительных элементов;
- с теплоотражающим экраном;
- с теплоотражающим экраном и коллектором устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

В воздушной среде канала теплотрассы рассматривается радиационно-конвективный теплообмен, в твердых телах – перенос теплоты теплопроводностью.

При составлении системы дифференциальных уравнений приняты следующие допущения:

- температура воздуха в канале и в элементах исследуемой системы по длине теплотрассы постоянна;
- стенки коллектора и трубопроводов гладкие и жесткие;
- скорость воздуха на поверхности трубопроводов и коллектора равна нулю;
- вязкость и средняя удельная теплоемкость воздуха не зависят от температуры;
- теплофизические свойства материалов изоляции не зависят от влажности;

- осевое течение воздуха в канале вдоль теплопровода отсутствует;

- температура теплоносителя в трубе постоянна;

- окружающая среда в виде грунта однородная и имеет постоянные теплофизические свойства;

- воздух в канале несжимаемый и прозрачный;

- степень черноты поверхностей не зависит от температуры;

- степень черноты и поглощательная способность не зависят от длины волны;

- термическое сопротивление стальной трубы и наружной оболочки тепловой изоляции пренебрежимо мало.

Необходимо отметить, что при естественной конвекции, наблюдаемой в воздушной среде канала теплотрассы, основная движущая сила обусловлена наличием поля температур, приводящим к изменению плотности воздуха, что влечет за собой появление выталкивающей силы, образующейся из-за сил гравитации. При этом поле температур связано с течением жидкости, поэтому уравнения движения, энергии и неразрывности связаны между собой через изменение плотности и, соответственно, решать эти уравнения необходимо совместно. Это, несомненно, усложняет исследование и значительно увеличивает трудоемкость дальнейших численных расчетов. В связи с этим при изучении естественной конвекции прибегают к различным допущениям, упрощающим дальнейшие расчеты и не приводящим к значимым искажениям в понимании физики процесса. В [5] установлено, что если скорость движения жидкости мала по сравнению со скоростью звука, то возникающие в результате движения жидкости изменения давления настолько малы, что вызываемым ими изменением плотности (и других термодинамических параметров) можно пренебречь. Кроме того, чтобы в уравнениях движения неравномерно нагретой жидкости условно можно было считать плотность постоянной, необходимо, чтобы имеющиеся в жидкости разности температур были достаточно малы. В этом случае речь идет об абсолютных значениях разностей температур, а не о градиенте температуры. Разности температур воздуха в канале в нашем исследовании являются малыми, поэтому воздух принят несжимаемым. Это

существенно упрощает основные уравнения естественной конвекции. Однако изменение плотности в уравнениях необходимо учесть. Для этого принято допущение Буссинеска, согласно которому разность плотностей, вызывающую возникновение течения в результате взаимодействия гравитационной объемной силы и градиента гидростатического давления, можно приближенно представить как влияние одной лишь температуры.

Таким образом, разность плотностей можно представить в виде

$$\rho_a - \rho = \rho\beta(T - T_a), \quad (1)$$

где  $\rho_a$ ,  $T_a$  – плотность и температура окружающей среды;  $\rho$ ,  $T$  – плотность и температура жидкости в данной точке потока;  $\beta$  – коэффициент объемного расширения среды.

При этом в уравнении неразрывности изменением плотности можно пренебречь. Т.е. в условиях решаемой задачи несжимаемой жидкости переменность плотности учитывается только при вычислении объемной силы [6].

Объемная сила равна

$$G = g\rho\beta(T - T_a), \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>.

С учетом принятых допущений задача сводится к двумерной постановке. Основные определяющие уравнения для нахождения полей скорости и температуры в процессе теплообмена в прямоугольной декартовой системе координат с учетом принятых допущений приведены ниже.

Поле скоростей в воздушном пространстве канала теплотрассы определяется системой уравнений движения и неразрывности

$$\rho \left( u_y \frac{\partial u_y}{\partial x} + u_y \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \right); \quad (3)$$

$$\rho \left( u_x \frac{\partial u_x}{\partial x} + u_x \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) = \quad (4)$$

$$= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} \right) + g\rho\beta(t - t_a);$$

$$\rho \left( \frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} \right) = 0, \quad (5)$$

где  $u$  – скорость движения жидкости, м/с;  $p$  – давление жидкости, Па;  $\mu$  – динамическая вязкость, Па·с.

Температурное поле в воздушном пространстве канала теплотрассы определяется решением уравнения энергии для жидкости:

$$\rho C_p \left( u_x \frac{\partial T}{\partial x} + u_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right), \quad (6)$$

где  $C_p$  – средняя удельная изобарная теплоемкость, Дж/кг·К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности жидкости, Вт/м·К.

Температурное поле в твердых элементах тепловой сети определяется решением уравнения энергии для твердого тела:

$$\lambda_w \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) = 0, \quad (7)$$

где  $\lambda_w$  – коэффициент теплопроводности твердого тела, Вт/м·К.

Математические модели процессов теплообмена в описанных выше вариантах тепловой сети имеют в своей основе идентичные уравнения движения (3), (4), неразрывности (5) и переноса энергии (6), (7), но разный набор элементов с соответствующими граничными условиями. В состав тепловой сети без дополнительных элементов входит трубопровод и канал. Тепловая сеть с теплоотражающим экраном состоит из трубопровода, теплоотражающего экрана и канала. Тепловая сеть с теплоотражающим экраном и коллектором устройства включает в себя трубопровод, теплоотражающий экран, канал и коллектор.

Зададим для уравнений (3)–(7) граничные условия, предполагающие сопряжение по тепловым потокам и температурам (рис. 2).

Ниже приведен перечень граничных условий для всех моделей:

- $\Gamma_1$  – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у внутренней поверхности трубопроводов, через которую подводится теплота;

- $\Gamma_2$  – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у поверхности изолированного трубопровода;

- $\Gamma_3$  – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у поверхности теплоотражающего экрана;

- $\Gamma_4$  – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у внутренней поверхности канала;

- $\Gamma_5$  – граничные условия 4-го рода, описывающие теплообмен у внешней стороны канала, у границы контакта внешней границы канала с прилегающим грунтом;

•  $\Gamma_6$  – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у внешней поверхности коллектора;

•  $\Gamma_7$  – граничные условия 3-го рода, описывающие теплообмен у внутренней поверхности коллектора, через которую отводится теплота.

Таким образом, первая математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети без дополнительных элементов ( $M_1$ ), имеет границы  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_4, \Gamma_5$ . Вторая математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети с теплоотражающим экраном ( $M_2$ ), имеет границы  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5$ . Третья математическая модель, описывающая теплообмен в тепловой сети при ее совместной работе с устройством по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы ( $M_3$ ), имеет границы  $\Gamma_1, \Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_5, \Gamma_6, \Gamma_7$ .

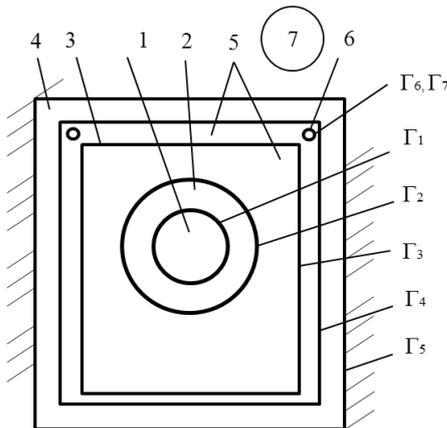


Рис. 2. Схема граничных условий: 1 – теплоноситель; 2 – изолированный трубопровод; 3 – теплоотражающий экран; 4 – канал; 5 – воздух канала теплотрассы; 6 – коллектор; 7 – окружающая среда

Граничные условия 3-го рода, описывающие процесс теплоотдачи на поверхности твердых тел при взаимодействии с воздухом канала теплотрассы с учетом теплообмена излучением ( $\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4, \Gamma_6$ ), в общем случае имеют вид

$$-\lambda_w \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha_b (T_w - T_{\text{возд}}) + \varepsilon_w (e_b(T) - G), \quad (8)$$

где  $T_w$  – температура стенки, °С;  $T_{\text{возд}}$  – температура воздуха в канале, °С;  $\alpha_b$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху в канале, Вт/м<sup>2</sup>·К;  $\varepsilon_w$  – степень черноты стенки;  $e_b(T)$  – плотность потока собственного излучения абсолютно черного тела, Вт/м<sup>2</sup>;  $G$  – суммарная поверхностная плот-

ность потока излучения, падающего на поверхность, Вт/м<sup>2</sup>.

Граничные условия 3-го рода, описывающие процесс теплоотдачи на внутренней поверхности трубопроводов и коллектора ( $\Gamma_1, \Gamma_7$ ), в общем случае имеют вид

$$-\lambda_w \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha_{\text{тн}} (T_w - T_{\text{тн}}), \quad (9)$$

где  $T_{\text{тн}}$  – температура теплоносителя, °С;  $\alpha_{\text{тн}}$  – коэффициент теплоотдачи от стенки к теплоносителю, Вт/м<sup>2</sup>·К.

Граничное условие 4-го рода, описывающее условие теплообмена между наружной поверхностью канала и грунтом, имеет вид

$$-\lambda_{\text{бет}} \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right) = -\lambda_{\text{гр}} \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right), \quad (10)$$

где  $\lambda_{\text{бет}}$  – коэффициент теплопроводности железобетона, Вт/м·К;  $\lambda_{\text{гр}}$  – коэффициент теплопроводности грунта, Вт/м·К.

Для расчета теплообмена излучением использовались следующие математические соотношения, определяющие эффективный и результирующий тепловые потоки излучения с поверхности твердых тел:

$$J = \rho_d G + \varepsilon_w e_b(T); \quad (11)$$

$$q_{\text{рез}} = (1 - \rho_d) G - \varepsilon_w e_b(T), \quad (12)$$

где  $J$  – эффективный тепловой поток излучения, Вт/м<sup>2</sup>;  $\rho_d$  – коэффициент диффузного отражения.

Зависимость плотности потока собственного излучения абсолютно черного тела от температуры определяется по уравнению Стефана-Больцмана:

$$e_b(T) = \int_0^{\infty} e(\lambda, T) d\lambda = \sigma T^4, \quad (13)$$

где  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>.

Суммарная поверхностная плотность потока излучения падающего на поверхность равна

$$G = G_m + G_{\text{amb}} + G_{\text{ext}}, \quad (14)$$

где  $G_m$  – падающее излучение с других поверхностей системы, Вт/м<sup>2</sup>;  $G_{\text{ext}}$  – падающее излучение с внешних источников, Вт/м<sup>2</sup>;  $G_{\text{amb}}$  – плотность потока излучения окружающей среды, Вт/м<sup>2</sup>.

Все поверхности рассматриваемых систем являются диффузно серыми, т.е. могут диффузно излучать и диффузно отражать падающее излучение. Интенсив-

ность излучения таких поверхностей одинакова по всем направлениям. При этом зависимость излучательных и поглощательных свойств поверхностей от длины волны не учитывается. Это условие справедливо, поскольку в работе рассмотрен достаточно ограниченный спектральный диапазон, в пределах которого изменением коэффициентов излучения и отражения можно пренебречь.

Граничное условие диффузно-излучающей и отражающей поверхности при моделировании теплообмена излучением с поверхности на поверхность в прозрачной среде задано на наружных поверхностях трубопровода и коллектора, на внутренней поверхности канала теплотрассы, на всех поверхностях теплоотражающих экранов. При этом эффективный и результирующий радиационные тепловые потоки рассчитываются с учетом отсутствия внешних источников излучения и излучения окружающей среды по уравнениям:

$$J = (1 - \varepsilon_w) G_m + \varepsilon_w e_b(T); \quad (15)$$

$$-nq_{pez} = \varepsilon_w (G_m - e_b(T)). \quad (16)$$

Адекватность математической модели и обоснованность принятых допущений были проверены сопоставлением результатов численного расчета с данными экспериментального исследования, в ходе которого фиксировались значения теплового потока на наружной поверхности канала физической модели сети теплоснабжения.

Экспериментальное исследование проводилось на трех конфигурациях экспериментальной установки: без экрана (ЭУ №1); оснащенной одним теплоотражающим экраном (ЭУ №2); оснащенной двумя теплоотражающими экранами, расположенными вокруг трубопровода (ЭУ №3). Описание и результаты натурного эксперимента приведены в [4].

Математическая модель процессов переноса тепловой энергии в сети теплоснабжения канальной прокладки в непроходных каналах реализована в специализированном программном комплексе, основанном на методе конечных элементов. Граничные условия были определены экспериментально и не изменялись в ходе проведения расчетов. Схема расчетной области экспериментальной установки (ЭУ №2) с указанием основных размеров показана на рис. 3. Физические характеристики материалов экспериментальной

установки приведены в табл. 1<sup>1</sup>. Экспериментальные и расчетные значения тепловых потоков представлены в табл. 2.

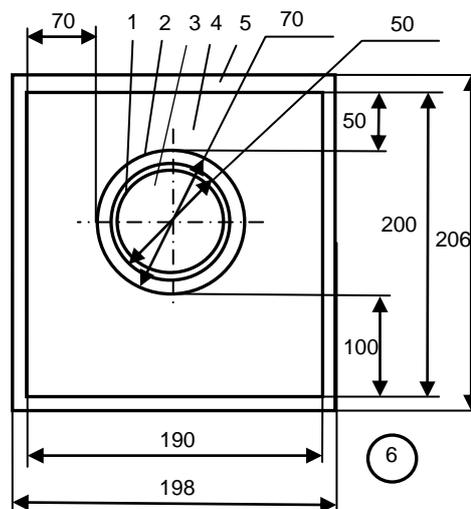


Рис. 3. Схема расчетной области экспериментальной установки с одним экраном: 1 – трубопровод; 2 – теплоотражающий экран; 3 – теплоноситель; 4 – воздух канала теплотрассы; 5 – канал; 6 – окружающая среда

На рис. 4 показаны поле температур и поле скоростей в элементах физической модели однотрубной тепловой сети (ЭУ №1). Анализ этих показателей показывает, что полученное температурное поле и поле скоростей являются достаточно типичными, при этом теплый воздух от трубопровода поступает к верхней стенке канала и, остывая вдоль боковых стенок, движется вниз. Исследование показало, что установка теплоотражающих экранов при геометрических и теплофизических характеристиках данной физической модели тепловой сети позволяет повысить температуру на поверхности трубопровода, значительно уменьшить радиационный тепловой поток и сократить линейные тепловые потери сети теплоснабжения на 57,9 % при установке одного экрана и на 70 % при установке двойного экрана. При этом наблюдается снижение температуры и подвижности воздуха в канале.

Относительная погрешность результатов моделирования, по сравнению с экспериментальными данными, не превышает 5,4 %, что свидетельствует об адекватности принятых при построении математических моделей допущений.

<sup>1</sup> Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1231 с.

Таблица 1. Теплофизические свойства материалов экспериментальной установки

Наименование элемента системы	Технические характеристики				
	материал	плотность, кг/м <sup>3</sup>	теплопроводность, Вт/м·К	теплоемкость, Дж/кг·К	степень черноты <sup>2</sup>
Трубопровод	Полипропилен	990	0,19	1930	0,9
Теплоотражающий экран	Алюминий	2670	204	920	0,15
Канал	Оргстекло	1100	0,196	1800	0,92

Таблица 2. Экспериментальные и расчетные значения тепловых потоков

Конфигурация экспериментальной установки	Метод исследования	Плотность теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>			Среднее значение плотности теплового потока, Вт/м <sup>2</sup>	Относительная погрешность численного расчета, %
		верхняя поверхность канала	боковая поверхность канала	нижняя поверхность канала		
Экспериментальная установка №1 (ЭУ №1)	Эксперимент	189,7	97,0	60,1	110,95	0,02
	Численный расчет	191,3	96,5	59,4	110,93	
Экспериментальная установка №2 (ЭУ №2)	Эксперимент	92,4	45,6	13,9	49,375	5,32
	Численный расчет	93,4	41,6	10,4	46,75	
Экспериментальная установка №3 (ЭУ №3)	Эксперимент	62,6	29,2	12,1	33,275	1,50
	Численный расчет	61,2	31,8	6,3	32,775	

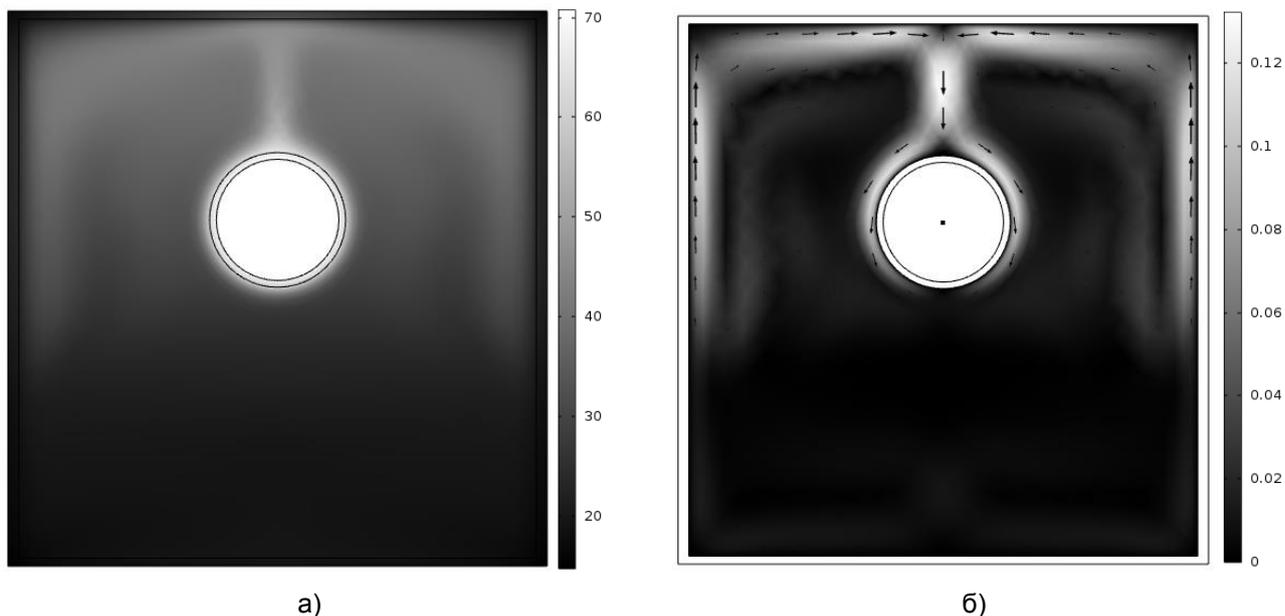


Рис. 4. Температурное поле, °С, (а) и поле скоростей, м/с, (б) экспериментальной установки №1

В целях определения максимально возможного тепловосприятия коллектора устройства для утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы необходимо решить следующие задачи: выбор места

расположения теплоотражающего экрана и исследование влияния работы устройства по утилизации тепловых потерь на тепловой режим работы однотрубной и двухтрубной тепловой сети с канальной подземной прокладкой в непроходных каналах.

Поскольку трубопровод тепловой сети рассматривается только как источник теп-

<sup>2</sup> Излучательные свойства твердых материалов: справочник / под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.

ловой энергии, то в случае двухтрубной тепловой сети взаимным влиянием прямого и обратного трубопровода, ввиду его незначимости для настоящего исследования, допустимо пренебречь. Таким образом, разработанные математические модели можно экстраполировать на двухтрубную тепловую сеть.

Исследование однотрубной и двухтрубной тепловой сети с подземной канальной прокладкой трубопровода в непроходном канале, диаметром трубопроводов 200 мм и глубиной залегания трубопровода 1,5 м проведено методом численного моделирования для температурных графиков работы системы теплоснабжения 150/70 и 95/70. Расчеты велись для температур теплоносителя, соответствующих расчетной температуре воздуха. При этом температура окружающего грунта во всех вариантах численного анализа принималась равной средней температуре грунта за отопительный период для условий г. Иваново.

Основные теплофизические характеристики материалов тепловой сети приведены в табл. 3<sup>3</sup>.

Для анализа влияния отбора энергии коллектором устройства на тепловой режим работы сети теплоснабжения был произведен ряд численных расчетов при наличии теплоотражающего экрана и коллектора.

При выборе места расположения коллектора и конфигурации теплоотражающего экрана необходимо учесть деформацию трубопровода, вызванную его линейным удлинением с ростом температуры

теплоносителя в течение отопительного периода. С учетом данных особенностей было решено располагать экран у внутренней стенки канала, что позволяет трубопроводу свободно деформироваться, не нарушая целостности экрана. При этом коллектор целесообразно разместить в зазоре между экраном и стенкой канала. Также необходимо отметить, что величина тепловосприятости коллектора рассматривается в работе относительно одного метра длины трубопроводов тепловой сети.

**Результаты.** На основании результатов математического моделирования процессов теплообмена в рассматриваемых системах ( $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ ) были построены зависимости, показанные на рис. 5 и 6, отражающие влияние тепловосприятости коллектора, отнесенного к одному метру длины трубопроводов, на величины линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов и линейных потерь с поверхности канала в грунт для двух систем: без теплоотражающего экрана (черные линии) и с теплоотражающим экраном (серые линии).

Полученные зависимости показывают, что отбор теплоты коллектором из канала теплотрассы в размере первоначальных тепловых потерь для данной тепловой сети вызывает увеличение линейной плотности теплового потока с поверхности трубопроводов в среднем на 10–14 %.

Для ограничения отбора теплоты в устройстве предусмотрен теплоотражающий экран, способный сократить радиационную составляющую теплового потока с поверхности трубопроводов.

Таблица 3. Теплофизические характеристики элементов тепловой сети

Наименование элемента системы	Технические характеристики				
	Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплопроводность, Вт/м·К	Теплоемкость, Дж/кг·К	Степень черноты <sup>4</sup>
Трубопровод, коллектор	Сталь	7800	44,5	450	0,96
Теплоотражающий экран	Алюминий	2700	204	920	0,15
Тепловая изоляция	Пенополиуретан (с полиэтиленовой оболочкой)	70	0,035	1470	0,8
Канал	Железобетон	2300	1,8	880	0,9

<sup>3</sup> Физические величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.А. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1231 с.

<sup>4</sup> Излучательные свойства твердых материалов: справочник / под ред. А.Е. Шейндлина. – М.: Энергия, 1974. – 472 с.

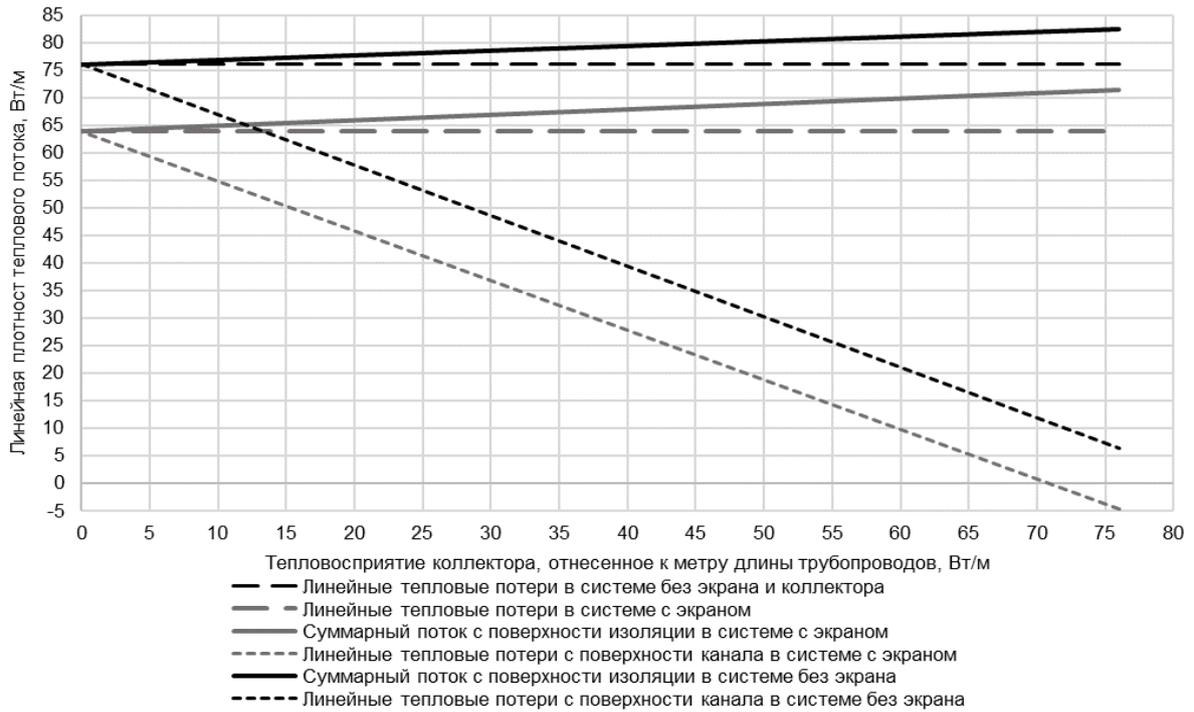


Рис. 5. Влияние тепловосприятости коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в однотрубной тепловой сети  $d = 200$  мм при расчетной температуре наружного воздуха

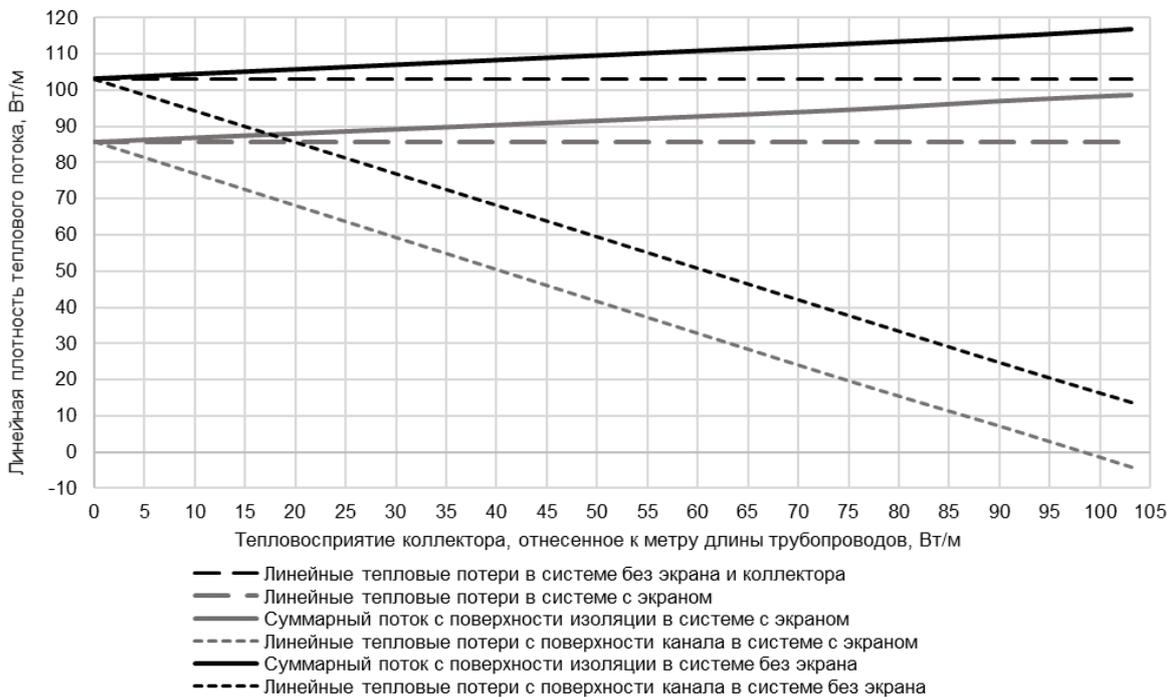


Рис. 6. Влияние тепловосприятости коллектора на тепловой поток с поверхности изоляции и с поверхности канала в двухтрубной тепловой сети  $d = 200$  мм при расчетной температуре наружного воздуха

Анализ работы теплоотражающего экрана в условиях тепловой сети без коллектора показал, что при установке теплоотражающего экрана у внутренней поверхности канала теплотрассы во всех вариантах расчета его эффективность варьируется в диапазоне от 16,8 до 18,8 %.

Результаты численных расчетов совместной работы сети, экрана и коллектора (рис. 5, 6) показали, что применение теплоотражающего экрана, расположенного у внутренней поверхности канала теплотрассы между коллектором и трубопроводами, при прежней величине тепловос-

приятия коллектора, равной первоначальным линейным тепловым потерям, дает принципиально иной результат. В этом случае линейная плотность теплового потока с поверхности трубопроводов становится на 4 % меньше первоначального значения, что говорит о сохранении теплового режима работы сети. При этом тепловая энергия в объеме 4 % от первоначальных потерь, необходимая для достижения требуемого тепловосприятия коллектора, компенсируется энергией окружающего грунта. Однако такой режим совместной работы сети и предлагаемого устройства недопустим, поскольку он неизбежно вызовет охлаждение и, возможно, промерзание грунта в месте расположения устройства.

Таким образом, тепловосприятие коллектора, которое будет допустимым с точки зрения сохранности теплового режима сети и в то же время достаточным для работы устройства по утилизации тепловых потерь, определяется нулевым отбором энергии из окружающего грунта. По результатам анализа математического моделирования допустимое тепловосприятие коллектора находится в диапазоне от 90 до 95 % первоначальных тепловых потерь.

**Выводы.** Предложенные математические модели позволяют определять тепловые потоки в сети теплоснабжения и оценивать влияние на работу тепловой сети теплоотражающего экрана и устройства по утилизации тепловых потерь в канале теплотрассы.

Полученные результаты математического моделирования показали, что 90 % от первоначальных тепловых потерь сети теплоснабжения допустимо утилизировать с помощью предлагаемого устройства. Кроме того, результаты моделирования могут быть использованы при определении геометрических параметров и режима работы коллектора устройства по утилизации.

#### Список литературы

1. **Половников В.Ю.** Математическое моделирование тепловых режимов систем транспортировки тепла // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. – 2012. – № 2. – С. 118–122.

2. **Кузнецов Г.В., Половников В.Ю.** Численный анализ влияния радиационного теплообмена на тепловые режимы и тепловые потери теплопроводов // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2011. – № 5–6. – С. 12–20.

3. **Тарасевич Е.И.** Численное моделирование теплообмена для двухтрубных тепловых сетей при подземной канальной и бесканальной прокладке // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2–22. – С. 4880–4885.

4. **Банникова С.А., Захаров В.М., Козлова М.В.** Экспериментальное определение тепловых потерь сети теплоснабжения для их использования в устройстве утилизации // Вестник ИГЭУ. – 2019. – Вып. 1. – С. 5–11.

5. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Теоретическая физика: учеб. пособие. В 10 т. Т. VI. Гидродинамика. – 3-е изд., перераб. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

6. **Джалурия Й.** Естественная конвекция: Тепло- и массообмен. – М.: Мир, 1983. – 400 с.

#### Reference

1. Polovnikov, V.Yu. Matematicheskoe modelirovaniye teplovykh rezhimov sistem transportirovki tepla [Mathematical modeling of heat regimes of heat transportation systems]. *Sovremennaya nauka: issledovaniya, idei, rezul'taty, tekhnologii*, 2012, no. 2, pp. 118–122.

2. Kuznetsov, G.V., Polovnikov, V.Yu. Chislennyy analiz vliyaniya radiatsionnogo teploobmena na teplovye rezhimy i teplovye poteri teploprovodov [Numerical analysis of the effect of radiative heat transfer on heat regimes and heat losses of heat pipelines]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki*, 2011, no. 5–6, pp. 12–20.

3. Tarasevich, E.I. Chislennoe modelirovaniye teploobmena dlya dvukhtрубnykh teplovykh setey pri podzemnoy kanal'noy i beskanal'noy prokladke [Numerical simulation of heat transfer for two-pipe heat networks with underground channel and channel-free laying]. *Fundamental'nye issledovaniya*, 2015, no. 2–22, pp. 4880–4885.

4. Bannikova, S.A., Zakharov, V.M., Kozlova, M.V. Eksperimental'noe opredelenie teplovykh poter' seti teplosnabzheniya dlya ikh ispol'zovaniya v ustroystve utilizatsii [Experimental study of heat losses of the heat supply network to use in the utilization device]. *Vestnik IGEU*, 2019, issue 1, pp. 5–11.

5. Landau, L.D., Lifshits, E.M. *Teoreticheskaya fizika: v 10 t., t. VI. Gidrodinamika* [Theoretical physics: in 10 vol., vol. VI. Hydrodynamics]. Moscow: Nauka, 1986. 736 p.

6. Dzhaluruya, Y. *Estestvennaya konveksiya: Teplo i massoobmen* [Natural convection: Heat and mass transfer]. Moscow: Mir, 1983. 400 p.

УДК 621.311

**Элина Александровна Тюрина**

ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН; ФГБОУВО «Иркутский Национальный исследовательский технический университет», доктор технических наук, ведущий научный сотрудник, заведующая кафедрой теплоэнергетических систем, Россия, Иркутск, e-mail: tyurina@isem.irk.ru

**Александр Станиславович Медников**

ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, кандидат технических наук, научный сотрудник, Россия, Иркутск, телефон (3952) 50-06-46 доб. 318, e-mail: mednikov@isem.irk.ru

**Павел Юрьевич Елсуков**

ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, кандидат технических наук, научный сотрудник, Россия, Иркутск, телефон 50-06-46 доб. 331, e-mail: els@isem.irk.ru

**Павел Валериевич Жарков**

ФГБУН Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, кандидат технических наук, научный сотрудник, Россия, Иркутск, телефон 50-06-46 доб. 332, e-mail: pzharkov@isem.irk.ru

**Екатерина Васильевна Зубова**

ФГБОУВО «Иркутский Национальный исследовательский технический университет», аспирант, Россия, Иркутск, e-mail: zubova@istu.edu

## **Использование газа подземной газификации угля для совместного производства электроэнергии и синтетического жидкого топлива<sup>1</sup>**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Актуальность исследования обусловлена ростом интереса к технологиям подземной газификации угля в связи с истощением мировых запасов нефти и газа, наличием значительного количества угольных месторождений в различных странах мира, растущим спросом на энергию, а также угрозой глобального изменения климата. Возможности использования подземной газификации низкосортных углей со сложными геологическими условиями залегания огромны. В отличие от основных программ XX века, этот беспрецедентный интерес стимулируется в основном частным капиталом в ответ на рекордно высокие цены на нефть и энергоносители. В связи с этим исследования подземной газификации угля востребованы и проводятся или планируются более 30 испытаний в Австралии, Китае, Индии, Южной Африке, Новой Зеландии, Канаде и США. Первоочередной задачей является разработка конкурентоспособных технологий производства электроэнергии и синтетических жидких топлив на основе газа подземной газификации угля.

**Материалы и методы.** Исследования проведены с использованием математической модели установки производства электроэнергии и метанола. Для построения математической модели применен созданный в институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН (ИСЭМ) эффективный в вычислительном плане программно-вычислительный комплекс – система машинного построения программ (СМПП).

**Результаты.** Представлены результаты исследования перспективного направления использования газа подземной газификации угля для комбинированного производства синтетического жидкого топлива (метанола) и электроэнергии. Разработана подробная математическая модель установки производства электроэнергии и метанола. На основе модели проведена технико-экономическая оптимизация ее схем и параметров, что позволило оценить условия конкурентоспособности предлагаемого способа переработки угля. Кроме того, исследована чувствительность экономических показателей установки к изменениям внешних условий.

**Выводы.** На основании анализа стоимости дизельного топлива в восточных регионах России сделан вывод о том, что и в настоящее время метанол, производимый на энерготехнологической уста-

<sup>1</sup> Работа выполнена в ИСЭМ СО РАН, номер темы FWEU-2021-0005, регистрационный номер: AAAA-A21-121012190004-5 и в ИРНТУ по направлению подготовки магистров 13.04.01 «Теплоэнергетика и теплотехника». The project is carried out at the ESI SB RAS, number of the project FWEU-2021-0005, registration number: AAAA-A21-121012190004-5 and at IRNITU majoring in Master's Degree program 13.04.01 "Heat power engineering and heat engineering".

новке, конкурентоспособен наряду с поставляемым дорогим дизельным топливом. Внедрение таких систем экономически целесообразно в ближайшее время.

**Ключевые слова:** метанол, подземная газификация угля, производство электроэнергии, математическое моделирование, синтетические жидкие топлива

**Elina Alexandrovna Tyurina**

Melentiev Energy Systems Institute (ESI), Siberian Branch (SB) of the Russian Academy of Sciences (RAS), Irkutsk National Research Technical University, Doctor of Engineering Sciences, Leading Research Scientist, Head of Thermal Power Systems Department, Russia, Irkutsk, e-mail: tyurina@isem.irk.ru

**Alexander Stanislavovich Mednikov**

Melentiev Energy Systems Institute (ESI), Siberian Branch (SB) of the Russian Academy of Sciences (RAS), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Research Scientist, Russia, Irkutsk, telephone (3952) 50-06-46, extension number 318, e-mail: mednikov@isem.irk.ru

**Pavel Yurievich Elsukov**

Melentiev Energy Systems Institute (ESI), Siberian Branch (SB) of the Russian Academy of Sciences (RAS), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Research Scientist, Russia, Irkutsk, telephone (3952) 50-06-46, extension number 331, e-mail: els@isem.irk.ru

**Pavel Valerievich Zharkov**

Melentiev Energy Systems Institute (ESI), Siberian Branch (SB) of the Russian Academy of Sciences (RAS), Candidate of Engineering Sciences (PhD), Research Scientist, Russia, Irkutsk, telephone (3952) 50-06-46, extension number 332, e-mail: pzharkov@isem.irk.ru

**Ekaterina Vasilievna Zubova**

Irkutsk National Research Technical University, Post-graduate student, Russia, Irkutsk, e-mail: zubova@istu.edu

## Use of underground coal gasification gas for co-production of electric power and synthetic liquid fuel

### Abstract

**Background.** The study is relevant due to increased interest to the underground coal gasification technologies (UCG). The interest is determined by the depletion of world oil and gas reserves, the significant amount of coal deposits in various countries of the world, the growing energy demand, as well as the threat of global climate change. The possibility to use technologies of underground gasification of low-grade coal with complex geological environment is huge. Recently, interest to UCG has grown dramatically. In contrast to all major programs of the 20th century, this unprecedented interest is mainly stimulated by private capital in response to high oil and energy prices. Thus, the studies of UCG are carried out. And more than 30 tests are planned in Australia, China, India, South Africa, New Zealand, Canada, and the United States. The development of competitive gas-based technologies of production of electricity and synthetic liquid fuels is a high-priority task.

**Materials and methods.** The studies have been carried out using a mathematical model of the unit for the production of electricity and methanol. To design a mathematical model, a software, or the system of machine programs development (SMPP) has been used. It has been developed at Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ESI SB RAS).

**Results.** The article presents the results of the study of the use of UCG for the coproduction of synthetic liquid fuel (methanol) and electricity. A detailed mathematical model of electricity and methanol production unit has been developed. Based on the model, technical and economic optimization of the schemes and parameters has been carried out. It made possible to estimate the competitiveness conditions of the proposed method of coal processing. In addition, the sensitivity of the economic indicators of the unit to changes in external conditions has been studied.

**Conclusions.** Based on the results of the analysis of the cost of diesel fuel in the eastern regions of Russia, the authors have made the conclusion that at present methanol produced by the energy technological unit is as competitive as delivered expensive diesel fuel. The introduction of such systems is economically reasonable in the near future.

**Key words:** methanol, underground coal gasification, electricity production, mathematical modeling, synthetic liquid fuels

DOI: 10.17588/2072-2672.2022.1.022-037

**Введение.** Д.И. Менделеев в 1888 г. высказал идею о превращении угля под землей в искусственный горючий газ. 30–60-е годы XX века можно назвать первой волной исследований подземной газификации. Этот период времени охарактеризован повышенным интересом к данной технологии. В конце 40-х годов были построены опытно-промышленные станции в Горловке, Лисичанске, Туле. В послевоенный период в работе по подземной газификации угля (ПзГУ) основное внимание было уделено химической технологии переработки топлива, подземной гидродинамике и аэродинамике, гидрогеологии, конструированию специальных машин и оборудования. В этот период были введены в эксплуатацию Южно-Абинская станция «Подземгаз» (1955 г., 500 млн м<sup>3</sup>/год), Шатская станция (1958 г., 660 млн м<sup>3</sup>/год), Ангренская станция (1961 г., 2300 млн м<sup>3</sup>/год).

Открытие в начале 60-х годов крупных месторождений природного газа привело к изменениям структуры топливно-энергетического баланса страны. Основным топливом стали природный газ и нефтепродукты. Работы по ПзГУ с этого периода были значительно сокращены. Энергетический кризис, охвативший капиталистические страны в 1973–1974 гг., вновь привлек внимание к подземной газификации. Этот период можно считать второй волной интереса к подземной газификации.

В настоящее время возрождается научный и практический интерес к развитию ПзГУ, обусловленный экономическими и экологическими достоинствами этой технологии.

Ниже представлено исследование перспективного направления переработки газа ПзГУ, обогащенного водородом и оксидами углерода, полученного в результате газификации с использованием парокислородного газифицирующего агента. Предварительно очищенный газ может использоваться как синтез-газ для получения ценных синтетических жидких топлив (СЖТ). В качестве СЖТ в первую очередь рассматривается экологически чистый энергоноситель – метиловый спирт, который может использоваться не только в качестве энергетического, но и в качестве моторного топлива [1–7].

Метанол является одним из наиболее широко используемых промышленных химических веществ в мире с 1800-х годов. Это ключевой компонент сотен химических веществ. Наиболее масштабные по объему

области его применения – это переработка метанола в формальдегид, который дополнительно обрабатывается с образованием смол, клеев и различных пластиков, а также для производства уксусной кислоты (рис. 1)<sup>2</sup>. Во всем мире треть потребности в метаноле приходится на производство формальдегидов (около 10 миллионов метрических тонн) – это крупнейший рынок метанола. Одним из самых новых и быстрорастущих рынков для метанола является производство легких олефинов, которые используются в производстве пластмасс.

Нарастают темпы новое направление – использование метанола в качестве экологически чистого топлива для производства электроэнергии. Во всем мире реализуется несколько проектов по включению метанола в существующие газовые турбины, использующие два вида топлива. Низкая смазывающая способность и низкая температура вспышки делают его превосходным турбинным топливом, по сравнению с природным газом и дистиллятом, что позволяет снизить выбросы, повысить скорость нагрева и выходную мощность. Недавний демонстрационный проект General Electric по производству метанола и электроэнергии показал жизнеспособность этой технологии, особенно для районов, расположенных вдали от газопроводов.

В предлагаемом исследовании для производства метанола используется синтез-газ ПзГУ Раковского бурого угольного месторождения Приморского края, полученный на основе парокислородной газификации. Данное месторождение находится в освоенном угольной промышленностью районе с развитой инфраструктурой, где имеются потребители энергии.

Согласно исследованиям Института горного дела им. А.А. Скочинского, установленные запасы угля по различным пластам, залегающим ниже границы открытой добычи и пригодным для подземной газификации, составляют 69,2 млн т по категории С и 17,6 млн т по категории С2, что обеспечивает работу станции «Подземгаз» на необходимый амортизационный срок при любой мощности. Повышение характеристик производимого газа, а также коэффициента полезного действия процесса газификации возможно за счет применения новых конструкций подземных газогенераторов и новых технологических решений [8–11].

<sup>2</sup> <https://www.methanol.org>

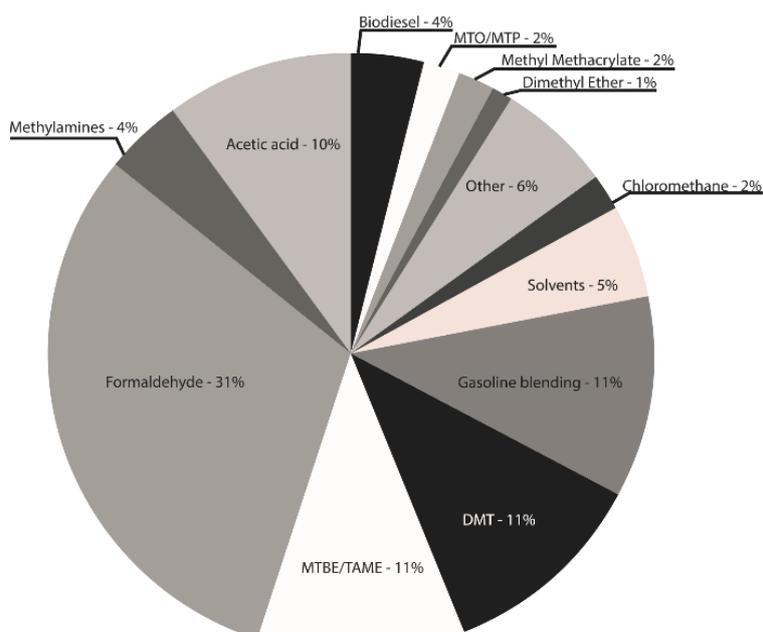


Рис. 1. Области (сферы) использования метанола

По сравнению с обычной добычей полезных ископаемых и поверхностной газификацией, ПзГУ обещает более низкие капитальные и эксплуатационные расходы, а также имеет другие преимущества, такие как отсутствие человеческого труда под землей. Кроме того, ПзГУ потенциально может быть связана с улавливанием и поглощением двуокси углерода [12, 13].

Перспективным направлением является использование газа ПзГУ в качестве сырья для комбинированного производства синтетического жидкого топлива – метанола и электроэнергии.

Переработка газа ПзГУ в метанол характеризуется выделением большого количества тепла и оксидов углерода. Совмещение химических процессов с выработкой электроэнергии повышает эффективность использования газов ПзГУ. Анализ технологий переработки различного органического сырья, выполненный в Институте систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН, выявил целесообразность комбинирования химической технологии переработки с производством электроэнергии в энерготехнологических установках (ЭТУ). Раздельные производства метанола и электроэнергии проигрывают комплексной технологии по энергетической и экономической эффективности [7, 14, 15].

Разработанная математическая модель ЭТУ включает модели технологических элементов производства метанола (каталитический реактор, теплообменники

охлаждения синтез-газа, конденсаторы-охладители, сепараторы метанола и т.д.) и модели энергетических элементов блока производства электроэнергии (газовая турбина, котел-утилизатор, отсеки паровой турбины и др.). Исходным топливом для ЭТУ является газ ПзГУ. С помощью полученной модели выполнена технико-экономическая оптимизация параметров для оценки масштабов применения данного способа использования газа ПзГУ.

Предлагаются результаты исследования установки, функционирующей на продуктах подземной газификации угля, для условий Дальнего Востока (Приморский край). Проведенные исследования акцентированы на оптимизацию работы блока синтеза и блока производства электроэнергии. Данные по способу газификации, составу и характеристикам газа ПзГУ Раковского месторождения получены в Дальневосточном государственном техническом университете коллективом исследователей под руководством профессора Б.И. Кондырева [16, 17].

**Состояние исследований ПзГУ.** В настоящее время в России и за границей проводятся изучения технологии глубокой переработки твердых топлив методом подземной газификации, который представляется одним из основных направлений ввода в топливно-энергетические балансы дополнительных объемов энергоресурсов [18, 21]. Закрытая добыча угля показывает меньшую технико-экономичес-

кую эффективность по сравнению с промышленными предприятиями ПзГУ по выработке газообразного энергоносителя низкой теплоты сгорания (до 4 МДж/м<sup>3</sup>) [19]. В [8, 9, 16, 17] проведен анализ развития технологий подземной газификации угля и показаны перспективы освоения угольных месторождений Дальнего Востока. В [11, 20] показано, что достигнутый технологический уровень развития процесса ПзГУ позволяет осуществлять производство газа с достаточно стабильными качественными и количественными параметрами в зависимости от применяемых технологических инструментов и требований потребителей. В [17] рассматривается история развития технологии подземной газификации угля в России и за рубежом. Приведены основные направления совершенствования технологии ПзГУ, развиваемые в Дальневосточном государственном техническом университете, при котором создается Центр по глубокой переработке угля. Подчеркнута важная роль описываемой технологии, приводятся сведения о строящихся станциях ПзГУ в Дальневосточном регионе. В [4–6] проводится анализ энергетической эффективности полного технологического цикла от добычи угля до его использования на ТЭС. Предложены новейшие решения в целях увеличения энергоэффективности и энергосбережения углеводородных ресурсов, базирующиеся на создании локальных углегазоэнергетических комплексов. Представлен анализ уровня увеличения теплоты сгорания генераторной смеси до степени, предъявляемой к газотурбинным генерирующим установкам. В [13, 22–24] сообщается о научных исследованиях ПзГУ с основным упором на химические и физические характеристики сырья, химию процесса, конструкции газификатора и условия эксплуатации. Также приведены термодинамические исследования ПзГУ с акцентом на оптимизацию работы газогенератора на основе термодинамики и разработанных кинетических моделей процесса. В [25] представлен обзор фундаментальных физических явлений в подземной газификации угля и связанных с этим сложностей при моделировании. Рассмотрены явления переноса и химические реакции, происходящие в проницаемом слое угля и пепла, а также в пустотном пространстве.

Произведено моделирование переноса тепла и массы, включая загрязняющие вещества, в ближних и дальних полях, окружающих подземный газификатор угля. Рассматриваются интегрированные модели ПзГУ и даются рекомендации по дальнейшей разработке модели. Проводятся экспериментальные исследования, направленные на получение обоснованных результатов по ПзГУ [17, 26], в том числе для получения оптимальных составов газифицирующих агентов, что играет важную роль в экономике подземной газификации угля.

Большая часть исследований по технологиям получения электрической, тепловой энергии и СЖТ из газа ПзГУ в мире и России посвящена изучению отдельных процессов и аппаратов, для оценки всего технологического комплекса чаще всего применяется термодинамический анализ. В то же время для возможно более полного понимания результатов исследований сложных комбинированных технологий требуется разработка эффективных математических моделей всех процессов, аппаратов и систем и оптимизационные исследования ЭТУ с учетом нелинейности процессов. Принятие приемлемых технических решений и достаточно объективных финансовых характеристик, которые определяют условия конкурентоспособности исследуемых технологий, без такого рассмотрения невозможно. Поэтому учет указанных обстоятельств является одной из основных целей работы.

**Краткое представление способа подземной газификации угля и использования газа для производства метанола.** Упрощенная схема предлагаемой технологии использования газа ПзГУ представлена на рис. 2.

В качестве газогенератора для предприятия ПзГУ на Раковском бурогольном месторождении выбран подземный газогенератор нового технического уровня, разработанный в АО «Газпром промгаз» [27]. Использование направленного подвода окислителя к раскаленной реакционной поверхности угля обеспечивает увеличение уровня температуры и вывода СО. Перемещение реакционного канала постоянных геометрических параметров (по мере выгзовывания пласта) обеспечивает устойчиво-стабильный ход процесса газообразования [16, 17].

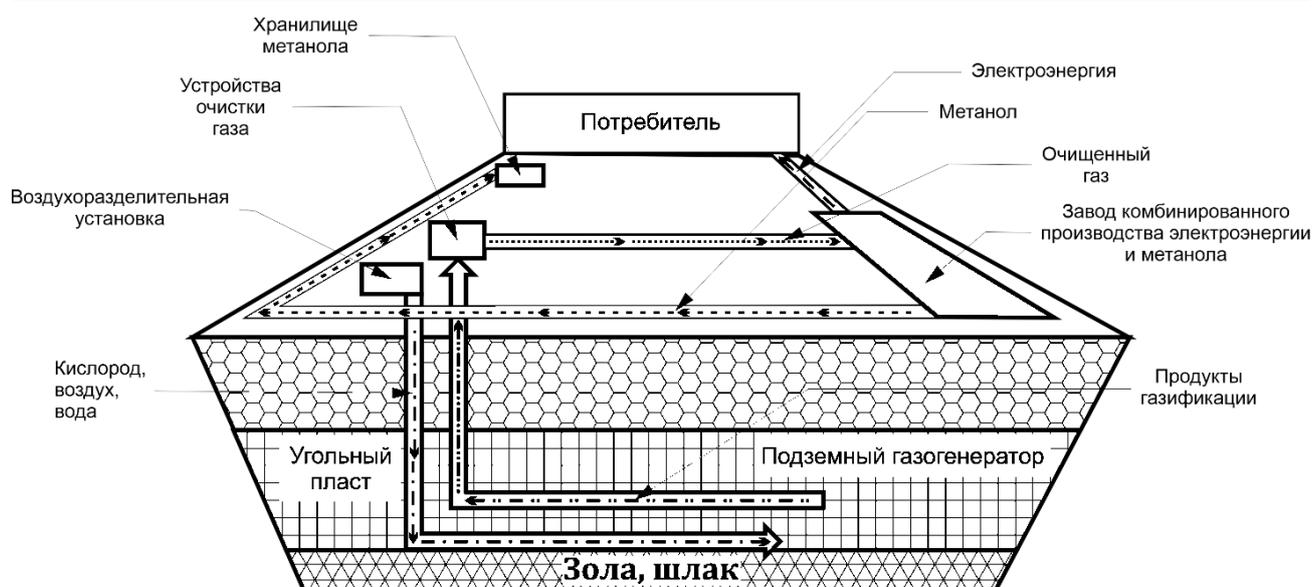


Рис. 2. Упрощенная схема комплекса производства энергоресурсов на основе газа подземной газификации угля

Газогенератор содержит серию пересекаемых на горизонте первоначального канала газификации наклонно-горизонтальной скважиной параллельных наклонно-направленных газоотводящих и дутьевых скважин. По мере выгазовывания пласта учтено перемещение точки подвода дутья к реакционной зоне.

Высочайший устойчиво-стабильный ход газообразования, увеличенный КПД газификации, уменьшение количественно-объемных величин бурения скважин, средства контроля термических реакций внутри угольного пласта обеспечиваются новой технологией ПзГУ. Оптимальный для синтеза метанола газ ПзГУ характеризуется достаточно высоким соотношением  $H_2/CO$  и теплотворной способностью.

**Производство метанола и электроэнергии из газа подземной газификации угля.** Ниже приведено исследование энерготехнологической установки, работающей на продуктах подземной газификации угля, для условий Приморского края. Мощность завода комбинированного производства электроэнергии и метанола может наращиваться за счет увеличения числа таких ЭТУ.

Технологическая схема установки представлена на рис. 3. Сжатый компрессорами 1 до 2,7 МПа синтез-газ, поступающий со станции ПзГУ, подогревается в ре-

генеративном подогревателе 2 и концевом электроподогревателе 3 до 340 и 350 °С соответственно. После удаления сероводорода из газа в системе сероочистки 4 очищенный газ охлаждают, пропуская его через регенеративный теплообменник и охладитель компрессора 24. В блок синтеза метанола газ подается сжатый компрессором до 8 МПа. Как показали предшествующие исследования ЭТУ различных типов, три ступени синтеза оптимальны для получения максимального количества метанола на основе различных составов синтез-газа. В каждой ступени имеется реактор синтеза метилового спирта 5, регенеративный теплообменник 6, холодильник-конденсатор, где образуется метанол с некоторым процентом воды 7 и сепаратор метанола-сырца 8. Процесс синтеза метанола осуществляется в изотермическом реакторе на медьцинккалюминиевом катализаторе при температуре 260 °С. В процессе синтеза выделяется тепло, которое утилизируется паром низкого давления 4,3 МПа. Затем газ охлаждается до 30 °С (с конденсацией паров метилового спирта и воды) в холодильнике-конденсаторе и регенеративном теплообменнике. Сепаратором отделяют конденсат от газа. Осушенный синтез-газ поступает на следующую ступень синтеза.

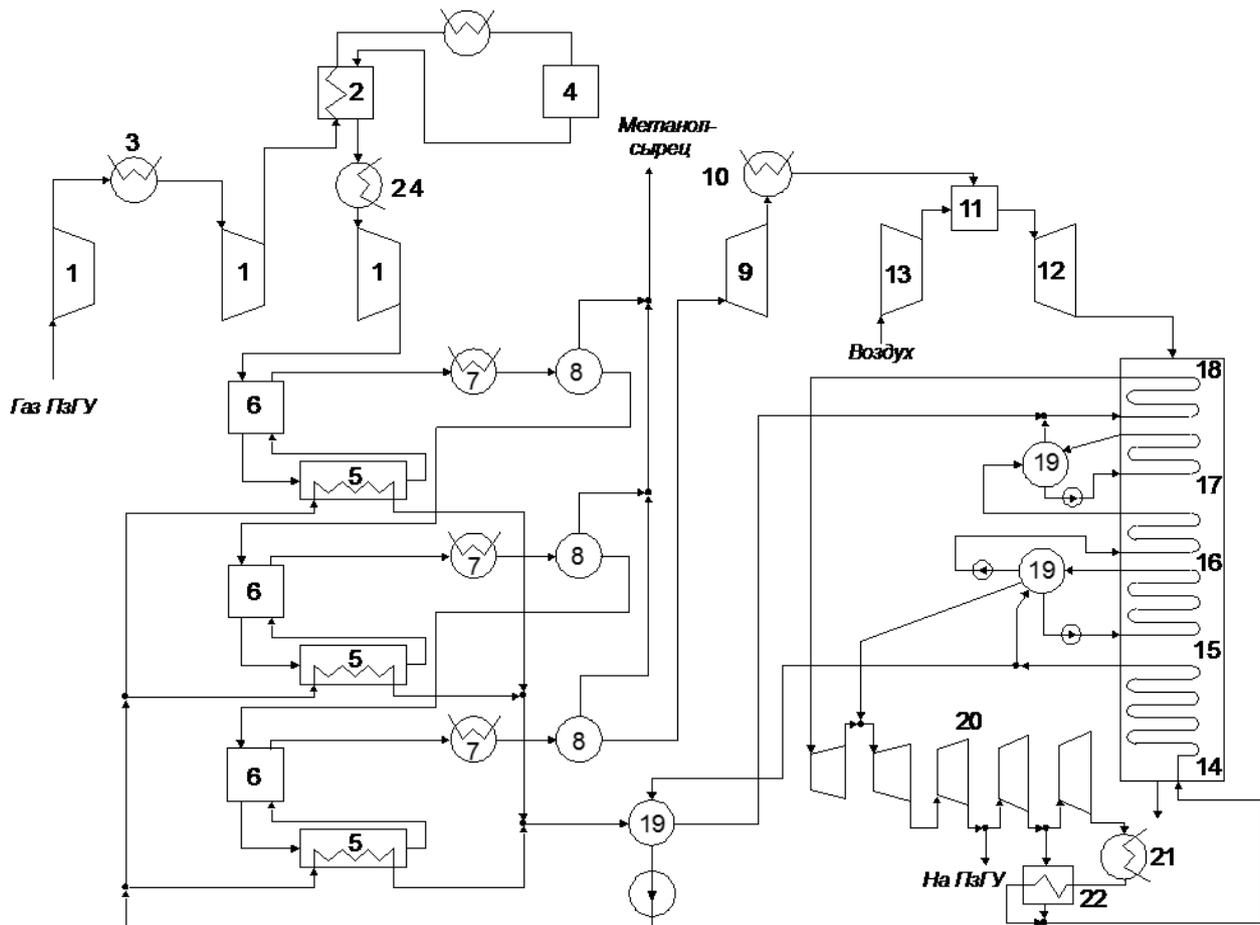


Рис. 3. Технологическая схема ЭТУ на газе подземной газификации угля

Из третьей ступени так называемый продувочный газ поступает в расширительную турбину 9, где его давление снижается до 1,0 МПа. При этом газ охлаждается хладагентом в теплообменнике 10. Отвод тепла составляет 140 ккал/с. Хладагент используется в системе очистки газа ПзГУ. Продувочный газ поступает в камеру сгорания 11 основной газовой турбины 12. Туда же поступает воздух из компрессора 13. Газовая, расширительная турбины и воздушный компрессор расположены на одной оси. Продукты сгорания охлаждаются в поверхностях нагрева котла-утилизатора: экономайзерах низкого 14 и высокого 16 давления, испарителях низкого 15 и высокого 17 давления и пароперегревателе 18. Пар высокого и низкого давления из барабанов-сепараторов 19 направляется в паровую турбину 20, после чего поступает в конденсатор 21. Для подогрева питательной воды используется регенеративный подогреватель 22. Для подземной газификации используется отбор пара из паровой турбины.

**Математическое моделирование ЭТУ на газе ПзГУ.** Модели отдельных энергетических и технологических элементов (синтеза метанола) использовались в процессе разработки математической модели установки в целом: теплообменники различных типов; камеры сгорания; компрессоры; газовые и паровые турбины; встроенные газодляные, регенеративные газо-газовые теплообменники реактора синтеза метанола; холодильники-конденсаторы; сепараторы метанола и др. В ранее опубликованных работах ИСЭМ СО РАН рассматривались проблемы моделирования энергетических и технологических элементов [28–31].

Каталитический реактор синтеза метанола является принципиально новым элементом, который отсутствует на электростанциях. Дифференциальные уравнения химической кинетики описывают состояние газовой смеси в реакторе, которое имеет существенные отличия от равновесного состояния.

В математической модели каталитического реактора использованы механизм

синтеза метилового спирта и кинетические уравнения скоростей образования метанола, разработанные в Институте нефтехимического синтеза РАН [32–34]. Несколько адиабатных зон, заполненных катализатором, между которыми расположены конвективные теплообменники для утилизации тепла, образуют реактор синтеза метанола. Для упрощения расчетов зоны разделены на секции.

Нижеследующие условия учтены при разработке алгоритма решения системы уравнений для участка реактора. Скорости образования  $\text{CH}_3\text{OH}$  и  $\text{CO}$  основаны на константах равновесия и скорости образования (так как однозначно зависят от температуры газа, давления, мольных долей компонентов газовой смеси). В рабочем диапазоне процесса синтеза изменения констант равновесия и скорости, а также давления незначительны, а вот колебание мольных долей отдельных компонентов весьма заметно. Кроме того, значительно влияние мольных долей отдельных компонентов на скорости образования  $\text{CH}_3\text{OH}$  и  $\text{CO}$ . В связи с этим адиабатные зоны реактора разбиваются на большие участки, где давление газовой смеси, константы скорости и равновесия можно считать постоянными, и малые, на которых происходит значительное изменение мольных долей компонентов. Такой подход значительно упрощает вычислительную работу при расчете адиабатной зоны.

Для численного интегрирования системы уравнений, описывающих процессы на малом участке реактора, используется метод Рунге-Кутты четвертого порядка. Интегрирование дифференциальных уравнений методом Эйлера позволяет определить покомпонентные мольные расходы, температуру и давление газа на выходе из адиабатной зоны.

Энерготехнологическая установка – сложная комбинированная техническая система с большим количеством энергетических и технологических элементов, соединенных разнородными технологическими связями. Для разработки сложных и эффективных математических моделей в ИСЭМ СО РАН имеется программно-вычислительный комплекс (ПВК) – система машинного построения программ СМПП-ПК [14, 28]. На его основе производится автоматическая генерация математической модели в виде программы расчета на языке

Fortran. При этом используются математические модели отдельных процессов, систем элементов установки и информация о технологических связях между ними. Разработанная модель, расчетная схема которой представлена на рис. 3, настроена на конструкторский расчет. Определяются поверхности нагрева теплообменников и массы используемого металла, объем катализатора в реакторах, мощности всех турбин и насосов и др. Данное обстоятельство позволяет оценить уровень капитальных вложений в установку. Программа расчета установки содержит около 1500 переменных, несколько сотен алгебраических и трансцендентных уравнений. Решение систем уравнений, описывающих всю установку, проводится методом Зейделя [29].

**Результаты исследований ЭТУ на синтез-газе ПзГУ.** Цель исследований, проводимых с помощью математических моделей ЭТУ, использующей синтез-газ ПзГУ, – определение оптимальных параметров установки и чувствительности ее экономических показателей к изменению внешних условий, в первую очередь стоимости газа подземной газификации угля, что необходимо для оценки потенциальной возможности применения предложенного способа использования газа ПзГУ.

Постановка задачи оптимизации параметров ЭТУ имеет следующий вид:

$$\min_{dl} c_{UCG}(x, y, dl, V_{cat}, G_{ms}, G_{lps}, B_{UCG}, K_I, P_{meth}, P_{el}, c_{meth}, c_{el}, IRR_z),$$

при условиях:

$$H(x, y) = 0;$$

$$G(x, y) = 0;$$

$$X_{\min} \leq x \leq X_{\max};$$

$$T_{sg} \geq T_{cat};$$

$$IRR = IRR_z,$$

где  $c_{UCG}$  – цена газа ПзГУ;  $x$  – вектор независимых оптимизируемых параметров;  $y$  – вектор зависимых вычисляемых параметров;  $H$  – вектор ограничений-равенств (ограничения на материальные, энергетические балансы, теплопередачу и т.д.);  $G$  – вектор ограничений-неравенств;  $X_{\min}$ ,  $X_{\max}$  – векторы граничных значений оптимизируемых параметров;  $dl$  – длина реактора синтеза;  $V_{cat}$  – объем катализатора в реакторе синтеза;  $G_{ms}$  – основной расход пара;  $G_{lps}$  – расход пара низкого давления;  $B_{UCG}$  – годо-

вое потребление газа ПзГУ;  $P_{meth}$  – годовое производство метанола;  $C_{meth}$  – цена метанола;  $T_{sg}$  – температура синтез-газа в реакторе синтеза;  $T_{cat}$  – максимально допустимая температура синтез-газа согласно условиям работы катализатора;  $KI$  – капиталовложения в ЭТУ;  $P_{el}$  – годовое производство электроэнергии;  $C_{el}$  – цена производимой электроэнергии;  $IRR_z$  – заданная внутренняя норма возврата капитальных вложений.

Оптимизируемые параметры – энтальпии, давления и расходы пара высокого и низкого давления в блоке производства электроэнергии, объем катализатора на участках реактора синтеза и др. В систему ограничений входят условия на соблюдение требуемых температур и давлений материальных потоков, законов термо-

динамики для тепловых и материальных балансов, рабочих температур и механических напряжений металлов и т.д. Исходная технико-экономическая информация принята на основе ранее проведенных в ИСЭМ СО РАН исследований технологий переработки твердого топлива в СЖТ и анализа смет технологических и энергетических производств с учетом условий функционирования [7, 14, 15, 28–31].

В табл. 1 приведены основные исходные данные для определения технико-экономических показателей ЭТУ. Расчеты капиталовложений проводились на основе удельных стоимостей оборудования, при этом удорожание установки, связанное с ее малыми масштабами, учитывалось коэффициентом удорожания, равным 1,5.

Таблица 1. Исходные данные для расчетов энерготехнологической установки

Наименование	Значение
Давление процесса синтеза, МПа	8
Температура газа на входе в реакторы синтеза, °С	220
Температура газа на выходе из реакторов синтеза, °С	270
Температура газа после холодильников-конденсаторов, °С	30
Температура газа перед основной газовой турбиной, °С	1100
Давление газа перед основной газовой турбиной, МПа	0,96
Давление острого пара, МПа	13
Энтальпия острого пара, ккал/кг	800
Давление пара промежуточного перегрева, МПа	2,1
Энтальпия пара промежуточного перегрева, ккал/кг	800
Давление пара в испарительном контуре низкого давления, МПа	4,3
Удельная стоимость катализатора, долл/кг	25
Удельная стоимость газовой турбины, долл/кВт	700
Удельная стоимость компрессора синтез-газа, долл/кВт	200
Удельная стоимость воздушного компрессора, долл/кВт	150
Удельная стоимость поверхностей нагрева из низколегированной стали, долл/м <sup>2</sup>	1800
Удельная стоимость поверхностей нагрева из углеродистой стали, долл/м <sup>2</sup>	1350
Удельная стоимость корпусов блока синтеза, тыс. долл/м	180
Удельная стоимость каналов системы технического водоснабжения, тыс. долл/(т/ч)	120
Удельная стоимость охладителей системы технического водоснабжения, тыс. долл/ МВт	50
Доля затрат на строительные-монтажные работы от стоимости изготовления оборудования блока синтеза	0,6
Доля затрат на строительные-монтажные работы от стоимости изготовления энергетического блока	1
Доля амортизационных отчислений	3,5
Доля затрат на текущий, капитальный ремонты	4,5
Процентная ставка депозита, %	6
Процентная ставка на кредит, %	8
Период эксплуатации установки, лет	30
Срок строительства установки, лет	3

Подземная газификация угля осуществляется в подземных газогенераторах с парокислородным газифицирующим агентом при атмосферном давлении. На вход ЭТУ поступает синтез-газ с установки ПзГУ после глубокой очистки продуктов газификации от золы и окислов серы по установленным со стороны катализатора синтеза метанола требованиям [35, 27]. Годовой расход свежего газа 250 млн  $\text{м}^3$  ( $29,8 \text{ м}^3/\text{ч}$ ,  $8,27 \text{ м}^3/\text{с}$ ), число часов работы установки в году – 8400. Состав газовой смеси ПзГУ на входе в выглядит следующим образом (объемный %):  $\text{CO}_2$  – 6,2;  $\text{H}_2$  – 41;  $\text{CO}$  – 31,4;  $\text{NO}_x$  – 16,7;  $\text{CH}_4$  – 1,4;  $\text{H}_2\text{O}$  – 3;  $\text{O}_2$  – 0,2;  $\text{SO}_x$  – 0,01;  $\text{NH}_3$  – 0,01. Теплотворная способность синтез-газа –  $9060 \text{ МДж}/\text{м}^3$ .

В результате выполненных на математической модели ЭТУ расчетов определены конструктивные характеристики основных элементов установки (объем катализатора в реакторе, площади поверхностей нагрева теплообменников и т.д.), параметры материальных и энергетических потоков между элементами схемы, объем производства метанола и электроэнергии. По результатам расчетов получена оценка капитальных вложений в установку и текущих затрат.

Результаты расчетов представлены в табл. 2–4 и на рис. 4 и 5. Состав газа на выходе из установки синтеза (объемный %):  $\text{CO}_2$  – 14,4;  $\text{H}_2$  – 16,4;  $\text{CO}$  – 29,2;  $\text{NO}_x$  – 36,5;  $\text{CH}_4$  – 3,1;  $\text{H}_2\text{O}$  – 0,08;  $\text{CH}_3\text{OH}$  – 0,4.

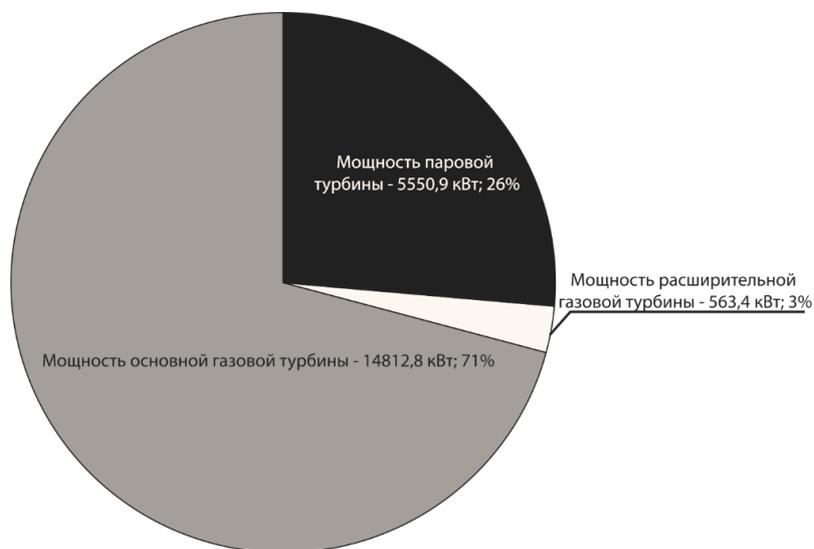


Рис. 4. Энергетический баланс энерготехнологической установки на газе подземной газификации угля. Выработка



Рис. 5. Энергетический баланс энерготехнологической установки на газе подземной газификации угля. Потребление и отпуск внешним потребителям

Таблица 2. Характеристики оборудования блока синтеза

Наименование	Ступень 1	Ступень 2	Ступень 3	Всего
Масса катализатора, т	9	3,9	2,6	15,5
Объем реактора, м <sup>3</sup>	21	9	6	36
Высота реактора, м	7	7	7	
Диаметр реактора, м	2	1,3	1	
Площадь поверхности нагрева регенеративного подогревателя, м <sup>2</sup>	26,4	32,5	32	90,9
Масса регенеративного подогревателя, т	0,213	0,262	0,258	0,733
Длина регенеративного подогревателя, м	14,7	21,9	23,9	
Диаметр регенеративного подогревателя, м	0,183	0,167	0,159	
Площадь поверхности нагрева холодильника-конденсатора, м <sup>2</sup>	265,4	250,3	170,1	685,4
Масса холодильника-конденсатора, т	2,12	2	1,36	5,48
Диаметр холодильника-конденсатора, м	0,36	0,22	0,17	
Длина холодильника-конденсатора, м	4,63	4,6	4,4	
Производство метанола, кг/с	1,16	0,55	0,28	1,99
Производство пара давлением 4,3 МПа, кг/с	1,29	0,49	0,22	2

Таблица 3. Характеристики оборудования энергетического блока

Наименование	Значение
Температура газа перед расширительной газовой турбиной, К	303,15
Давление газа перед расширительной газовой турбиной, МПа	7,86
Давление газа за расширительной газовой турбиной, МПа	0,96
Температура газа за расширительной газовой турбиной, К	202,2
Температура газа перед основной газовой турбиной, К	1373
Давление газа за основной газовой турбиной, МПа	0,114
Температура газа за основной газовой турбиной, К	923
Температура острого пара паровой турбины, К	781,2
Давление острого пара паровой турбины, МПа	4,2
Расход острого пара на паровую турбину, кг/с	5,6
Давление в барабане-сепараторе низкого давления, МПа	1,4
Расход пара из барабана-сепаратора низкого давления, кг/с	1,1
Площадь поверхности нагрева экономайзера низкого давления, м <sup>2</sup>	201
Масса труб экономайзера низкого давления, т	5,4
Площадь поверхности нагрева испарителя низкого давления, м <sup>2</sup>	971
Масса труб испарителя низкого давления, т	33,6
Площадь поверхности нагрева экономайзера высокого давления, м <sup>2</sup>	297
Масса труб экономайзера высокого давления, т	8
Площадь поверхности нагрева испарителя высокого давления, м <sup>2</sup>	296
Масса труб испарителя высокого давления, т	10,2
Площадь поверхности нагрева пароперегревателя, м <sup>2</sup>	222
Масса труб пароперегревателя, т	7,9
Температура уходящих газов, К	413
Объем уходящих газов, м <sup>3</sup> /с	33,7
Удельный объем вредных выбросов, кг/МВт ч:	
зола	0,08
окислы азота	0,5
окислы серы	0,0032

Анализ полученных результатов показывает, что ЭТУ обладает высокой экологической эффективностью, которая определяется высокими требованиями технологии синтеза и условиями работы энергетического оборудования. Содержание сероводорода в синтез-газе, поступающем в блок синтеза, не превышает  $0,2 \text{ мг/нм}^3$  (по требованиям со стороны катализатора), а содержание золы не превышает  $5 \text{ мг/нм}^3$  (по требованиям недопущения эрозии проточной части газовых компрессоров и турбин). В пересчете на тонну натурального топлива это в сотни раз по  $\text{SO}_2$ , в 2 раза по золе и в 4 раза по  $\text{NO}_x$  меньше, чем у экологически чистых ТЭС. Это дает дополнительное основание к развитию данной технологии переработки угля на основе установок комбинированного производства метанола и электроэнергии.

Результаты исследования условий конкурентоспособности ЭТУ в зависимости от стоимости газа ПзГУ, электроэнергии и заданной экономической эффективности представлены в табл. 4.

Как показывают аналитические исследования, стоимость газа ПзГУ, получаемого с использованием парокислородного газифицирующего агента, с учетом систем очистки продуктов подземной газификации, меняется в пределах  $80\text{--}120 \text{ долл./тыс. м}^3$  [36, 37]. При этом цена метанола принималась  $550 \text{ долл/т у.т.}$ , цена электрической энергии –  $8 \text{ цент/кВт}\cdot\text{ч}$ , что соответствует стоимости электроэнергии в энергодефицитных районах Дальнего Востока [18, 38–40].

Таблица 4. Техничко-экономические показатели ЭТУ

Наименование	Значение
Годовое производство метанола, т	60500
Годовой отпуск электроэнергии внешним потребителям, млн кВт	50,07
Годовое потребление газа подземной газификации угля, т у.т. (млн $\text{нм}^3$ )	77253 (250)
Капиталовложения в блок синтеза метанола, млн долл.	47,2
Капиталовложения в энергетический блок, млн долл.	10,5
Суммарные капиталовложения в ЭТУ, млн долл.	57,7
Численность персонала, чел.	80
Годовой фонд заработной платы, млн долл.	1,2
Внутренняя норма возврата капиталовложений	0,12
Цена отпускаемой от ЭТУ электроэнергии, долл/кВт ч	0,08
Стоимость метанола, долл/т у.т.:	
цена синтез-газа $80 \text{ долл/тыс. нм}^3$	595
цена синтез-газа $100 \text{ долл/тыс. нм}^3$	770
цена синтез-газа $120 \text{ долл/тыс. нм}^3$	887

Анализ стоимости дизельного топлива в рассматриваемых регионах показывает, что его стоимость составляет  $595\text{--}826 \text{ долл/т у.т.}$  [41–43]. Таким образом, очевидно, что уже в настоящее время производимый на ЭТУ метанол может конкурировать с дорогим поставляемым дизельным топливом при условиях государственной поддержки инвесторов. В будущем эта тенденция может улучшиться.

**Выводы.** Разработанная математическая модель энерготехнологической установки эффективна с точки зрения адекватности представления исследуемых процессов на основе подземной газификации угля Раковского месторождения.

На основе модели была проведена технико-экономическая оптимизация параметров. Найдены оптимальные параметры энерготехнологической установки. Оценены условия конкурентоспособности исследуемых установок. Основные результаты исследования заключаются в следующем.

Для синтеза метанола использовались нетрадиционные прямоточные реакторы с промежуточным охлаждением синтез-газа между слоями катализатора паром для получения пара низкого давления. Это позволяет использовать синтез-газ с низким (по сравнению со стехиометрическим) отношением  $\text{H}_2/\text{CO}$  и устраняет дорогостоящую систему конверсии  $\text{CO}$  в установке для синтеза. В связи с этим комбинированное производство метанола и электроэнергии увеличивает тепловой КПД и снижает удельные капитальные вложения в установку.

Важной особенностью комбинированных процессов является их экологичность, что обусловлено высокими требованиями к чистоте синтез-газа от катализаторов синтеза и низкими выбросами NOx из-за небольших объемов продувочных газов, сжигаемых в камере сгорания газовой турбины.

Исследована чувствительность энерготехнологической установки к изменениям внешних условий (стоимости газа подземной газификации угля). На основании анализа стоимости дизельного топлива в восточных регионах России сделан вывод о том, что и в настоящее время метанол, производимый на энерготехнологической установке, конкурентоспособен с поставляемым дорогим дизельным топливом. Внедрение таких систем экономически целесообразно в ближайшее время.

Таким образом, представленные энерготехнологические установки имеют конкурентную среду. Практическая реализация требует предпроектных проработок, направленных на повышение устойчивости процесса газификации, улучшение катализаторов синтеза, параметров газовой турбины, газогенераторов и др.

#### Список литературы

1. **Energy** savings by co-production: A methanol/electricity case study / L. Guangjian, L. Zheng, W. Minghua, N. Weidou // *Applied Energy*. – 2010. – Vol. 87. – P. 2854–2859.
2. **What** is Methanol, its uses, energies. Methanol Institute / <https://www.methanol.org/>
3. **Cogeneration** of power and methanol based on a conventional power plant in Germany / F. Moellenbruck, T. Kempken, M. Dierks, et al. // *Journal of Energy Storage*. – 2018. – Vol. 19. – P. 393–401.
4. **Basile A., Dalena F.** Methanol: Science and Engineering. 1st Edition // Elsevier. – 2017. – 706 p.
5. **Techno-economic** analysis of coal-to-liquid processes with different gasifier alternatives / Sh. Yang, Zh. Xiao, Ch. Deng, et al. // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 253. – P. 120006.
6. **Methanol-power** production using coal and methane as materials integrated with a two-level adjustment system / L. Lv, L. Zhu, H. Li, B. Li // *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*. – 2019. – Vol. 97. – P. 346–355.
7. **Kler A.M., Tyurina E.A., Mednikov A.S.** A plant for methanol and electricity production: Technical-economic analysis // *Energy*. – 2018. – Vol. 165. – P. 890–899.
8. **Кондырев Б.И., Белов А.В., Маннанголов Д.Ш.** Развитие технологии подземной газификации угля. Перспективы освоения угольных месторождений Дальнего Востока // *ГИАБ*. – 2007. – № 1. – С. 297–300.
9. **Кондырев Б.И., Белов А.В., Ларионов М.В.** Становление и развитие технологии подземной газификации угля // *ГИАБ*. – 2003. – № 4. – С. 233–234.
10. **Кондырев Б.И., Нисковский А.Ю.** Основные направления совершенствования подземной газификации угля // *ГИАБ*. – 2000. – № 5. – С. 210–215.
11. **Рубан А.Д.** Подземная газификация угля – новый этап технологического и инвестиционного развития // *ГИАБ*. – 2007. – № 2. – С. 288–300.
12. **Перспективы** применения подземной газификации в старопромышленных районах Кузбасса / Е.М. Жуков, Ю.И. Кропотов, И.А. Лугинин, Ю.И. Чижик // *Молодой ученый*. – 2016. – № 2 (106). – С. 146–148.
13. **Abdul Waheed Bhuttoa, Aqeel Ahmed Bazmibc, Gholamreza Zahedib** Underground coal gasification: From fundamentals to applications. *Progress in Energy and Combustion // Science*. – 2013. – Vol. 39. – P. 189–214.
14. **Клер А.М., Тюрина Э.А.** Оптимизационные исследования энергетических установок и комплексов. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. – С. 298.
15. **Tyurina E.A., Mednikov A.S.** Energy efficiency analyses of combined-cycle plant // *Advances in Energy Research*. – 2015. – Vol. 3. – P. 195–203.
16. **Состояние** и перспективы развития подземной газификации угля на Дальнем Востоке России / Б.И. Кондырев, А.В. Белов, Н.А. Николайчук и др. // *Вологдинские чтения*. – 2012. – № 80. – С. 213–215.
17. **Кондырев Б.И., Белов А.В., Иванов А.Н.** Новые технические решения в технологии подземной газификации как фактор актуализации ее применения на угольных месторождениях дальнего Востока // *ГИАБ*. – 2005. – № S3. – С. 177–188.
18. **Энергетическая** стратегия России на период до 2030 года / <http://minenergo.gov.ru/node/1026>
19. **Крейнин Е.В.** Техничко-экономические перспективы подземной газификации угля // *ГИАБ*. – 2009. – № 5. – С. 347–352.
20. **Зоря А.Ю., Крейнин Е.В.** От подземной газификации угольных пластов к синтезу углеводородных топлив // *Газохимия*. – 2009. – № 1(5). – С. 18–20.
21. Газовое углеводородное топливо из угля – будущая основа тепловой энергетики / Ю.Ф. Васючков, В.В. Мельник, Н.И. Абрамкин, И.И. Савин // *Известия ТулГУ. Науки о Земле*. – 2017. – № 4. – С. 131–140.
22. **Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas industry in China / Z. Caineng, C. Yanpeng,**

K. Lingfeng, et al. // *Petroleum Exploration and Development*. – 2019. – Vol. 46. – P. 205–215.

23. Technical application of safety and cleaner production technology by underground coal gasification in China / X. Jun, X. Lin, H. Xiangming, et al. // *Journal of Cleaner Production*. – 2020. – Vol. 250. – P. 119487–119501.

24. **Perkins G.** Underground coal gasification – Part I: Field demonstrations and process performance // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2018. – Vol. 67. – P. 158–187.

25. **Perkins G.** Underground coal gasification – Part II: Fundamental phenomena and modeling // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 2018. – Vol. 67. – P. 234–274.

26. **Monitoring** and evaluation of simulated underground coal gasification in an ex-situ experimental artificial coal seam system / S. Faqiang, H. Akihiro, I. Kenichi, et al. // *Applied Energy*. – 2018. – Vol. 223. – P. 82–92.

27. **Крейнин Е.В.** Подземная газификация углей: основы теории и практики, инновации. – М.: ООО «Корина-офсет», 2010. – 396 с.

28. **Клер А.М.** Эффективные методы схемно-параметрической оптимизации сложных теплоэнергетических установок: разработка и применение. Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Инт-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2018. – С. 145.

29. **Клер А.М., Деканова Н.П., Тюрина Э.А.** Теплосиловые системы: Оптимизационные исследования. – Новосибирск: Наука, 2005. – 236 с.

30. **Kler A.M., Zharkov P.V., Epishkin N.O.** An effective approach to optimizing the parameters of complex thermal power plants // *Thermophysics and Aeromechanics*. – 2016. – Vol. 23. – P. 289–296.

31. **Kler A.M., Tyurina E.A.** Production of products of deep coal processing: modeling of technologies, comparison of efficiency // *The burning and plasma chemistry*. – 2007. – Vol. 4. – P. 276–281.

32. **An in SITU IR** spectroscopic study of methanol conversion on an SNM-1 catalyst / L.A. Berezina, V.A. Matyshak, V.N. Korchak // *Kinetics and Catalysis*. – 2009. – Vol. 50. – P. 775–783.

33. **Rozovskii A.Ya., Lin G.I.** Fundamentals of methanol synthesis and decomposition // *Topics in Catalysis*. – 2003. – Vol. 22. – P. 137–150.

34. **Розовский А.Я., Лин Г.И.** Теоретические основы процесса синтеза метанола. – М.: Химия, 1990. – С. 267.

35. **Крейнин Е.В., Стрельцов С.Г., Сушенцова Б.Ю.** Анализ и перспективы современных проектов подземной газификации углей в мире // *Уголь*. – 2011. – № 1. – С. 40–43.

36. **Гридин С.В., Вертела С.А.** Анализ перспектив и методов использования газогенераторного газа с целью разработки энергоэффективных решений по экономии

энергоресурсов // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. – 2013. – № 8(114). – С. 31–40.

37. **Mao Fei.** (2017). Underground coal gasification (UCG): A new trend of supply-side economics of fossil fuels. *Natural Gas Industry B*. 3. 10.1016/j.ngib.2016.12.007

38. **Regional Energy Commission of the Sakhalin Region.** <http://rec.admsakhalin.ru/tarfy/>.

39. **Far Eastern Energy Company Branch of Khabarovskenergosbyt.** [https://www.dvec.ru/khabsbyt/private\\_clients/tariffs/](https://www.dvec.ru/khabsbyt/private_clients/tariffs/)

40. **Far Eastern Energy Company Branch of Dalenergosbyt.** [https://www.dvec.ru/dalsbyt/private\\_clients/tariffs/](https://www.dvec.ru/dalsbyt/private_clients/tariffs/).

41. **Federal State Statistics Service.** <https://www.gks.ru/folder/10705>

42. **Far Eastern Energy Company Branch of Khabarovskenergosbyt.** [https://www.dvec.ru/khabsbyt/private\\_clients/tariffs/](https://www.dvec.ru/khabsbyt/private_clients/tariffs/)

43. **Far Eastern Energy Company Branch of Dalenergosbyt.** [https://www.dvec.ru/dalsbyt/private\\_clients/tariffs/](https://www.dvec.ru/dalsbyt/private_clients/tariffs/)

## References

1. Guangjian, L., Zheng, L., Minghua, W., Weidou, N. Energy savings by co-production: A methanol/electricity case study. *Applied Energy*, 2010, vol. 87, pp. 2854–2859.

2. What is Methanol, its uses, energies. Methanol Institute. <https://www.methanol.org/>

3. Moellenbruck, F., Kempken, T., Dierks, M., Oeljeklaus, G., Goerner, K. Cogeneration of power and methanol based on a conventional power plant in Germany. *Journal of Energy Storage*, 2018, vol. 19, pp. 393–401.

4. Basile, A., Dalena, F. Methanol: Science and Engineering. Elsevier, 2017. 706 p.

5. Yang, Sh., Xiao, Zh., Deng, Ch., Liu, Zh., Zhou, H., Ren, J., Zhou, T. Techno-economic analysis of coal-to-liquid processes with different gasifier alternatives. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 253, pp. 120006.

6. Lv, L., Zhu, L., Li, H., Li, B. Methanol-power production using coal and methane as materials integrated with a two-level adjustment system. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2019, vol. 97, pp. 346–355.

7. Kler, A.M., Tyurina, E.A., Mednikov, A.S. A plant for methanol and electricity production: Technical-economic analysis. *Energy*, 2018, vol. 165, pp. 890–899.

8. Kondyrev, B.I., Belov, A.V., Mannangolov, D.Sh. Razvitie tekhnologii podzemnoy gazifikatsii uglya. Perspektivy osvoeniya ugol'nykh mestorozhdeniy Dal'nego Vostoka [Development of underground coal gasification technology. Prospects for the development of coal deposits in the Far East]. *GIAB*, 2007, no. 1, pp. 297–300.

9. Kondyrev, B.I., Belov, A.V., Larionov, M.V. Stanovlenie i razvitie tekhnologii podzemnoy

gazifikatsii uglia [Formation and development of underground coal gasification technology]. *GIAB*, 2003, no. 4, pp. 233–234.

10. Kondyrev, B.I., Niskovskiy, A.Yu. Osnovnye napravleniya sovershenstvovaniya podzemnoy gazifikatsii uglia [The main directions of improvement of underground coal gasification]. *GIAB*, 2000, no. 5, pp. 210–215.

11. Ruban, A.D. Podzemnaya gazifikatsiya uglia novyy etap tekhnologicheskogo i investitsionnogo razvitiya [Underground gasification of coal a new stage of technological and investment development]. *GIAB*, 2007, no. 2, pp. 288–300.

12. Zhukov, EM, Kropotov, Yu.I., Luginin, I.A., Chizhik, Yu.I. Perspektivy primeneniya podzemnoy gazifikatsii v staropromyshlennykh rayonakh Kuzbassa [Prospects for the use of underground gasification in the old industrial areas of Kuzbass]. *Molodoy uchenyy*, 2016, no. 2(106), pp. 146–148.

13. Abdul Waheed Bhutto, Aqeel Ahmed Bazmibc, Gholamreza Zahedib Underground coal gasification: From fundamentals to applications. Progress in Energy and Combustion. *Science*, 2013, vol. 39, pp. 189–214.

14. Kler, A.M., Tyurina, E.A. *Optimizatsionnye issledovaniya energeticheskikh ustanovok i kompleksov* [Optimization studies of power plants and complexes]. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo «Geo», 2016. 298 p.

15. Tyurina, E.A., Mednikov, A.S. Energy efficiency analyses of combined-cycle plant. *Advances in Energy Research*, 2015, vol. 3, pp. 195–203.

16. Kondyrev, B.I., Belov, A.V., Nikolaychuk, N.A., Zvonarev, M.I., Grebenyuk, I.V. Sostoyanie i perspektivy razvitiya podzemnoy gazifikatsii uglia na Dal'nem Vostoke Rossii [State and Prospects for the Development of Underground Coal Gasification in the Russian Far East]. *Vologdinskije chteniya*, 2012, no. 80, pp. 213–215.

17. Kondyrev, B.I., Belov, A.V., Ivanov, A.N. Novye tekhnicheskie resheniya v tekhnologii podzemnoy gazifikatsii kak faktor aktualizatsii ee primeneniya na ugol'nykh mestorozhdeniyakh dal'nego Vostoka [New technical solutions in underground gasification technology as a factor in the actualization of its application in coal deposits of the Far East]. *GIAB*, 2005, no. S3, pp. 177–188.

18. *Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2030 goda* [Energy strategy of Russia for the period up to 2030]. Available at: <http://minenergo.gov.ru/node/1026>

19. Kreynin, E.V. Tekhniko-ekonomicheskie perspektivy podzemnoy gazifikatsii uglia [Technical and economic prospects for underground coal gasification]. *GIAB*, 2009, no. 5, pp. 347–352.

20. Zorya, A.Yu., Kreynin, E.V. Ot podzemnoy gazifikatsii ugol'nykh plastov k

sintezu uglevodorodnykh topliv [From underground gasification of coal seams to the synthesis of hydrocarbon fuels]. *Gazokhimiya*, 2009, no. 1(5), pp. 18–20.

21. Vasyuchkov, Yu.F., Melnik, V.V., Abramkin, N.I., Savin, I.I. Gazovoe uglevodorodnoe toplivo iz uglia – budushchaya osnova teplovoy energetiki [Gas hydrocarbon fuel from coal – the future basis of thermal energy]. *Izvestiya TulGU. Nauki o Zemle*, 2017, no. 4, pp. 131–140.

22. Caineng, Z., Yanpeng, C., Lingfeng, K., Fenjin, S., Shanshan, C., Zhen, D. Underground coal gasification and its strategic significance to the development of natural gas industry in China. *Petroleum Exploration and Development*, 2019, vol. 46, pp. 205–215.

23. Jun, X., Lin, X., Xiangming, H., Weimin, Ch., Weitao, L., Zhigang, W. Technical application of safety and cleaner production technology by underground coal gasification in China. *Journal of Cleaner Production*, 2020, vol. 250, pp. 119487–119501.

24. Perkins, G. Underground coal gasification – Part I: Field demonstrations and process performance. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, vol. 67, pp. 158–187.

25. Perkins, G. Underground coal gasification – Part II: Fundamental phenomena and modeling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2018, vol. 67, pp. 234–274.

26. Faqiang, S., Akihiro, H., Kenichi, I., Wenyan, Zh., Gota, D., Kohki, S., Kazuhiro, T., Junichi, K. Monitoring and evaluation of simulated underground coal gasification in an ex-situ experimental artificial coal seam system. *Applied Energy*, 2018, vol. 223, pp. 82–92.

27. Kreynin, E.V. *Podzemnaya gazifikatsiya uglia: osnovy teorii i praktiki, innovatsii* [Underground Coal Gasification: Foundations of Theory and Practice, Innovation]. Moscow: OOO «Korina-ofset», 2010. 396 p.

28. Kler, A.M. *Effektivnye metody skhemno-parametricheskoy optimizatsii slozhnykh teploenergeticheskikh ustanovok: razrabotka i primeneniye* [Effective methods of circuit-parametric optimization of complex thermal power plants: development and application]. Novosibirsk: Akademicheskoe izdatel'stvo «Geo», 2018. 145 p.

29. Kler, A.M., Dekanova, N.P., Tyurina, E.A. *Teplosilovye sistemy: Optimizatsionnye issledovaniya* [Thermal power systems: Optimization studies]. Novosibirsk: Nauka, 2005. 236 p.

30. Kler, A.M., Zharkov, P.V., Epishkin, N.O. An effective approach to optimizing the parameters of complex thermal power plants. *Thermophysics and Aeromechanics*, 2016, vol. 23, pp. 289–296.

31. Kler, A.M., Tyurina, E.A. Production of products of deep coal processing: modeling of

technologies, comparison of efficiency. *The burning and plasma chemistry*, 2007, vol. 4, pp. 276–281.

32. Berezina, L.A., Matyshak, V.A., Korchak, V.N., Burdeinaya, T.N., Tretyakov, V.F., Rozovskii, A.Ya., Lin, G.I. An in SITU IR spectroscopic study of methanol conversion on an SNM-1 catalyst. *Kinetics and Catalysis*, 2009, vol. 50, pp. 775–783.

33. Rozovskii, A.Ya., Lin, G.I. Fundamentals of methanol synthesis and decomposition. *Topics in Catalysis*, 2003, vol. 22, pp. 137–150.

34. Rozovskiy, A.Ya., Lin, G.I. *Teoreticheskie osnovy protsessa sinteza metanola* [Theoretical foundations of the methanol synthesis process]. Moscow: Khimiya, 1990. 267 p.

35. Kreynin, E.V., Strel'tsov, S.G., Sushentsova, B.Yu. Analiz i perspektivy sovremennykh proektov podzemnoy gazifikatsii ugley v mire [Analysis and prospects of modern projects of underground coal gasification in the world]. *Ugol'*, 2011, no. 1, pp. 40–43.

36. Gridin, S.V., Vertela, S.A. Analiz perspektiv i metodov ispol'zovaniya gazogeneratornogo gaza s tsel'yu razrabotki energoeffektivnykh resheniy po ekonomii energoresursov [Analysis of prospects and methods of using gas generator gas for the

development of energy-efficient solutions to save energy resources]. *Energoberezhenie. Energetika. Energoaudit*, 2013, no. 8(114), pp. 31–40.

37. Mao, Fei. (2017). Underground coal gasification (UCG): A new trend of supply-side economics of fossil fuels. *Natural Gas Industry B*. 3. 10.1016/j.ngib.2016.12.007.

38. Regional Energy Commission of the Sakhalin Region. Available at: <http://rec.admsakhalin.ru/tarfy/>

39. Far Eastern Energy Company Branch of Khabarovskenergosbyt. Available at: [https://www.dvec.ru/khabsbyt/private\\_clients/tariffs/](https://www.dvec.ru/khabsbyt/private_clients/tariffs/)

40. Far Eastern Energy Company Branch of Dalenergosbyt. Available at: [https://www.dvec.ru/dalsbyt/private\\_clients/tariffs/](https://www.dvec.ru/dalsbyt/private_clients/tariffs/)

41. Federal State Statistics Service. [Accessed 27.02.2020]. Available at: <https://www.gks.ru/folder/10705>

42. Far Eastern Energy Company Branch of Khabarovskenergosbyt [Accessed 27.02.2020]. Available at: [https://www.dvec.ru/khabsbyt/private\\_clients/tariffs/](https://www.dvec.ru/khabsbyt/private_clients/tariffs/)

43. Far Eastern Energy Company Branch of Dalenergosbyt [Accessed 27.02.2020]. Available at: [https://www.dvec.ru/dalsbyt/private\\_clients/tariffs/](https://www.dvec.ru/dalsbyt/private_clients/tariffs/)

## ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311

**Валерий Павлович Голов**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, Россия, Иваново, e-mail: golov@ispu.ru

**Дмитрий Николаевич Кормилицын**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: dnk@es.ispu.ru

**Ольга Сергеевна Суханова**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры электрических систем, Россия, Иваново, e-mail: suhanova-olya@mail.ru

### **Анализ влияния управляемой линии высокого напряжения и автоматического регулирования возбуждения генераторов на колебательную устойчивость электроэнергетической системы<sup>1</sup>**

#### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Согласно Правилам устройства электроустановок, синхронные машины (генераторы, компенсаторы, электродвигатели) должны быть оборудованы устройствами автоматического регулирования возбуждения. Их применение положительно сказывается на показателях устойчивости и режимах электроэнергетической системы. В настоящее время развитие промышленности и увеличение числа потребителей требует повышения пропускной способности существующих линий электропередачи напряжением 220 кВ. При выдаче мощности с электростанции применение управляемых устройств продольной емкостной компенсации способно существенно увеличить пропускную способность линии электропередачи, однако при этом встает вопрос устойчивой работы электроэнергетической системы. Для формирования методов выбора параметров автоматического регулирования возбуждения и управляемого устройства продольной компенсации целесообразно проанализировать статическую колебательную устойчивость электроэнергетической системы, содержащей управляемую линию электропередачи 220 кВ, при регулировании возбуждения ее генераторов.

**Материалы и методы.** Используются методы математического моделирования электроэнергетической системы, теория дальних линий электропередачи и электромеханических переходных процес-

<sup>1</sup> Работа выполняется при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых – кандидатов наук (соглашение 075-15-2020-038 от 17.03.2020).

The project is carried out with financial assistance of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation within the framework of the Grant of President of the Russian Federation to Support Young Researchers – Candidate of Science of Russia (agreement 075-15-2020-038 dated 17.03.2020).

сов, методы анализа устойчивости электроэнергетических систем. В качестве инструмента моделирования применено оригинальное программное обеспечение на языке программирования C++.

**Результаты.** Произведен анализ влияния управляемого устройства продольной компенсации линии высокого напряжения и автоматического регулирования возбуждения генераторов на колебательную статическую устойчивость. Определены значения параметров регулирования управляемого устройства продольной компенсации и автоматического регулятора возбуждения с учетом возможных ограничений при сохранении положительного влияния данных устройств. Построены области устойчивости исследуемой электроэнергетической системы в зависимости от настроечных параметров рассматриваемых устройств.

**Выводы.** Полученные результаты могут использоваться для улучшения статической колебательной устойчивости электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации и автоматическим регулированием возбуждения генераторов.

**Ключевые слова:** статическая колебательная устойчивость, линии электропередачи высокого напряжения, управляемое устройство продольной компенсации, автоматическое регулирование возбуждения

**Valery Pavlovich Golov**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Russia, Ivanovo, e-mail: golov@ispu.ru

**Dmitriy Nikolayevich Kormilitsyn**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: dnk@es.ispu.ru

**Olga Sergeevna Sukhanova**

Ivanovo State Power Engineering University, Master Degree Student of Electric Power Systems Department, Russia, Ivanovo, e-mail: suhanova-olya@mail.ru

## **Analysis of influence of controlled high voltage line and automatic excitation control generators on oscillatory steady-state stability of electric-power system**

### **Abstract**

**Background.** According to the rules of installation of electricity-generating equipment, synchronous machines (generators, compensators, electric motors) must be equipped with automatic excitation control devices. Their application has a positive effect on the stability indicators and electrical power-engineering system modes. Currently, the development of industry and an increase in the number of consumers require transmission capacity growth of existing 220 kV power transmission lines. The use of controlled series compensation devices can significantly increase the transmission capacity of a power transmission line, however, there is a problem of stable operation of the electric power-engineering system. To choose the methods for control parameters of automatic excitation control and controlled series compensation device, it is advisable to analyze the oscillatory steady-state stability of the electric power-engineering system that contain a controlled 220 kV power transmission line when regulating the excitation of its generators.

**Materials and methods.** Methods of mathematical modeling of the electric power system, the theory of long-distance power lines and electromechanical transients, methods of analyzing the stability of electric power systems are used. The original software in the C++ programming language has been used as a modeling tool.

**Results.** The authors have analyzed the influence of controlled series compensation of high voltage transmission line and generators of automatic excitation control on oscillatory steady-state stability of electric power system. The parameters value of regulation of the controlled series compensation device and the automatic excitation control are determined, considering restrictions while maintaining the positive influence of these devices. Zones of stability of the examined electric power-engineering system are formed depending on setup variable of the devices under consideration.

**Conclusions.** The obtained results can be used to enhance oscillatory steady-state stability of electric power system with controlled series compensation device and automatic excitation control systems.

**Key words:** oscillatory steady-state stability, high voltage power lines, series compensation device, automatic excitation control

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2022.1.038-045

**Состояние вопроса.** Наиболее тяжелым режимом, нарушающим нормальное функционирование электроэнергетической системы, является аварийный режим, называемый системной аварией [1]. При такой аварии прекращает работу все оборудование, использующее электроэнергию, что приводит не только к ее недовыработке, но и к огромным убыткам от брака и порчи продукции, а также к аварии самого производящего оборудования. Следует заметить, что системные аварии могут начинаться без видимых причин, при нормальном режиме электроэнергетической системы. Такие аварии связаны с выбором настроечных параметров регулирующих устройств, наличием управляемых устройств продольной компенсации и т.д. Для решения этих задач необходимо оценивать статическую устойчивость электроэнергетической системы (ЭЭС) или ее устойчивость к «малым» возмущениям, так как именно нарушения этого вида устойчивости приводят к системным авариям с их отрицательными последствиями [2].

**Материалы и методы. Модель рассматриваемой электроэнергетической системы.** Исследование проводилось для простейшей электроэнергетической системы, содержащей управляемую ЛЭП ВН (рис. 1). Системы с управляемыми передачами рассматриваются в работах достаточно часто [3–5]. Генераторы электрической станции с суммарной мощностью 600 МВт с автоматическим регулированием возбуждения (АРВ) соединены с системой двухцепной линией электропередачи 220 кВ длиной 126 км с установленным управляемым устройством продольной компенсации (УУПК). На выводах УУПК установлены шунтирующие реакторы (ШР).

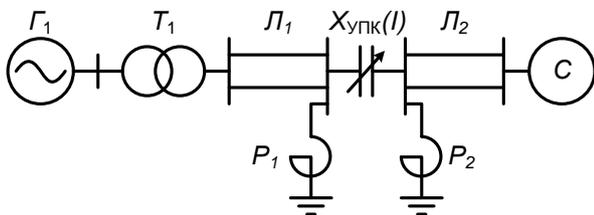


Рис. 1. Схема исследуемой электроэнергетической системы, содержащей управляемую ЛЭП СВН

Математическая модель исследования устойчивости состоит из дифференциальных и алгебраических уравнений, описывающих электромагнитные и электроме-

ханические переходные процессы в элементах системы [6].

Закон регулирования АРВ при анализе статической устойчивости [5] имеет вид

$$\Delta u_f = K_{0U}(U_0 - U_f), \quad (1)$$

где  $\Delta u_f$  – значение добавочного напряжения обмотки возбуждения под воздействием АРВ;  $K_{0U}$  – коэффициент регулирования по отклонению напряжения генератора;  $U_0$  – уставка АРВ пропорционального действия генератора по напряжению;  $U_f$  – напряжение на выводах генератора.

Регулирование управляемого УПК осуществляется путем изменения емкостного сопротивления в зависимости от тока линии (передаваемой по линии мощности) [7]:

$$X_{\text{УУПК}}(I) = \frac{10^6}{\omega_0 (K_{1\text{УУПК}} - K_{2\text{УУПК}} I)}, \quad (2)$$

где  $X_{\text{УУПК}}(I)$  – сопротивление УУПК, Ом;  $I$  – ток линии (в месте установки УУПК), кА;  $K_{1\text{УУПК}}$ ,  $K_{2\text{УУПК}}$  – коэффициенты УУПК, мкФ и мкФ/кА соответственно.

Однако в данной электроэнергетической системе из-за наличия изменяющегося емкостного сопротивления не исключается возможность появления резонанса напряжений. Он обусловлен равенством суммарного индуктивного сопротивления сети и емкостного сопротивления УУПК, которое зависит от тока, проходящего через него.

Значение тока, при котором наблюдается резонанс напряжений, называется резонансным и зависит от коэффициентов регулирования УУПК. При больших коэффициентах  $K_{2\text{УУПК}}$  резонанс напряжений возникает при меньшем значении тока, так как при этом быстрее увеличивается сопротивление  $X_{\text{УУПК}}$ .

Как правило, до появления резонанса напряжений возникает явление резонансного перехода. Введем понятие падения напряжения  $N$  в электропередаче между узлами 1 и 2. Для упрощения рассмотрена та же система, но без учета активных сопротивлений (рис. 2).

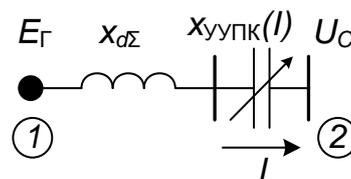


Рис. 2. Схема замещения рассматриваемой сети без учета активных сопротивлений

Значение модуля падения напряжения можно рассчитать по теореме косинусов, построив векторную диаграмму для данной сети (рис. 3):

$$|N| = \sqrt{E_G^2 - 2E_G U_C \cdot \cos \delta + U_C^2}. \quad (3)$$

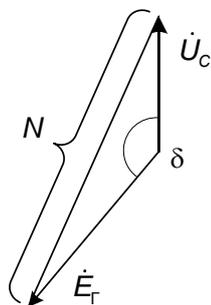


Рис. 3. Векторная диаграмма падения напряжения

Кроме того, можно определить минимальное и максимальное значения падения напряжения исходя из возможных значений взаимных углов в диапазоне от 0 до 180 (рис. 4).

Однако модуль падения напряжения также можно получить по второму закону Кирхгофа (рис. 2):

$$N(I) = I(x_{d\Sigma} - X_{ууПК}(I)). \quad (4)$$

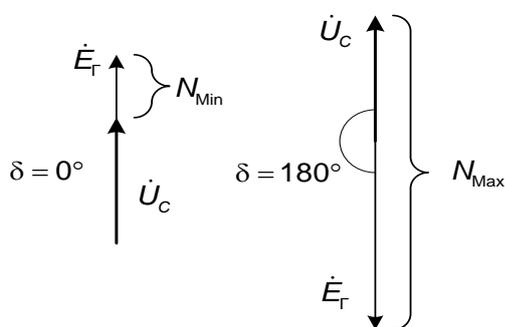


Рис. 4. Векторная диаграмма минимального и максимального падений напряжения

С помощью математических преобразований получено уравнение

$$N(I) = (I x_{d\Sigma}) - \left( I \frac{10^6}{\omega (K_{1уПК} - K_{2уПК} I I_6) Z_6} \right). \quad (5)$$

На рис. 5 представлены зависимости модуля напряжения от тока через УУПК для различных законов регулирования. Анализ результатов построения позволяет сделать вывод о том, что увеличение коэффициента регулирования  $K_{2уПК}$  приводит к снижению значения  $|N(I)|$  не достигая значения  $N_{max}$ .

Данное явление приводит к тому, что при утяжелении режима по току в диапа-

зоне от  $N_{min}$  до  $N_{max}$  существует экстремум, при котором  $\frac{\partial N(I)}{\partial I} = 0$  (рис. 5, точка а).

Данный режим соответствует началу резонансного перехода. Рассматриваемый экстремум наблюдается из-за быстрого роста вычитаемого в (5) при дальнейшем увеличении тока. Таким образом, при достижении рассматриваемой точки экстремума возникает резонансный переход, который приводит к резкому изменению электромагнитной мощности генераторов и потере устойчивости системы [7].

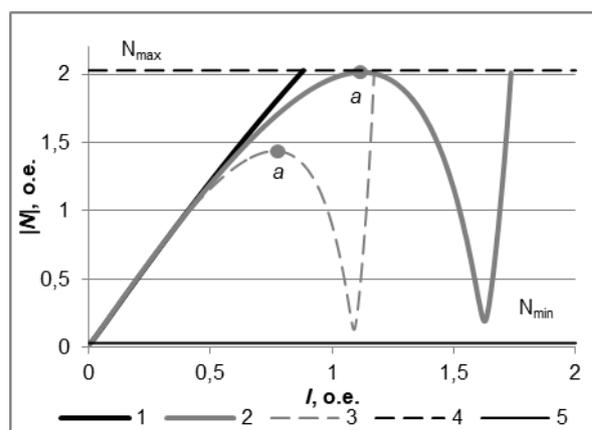


Рис. 5. Зависимость модуля падения напряжения на электропередаче от тока через УУПК для различных законов регулирования УУПК: 1 –  $K_{2уПК} = 10$ ; 2 –  $K_{2уПК} = 18$ ; 3 –  $K_{2уПК} = 31$ ; 4 – максимальное падение напряжения на электропередаче  $N_{max}$ ; 5 – минимальное падение напряжения на электропередаче  $N_{min}$

Следовательно, чтобы избежать резонансного перехода и его последствий, при этом получив максимальный эффект от управляемой продольной компенсации, выбран такой закон регулирования, при котором в момент начала резонансного перехода (рис. 5, точка а)  $K_{2уПК} = 0$ . Таким образом, угловая характеристика после ограничения становится традиционной, как для системы с неуправляемым УПК, и показывает увеличение предельной по статической устойчивости активной мощности. На рис. 6 представлены угловые характеристики при ограниченно-зависимой характеристике  $X_{уПК}$  для различных законов регулирования УУПК.

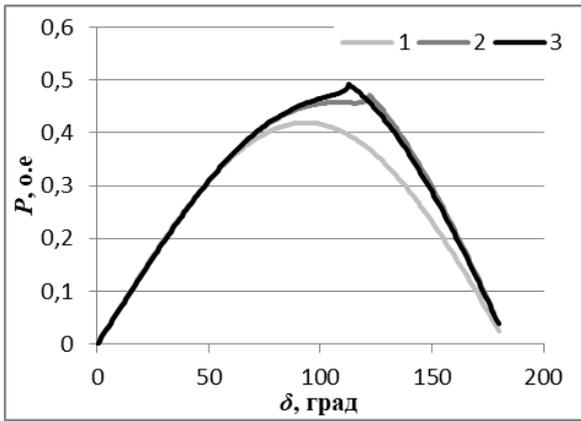


Рис. 6. Угловые характеристики при ограниченно-зависимой характеристике  $X_{уупк}(I)$  для различных законов регулирования УПК: 1 –  $K_{2уупк} = 10$ ; 2 –  $K_{2уупк} = 28$ ; 3 –  $K_{2уупк} = 30$

**Результаты исследования.** Для оценки статической устойчивости традиционно анализируют коэффициенты при степенях характеристического уравнения, используя различные критерии, или оценивают устойчивость по корням этого уравнения [8]. Характеристические уравнения высокого порядка достаточно затруднительно решить для получения корней. В этом случае для оценки устойчивости системы используют алгебраические и частотные критерии, связывающие корни с коэффициентами при степенях характеристического уравнения [9]. Современные вычислительные мощности позволяют анализировать статическую устойчивость с помощью вычислительного эксперимента по детальной математической модели системы путем решения системы уравнений при задании «малого» возмущения без линеаризации системы дифференциальных уравнений. По результату протекания переходного процесса формируется вывод об устойчивости энергосистемы [10].

Расчет установившихся режимов системы выполнен по математической модели с помощью оригинального программного обеспечения на языке программирования С++ [11]. Каждый конкретный режим ЭЭС имеет свою область устойчивости [12]. При фиксации степени компенсации и коэффициента усиления АРВ-ПД произведен вычислительный эксперимент по определению границы статической устойчивости. Мощность турбины кратковременно (на 0,05 с) повышается на 5 % от значения в исходном установившемся режиме. Результат протекания переходного процесса

рассматривается на изменении угла ротора  $\delta$ . На рис. 7 представлены графики зависимостей для различных законов регулирования УУПК.

Анализ результатов построения показывает, что значение  $K_{2уупк} = 21,7$  является границей колебательной устойчивости, так как в системе имеют место незатухающие колебания угла. Анализ зависимостей показывает, что начальный угол положения ротора генератора для различных коэффициентов  $K_{2уупк}$  имеет неодинаковые значения.

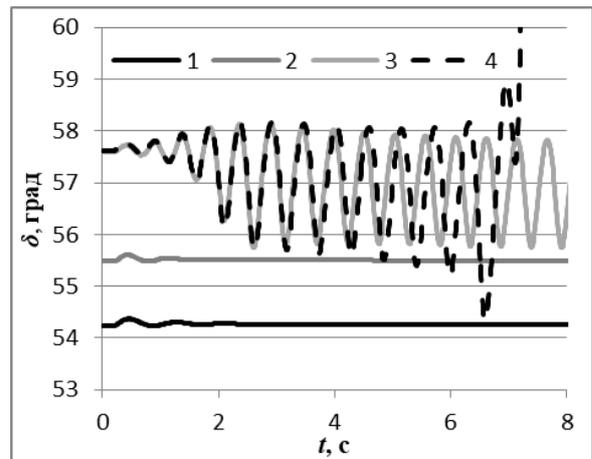


Рис. 7. Зависимости угла положения ротора  $\delta$  от времени для различных коэффициентов  $K_{2уупк}$ : 1 –  $K_{2уупк} = 0$ ; 2 –  $K_{2уупк} = 10$ ; 3 –  $K_{2уупк} = 21,7$ ; 4 –  $K_{2уупк} = 21,8$

Для объяснения этого явления построены угловые характеристики активной мощности для коэффициентов регулирования  $K_{2уупк} = 0$  и  $K_{2уупк} = 21,7$  (рис. 8).

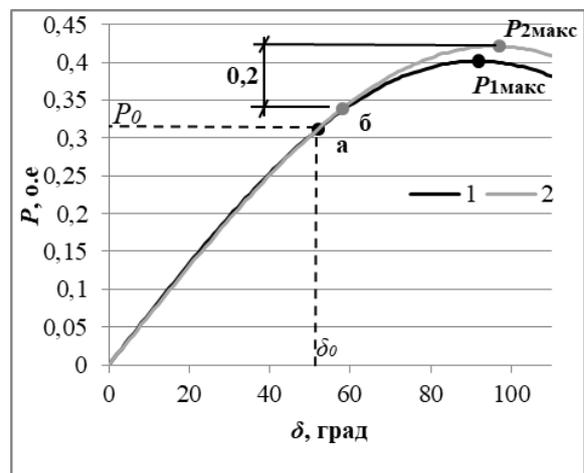


Рис. 8. Угловые характеристики для различных законов регулирования УУПК: 1 –  $K_{2уупк} = 0$ ; 2 –  $K_{2уупк} = 21,7$

При любых вариациях коэффициента регулирования  $K_{2УУПК}$  исходный режим остается одинаковым и угловые характеристики имеют общую точку  $(\delta_0, P_0)$ . Это позволяет сравнивать построенные величины между собой и анализировать влияние коэффициента  $K_{2УУПК}$  на предел передаваемой мощности ( $P_{1\max}, P_{2\max}$ ).

Однако, согласно требованиям к устойчивости энергосистем, при проведении расчетов режимов и устойчивости необходимо учитывать минимальный коэффициент запаса статической аperiodической устойчивости по активной мощности, который для нормальных режимов энергосистемы составляет  $K_{p,\min} = 0,2$ . Следовательно, значения предельной передаваемой активной мощности с учетом коэффициента запаса сместятся из  $P_{1\max}$  и  $P_{2\max}$  в точки а и б соответственно (рис. 8). Каждая из этих мощностей определяется углом положения ротора  $\delta$ , который является исходным для вычислительного эксперимента по определению характера протекания переходного процесса при «малом» возмущении (рис. 7).

После проведения расчетов для различных значений начальной степени компенсации и  $K_{0U}$  при изменении  $K_{2УУПК}$  выявляется точка границы устойчивости. Таким образом, можно построить семейство областей устойчивости для рассматриваемой системы в плоскости коэффициентов  $K_{2УУПК}$  и  $K_{0U}$  (рис. 9–12).

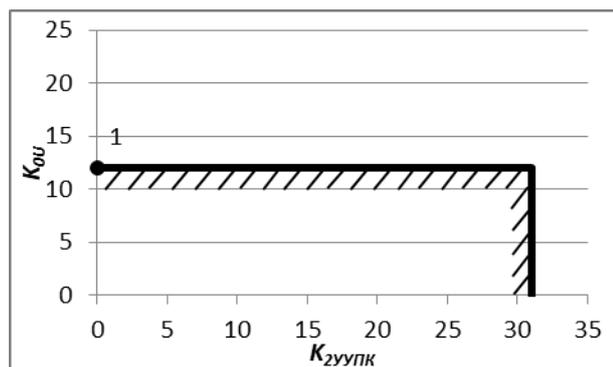


Рис. 9. Область устойчивости системы в плоскости коэффициентов  $K_{2УУПК}$  и  $K_{0U}$  при электропередаче, выполненной проводом марки АС-240/32, и  $X_{УУПК} = 0,155$

Результаты исследования свидетельствуют о том, что при малых начальных значениях сопротивления УУПК область устойчивости наименьшая (рис. 9). На рис. 9–12 точка 1 соответствует границе

колебательной устойчивости при отсутствии регулирования УУПК ( $K_{2УУПК} = 0$ ).

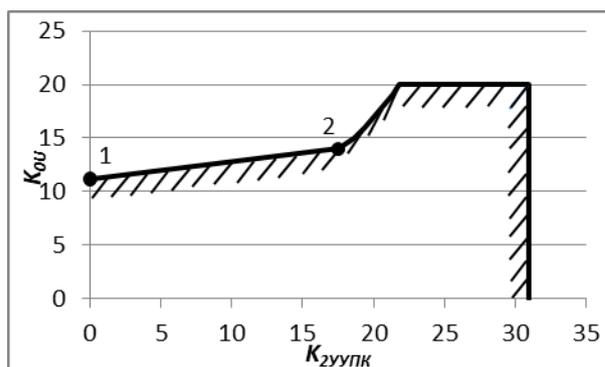


Рис. 10. Область устойчивости системы в плоскости коэффициентов  $K_{2УУПК}$  и  $K_{0U}$  при электропередаче, выполненной проводом марки АС-240/32, и  $X_{УУПК} = 0,233$

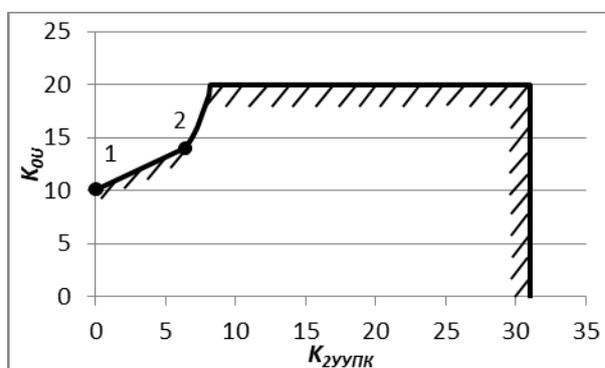


Рис. 11. Область устойчивости системы в плоскости коэффициентов  $K_{2УУПК}$  и  $K_{0U}$  при электропередаче, выполненной проводом марки АС-240/32, и  $X_{УУПК} = 0,337$

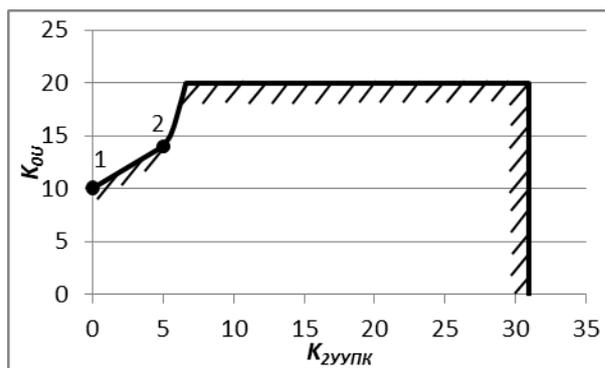


Рис. 12. Область устойчивости системы в плоскости коэффициентов  $K_{2УУПК}$  и  $K_{0U}$  при электропередаче, выполненной проводом марки АС-240/32, и  $X_{УУПК} = 0,362$

При увеличении начальной степени компенсации и равенстве нулю  $K_{2УУПК}$  статическая колебательная устойчивость нарушается при меньших значениях ко-

эфициента усиления  $K_{0U}$  (рис. 13). Это следует из того, что УУПК в принципе ухудшает колебательную статическую устойчивость (ведет к самовозбуждению).

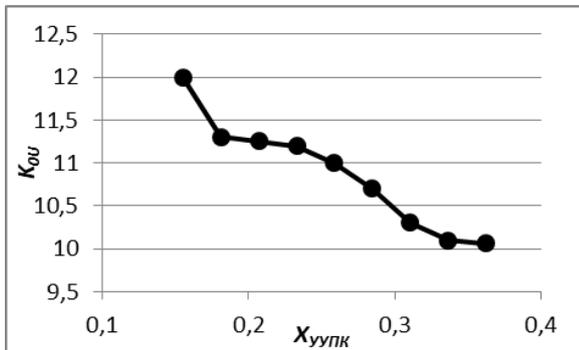


Рис. 13. Движение точки 1 при увеличении  $X_{УУПК}$

Анализ областей устойчивости системы (рис. 10–12) показывает, что при увеличении начальной степени компенсации при больших значениях  $K_{0U}$  область устойчивости начинает расширяться при меньшем значении  $K_{2УУПК}$  (точка 2 на зависимостях). Это можно объяснить, если ввести понятие  $X_{УУПКпред}$  – такое предельное сопротивление УУПК, при котором наблюдается граница статической колебательной устойчивости. Тогда при одинаковых  $K_{2УУПК}$  емкостное сопротивление УУПК достигнет  $X_{УУПКпред}$  быстрее при большей начальной степени компенсации (рис. 14, зависимости 1 и 2, точки исходного установившегося режима а и б соответственно).

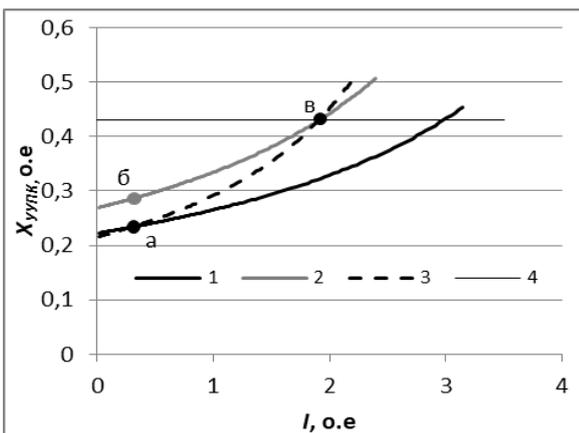


Рис. 14. Зависимости сопротивлений УУПК от тока: 1 –  $X_{УУПК} = 0,233$ ,  $K_{2УУПК} = 17,5$ ; 2 –  $X_{УУПК} = 0,285$ ,  $K_{2УУПК} = 17,5$ ; 3 –  $X_{УУПК} = 0,233$ ,  $K_{2УУПК} = 29$ ; 4 –  $X_{УУПКпред}$

При этом для зависимости 2 с большей исходной степенью компенсации можно найти иную зависимость с меньшей исходной степенью компенсации и таким

коэффициентом регулирования УУПК, при котором они будут иметь общую точку при  $X_{УУПКпред}$  (рис. 14, зависимости 2 и 3, общая точка в). При этом большая исходная степень компенсации требует меньшей крутизны характеристики для достижения точки  $X_{УУПКпред}$ , являющейся границей статической устойчивости, и наоборот. Соответственно, данный эффект приводит к поведению точки 2, показанному на рис. 10–12: при меньшем значении исходной степени компенсации необходим больший регулирующий эффект от УУПК для достижения границы устойчивости.

На рис. 15 представлена пространственная модель области статической колебательной устойчивости в координатах  $K_{0U}$ ,  $K_{2УУПК}$  и  $X_{УУПК}$ . Различные сечения этой пространственной фигуры по оси  $X_{УУПК}$  имеют полное соответствие с рис. 9–12. Следует отметить, что выбор любых значений коэффициентов регулирования, входящих в эту трехмерную фигуру, гарантирует статическую колебательную устойчивость системы.

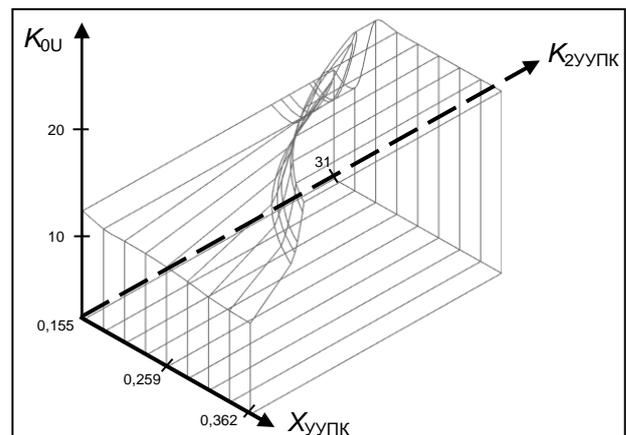


Рис. 15. Пространственная область статической колебательной устойчивости в координатах  $K_{0U}$ ,  $K_{2УУПК}$  и  $X_{УУПК}$

**Выводы.** В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы.

1. При малых сопротивлениях УУПК область устойчивости наименьшая.

2. При увеличении степени компенсации и равенстве  $K_{2УУПК}$  нулю статическая колебательная устойчивость нарушается при меньших значениях коэффициента усиления  $K_{0U}$ .

3. При увеличении степени компенсации при больших значениях  $K_{0U}$  область устойчивости начинает расширяться при меньшем значении  $K_{2УУПК}$ .

4. Наибольший положительный эффект на колебательную статическую устойчивость от применения УУПК и АРВ наблюдается при высоких начальных степенях компенсации.

#### Список литературы

1. **Anderson P.M., Fouad A.A.** Power system control and stability, Second edition, Wiley-interscience. – USA, 2003. – 672 p.
2. **Albertos A.P., Sala A.** Multivariable control systems. – Springer, 2007. – 340 p.
3. **Антонов А.В., Фокин В.К., Тузлукова Е.В.** О применении устройств продольной компенсации в высоковольтных электрических сетях России // Энергия единой сети. – 2016. – № 6(29). – С. 26–43.
4. **Vaibhav Desai, Vivek Pandya, Anilkumar Markana.** Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation // International Journal of Engineering Research and Development (IJERD) ISSN: 2278-067X Recent trends in Electrical and Electronics & Communication Engineering (RTEECE 17th – 18th April 2015). – 2015. – P. 62–68.
5. **Шакарян Ю.Г., Фокин В.К., Лихачев А.П.** Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с сетевыми устройствами гибких электропередач // Электричество. – 2013. – № 12. – С. 2–13.
6. **Using controlled electric-power lines with controlled series compensation in smart-grid networks / V.P. Golov, A.A. Martirosyan, I.A. Moskvina, D.N. Kormilitsyn // Russian Electrical Engineering.** – February 2017. – Vol. 88, Issue 2. – New York, USA: Allerton Press, 2017. – P. 81–86.
7. **Критерий аperiodической статической устойчивости электроэнергетической системы с управляемым устройством продольной компенсации на линии 220 кВ / В.П. Голов, Д.Н. Кормилицын, А.В. Калущков, О.С. Суханова // Вестник ИГЭУ.** – 2020. – Вып. 5. – С.13–24.
8. **Kundur P.** Power System Stability and Control. – New York: Tata McGraw-Hills, 1994.
9. **Костюк О.М.** Элементы теории устойчивости энергосистем. – Киев: Наукова думка, 1983. – 296 с.
10. **Веников В.А., Анисимова Н.Д., Долгинов А.И.** Самовозбуждение и самораскачивание в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1964.
11. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660842. Controlled electric power system stability / Д.Н. Кормилицын; зарег. в реестре программ для ЭВМ 28.08.18.
12. **Веников В.А.** Переходные электромеханические процессы в электрических системах. – М.: Высш. шк., 1985. – 536 с.

#### References

1. Anderson, P.M., Fouad, A.A. Power system control and stability. Wiley-interscience. USA, 2003. 672 p.
2. Albertos, A.P., Sala, A. Multivariable control systems. Springer, 2007. 340 p.
3. Antonov, A.V., Fokin, V.K., Tuzlukova, E.V. O primeneniі ustroystv prodol'noy kompensatsii v vysokovol'tnykh elektricheskikh setyakh Rossii [On applying longitudinal compensation devices in Russian high-voltage electric networks]. *Energiya edinoy seti*, 2016, no. 6(29), pp. 26–43.
4. Vaibhav, Desai, Vivek, Pandya, Anilkumar, Markana. Enhancement of Transient Stability of Power System with Variable Series Compensation. International Journal of Engineering Research and Development (IJERD) ISSN: 2278-067X Recent trends in Electrical and Electronics & Communication Engineering (RTEECE 17th – 18th April 2015), 2015, pp. 62–68.
5. Shakaryan, Yu.G., Fokin, V.K., Likhachev, A.P. Ustanovivshiesya rezhimy raboty elektroenergeticheskikh sistem s setevymi ustroystvami gibkikh elektroperedach [Steady states modes of electric power systems with flexible power transmissions]. *Elektrichestvo*, 2013, no. 12, pp. 2–13.
6. Golov, V.P., Martirosyan, A.A., Moskvina, I.A., Kormilitsyn, D.N. Using controlled electric-power lines with controlled series compensation in smart-grid networks. *Russian Electrical Engineering*, February 2017, vol. 88, issue 2, pp. 81–86.
7. Golov, V.P., Kormilitsyn, D.N., Kalutskov, A.V., Sukhanova, O.A. Kriteriy aperiodicheskoy staticheskoy ustoychivosti elektroenergeticheskoy sistemy s upravlyаемым ustroystvom prodol'noy kompensatsii na linii 220 kV [Criterion of aperiodic steady-state stability of an electric power system with a controlled series compensation device on a 220 kV line]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 5, pp. 13–24.
8. Kundur, P. Power System Stability and Control. New York: Tata McGraw-Hills, 1994.
9. Kostyuk, O.M. *Elementy teorii ustoychivosti energosistem* [Power system stability theory elements]. Kiev: Naukova dumka, 1983. 296 p.
10. Venikov, V.A., Anisimova, N.D., Dolginov, A.I. *Samovozbuzhdenie i samoraskachivanie v elektricheskikh sistemakh* [Self-excitation and self-oscillation in electric systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1964.
11. Kormilitsyn, D.N. Controlled electric power system stability. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018660842* [Certificate of Software Registration no. 2018660842], 2018.
12. Venikov, V.A. *Perekhodnye elektromekhanicheskie protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Electromechanical transients in electric systems]. Moscow: Vysshaya shkola, 1985. 536 p.

УДК 621.316.925:681.3

**Сергей Владимирович Деркачев**

Донецкий национальный технический университет, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических станций, Украина, Донецк, e-mail: sergey\_derkachev@mail.ru

## Микропроцессорная защита группы электродвигателей от обрыва фаз в сети внешнего электроснабжения

### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Возникновение несимметричных режимов в сети внешнего электроснабжения в процессе эксплуатации может быть вызвано различными причинами: обрывом фазы вследствие сильного ветра или оледенения воздушных линий электропередач; перегоранием проводов вследствие возникновения устойчивых коротких замыканий; неполнофазными автоматическими повторными включениями. В случае возникновения неполнофазного режима в сети внешнего электроснабжения синхронные и асинхронные электродвигатели начинают получать питание по двум оставшимся в работе фазам, что приводит к появлению тока обратной последовательности, который представляет наибольшую опасность для электродвигателей, поскольку он вызывает их дополнительный нагрев и, как следствие, преждевременный выход из строя. В связи с этим актуальным является исследование переходных процессов в двигательной нагрузке при возникновении неполнофазного режима в сети внешнего электроснабжения и разработка микропроцессорной защиты группы электродвигателей от обрыва фазы в питающей сети.

**Материалы и методы.** Исследование проведено методом компьютерного моделирования, основанном на математических моделях элементов электрической сети, записанных с помощью систем дифференциальных уравнений в трехфазной системе координат.

**Результаты.** Установлены закономерности протекания переходных процессов в синхронных и асинхронных электродвигателях при возникновении неполнофазных режимов в сети как внутреннего, так и внешнего электроснабжения, которые позволили разработать алгоритм работы микропроцессорной защиты группы электродвигателей от обрыва фаз в сети внешнего электроснабжения. Предложенный алгоритм основан на контроле уровня тока обратной последовательности и отсутствии тока в одной из фаз на вводе секции.

**Выводы.** Предложенный алгоритм защиты группы электродвигателей от неполнофазных режимов в сети внешнего электроснабжения обладает высокой селективностью, а его использование в качестве пускового органа устройства быстродействующего автоматического включения резерва позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение предприятий с непрерывным технологическим процессом.

**Ключевые слова:** синхронные электродвигатели, асинхронные электродвигатели, пусковой орган микропроцессорных устройств, неполнофазный режим работы электродвигателей, обрыв фазы, надежность электроснабжения, микропроцессорная защита электродвигателей

**Sergey Vladimirovich Derkachev**

Donetsk National Technical University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electrical Stations Department, Ukraine, Donetsk, e-mail: sergey\_derkachev@mail.ru

## Microprocessor protection of electrical motors against phase failure in external power supply network

### Abstract

**Background.** Nonsymmetrical modes in the external power supply network during operation can be caused by several reasons: phase failure due to strong wind or glaciation of overhead power lines, wire burnout due to persistent short circuits, open phase automatic reclosing. In case of open phase condition, the external power supply network, synchronous and asynchronous electric motors are powered along the two phases that are in operation. It leads to the negative sequence current, which poses maximum danger for electric motors, since it causes additional heating and, as a result, premature damage. Therefore, the currently important goal of the project is to study transient processes of the motor load when an open phase mode oc-

curs in the external power supply network and to design microprocessor protection of electrical motors against phase failure in the supply network.

**Materials and methods.** To achieve the goal, a computer simulation method is used, based on mathematical models of the elements of electrical network presented as the systems of differential equations in a three-phase coordinate system.

**Results.** The regularities of the flow of transient processes in synchronous and asynchronous electric motors in case of open phase modes in both the internal and external power supply networks have been established. Thus, it is possible to develop an algorithm of the operation of microprocessor protection of electrical motors against phase failure in the external power supply network. The proposed algorithm is based on monitoring the negative sequence current level and the absence of current in one of the phases at the section input.

**Conclusions.** The obtained results show that the proposed algorithm to protect electrical motors against open phase modes in an external power supply network has a high selectivity. Its use as a starting element of the fast-acting automatic transfer switch device allows you to provide uninterrupted power supply for enterprises with a continuous technological process.

**Key words:** synchronous motors, induction electrical motors, starting element of microprocessor device, open phase mode of motors, phase failure, reliability of power supply, microprocessor protection of motor

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2022.1.046-053

**Введение.** Синхронные и асинхронные электродвигатели большой единичной мощности и напряжением статора 6–10 кВ, используемые на промышленных предприятиях в качестве привода основных механизмов, как правило, получают питание от сборных шин главной понизительной подстанции как по воздушным, так и по кабельным линиям. В свою очередь, главная понизительная подстанция представляет собой двухтрансформаторную подстанцию, которая получает питание по воздушным высоковольтным линиям от двух независимых источников питания.

Переходным процессам в синхронных и асинхронных электродвигателях в режимах пуска и самозапуска, переключения на резервный источник питания вследствие потери питания от основного источника и возникновения коротких замыканий в сети внешнего электроснабжения посвящено достаточно большое количество работ [1–6]. Тем не менее вопросам поведения двигательной нагрузки в неполнофазных режимах, возникающих в сети внешнего электроснабжения, уделяется недостаточно внимания. Неполнофазный режим в системе внешнего электроснабжения в процессе эксплуатации может быть вызван обрывом фаз воздушных высоковольтных линий вследствие сильного ветра или оледенения проводов, перегоранием проводов при возникновении коротких замыканий, а также неполнофазным автоматическим повторным включением.

При возникновении неполнофазного режима в сети внешнего электроснабжения синхронные и асинхронные электродвигатели, подключенные к одной секции шин,

начинают получать питание по двум оставшимся в работе фазам. Возникающие при этом токи обратной последовательности представляют наибольшую опасность, поскольку вызывают дополнительный нагрев электродвигателей. Работа синхронных и асинхронных электродвигателей в таком режиме является недопустимой, так как из-за возникающего перегрева возможен их преждевременный выход из строя.

Таким образом, актуальным является исследование переходных процессов в двигательной нагрузке при возникновении неполнофазного режима в сети внешнего электроснабжения и разработка микропроцессорной защиты группы электродвигателей от обрыва фазы в питающей сети.

**Методы исследования.** Для исследования переходных процессов в двигательной нагрузке при возникновении неполнофазных режимов работы в сети как внешнего, так и внутреннего электроснабжения воспользуемся математической моделью участка сети с двигательной нагрузкой в виде синхронных и асинхронных электродвигателей, получающих питание от высоковольтной воздушной линии через понижающий трансформатор (рис. 1). Для повышения точности расчетов в несимметричных режимах математические модели элементов, входящих в состав модели (синхронный и асинхронный двигатели, трансформатор, кабельные и воздушные линии), представлены в виде систем дифференциальных уравнений, записанных в трехфазной системе координат. Подробное описание математической модели участка сети с двигательной нагрузкой приведено в

[7], а расчет параметров схем замещения представлен в [8, 9]. В качестве двигательной нагрузки для моделирования были выбраны синхронный двигатель мощностью 3150 кВт и напряжением статора 6 кВ и два асинхронных двигателя мощностью 1500 и 240 кВт и напряжением статора 6 кВ.

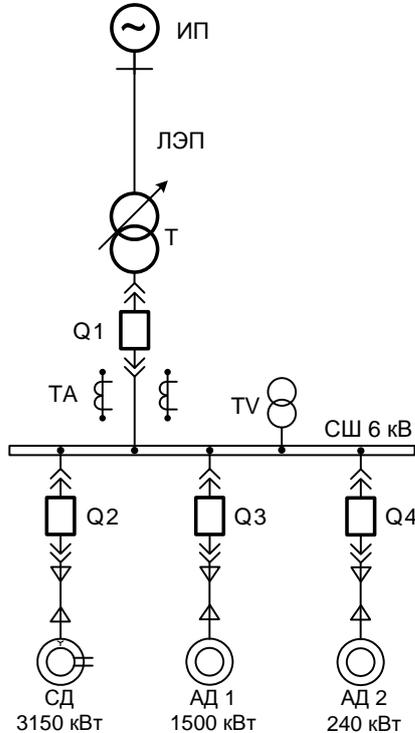


Рис. 1. Участок сети с двигательной нагрузкой

Поскольку в реальных схемах электроснабжения измерительные трансформаторы тока устанавливаются, как правило, в фазе А и фазе С, то для определения токов прямой и обратной последовательностей в используемой математической модели сначала необходимо определить ортогональные составляющие токов на основе токов фазы А и фазы С по следующим формулам:

$$i_{\alpha} = i_a; \quad (1)$$

$$i_{\beta} = \frac{-i_a - 2i_c}{\sqrt{3}}, \quad (2)$$

где  $i_a$  и  $i_c$  – мгновенные значения токов фазы А и фазы С.

Токи прямой и обратной последовательностей на основе ортогональных составляющих  $i_{\alpha}$  и  $i_{\beta}$  могут быть определены по формулам:

$$I_{\text{пп}} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(i_{\alpha} + \frac{d}{dt} i_{\beta}\right)^2 + \left(\frac{d}{dt} i_{\alpha} - i_{\beta}\right)^2}; \quad (3)$$

$$I_{\text{оп}} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(i_{\alpha} - \frac{d}{dt} i_{\beta}\right)^2 + \left(\frac{d}{dt} i_{\alpha} + i_{\beta}\right)^2}, \quad (4)$$

где  $\frac{d}{dt} i_{\alpha}$  и  $\frac{d}{dt} i_{\beta}$  – производные ортогональных составляющих токов.

Производные ортогональных составляющих токов  $i_{\alpha}$  и  $i_{\beta}$  рассчитываются на основе нескольких выборок по формулам:

$$\frac{d}{dt} i_{\alpha} = \frac{1}{2\omega h} (3i_{\alpha} - 4i_{\alpha n-1} + i_{\alpha n-2}); \quad (5)$$

$$\frac{d}{dt} i_{\beta} = \frac{1}{2\omega h} (3i_{\beta n} - 4i_{\beta n-1} + i_{\beta n-2}), \quad (6)$$

где  $h$  – шаг дискретизации;  $\omega$  – частота измеряемого сигнала.

**Результаты исследования.** На рис. 2 показаны результаты компьютерного моделирования несимметричного режима работы двигательной нагрузки, вызванного обрывом фазы В в сети внешнего электроснабжения.

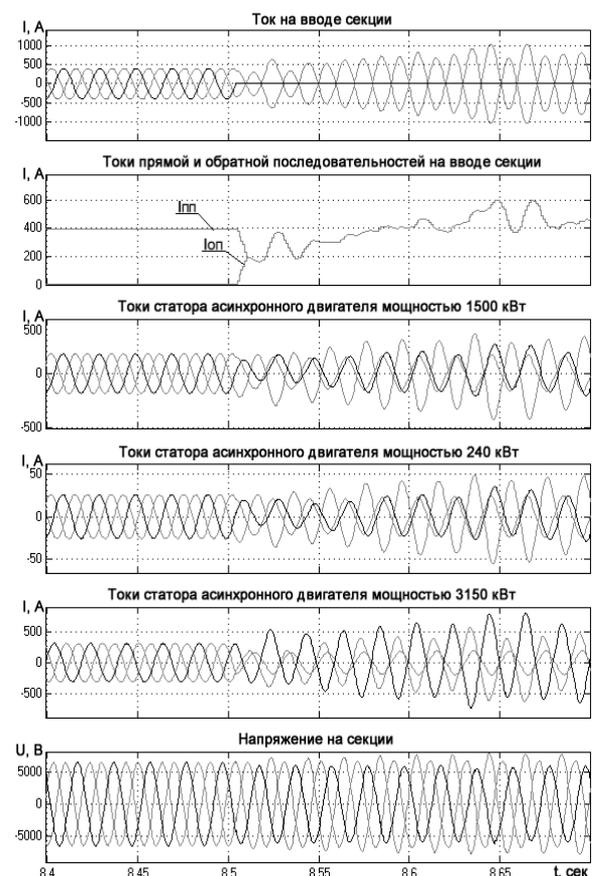


Рис. 2. Результаты компьютерного моделирования неполнофазного режима работы электродвигателей при обрыве фазы в сети внешнего электроснабжения

Анализ полученных результатов (рис. 2) показывает, что при возникновении несимметричного режима в сети внешнего электроснабжения

троснабжения, вызванного отключением фазы В, на вводе секции возникает ток обратной последовательности, равный току прямой последовательности. В этом режиме несимметрия по току составляет 100 %, а по напряжению – 17,9 %, при этом двигательная нагрузка продолжает потребление электроэнергии по двум оставшимся фазам и на общих шинах начинает генерировать ток в третьей фазе. Работа электродвигателей в таком режиме является недопустимой, поскольку возникший ток обратной последовательности значительно превышает допустимый уровень тока обратной последовательности, что приводит к перегреву обмоток электродвигателей и, как следствие, к их отключению собственными тепловыми защитами или полному их выходу из строя, что является недопустимым для предприятий с непрерывным технологическим процессом.

На рис. 3 показаны результаты компьютерного моделирования несимметричного режима работы двигательной нагрузки, вызванного обрывом фазы В в сети внутреннего электроснабжения.

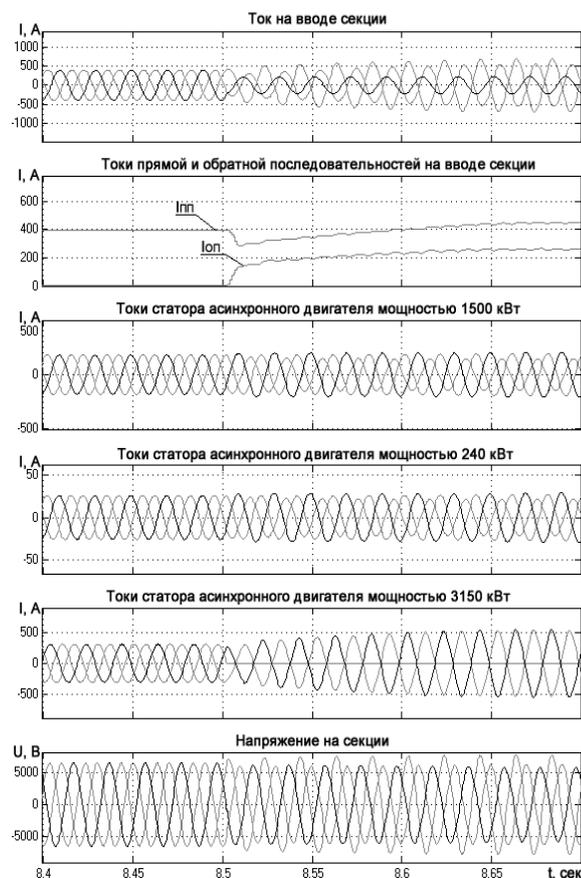


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования неполнофазного режима работы электродвигателей при обрыве фазы в сети внутреннего электроснабжения

Анализ полученных результатов (рис. 3) показывает, что при возникновении несимметричного режима, вызванного обрывом фазы в сети внутреннего электроснабжения на вводе секции, питающей двигательную нагрузку, также возникает ток обратной последовательности, величина которого значительно меньше, чем при возникновении несимметричного режима в сети внешнего электроснабжения. Величина несимметрии по току в этом режиме составляет 57,5 %, а по напряжению – 7,4 %. В этом случае все электродвигатели испытывают перегрузку током обратной последовательности, однако отключение электродвигателя, в цепи питания которого произошло нарушение, будет выполнено собственными защитами, а остальные электродвигатели при этом останутся в работе.

Поскольку при возникновении несимметричного режима работы в сети внешнего электроснабжения наблюдается отсутствие тока в одной из фаз на вводе секции (рис. 2), а при возникновении несимметричного режима в сети внутреннего электроснабжения на вводе секции ток присутствует во всех трех фазах (рис. 3), то предлагается выполнить защиту группы электродвигателей на основе контроля уровня тока обратной последовательности на вводе секции, дополненную контролем отсутствия тока в одной из фаз на вводе секции для обеспечения селективного действия защиты. Предложенная защита должна действовать на отключение вводного выключателя секции и на включение выключателя резервного источника питания.

На рис. 4 приведена структурная схема предлагаемой защиты группы электродвигателей от обрыва фазы в сети внешнего электроснабжения.

Анализ представленной на рис. 4 структурной схемы показывает, что предлагаемая защита состоит из следующих блоков: блок обработки входных сигналов; блок определения производных ортогональных составляющих тока; блок определения амплитудных значений фазных токов; блок определения тока обратной последовательности и блок логической обработки сигналов.

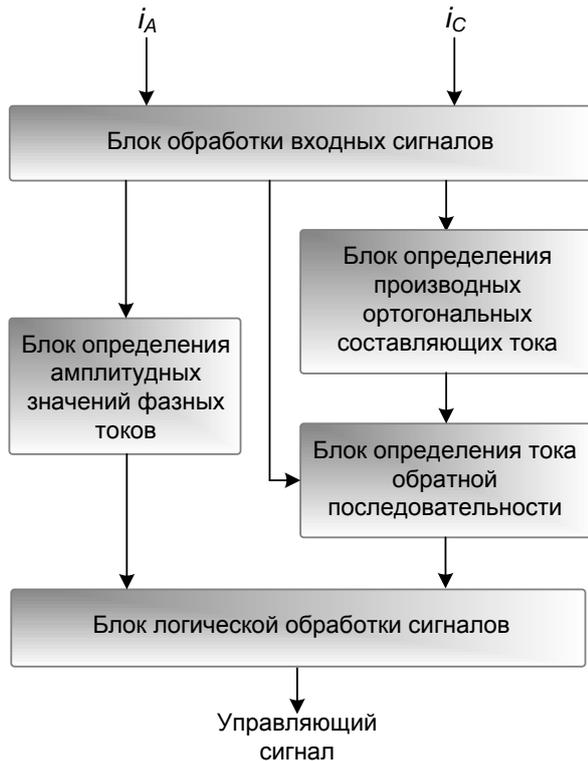


Рис. 4. Структурная схема защиты группы электродвигателей при обрыве фазы в сети внешнего электроснабжения

Блок обработки входных сигналов предназначен для фильтрации сигналов, поступающих от измерительных трансформаторов тока, и математического определения тока в третьей фазе. Фильтрация измеряемого сигнала выполняется путем интегрального усреднения мгновенных дискретных значений измеряемого сигнала на основе пяти выборок. Подробно алгоритм фильтрации измеряемого сигнала описан в [10], а на рис. 5 приведена структурная схема алгоритма фильтрации входного сигнала тока.

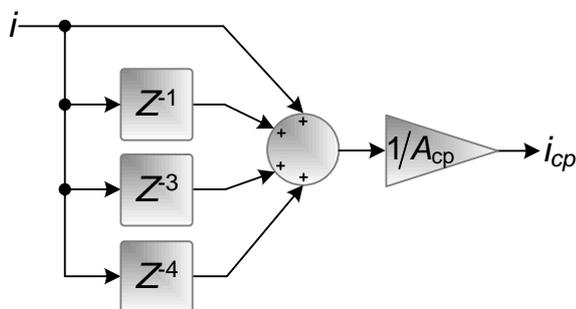


Рис. 5. Структурная схема алгоритма фильтрации входных сигналов тока

Коэффициент усреднения  $A_{cp}$  (рис. 5) представляет собой отношение суммы всех

выборок измеряемого сигнала к центральной выборке. Выходными сигналами блока обработки входных сигналов являются усредненные значения токов трех фаз на вводе секции.

Для определения амплитудных значений измеряемых токов на вводе секции используется блок определения амплитудных значений фазных токов, структурная схема которого показана на рис. 6.

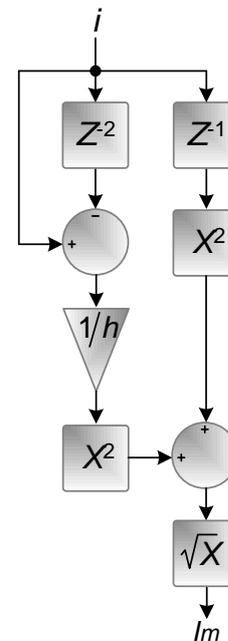


Рис. 6. Структурная схема блока определения амплитудных значений фазных токов на примере одной фазы

Входными сигналами блока определения амплитудных значений фазных токов являются усредненные значения токов на вводе секции, а выходными сигналами блока являются амплитудные значения фазных токов на вводе секции. Показанный на рис. 6 коэффициент  $h$  равен шагу дискретизации измеряемых сигналов тока на вводе секции.

Блок определения ортогональных составляющих тока, показанный на рис. 4, реализует формулы (1), (2), (5) и (6). В качестве входных сигналов блок использует усредненные значения токов на вводе секции. Выходными сигналами блока являются значения ортогональных составляющих тока обратной последовательности, которые в свою очередь являются входными сигналами блока определения тока обратной последовательности. Работа блока определения тока обратной последовательности основана на реализации формулы (4).

На рис. 7 приведена структурная схема блока логической обработки сигналов, который предназначен для обеспечения селективного действия предлагаемой защиты группы двигателей.

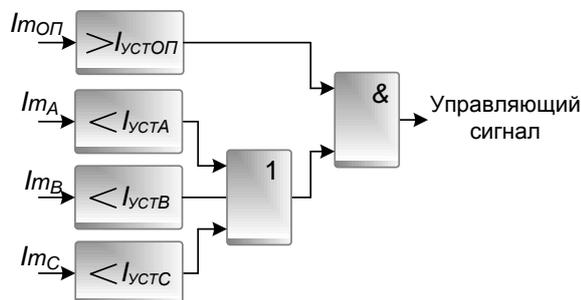


Рис. 7. Структурная схема блока логической обработки сигналов

Входными сигналами блока являются амплитудные значения фазных токов и значение тока обратной последовательности на вводе секции. Работа блока логической обработки сигналов заключается в следующем: в режиме реального времени блок контролирует значение величины тока обратной последовательности на вводе секции и наличие тока во всех трех фазах. При возникновении несимметричного режима работы в сети внешнего электропитания, обусловленного различными причинами, в случае превышения уровнем тока обратной последовательности на вводе секции заданной уставки и отсутствия тока в одной из трех фаз на вводе секции на выходе блока формируется сигнал на отключение вводного выключателя секции и включение выключателя резервного источника питания.

В случае возникновения несимметричного режима в сети внутреннего электропитания защита не подаст сигнал на отключение вводного выключателя секции, поскольку на вводе секции в этом случае ток будет присутствовать во всех трех фазах.

Поскольку обеспечение бесперебойного питания при нарушении нормального режима электропитания является основным требованием для промышленных предприятий с непрерывным технологическим процессом, то предложенная защита группы электродвигателей может быть использована в качестве дополнительного пускового органа микропроцессорных устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР).

На рис. 8 приведены результаты компьютерного моделирования переключения на резервный источник питания двигательной нагрузки при возникновении несимметричного режима работы.

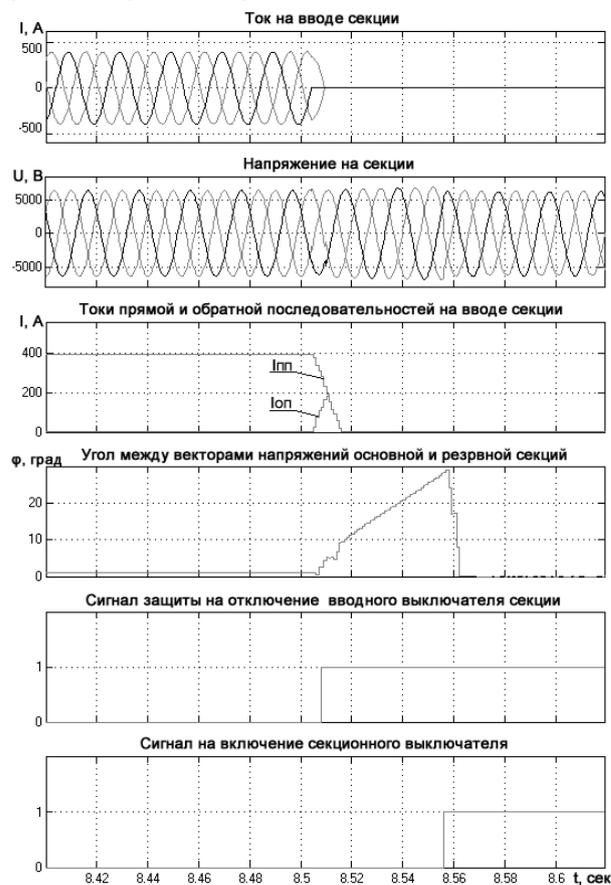


Рис. 8. Результаты компьютерного моделирования переключения на резервный источник питания при возникновении несимметричного режима работы.

Анализ полученных результатов (рис. 8) показывает, что при возникновении несимметричного режима в сети внешнего электропитания в момент времени 8,5 с через 0,01 с была подана команда на отключение вводного выключателя секции, питающей двигательную нагрузку. Резервное питание было подано в момент времени 8,555 с. Таким образом, время перерыва питания двигательной нагрузки составило 0,055 с, а включение резервного источника питания произошло с углом рассогласования между векторами напряжения основного и резервного источников питания, равным 30 градусам, что не превышает предельно допустимого значения, равного 40 градусам [7].

Таким образом, использование предлагаемой защиты группы электродвигателей от обрыва фаз в сети внешнего электропитания в качестве пускового органа

БАВР позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение промышленных предприятий со сложным непрерывным технологическим процессом при возникновении несимметричных режимов в питающей сети.

**Выводы.** Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Метод математического моделирования позволяет установить особенности протекания переходных процессов в синхронных и асинхронных электродвигателях при возникновении несимметричных режимов в сети как внутреннего, так и внешнего электроснабжения.

2. Использование предложенного алгоритма защиты группы электродвигателей от неполнофазных режимов в сети внешнего электроснабжения в качестве пускового органа устройства БАВР позволяет обеспечить бесперебойное электроснабжение ответственных потребителей на предприятиях с непрерывным технологическим процессом.

#### Список литературы

1. **Слодарж М.И.** Режимы работы, релейная защита и автоматика синхронных электродвигателей. – М.: Энергия, 1977. – 216 с.

2. **Носов К.Б., Дворак Н.М.** Способы и средства самозапуска электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 144 с.

3. **Голоднов Ю.М.** Самозапуск электродвигателей. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.

4. **Беляев А.В.** Противоаварийное управление в узлах нагрузки с синхронными электродвигателями большой мощности. – М.: Энергопресс, 2004. – 80 с.

5. **Киреева Э., Пупин В., Гумиров Д.** Современные устройства быстродействующего АВР // Главный энергетик. – 2005. – № 11. – С. 23–25.

6. **Быстродействующее** устройство АВР с однократным принципом определения нарушения нормального электроснабжения потребителей / В.А. Жуков, В.М. Пупин, С.И. Гамазин и др. // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. – 2011. – № 9. – С. 11–18.

7. **Сивокобыленко В.Ф., Деркачев С.В.** Анализ переходных процессов в двигательной нагрузке при переключениях питания на резервный источник // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2016. – № 5. – С. 69–74. DOI:10.17213/0136-3360-2016-5-69-74.

8. **Сивокобыленко В.Ф., Лебедев В.К.** Определение параметров схем замещения и характеристик синхронных турбодвигателей //

Научные труды ДонНТУ. Сер. Электротехника и энергетика. – 2014. – № 1(16). – С. 189–193.

9. **Сивокобыленко В.Ф., Ткаченко С.Н., Деркачев С.В.** Определение параметров схем замещения и характеристик асинхронных двигателей // Электричество. – 2014. – № 10. – С. 38–44.

10. **Сивокобыленко В.Ф., Деркачев С.В.** Особенности измерительных органов цифровых устройств быстродействующего автоматического включения резерва для систем электроснабжения с двигательной нагрузкой // Электромеханические и энергосберегающие системы. Ежеквартальный научно-производственный журнал. – 2015. – № 3(31). – С. 126–133.

#### References

1. Slodarz, M.I. *Rezhimy raboty, reley'naya zashchita i avtomatika sinkhronnykh elektrodvigateley* [Operation Modes, Relay Protection and Automation of Synchronous Motors]. Moscow: Energiya, 1977. 216 p.

2. Nosov, K.B., Dvorak, N.M. *Sposoby i sredstva samozapuska elektrodvigateley* [Means and Methods of Self-Starting Electric Motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1992. 144 p.

3. Golodnov, Yu.M. *Samozapusk elektrodvigateley* [Self-Starting Electric Motors]. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 136 p.

4. Belyaev, A.V. *Protivoavariynoe upravlenie v uzлах nagruzki s sinkhronnymi elektrodvigateleyami bol'shoy moshchnosti* [Emergency Control in Loads Nodes with High Power Synchronous Motors]. Moscow: Energopress, 2004. 80 p.

5. Kireeva, E., Pupin, V., Gumirov, D. *Sovremennye ustroystva bystrodeystvuyushchego AVR* [Modern devices for high-speed ATS]. *Glavnyy energetik*, 2005, no. 11, pp. 23–25.

6. Zhukov, V.A., Pupin, V.M., Gamazin, S.I., Kulikov, A.I., Tsyruk, S.A. *Bystrodeystvuyushchee ustroystvo AVR s odnokratnym printsipom opredeleniya narusheniya normal'nogo elektrosnabzheniya potrebiteley* [Fast-Acting ATS Device with a One-time Principle for Determining a Violation of Normal Power Supply of Consumers]. *Elektrooborudovanie: ekspluatatsiya i remont*, 2011, no. 9, pp. 11–18.

7. Sivokobylenko, V.F., Derkachev, S.V. *Analiz perekhodnykh protsessov v dvigatel'noy nagruzke pri pereklyucheniakh pitaniya na rezervnyy istochnik* [Analysis of Transients Processes in Motor Load at Switching on to Reserve Power Supply Source]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Elektromekhanika*, 2016, no. 5, pp. 69–74. DOI: 10.17213/0136-3360-2016-5-69-74.

8. Sivokobylenko, V.F., Lebedev, V.K. *Opredelenie parametrov skhem zameshcheniya i kharakteristik sinkhronnykh turbodvigateley* [Determination of Parameters of Equivalent

Circuits and Characteristics of Synchronous Turbo Motors]. *Nauchnye trudy DonNTU. Seriya: Elektrotehnika i energetika*, 2014, no. 1(16), pp. 189–193.

9. Sivokobylenko, V.F., Tkachenko, S.N., Derkachev, S.V. Opredelenie parametrov skhem zameshcheniya i kharakteristik asinkhronnykh dvigateley [Determination of Parameters of Equivalent Circuits and Characteristics of Induction Motors]. *Elektrichestvo*, 2014, no. 10, pp. 38–44.

10. Sivokobylenko, V.F., Derkachev, S.V. Osobennosti izmeritel'nykh organov tsifrovyykh ustroystv bystrodeystvuyushchego avtomaticheskogo vklyucheniya rezerva dlya sistem elektrosnabzheniya s dvigatel'noy nagruzkoy [Measurement Features of Digital Device of Fast-acting automatic transfer switch for Power Supply Systems with Motor Load]. *Elektromekhanicheskie i energosberegayushchie sistemy. Ezhekvartal'nyy nauchno-proizvodstvennyy zhurnal*, 2015, no. 3(31), pp. 126–133.

## ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА

УДК 62-185.7

**Сергей Александрович Нестеров**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: elmash@em.ispu.ru

**Иван Сергеевич Егоров**

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант кафедры электромеханики, Россия, Иваново, e-mail: elmash@em.ispu.ru

### Анализ процессов в магнитожидкостном герметизаторе с учетом деформации магнитной жидкости

#### Авторское резюме

**Состояние вопроса.** Малая величина рабочего зазора в магнитожидкостном герметизаторе сильно затрудняет или делает невозможным многие физические измерения. Основным способом изучения процессов внутри устройства остается аналитическое и численное математическое моделирование. Большинство современных исследователей идет по пути конечно-элементного расчета магнитного поля и аналитического нахождения удерживаемого перепада давления. Работ, посвященных мультифизическому численному расчету процессов в зазоре герметизаторов, к настоящему времени выполнено мало, несмотря на то, что данный подход позволяет учитывать зависимость реологических свойств магнитной жидкости от гидродинамических, температурных и магнитных полей, реальную геометрию рабочей зоны, включает в себя меньшее количество предположений по сравнению с аналитическими моделями, позволяет визуализировать различные параметры течения, что особенно важно для его анализа. Целью работы является анализ влияния деформации магнитожидкостной пробки на удерживаемый герметизатором перепад давления на основе разработанной численной модели с взаимосвязанным расчетом магнитного и гидродинамического полей.

**Материалы и методы.** Исследования проведены на основе теорий феррогидродинамики, гидродинамики и электромагнитного поля. Использовано взаимосвязанное конечно-элементное моделирование магнитного и гидродинамического полей магнитожидкостного герметизатора в пакете Comsol Multiphysics.

**Результаты.** Разработана численная модель магнитожидкостного герметизатора, отличающаяся автоматическим перестроением границ магнитожидкостной пробки на основе баланса давлений внутри жидкости. Получены картины распределения магнитной индукции и давления в рабочем зазоре гер-

метизатора с учетом изменения границ магнитной жидкости. Проведено сравнение полученного удерживаемого перепада давления с результатами, полученными на других моделях.

**Выводы.** Разработанная численная математическая модель, учитывающая деформацию магнито-жидкостной пробки, позволяет оценить влияние центробежных усилий от вращающегося вала на удерживаемый перепад давления, что может быть использовано при создании высокоскоростных уплотнений. Разница с аналитическим расчетом не превышает 5 %. Возможное при расчете допущение о полном заполнении рабочего зазора магнитной жидкостью в 2,5 раза занижает удерживаемый перепад давления при больших частотах вращения вала.

**Ключевые слова:** магнитная жидкость, магнитожидкостный герметизатор, магнитожидкостная пробка, магнитная индукция, перепад давления, численное моделирование, Comsol Multiphysics

**Sergei Aleksandrovich Nesterov**

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences (PhD), Associate Professor of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: elmash@em.ispu.ru

**Ivan Sergeevich Egorov**

Ivanovo State Power Engineering University, Postgraduate Student of Electromechanics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: elmash@em.ispu.ru

## Analysis of processes in magnetorheological sealer considering for magnetic fluid deformation

**Background.** The small size of the working gap in the sealer makes many physical measurements difficult or impossible. The main way to study the processes inside the device is to use analytical and numerical mathematical modeling. Most researchers apply finite-element calculation of magnetic field and analytically find the difference in pressure. Currently, there are few studies devoted to multiphysics numerical calculations of the processes in magnetorheological seal. The use of numerical models allows considering the dependence of rheological properties of magnetic fluid on hydrodynamic, temperature and magnetic fields, the real geometry of the working zone. Compared to the analytical models, a numerical one includes a smaller number of assumptions and allows visualizing various flow parameters, which are especially important for the analysis. The purpose of this study is to analyze the effect of the deformation of the magnetorheological plug in case of pressure difference held by the sealer. The study is based on the developed numerical model with the related calculation of magnetic and hydrodynamic fields.

**Materials and methods.** The study is carried out based on the theories of ferrohydrodynamics, hydrodynamics and electromagnetic field. Integrated finite-element modeling of the magnetic and hydrodynamic fields of the magnetorheological sealer in Comsol Multiphysics has been used.

**Results.** A numerical model of the magnetorheological sealer characterized by automatic rearrangement of the boundaries of the liquid plug based on the balance of pressures inside the liquid has been developed. The distribution results of magnetic induction and pressure in the working gap of the sealer, considering changes in the boundaries of the magnetic fluid, has been obtained. Comparison of the results of the obtained retained pressure drop and the results of other models has been carried out.

**Conclusions.** A numerical mathematical model that considers the deformation of the magnetorheological plug has been developed. The model makes it possible to estimate the influence of centrifugal forces of the rotating shaft on the retained pressure drop. The results can be used to create high-speed seal components. The difference of the value of analytical calculation does not exceed 5 %. The assumption about full filling of the working gap with magnetic fluid 2,5 times underestimates the retained pressure difference at high shaft rotation speeds.

**Key words:** magnetic fluid, magnetic fluid sealer, magnetic fluid plug, magnetic induction, pressure drop, numerical simulation, Comsol Multiphysics

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2022.1.054-063

**Введение.** Исследования магнитной жидкости (МЖ) (стабильного коллоида, состоящего из трех компонентов: жидкостно-носителя, магнитных частиц нанометрового размера и поверхностно-активного вещества, выполняющего роль стабилизатора)

интересны благодаря уникальной возможности управлять ее течением и положением в пространстве с помощью градиента внешнего магнитного поля.

Одним из наиболее распространенных применений МЖ является магнито-жид-

костная герметизация вращающихся валов. Путем создания жидкостного барьера из МЖ, находящегося под действием магнитного поля, можно удерживать перепады давления в несколько атмосфер. Широкое распространение магнитожидкостного герметизатора (МЖГ) связано с его преимуществами над другими системами герметизации, такими как: вариативность конструкции; отсутствие механического износа между движущимися частями; нулевая утечка уплотняемой среды и полная герметичность; длительный срок службы и приспособленность к неблагоприятным условиям окружающей среды [1–3].

Типовая конструкция МЖГ показана на рис. 1 и состоит из двух ферромагнитных полюсов 1, являющихся концентраторами магнитного поля, созданного постоянным магнитом 2 и удерживающего МЖ 3 в зазоре между ферромагнитным валом 4 и зубцами полюсов 1.

Экспериментальное исследование МЖГ имеет ограничения, связанные с тем, что рабочий зазор в большинстве уплотнений составляет 0,2–0,4 мм, что сильно затрудняет или делает невозможным многие физические измерения. Поэтому основным способом изучения процессов внутри устройства остается аналитическое и численное математическое моделирование.

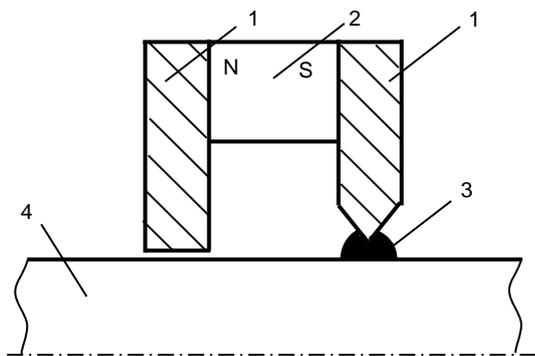


Рис. 1. Принципиальная конструкция МЖГ: 1 – полюс; 2 – магнит; 3 – МЖ; 4 – вал

Сложное реологическое поведение МЖ включает в себя взаимодействия не-ньютоновских, вязкопластических и вязкоупругих свойств, которые контролируются магнитным полем. Считается, что для моделирования параметров течения МЖ аналитических моделей магнитожидкостных систем недостаточно, что обусловлено разным поведением МЖ в зависимости от режима течения и геометрии рабочего за-

зора, принимаемыми в аналитических моделях допущениями и различными явлениями в каждой технической области применения МЖ.

В то же время использование численных расчетов позволяет учитывать большее количество явлений и конструктивных параметров и включать в себя меньшее количество предположений по сравнению с аналитическими моделями, а также визуализировать различные параметры течения, что особенно важно для его анализа.

Основная сложность при совместном численном расчете физических процессов, происходящих в рабочем зазоре МЖГ, связана с определением положения и формы поверхности магнитожидкостной пробки, на которую влияют распределение магнитного поля, в свою очередь зависящее от положения границ магнитожидкостной пробки, удерживаемый перепад давления и центробежные усилия от вращающегося вала [4].

Большинство современных работ, связанных с численным расчетом МЖГ, заключается в конечно-элементном расчете магнитного поля в герметизаторе и нахождении по аналитическим формулам максимального удерживаемого перепада давления [5–7]. Несмотря на широкое использование данного подхода в силу его простоты, он не учитывает множества гидродинамических процессов, происходящих в зазоре МЖГ, но позволяет проводить оптимизацию магнитной системы герметизатора, используя в качестве критерия максимальный градиент напряженности или индукции магнитного поля в зазоре [5, 6, 8, 9].

Работ, посвященных мультифизическому численному расчету МЖГ, к настоящему времени выполнено мало. Ю.Б. Казаков [10] определяет форму магнитной жидкости в зазоре МЖГ с помощью оптимизационной процедуры поиска, при которой в элементах сетки на поверхности МЖ обеспечивается значение магнитной индукции, определяемое перепадом давления и температурой. А.В. Родионов с соавторами [11, 12] по линиям равной индукции, полученным в результате численного расчета магнитного поля, задают границы магнитожидкостной пробки в зазоре МЖГ и, принимая их неизменными, методом конечных объемов исследуют гидродинамические процессы в данном объеме МЖ при вращении вала. Yibiao Chen с соавторами в [13] аналогичным образом находят первоначальные гра-

ницы магнитожидкостной пробки, а при численном расчете гидродинамических процессов учитывают деформацию поверхности МЖ под действием приложенного перепада давления и центробежных сил. С.А. Нестеров с соавторами в [14] принимают зазор МЖГ полностью заполненным МЖ и на основе распределения давления в МЖ, связанного с действием магнитных и центробежных сил, рассчитывают максимальный удерживаемый перепад давления.

Расширение возможностей применения численных методов при расчете магнитожидкостных устройств, позволяющих визуализировать и анализировать различные параметры течения, является сложной и актуальной научной задачей.

**Материалы и методы.** Для исследования выбрано одно зубцовое деление МЖГ, конфигурация которого показана на рис. 2,а. Задача сформулирована в двумерной осесимметричной постановке. Рассматривается переходный процесс деформации магнитожидкостной пробки под действием приложенного стороннего давления.

Ламинарное течение несжимаемой ньютоновской жидкости (МЖ или воздух) в зазоре МЖГ характеризуется уравнением Навье-Стокса, которое составляется на основании второго закона Ньютона:

$$\rho[(\bar{v} \cdot \nabla)\bar{v}] = -\nabla p + \nabla \left( \eta \left( \nabla \bar{v} + (\nabla \bar{v})^T \right) \right) + \bar{F},$$

где  $\bar{v}$ ,  $p$ ,  $\rho$  и  $\eta$  – скорость, давление, плотность и динамическая вязкость МЖ соответственно;  $\bar{F}$  – внешние силы, действующие на жидкость.

В [6] показано, что при малых диаметрах валов сила тяжести не оказывает заметного влияния на процессы в МЖГ и в данной модели не учитывается. Следова-

тельно, для воздуха внешние силы равны нулю. На МЖ действует дополнительная магнитная сила

$$\bar{F} = \mu_0 M \nabla \bar{H},$$

где  $M$  – намагниченность МЖ;  $\bar{H}$  – напряженность магнитного поля.

Граничные условия, использованные для расчетной области, показаны на рис. 2,б. В качестве допущений при расчете принято, что вязкость МЖ постоянна и не зависит от величины магнитной индукции, скорости сдвига и температуры.

Решение задачи магнитостатики проведено по уравнениям

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J}, \quad \nabla \cdot \bar{A} = \mu \bar{H}, \quad \nabla \cdot \bar{B} = \mu \bar{H},$$

где  $\bar{A}$  – векторный магнитный потенциал;  $\bar{B}$  – вектор магнитной индукции;  $\mu$  – магнитная проницаемость материала.

Для сокращения времени расчета магнитные свойства стального зубца и МЖ приняты постоянными и заданы относительной магнитной проницаемостью, равной 1000 для стали и 1,2 для МЖ.

Граничные условия для расчета магнитного поля показаны на рис. 2,в и задаются через азимутальную составляющую векторного магнитного потенциала, величина которой меняется прямо пропорционально радиусу вала:

$$A_2 = \frac{r_{\text{вала}} B_{\text{ср}} b}{r}.$$

Для деформации магнитожидкостной пробки под действием центробежной силы, магнитного и приложенного стороннего давлений необходимо обеспечить возможность изменения границ расчетной области в процессе расчета.

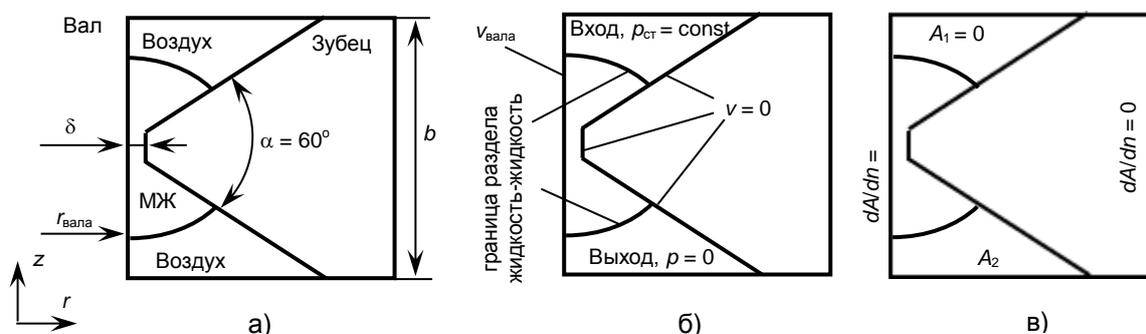


Рис. 2. Исследуемая область МЖГ: а – основные размеры; б – граничные условия для гидродинамического расчета; в – граничные условия при расчете магнитного поля

Положение и форма границ раздела между МЖ и воздухом отслеживаются с помощью граничного условия для двух несмешивающихся жидкостей Fluid-Fluid Interface, задаваемого уравнениями [15, 16]:

$$v_1 = v_2 + \left( \frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) M_f n_i;$$

$$n_i \tau_2 = n_i \tau_1 + f_{st};$$

$$v_{mesh} = \left( v_1 n_i - \frac{M_f}{\rho_1} \right) n_i,$$

где  $v_1$  и  $v_2$  – скорости МЖ и воздуха соответственно;  $v_{mesh}$  – скорость движения сетки на границе раздела;  $n_i$  – нормаль к границе раздела (направлена наружу от области с МЖ);  $\tau_1$  и  $\tau_2$  – тензоры полного напряжения в МЖ и воздухе;  $f_{st}$  – сила поверхностного натяжения на единицу площади;  $M_f$  – поток массы через границу раздела.

В качестве допущений принято, что поверхностное натяжение рассчитывается для случая керосин–воздух и поток массы через границу раздела отсутствует.

Для перемещения точек контакта МЖ со стальными элементами задана возможность скольжения границ раздела МЖ и воздуха по поверхностям вала и зубца с одновременной деформацией расчетной сетки. Если во время расчета качество элементов сетки в результате деформации становится неудовлетворительным, то происходит ее автоматическое перестроение во всей модели с учетом нового расположения границ. К сожалению, данный подход не позволяет получить изменение топологии модели (например, отрыв МЖ от одной из стальных поверхностей или отрыв части МЖ от общего объема), что является

возможным направлением дальнейшего развития работы.

В результате совместного расчета гидродинамического и магнитного полей можно получить распределение в рабочем зазоре МЖГ скорости и давления. Распределение давления внутри МЖ подчиняется уравнению Бернулли:

$$\rho \frac{v^2}{2} + p - \mu_0 \int_0^H M dH = const.$$

Свойства МЖ взяты на основе данных из научной лаборатории ИГЭУ: вязкость  $\eta = 1,33$  Па·с; плотность  $\rho = 1245$  кг/м<sup>3</sup>; намагиченность  $M_s = 38300$  А/м.

**Результаты.** Картина распределения магнитной индукции в МЖГ показана на рис. 3,а вместе с линиями равной индукции, по одной из которых выстраивается свободная поверхность магнитожидкостной пробки при неподвижном вале и отсутствии действующих на МЖ центробежных усилий. Анализ приведенного на рис. 3,б распределения величины магнитной индукции на поверхности вала показывает, что ее значение изменяется от 1,05 Тл в зоне минимального зазора до 0,185 Тл в межзубцовом пространстве и составляет 0,2 Тл на границе раздела МЖ и воздуха. Двадцатипроцентная разница в магнитной проницаемости материалов дает незначительный скачок индукции по величине на границе раздела.

По известной формуле аналитически рассчитаем максимальный удерживаемый перепад давления:

$$\begin{aligned} \Delta p &= M_s (B_{max} - B_{min}) = \\ &= 38300(1,02 - 0,22) = 30,64 \text{ кПа.} \end{aligned}$$

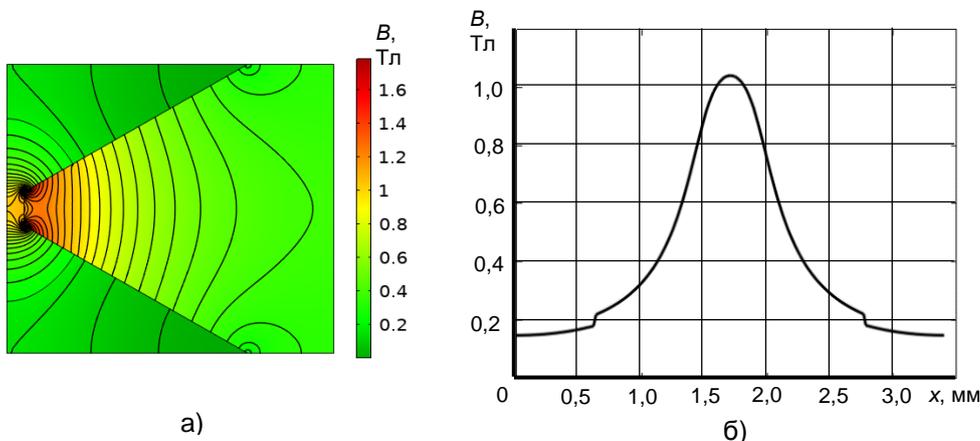


Рис. 3. Магнитное поле в МЖГ при  $r_{валат} = 32,5$  мм и  $\delta = 0,2$  мм: а – линии равной индукции; б – величина магнитной индукции на поверхности вала

Магнитная сила, возникающая в МЖ, находящейся в магнитном поле, создает в жидкости дополнительное давление, величину которого можно получить, если принять вал неподвижным и стороннее давление равным нулю.

На рис. 4,а показана картина распределения давления и линии равного давления в зазоре МЖГ при нулевой частоте вращения вала. Картина линий равного давления, связанного с объемной магнитной силой в МЖ, качественно повторяет распределение линий равной индукции в зазоре.

Деформация магнитожидкостной пробки, происходящая с ростом частоты

вращения вала от 0 до 20000 об/мин, что соответствует изменению линейной скорости на поверхности вала от 0 до 68 м/с, показана на рис. 5. С ростом линейной скорости поверхности вала увеличивается величина центробежных сил, действующих на элементарные объемы МЖ, которые отбрасывают жидкость от вала, что приводит к уменьшению длины жидкостной уплотняющей пробки, адсорбированной по его поверхности [1–3, 17].

При увеличении приложенного перепада давления происходит смещение магнитожидкостной пробки, границы которой по-прежнему выстраиваются по линиям равной индукции, как показано на рис. 6.

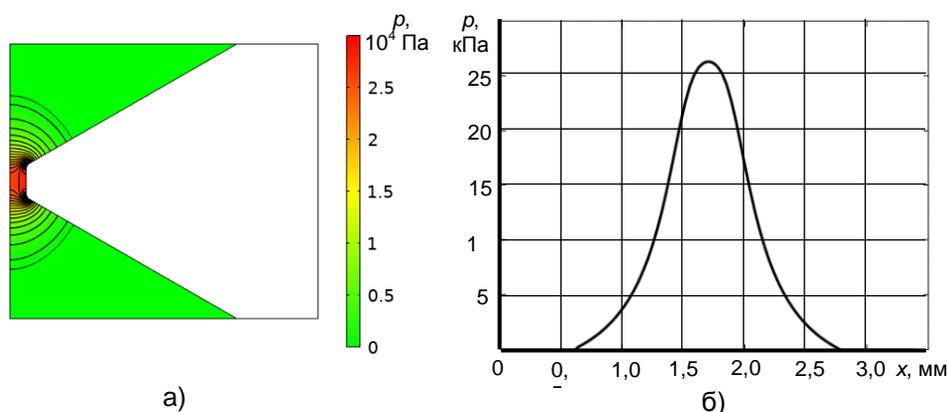


Рис. 4. Давление в МЖ при  $r_{\text{вала}} = 32,5$  мм и  $\delta = 0,2$  мм,  $n = 0$  об/мин: а – линии равного давления; б – распределение давления в МЖ на поверхности вала

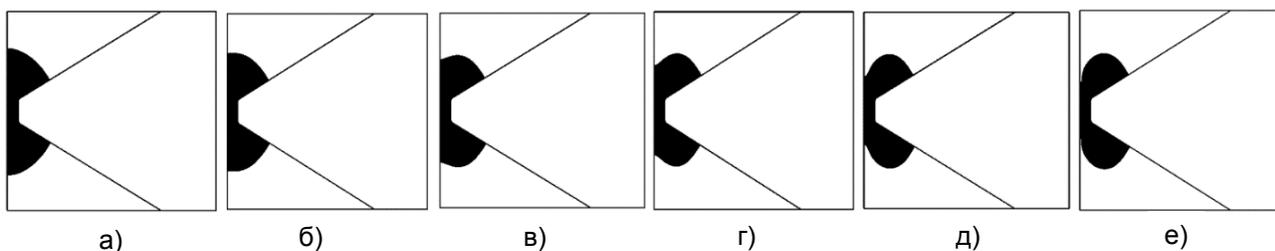


Рис. 5. Изменение границы магнитожидкостной пробки с ростом частоты вращения вала: а – 0 об/мин; б – 3000 об/мин; в – 6000 об/мин; г – 9000 об/мин; д – 15000 об/мин; е – 20000 об/мин

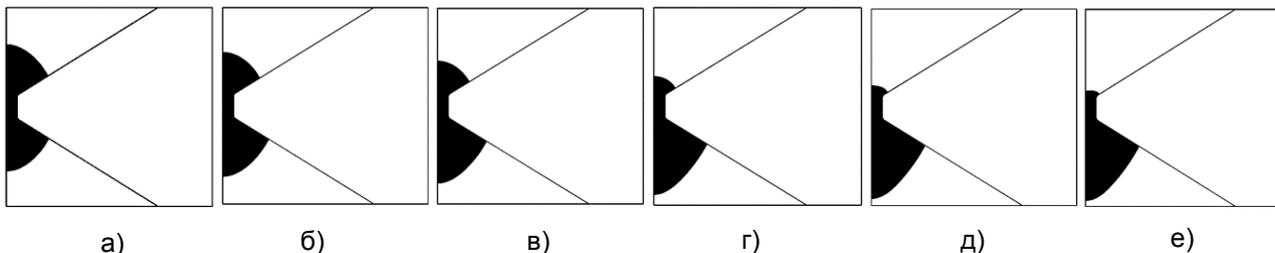


Рис. 6. Изменение границы магнитожидкостной пробки с ростом приложенного перепада давления при неподвижном вале: а – 0 кПа; б – 2,5 кПа; в – 5 кПа; г – 10 кПа; д – 15 кПа; е – 20 кПа

Так как по мере удаления от оси зубца магнитное поле достаточно быстро убывает, то начальное небольшое увеличение давления приводит к относительно сильной деформации магнитожидкостной пробки. С дальнейшим ростом приложенного давления верхняя граница магнитожидкостной пробки находится в области с частыми линиями равной индукции и движение границы замедляется.

Совместное действие центробежных сил и приложенного внешнего давления на форму поверхности магнитожидкостной пробки показано на рис. 7. При больших давлениях центробежные усилия практически не влияют на форму верхней поверхности магнитожидкостной пробки, так как она находится в области минимального зазора. Значительное искажение нижней границы, обусловленное большой разницей радиусов подвижной и неподвижной поверхностей, переводит точку контакта границы с валом в область больших индукций.

На рис. 8 показано распределение результирующего давления по поверхности вала. Сравнение зависимостей показывает, что на уменьшение максимального удерживаемого герметизатором давления влияет только баланс магнитных и центробеж-

ных сил в области минимального зазора под вершиной зубца. Несмотря на то, что деформация краев магнитожидкостной пробки смещает точку контакта МЖ с валом, это не оказывает заметного влияния на удерживаемый перепад давления. При большом приложенном перепаде давления объем МЖ, находящийся на стороне с большим давлением, небольшой и смещение точки контакта МЖ с валом с этой стороны незначительно.

На рис. 9 показано изменение максимального удерживаемого герметизатором перепада давления с ростом частоты вращения вала, полученное с использованием разных математических моделей. Линия 1 получена с использованием аналитической формулы [18]

$$\Delta p = M_s (B_{\max} - B_{\min}) - \frac{2\rho v_{\text{вала}}^2 \delta}{D_{\text{вала}}},$$

где  $D_{\text{вала}}$  – диаметр вала;  $v_{\text{вала}}$  – линейная скорость поверхности вала.

Первое слагаемое – это удерживаемый перепад давления при неподвижном вале, второе слагаемое – уменьшение удерживаемого перепада давления под действием центробежных сил

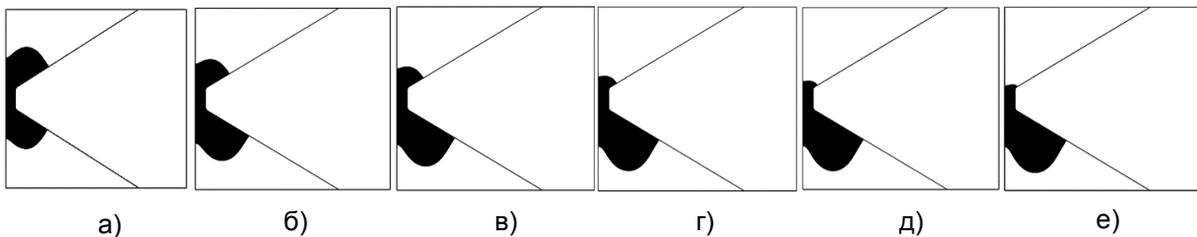


Рис. 7. Изменение границы магнитожидкостной пробки с ростом приложенного перепада давления при частоте вращения вала 9000 об/мин: а – 0 кПа; б – 2,5 кПа; в – 5 кПа; г – 10 кПа; д – 15 кПа; е – 20 кПа

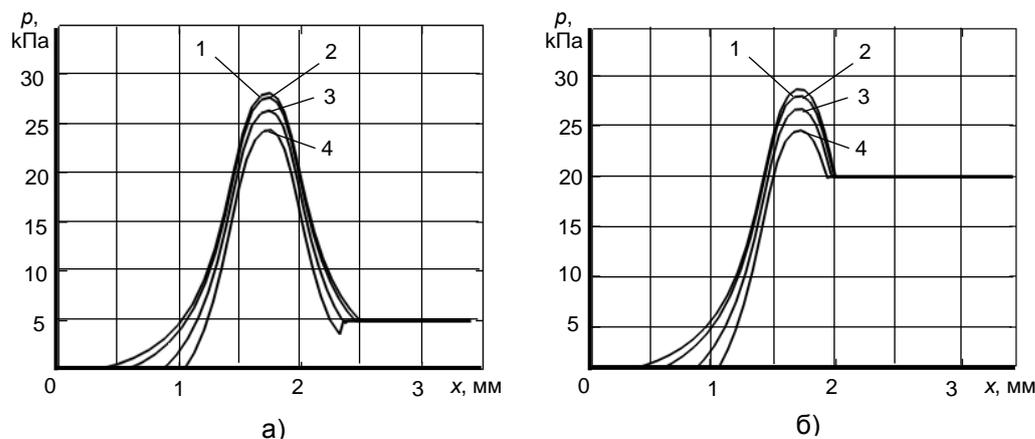


Рис. 8. Распределение давления в магнитожидкостной пробке по поверхности вала: а – удерживаемый перепад давления 5 кПа; б – удерживаемый перепад давления 20 кПа; 1 – частота вращения вала 0 об/мин; 2 – 3000 об/мин; 3 – 6000 об/мин; 4 – 9000 об/мин

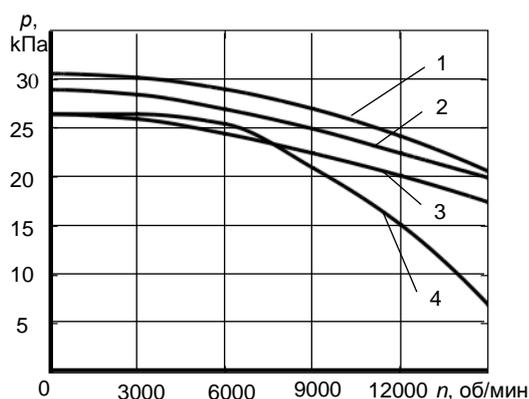


Рис. 9. Зависимость максимального удерживаемого перепада давления: 1 – аналитическое решение; 2 – магнитожидкостная пробка с учетом ее деформации; 3 – магнитожидкостная пробка без учета деформации; 4 – зазор полностью заполнен МЖ

Линия 2 построена на основе распределения давления по поверхности вала, полученного в результате расчета предложенной численной математической модели с учетом изменения поверхности магнитожидкостной пробки от центробежных сил и приложенного стороннего давления.

Линия 3 построена аналогично линии 2 с учетом изменения границ МЖ от центробежных сил, но без учета деформации от приложенного стороннего давления. Деформация магнитожидкостной пробки для данного случая показана на рис. 5.

Линия 4 построена на основе линий равного давления в МЖ, полученных в результате численного расчета с допущением о полном заполнении рабочего зазора жидкостью, как предложено в [14].

Сравнение кривых рис. 9 показывает, что учет деформации магнитожидкостной пробки позволяет максимально приблизиться к результатам, полученным по аналитическим формулам. Различие между зависимостями 1 и 2 связано с определением максимального перепада давления для неподвижного вала, и с ростом частоты вращения эта начальная разница давлений остается практически неизменной. Расхождение между графиками 1 и 2 не превышает 5 %.

Различие между линиями 2 и 3 связано с тем, что учет деформации МЖ под действием приложенного стороннего давления влияет на перераспределение магнитного поля в зазоре и приводит к увеличению значения магнитной индукции под вершиной зубца, а следовательно, и максимального удерживаемого перепада давления.

Резкое снижение удерживаемого перепада давления с ростом частоты вращения вала, получаемое при использовании модели, предложенной в [14] (рис. 9, линия 4), связано с большими центробежными усилиями, действующими на полностью заполняющий рабочий зазор объем МЖ, которые за счет внутренних напряжений «вытягивают» жидкость из области минимального зазора под вершиной зубца.

Для вала с радиусом 32,5 мм при увеличении частоты вращения до 15000 об/мин (линейная скорость 51 м/с) максимальный удерживаемый перепад давления только из-за влияния центробежных сил снизился на 32 %. В реальных условиях вязкостный разогрев МЖ приведет к еще более существенному снижению удерживаемого давления.

**Выводы.** Разработанная численная математическая модель для взаимосвязанного расчета магнитных и гидродинамических процессов с учетом деформации поверхности магнитожидкостной пробки позволяет оценить влияние центробежных усилий от вращающегося вала на удерживаемый МЖГ перепад давления.

Удерживаемый перепад давления, получаемый в результате расчета по аналитическим формулам, на всем диапазоне частот вращения получается выше, чем при численном расчете. Лучшее совпадение с аналитическим решением дает численный расчет с учетом деформации магнитожидкостной пробки под действием центробежной силы и приложенного перепада давлений. В этом случае разница в результатах не превышает 5 % и связана в первую очередь с определением удерживаемого перепада давления при неподвижном вале.

Допущение о полном заполнении рабочего зазора магнитной жидкостью сильно занижает удерживаемый перепад давления при больших частотах вращения. Однако сильная экономия времени на создание и расчет численной модели с данным допущением делает оправданным ее использование при малых (до 10 м/с) линейных скоростях на поверхности вала.

В качестве дальнейшего развития работы можно рассматривать учет влияния на удерживаемый МЖГ перепад давления изменения вязкостных и магнитных свойств МЖ из-за разогрева при вращении вала.

## Список литературы

1. **Магнитные** жидкости в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалев, Н.К. Мышкин и др.; под ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. – М.: Машиностроение, 1993. – 275 с.
2. **Морозов Н.А., Казаков Ю.Б.** Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. – Иваново, 2011. – 264 с.
3. **Сайкин М.С.** Магнитожидкостные герметизаторы технологического оборудования. – СПб.; М.; Краснодар: Лань, 2017. – 136 с.
4. **Казаков Ю.Б.** Герметизаторы на основе нанодисперсных магнитных жидкостей и их моделирование. – Иваново, 2010. – 184 с.
5. **Coaxial Twin-shaft Magnetic Fluid Seals Applied in Vacuum Wafer-Handling Robot** / C. Ming, W. Haiying, D.Yu, D. Penglei // *Chinese journal of mechanical engineering*. – 2012. – Vol. 25, no. 4. – P. 706–714. DOI: 10.3901/CJME.2012.04.706.
6. **Zhang H., Li D.** Analysis of Split Magnetic Fluid Plane Sealing Performance // *Journal of Magnetism*. – 2017. – Vol. 22(1). – P. 133–140. DOI: 10.4283/JMAG.2017.22.1.133.
7. **Hao F., Yang X., Sun P.** Design of Magnetic Circuit and Simulation of Magnetic Fluid Sealing with Three Magnetic Sources // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2020. – Vol. 740. – 012003. DOI: 10.1088/1757-899X/740/1/012003.
8. **Numerical** analysis of magnetic grease seal pole teeth optimization based on pressure bearing capacity / S. Li, R. Zheng, Q. Zhang, S. Li // *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. – 2021. – Vol. 1081. – 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/1081/1/012002.
9. **Two** stage magnetic fluid vacuum seal for variable radial clearance / S. Parmar, V. Raman, R.V. Upadhyay, K. Parekh // *Vacuum*. – 2020. – Vol. 172. – 109087. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.109087.
10. **Radionov A., Podoltsev A., Zahorulkoc A.** Finite-Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic-Fluid Seal for Rotational Shaft // *Procedia Engineering*. – 2012. – Vol. 39. – P. 327–338. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.038.
11. **Казаков Ю.Б.** Численное определение положения магнитной жидкости в магнито-жидкостном герметизаторе // *Электротехника*. – 2002. – № 1. – С. 51–55.
12. **Radionov A., Podoltsev A., Peczkis G.** The Specific Features of High-Velocity Magnetic Fluid Sealing Complexes // *Open Eng.* – 2018. – Vol. 8. – P. 539–544. DOI: 10.1515/eng-2018-0066.
13. **Numerical** Analysis on Boundary and Flow Regime of Magnetic Fluid in the Sealing Clearance With a Rotation Shaft / Y. Chen, D. Li, Z. Li, Y. Zhang // *IEEE Transactions on magnetism*. – 2019. – Vol. 55, no. 2 – 4600207. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2882162.
14. **Nesterov S.A., Stradomskii Yu.I., Belov V.S.** Study of Interconnected Physical Processes in the Magnetic Fluid Sealer // *Problemele energeticii regionale*. – 2021. – Vol. 3(51). – P. 1–9. DOI: 10.52254/1857-0070.2021.3-51.01.
15. **Scardovell R., Zalesk S.** Direct Numerical Simulation of Free Surface and Interfacial Flow // *Annu. Rev. Fluid Mech.* – 1999. – Vol. 31. – P. 567–603. DOI: 10.1146/annurev.fluid.31.1.567.
16. **COMSOL** CFD Module User's Guide [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://doc.comsol.com/5.6/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf> [Дата обращения 20.12.21].
17. **Numerical** analysis on the action of centrifuge force in magnetic fluid rotating shaft seals / J. Zoua, X. Lib, Y. Lua, J. Hu // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. – 2002. – Vol. 252. – P. 321–323.
18. **Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С.** Магнитные жидкости. – М.: Химия, 1989. – 240 с.

## References

1. Orlov, D.V., Mikhalev, Yu.O., Myshkin, N.K., Podgorkov, V.V., Sizov, A.P. *Magnitnye zhidkosti v mashinostroyenii* [Magnetic Fluids in Mechanical Engineering]. Moscow: Mashinostroyenie, 1993. 275 p.
2. Morozov, N.A., Kazakov, Yu.B. *Nanodispersnye magnitnye zhidkosti v tekhnike i tekhnologiyakh* [Nanodisperse Magnetic Fluids in Machinery and Processes]. Ivanovo, 2011. 264 p.
3. Saykin, M.S. *Magnitozhidkostnye germetizatory tekhnologicheskogo oborudovaniya* [Magnetorheological sealers of technological equipment]. Saint-Petersburg; Moscow; Krasnodar: Lan', 2017. 136 p.
4. Kazakov, Yu.B. *Germetizatory na osnove nanodispersnykh magnitnykh zhidkostey i ikh modelirovaniye* [Sealers based on nanodispersed magnetic fluids and their modeling]. Ivanovo, 2010. 184 p.
5. Ming, C., Haiying, W., Yu, D., Penglei, D. Coaxial Twin-shaft Magnetic Fluid Seals Applied in Vacuum Wafer-Handling Robot. *Chinese journal of mechanical engineering*, 2012, vol. 25, no. 4, pp. 706–714. DOI: 10.3901/CJME.2012.04.706.
6. Zhang, H., Li, D. Analysis of Split Magnetic Fluid Plane Sealing Performance. *Journal of Magnetism*, 2017, vol. 22(1), pp. 133–140. DOI: 10.4283/JMAG.2017.22.1.133.
7. Hao, F., Yang, X., Sun, P. Design of Magnetic Circuit and Simulation of Magnetic Fluid Sealing with Three Magnetic Sources. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2020, vol. 740, 012003. DOI: 10.1088/1757-899X/740/1/012003.
8. Li, S., Zheng, R., Zhang, Q., Li, S. Numerical Analysis of Magnetic Grease Seal Pole Teeth

Optimization Based on Pressure Bearing Capacity. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021, vol. 1081, 012002. DOI: 10.1088/1757-899X/1081/1/012002.

9. Parmar, S., Ramani, V., Upadhyay, R.V., Parekh, K. Two Stage Magnetic Fluid Vacuum Seal for Variable Radial Clearance. *Vacuum*, 2020, vol. 172, 109087. DOI: 10.1016/j.vacuum.2019.109087.

10. Radionov, A., Podoltsev, A., Zahorulok, A. Finite-Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic-Fluid Seal for Rotational Shaft. *Procedia Engineering*, 2012, vol. 39, pp. 327–338. DOI: 10.1016/j.proeng.2012.07.038.

11. Kazakov, Yu.B. Chislennoe opredelenie polozeniya magnitnoy zhidkosti v magnitno-zhidkostnom germetizatore [Numerical determination of the position of the magnetic fluid in a magnetorheological sealer]. *Elektrotehnika*, 2002, no. 1, pp. 51–55.

12. Radionov, A., Podoltsev, A., Peczkis, G. The Specific Features of High-Velocity Magnetic Fluid Sealing Complexes. *Open Eng*, 2018, vol. 8, pp. 539–544. DOI: 10.1515/eng-2018-0066.

13. Chen, Y., Li, D., Li, Z., Zhang, Y. Numerical Analysis on Boundary and Flow Regime of

Magnetic Fluid in the Sealing Clearance With a Rotation Shaft. *IEEE Transactions on magnetics*, 2019, vol. 55, no. 2, 4600207. DOI: 10.1109/TMAG.2018.2882162.

14. Nesterov, S.A., Stradomskii, Yu.I., Belov, V.S. Study of Interconnected Physical Processes in the Magnetic Fluid Sealer. *Problemele energeticii regionale*, 2021, no. 3(51), pp. 1–9. DOI: 10.52254/1857-0070.2021.3-51.01.

15. Scardovell, R., Zalesk, S. Direct Numerical Simulation of Free Surface and Interfacial Flow. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 1999, vol. 31, pp. 567–603. DOI: 10.1146/annurev.fluid.31.1.567.

16. *COMSOL CFD Module User's Guide*. Available at: <https://doc.comsol.com/5.6/doc/com.comsol.help.cfd/CFDModuleUsersGuide.pdf>.

17. Zoua, J., Lib, X., Lua, Y., Hu, J. Numerical Analysis on the Action of Centrifuge Force in Magnetic Fluid Rotating Shaft Seals. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2002, vol. 252, pp. 321–323.

18. Berkovskiy, B.M., Medvedev, V.F., Kravkov, M.S. *Magnitnye zhidkosti* [Magnetic fluids]. Moscow: Khimiya, 1989. 240 p.

## МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 517.9:66.021.1

### **Дмитрий Сергеевич Процко**

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», инструктор практического обучения, Россия, Воронеж, e-mail: protsko\_dmitriy@mail.ru

### **Сергей Юрьевич Панов**

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», доктор технических наук, профессор кафедры математики, Россия, Воронеж, e-mail: su-panov@yandex.ru

### **Анатолий Анатольевич Хвостов**

ФГБОУВО «Воронежский государственный технический университет», доктор технических наук, профессор кафедры прикладной математики и механики, Россия, Воронеж, e-mail: Khvtol1974@yandex.ru

### **Елена Алексеевна Шипилова**

Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», кандидат технических наук, доцент кафедры математики, Россия, Воронеж, e-mail: elen\_ship@list.ru@rambler.ru

## **Разработка математической модели тангенциальной регенерации фильтровальных перегородок малогабаритных пылеулавливающих аппаратов энергетических установок**

### **Авторское резюме**

**Состояние вопроса.** Вектор развития энергетики в настоящее время направлен на расширение используемых возобновляемых видов топлива. Одним из наиболее существенных последствий, связанных с сжиганием топлива, является поступление в атмосферу загрязняющих веществ. Особенно это актуально для малых энергетических установок, подведомственных Управлению коммунального хозяйства Министерства обороны РФ. Важным звеном решения проблемы, наряду с модернизацией действующего оборудования, является создание принципиально нового газоочистного оборудования, сочетающего такие характеристики, как высокая эффективность очистки, сниженное гидравлическое сопротивление и уменьшенные габариты установки. Совокупность этих вопросов обуславливает актуальность построения математических моделей функционирования фильтровальной аппаратуры.

**Материалы и методы.** Для решения поставленной задачи используется метод математического моделирования на основе математического аппарата аэрогидромеханики с применением  $k-\varepsilon$  модели турбулентности. Изучение влияния параметров на протекание процесса выполнено численными методами в программной среде вычислительной гидродинамики.

**Результаты.** Предложена математическая модель, позволяющая определять и строить поля давлений и скоростей в зазоре между корпусом фильтра и фильтрующим элементом при различных скоростях входного газового потока и дающая возможность оперативно оценивать степень засорения фильтра по динамике изменения давления на выходном патрубке фильтра. Полученные в ходе численного эксперимента результаты подтверждены лабораторными исследованиями.

**Выводы.** Разработанная математическая модель процесса тангенциальной регенерации фильтровальных перегородок позволяет оценить поля давлений и скоростей в зазоре, способствующие уносу частиц пыли, и тем самым прогнозировать эффективность фильтра в зависимости от удельной газовой нагрузки и ширины зазора. Результаты численных экспериментов согласуются с физическими представлениями о процессе и доказывают перспективность метода создания тангенциального потока для удаления осевших частиц дисперсной фазы с поверхности фильтровального элемента. Предложенная модель может быть использована в инженерной практике проектирования фильтров и управления процессом фильтрования.

**Ключевые слова:** математическое моделирование, численные методы, комплексы программ, тангенциальное фильтрование, поле давлений, поле скоростей

**Dmitriy Sergeevich Protsko,**

Military Education and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Practical Training Instructor, Russia, Voronezh, e-mail: protsko\_dmitriy@mail.ru

**Sergey Yuryevich Panov,**

Military Education and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N. E. Zhukovsky and Yu. A. Gagarin”, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Mathematics Department, Russia, Voronezh, e-mail: su-panov@yandex.ru

**Anatoly Anatolyevich Khvostov,**

Voronezh State Technical University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of Applied Mathematics and Mechanics Department, Russia, Voronezh, e-mail: Khvtol1974@yandex.ru

**Elena Alekseevna Shipilova**

Military Education and Scientific Center of the Air Force “Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin”, Candidate of Engineering Sciences, (PhD), Associate Professor of Mathematics Department, Russia, Voronezh, e-mail: elen\_ship@list.ru@rambler.ru

## **Development of mathematical model of tangential regeneration of filter partitions of small-sized dust collecting devices of power plants**

### **Abstract**

**Background.** The energy development vector is currently aimed at increasing application of renewable fuels. Air pollution is one of the most significant consequences of fuel combustion. The issue is of current importance for small power plants subordinate to the Department of Public Utilities of the Ministry of Defense of the Russian Federation. To solve the problem, it is necessary to both update the existing equipment and to develop fundamentally new gas cleaning equipment that have high cleaning efficiency, reduced hydraulic resistance and smaller size. Thus, these issues determine the relevance of development of mathematical models of filtering equipment operation.

**Materials and methods.** To solve the problem, the method of mathematical modeling is used. The model uses the mathematical apparatus of aerohydraulics using the  $k-\varepsilon$  turbulence model. The study of the influence of parameters on the flow of the process has been carried out by numerical methods in the computational fluid dynamics software environment.

**Results.** A mathematical model is proposed that allows us to determine and design pressure and velocity fields in the gap between the filter housing and the filter element at different speeds of the inlet gas flow. It makes possible to quickly assess the degree of clogging of the filter according to the dynamics of pressure changes at the outlet pipe of the filter. The results of the numerical experiment have been confirmed by laboratory studies.

**Conclusions.** The developed mathematical model of the process of tangential regeneration of filter baffles makes it possible to estimate the pressure and velocity fields in the gap that influence on the entrainment of dust particles. Thereby one can predict the efficiency of the filter depending on the specific gas load and the width of the gap. The results of numerical experiments are consistent with the physical concepts of the process. They prove the prospects of the method to create a tangential flow to remove the settled particles of the dispersed phase from the surface of the filter element. The developed model can be used in the engineering practice of designing filters and controlling the filtration process.

**Key words:** mathematical modeling, numerical methods, software packages, tangential filtering, pressure field, velocity field

**DOI:** 10.17588/2072-2672.2022.1.064-072

**Введение.** В современных условиях ужесточения экологического законодательства в области охраны атмосферы в промышленной энергетике актуальной является задача создания новых аппаратов очистки отходящих газов, удовлетворяющих выдвигаемым требованиям [1]. Особенно остро эта проблема стоит в энергетическом хозяйстве Министерства обороны РФ, где используются малые локальные энергетические установки, работающие зачастую на местных видах топлива (уголь, торф, мазут, древесина и т.п.) и выделяющие при горении загрязняющие вещества [2]. Для энергетических установок малой мощности необходима разработка малогабаритных высокоэффективных энергосберегающих газоочистных аппаратов, работающих при комбинации различных методов очистки.

Фильтры с пористыми перегородками имеют ряд преимуществ над другими аппаратами очистки газов (скрубберов, циклонов, электрофильтров), в особенности в более высокой степени очистки, меньшей зависимости характеристик работы аппарата от изменений параметров пылегазовых потоков [3]. Они могли бы частично решить проблему выбросов, однако сдерживающими факторами широкого применения данных устройств являются необходимость периодической очистки фильтровальной поверхности от накопившейся пыли и конструктивная сложность систем регенерации [4].

Одним из перспективных направлений в области разработки аппаратов очистки газов от механических примесей может стать сочетание фильтрования с силовым воздействием на поток, создающее дополнительное поле массовых сил, позволяющее улучшить условия очистки и восстановить пропускную способность фильтра самоочисткой фильтровальной перегородки от накопленного осадка. К таким устройствам относятся гидродинамические фильтры, реализующие принцип тангенциального фильтрования [5]. От традиционного фильтрования тангенциальное отличается тем, что очищаемая среда имеет касательную к

фильтровальной поверхности компоненту скорости  $v_k$  [6].

**Основные результаты.** Рассматривается комбинированный аппарат очистки (рис. 1), состоящий из цилиндрического корпуса 1, тангенциального патрубка подачи в аппарат пылегазового потока 5, конического днища 2 со штуцером удаления уловленной пыли 3, выходного патрубка 8. Выходной патрубок напрямую соединен с цилиндрическим фильтровальным элементом 4, изготовленным из пористого материала со связанной структурой слоя (керамика, металлокерамика, перфорированная фольга, металлические или полимерные жесткие сетки и т.п.).

На выходном патрубке крепится лопастное устройство по типу ветряного колеса, а патрубок с соединенным фильтровальным элементом имеет возможность вращения вокруг своей оси в подшипникоуплотнительном устройстве 7. Лопасти 6 ветряного колеса располагаются напротив тангенциального патрубка таким образом, чтобы поступающий через патрубок пылегазовый поток воздействовал на лопасти, заставляя вращаться фильтр-элемент.

Фильтровальный элемент, в свою очередь, концентрично помещен внутри неподвижно установленной в корпусе обечайки в виде эллиптического цилиндра 10 с зазором  $S$ , величина которого зависит от требуемой степени очистки фильтрующей поверхности.

Величина зазора подбирается из следующих соображений: чем больше слой осадка на фильтрующей поверхности, тем выше эффективность улавливания частиц, но и больше гидравлическое сопротивление; при незначительном слое осадка степень очистки низкая, как и гидравлическое сопротивление. Экспериментально или путем расчета подбирается величина зазора, которая при непрерывной регенерации фильтрующей поверхности обеспечивала бы сохранение на поверхности слоя осадка, при котором сохранялась бы высокая степень очистки при приемлемом гидравлическом сопротивлении.

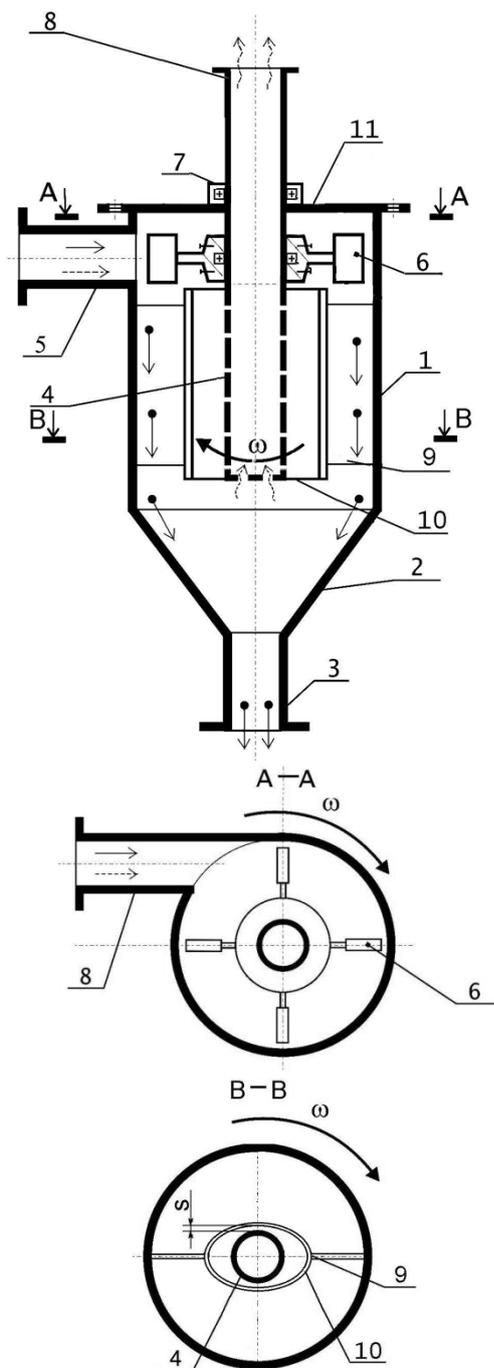


Рис. 1. Фильтр-циклон: 1 – цилиндрический корпус; 2 – коническое днище; 3 – штуцер удаления уловленной пыли; 4 – фильтровальный элемент; 5 – тангенциальный патрубок; 6 – лопасти; 7 – подшипнико-уплотнительное устройство; 8 – выходной патрубок; 9 – крепление обечайки; 10 – эллиптическая обечайка

Вращение фильтровальной трубы 4 вместе с ветряным колесом способствует созданию в зазоре S достаточно большой интермиттирующей движущей силы, которая обеспечивает непрерывную регенерацию фильтрующей поверхности и увеличение осевой составляющей скорости частиц

пыли, которая направляет частицы пыли в бункер, что повышает эффективность работы фильтр-циклона. Кроме того, наличие уменьшенного зазора между корпусом и обечайкой по большой оси эллиптической поверхности способствует увеличению тангенциальной составляющей скорости и, следовательно, общей эффективности очистки.

При работе устройства наблюдается непрерывное удаление осаждающейся на поверхности фильтровального элемента пыли.

Целью математического моделирования являлось определение влияния геометрических параметров на структуру течения в кольцевом зазоре.

Как было показано выше, с внешней стороны фильтровального элемента помещена обечайка в виде эллиптического цилиндра, обеспечивая заданную величину зазора между корпусом фильтрующего элемента и малой осью эллиптического сечения патрона (рис. 2).

В зависимости от угла поворота фильтрующего элемента, расстояние  $\varepsilon$  от кромки перегородки до поверхности фильтрующего элемента изменяется по закону

$$\varepsilon = \frac{ab}{\sqrt{a^2 \sin^2 \alpha + b^2 \cos^2 \alpha}} - r_{\phi}, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – угол поворота;  $a$  и  $b$  – полуоси эллипса (образующей цилиндра патрона фильтра);  $r_{\phi}$  – радиус фильтрующего элемента.

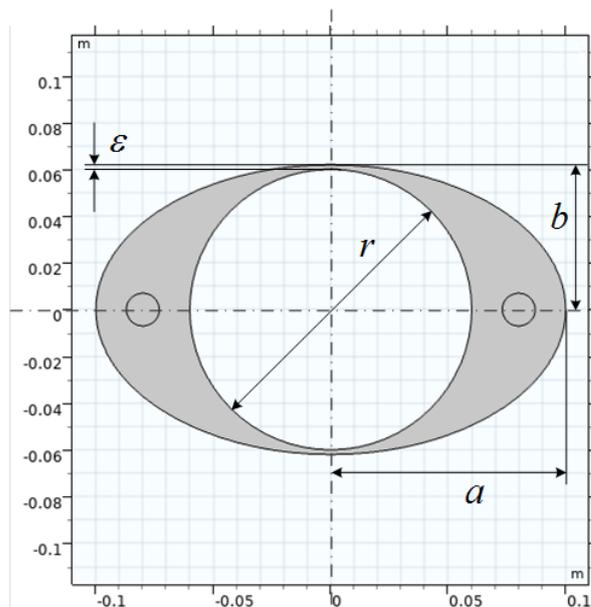


Рис. 2. Геометрическая схема сечения фильтра

Изменение величины зазора за один оборот показано на рис. 3, где пунктиром обозначен заданный рабочий диапазон угла поворота, в котором заданная скорость обеспечивается значением величины щелевого зазора между корпусом фильтрующего элемента и узкой частью эллиптического сечения патрона.

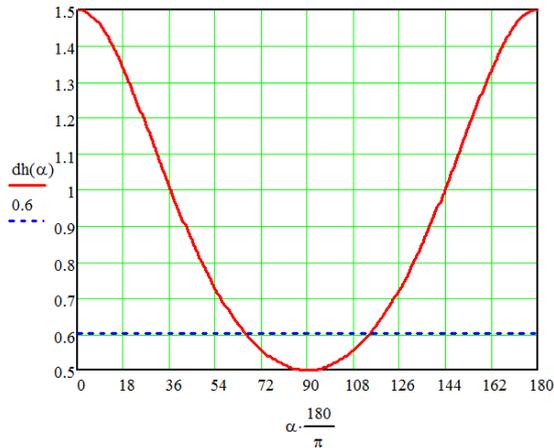


Рис. 3. Изменение величины щелевого зазора при повороте фильтрующего элемента на 180 град. ( $a = 3$  см,  $b = 2$  см,  $r = 1,5$  см)

Условие для расчета необходимого угла, обеспечивающего заданную скорость (величину щелевого зазора), определяется из условия

$$\arcsin \left[ \sqrt{\frac{\left(\frac{ab}{h_{\text{пер}} + r_{\text{ф}}}\right)^2 - b^2}{a^2 - b^2}} \right] \leq \alpha \leq \pi - \arcsin \left[ \sqrt{\frac{\left(\frac{ab}{h_{\text{пер}} + r_{\text{ф}}}\right)^2 - b^2}{a^2 - b^2}} \right], \quad (2)$$

где  $h_{\text{пер}}$  – величина щелевого зазора.

Чтобы определить требуемое значение  $h_{\text{пер}}$ , необходимо рассчитать поле скоростей в зазоре. Для этого требуется математическая модель, описывающая поля скоростей в пространстве между корпусом фильтра и фильтрующим элементом. Пренебрегая расходом воздуха через фильтрующий элемент в режиме регенерации, представлена расчетная схема камеры фильтрования (рис. 4). Температура воздуха принята равной  $25$  °С,

плотность воздуха  $1,1839$  кг/м<sup>3</sup>, вязкость воздуха  $18,6$  мкПа·с. Размеры фильтра: патрон – эллиптический цилиндр с полуосями  $a = 3$  см,  $b = 2$  см,  $r = 1,5$  см, длина фильтра  $L = 20$  см. Скорость потока в щелевом зазоре достигала  $5$ – $25$  м/с. Расчетный критерий Рейнольдса для этих условий составил порядка  $130000$ , что соответствует турбулентному режиму течения.

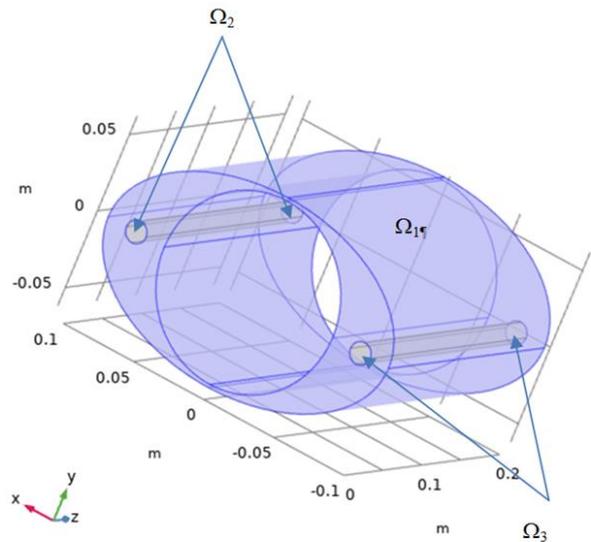


Рис. 4. Расчетная схема камеры фильтрования

Уравнения движения и неразрывности для турбулентного режима ( $k$ - $\varepsilon$  модель турбулентности) течения сплошной среды в установившемся изотермическом режиме [8–11] с граничными условиями на стенках  $\Omega_1: \mathbf{u} = 0$ , на входных каналах  $\Omega_2: \mathbf{u} = -u_0 \mathbf{n}$ , на выходных каналах  $\Omega_3: [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}]\mathbf{n} = P_a \mathbf{n}$  имеют следующий вид:

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = \nabla [-p\mathbf{I} + \mathbf{K}], \\ \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \\ \mathbf{K} = (\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} (\mu + \mu_T) (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{I} - \frac{2}{3} \rho k \mathbf{I}, \\ \mu_T = \rho_b C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}, \\ \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) k = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon, \\ \rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \left[ \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, \end{cases} \quad (3)$$

где  $\mathbf{u}$  – вектор скорости;  $\mathbf{n}$  – вектор нормали к соответствующей границе расчетной области;  $p$  – давление;  $P_a$  – атмосферное давление;  $\mathbf{K}$  – тензор вязких напряжений;  $\mathbf{I}$  – единичный тензор;  $u_0$  – скорость входного потока;  $\rho$  – плотность воздуха;  $\mu$  – динамическая вязкость;  $\mu_T$  – турбулентная динамическая вязкость;  $k$  – кинетическая энергия турбулентности;  $\varepsilon$  – турбулентная диссипация;  $C_{\mu}$ ,  $C_{\varepsilon 1}$ ,  $C_{\varepsilon 2}$ ,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\varepsilon$  – эмпирические коэффициенты [11];  $P_k$  – генерация; верхний индекс T – операция транспонирования.

Математическая модель (3) позволяет оценить поля давлений и скоростей в установившемся режиме в зазоре между корпусом фильтрующего элемента и узкой частью эллиптического сечения патрона. Это дает возможность подобрать необходимые геометрические размеры и скорость воздуха на входе в фильтр, обеспечивающие необходимую скорость воздуха в зазоре и унос частиц пыли. Также модель позволяет оценить давление на выходных патрубках при уменьшении размера щелевого зазора за счет роста пылевого слоя, что может быть использовано для косвенного контроля степени засоренности фильтра и прогноза времени его регенерации. Результаты моделирования представлены на рис. 5, 6.

Решение (3) осуществлено численно методом конечных элементов.

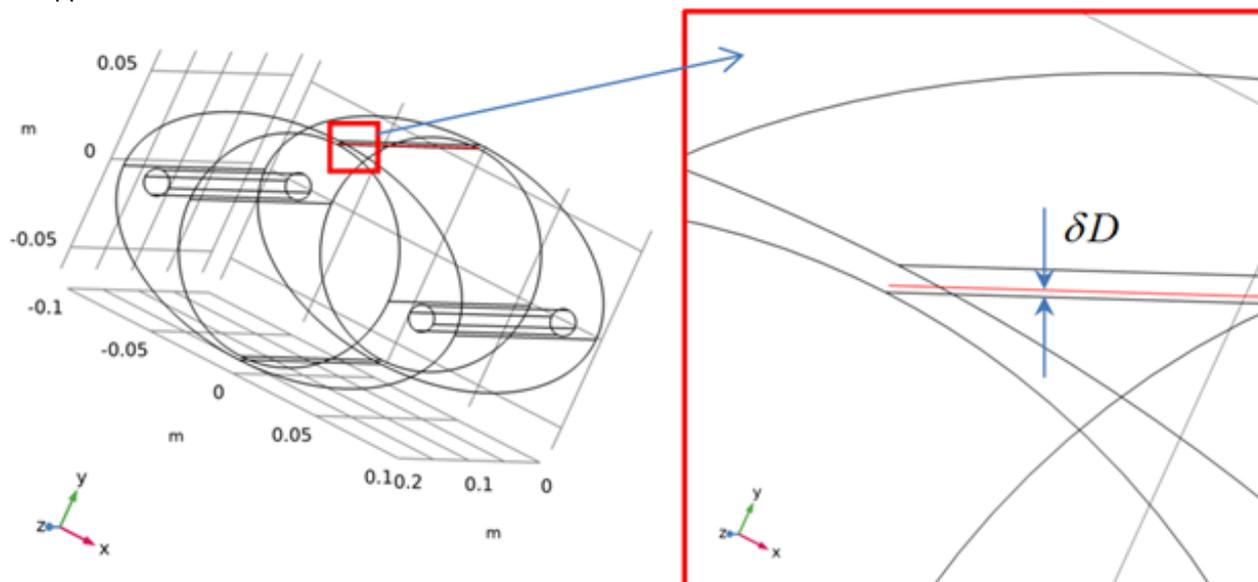


Рис. 5. Расположение контрольной линии для оценки скорости и давления на поверхности пылевого слоя

Для оценки скорости на поверхности пылевого слоя рассмотрено распределение скорости вдоль прямой линии, соединяющей точки с координатами  $(0; r + \delta D; 0)$  и  $(0; r + \delta D; L_f)$  в декартовой системе координат (рис. 5), где  $\delta D$  соответствует толщине пылевого слоя,  $L_f$  – длина корпуса фильтра. Скорость и давление на этом расстоянии от фильтрующего элемента характеризуют силы, действующие на слой пыли без учета гидравлического сопротивления этого слоя (рис. 6).

Таким образом, задаваясь входной скоростью потока воздуха в режиме регенерации, можно подобрать необходимую скорость воздуха в зазоре, обеспечивающую унос частиц пыли. Для оценки зависимости чувствительности изменения давления на выходных патрубках к толщине слоя пыли построена зависимость среднеинтегральной величины давления от толщины при разных значениях скорости потока на входе в фильтр (рис. 7).

Анализ полученных зависимостей (рис. 6) показывает, что скорость воздуха распределена практически равномерно по координате  $z$  и может быть изменена с помощью скорости входного потока в корпус фильтра. Это дает возможность управления процессом регенерации фильтра.

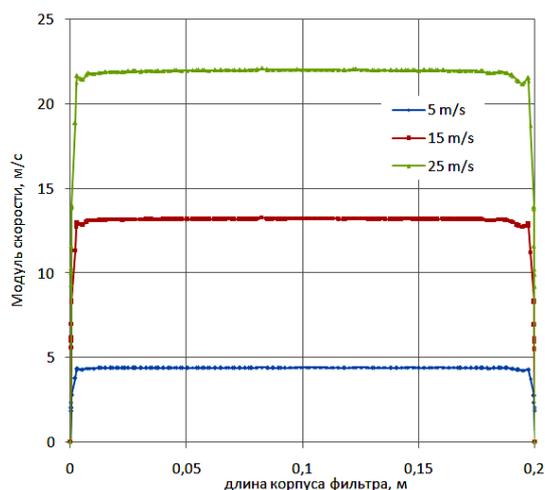


Рис. 6. Распределение скорости по длине контрольной линии

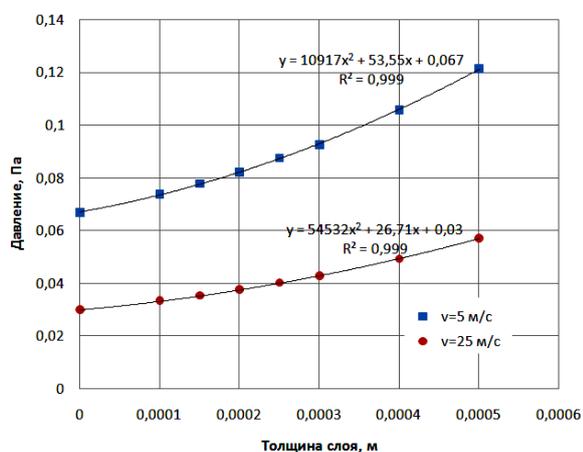


Рис. 7. Зависимость давления от толщины пылевого слоя

Анализ зависимостей (рис. 7) показывает, что существует тесная связь между толщиной пылевого слоя и давлением в камере фильтра. При этом для заданных геометрических размеров и скорости входного потока эта зависимость описывается многочленом второго порядка с коэффициентом корреляции не меньше 0,997, что дает возможность использовать значение этого давления для косвенной оценки степени засоренности фильтра. Это соответствует научным представлениям о рассматриваемом процессе.

Для верификации математического моделирования и подтверждения принятых научных положений были проведены экспериментальные исследования на модельном фильтре с тангенциальным входом (рис. 8).

При проведении экспериментов использован цилиндрический металлокерамический фильтрующий элемент  $\varnothing 40 \times 4$  мм

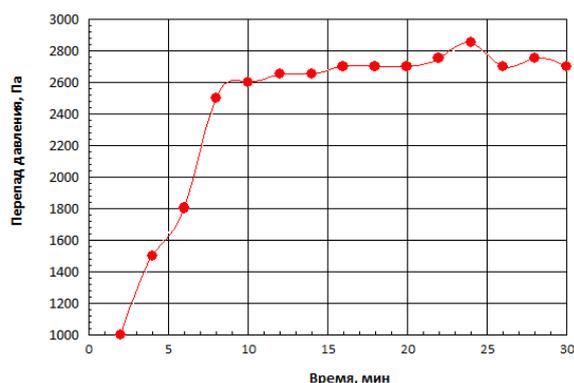
длиной 100 мм. Материал фильтра нержавеющая сталь ОХ18Н10 с фракциями  $< 0,063$  мм. Скорость во входном патрубке изменялась в диапазоне  $w = 5\text{--}25$  м/с. Начальное запыление  $1,5$  г/м<sup>3</sup>, пыль – зола (медианный размер  $d_m = 30$  мкм).



Рис. 8. Модельный фильтр

При испытаниях исследовались аэродинамические характеристики фильтра при различных значениях ширины зазора перегородки  $s = 2\text{--}10$  мм.

Приведенная на рис. 9 характеристика отражает работу фильтра в режиме саморегенерации. Анализ графика показывает, что через определенный интервал времени наступает равновесный режим, при котором количество частиц пыли, поступающих на фильтр, примерно совпадает с количеством частиц, удаляемых находящим потоком с поверхности фильтровальной перегородки.

Рис. 9. Зависимость  $\Delta P = f(\tau)$  проточного фильтра

На рис. 10 показано поле скоростей, полученное при аэродинамических измерениях по сечению аппарата в зазоре с помощью прецизионного термоанемометра.

Построенные поля скоростей показывают значения локальных скоростей, которые характеризуются уменьшением скорости при

движении от входного патрубка к периферии фильтровальной перегородки и увеличением скорости с уменьшением зазора.

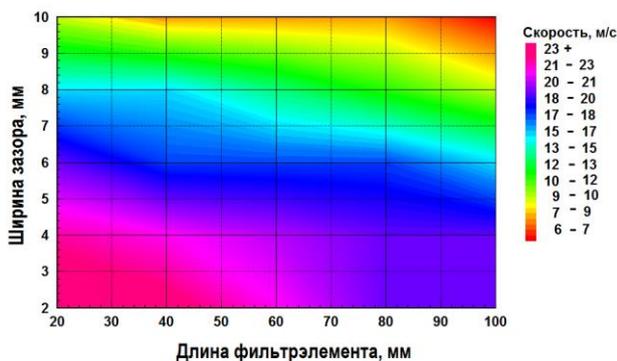


Рис. 10. Распределение поля скоростей в фильтре в режиме регенерации

**Выводы.** Результаты численного моделирования течения газа в зазоре между вращающимся цилиндрическим фильтровальным элементом и эллиптической обечайкой в трехмерной постановке и расчеты поля давлений и скоростей в зазоре между корпусом фильтра и фильтрующим элементом при различных скоростях входного газового потока в натурном эксперименте подтверждают, что при заданном угле поворота в эллиптической обечайке создается величина зазора, обеспечивающая гидродинамический поток, реализующий унос частиц пыли при одновременном сохранении приемлемого гидродинамического сопротивления. Построенная на основе вычислительного эксперимента зависимость давления на выходном патрубке от толщины пылевого слоя и, следовательно, степени засорения фильтра показывает, что повышение эффективности работы гидродинамического фильтра в заданном режиме возможно за счет выбора геометрических параметров фильтра (величины зазора, толщины фильтровального слоя, габаритов корпуса и т.д.), а также режимов его работы (объемного расхода, скорости вращения).

Внедрение фильтр-циклонов с тангенциальной регенерацией позволит частично (за счет удаления твердых частиц) решить экологическую проблему использования малых энергетических установок.

#### Список литературы

1. **Жабо В.В.** Охрана окружающей среды на ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 2012. – 240 с.

2. **Александров С.В., Макаrchuk Г.В., Медведева Л.В.** Экологические аспекты при работе дизельной теплоэлектростанции с активным котлом-утилизатором высокотемпературного кипящего слоя // Научно-аналитический журнал «Вестник Санкт-Петербургского университета Государственной противопожарной службы МЧС России». – 2019. – № 1. – С. 51–59.

3. **Расчет** и выбор пылеулавливающего оборудования: учеб. пособие / В.А. Горемыкин, М.К. Аль-Кудях, Ю.В. Красовицкий и др. – Воронеж: Воронежская государственная архитектурно-строительная академия, 2000. – 326 с.

4. **Белых О.Н., Зинковский А.В., Момотов В.С.** Особенности процесса регенерации фильтровальных перегородок // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. – 2015. – № 1(63). – С. 175–179.

5. **Изучение** процесса тангенциального фильтрования с низкой движущей силой при разделении пылегазовых потоков / Ю.Н. Шаповалов, Ю.В. Красовицкий, Д.В. Никитенко, О.А. Панова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2007. – № 3. – С. 11–12.

6. **Девисилов В.А., Шарай Е.Ю.** Гидродинамическое фильтрование // Безопасность в техносфере. – 2015. – № 3. – С. 68–80.

7. **Заявка № 2021109277/04(020023)** Российская Федерация, МКИ кл5 В01D46/02 (2006.01) В01D46/24 (2006.01) В04С9/00 (2006.01). Фильтр-циклон / Д.С. Процко, А.А. Хвостов, А.А. Бобков, С.В. Шахов, С.Ю. Панов (РФ); заявитель ФГБОУВО «Воронежский государственный университет инженерных технологий»; № 2021109277/04(020023); заявл. 05.04.2021.

8. **Лойцянский Л.Г.** Механика жидкости и газа: учеб. для вузов. – 7-е изд. – М.: Дрофа, 2003. – 840 с.

9. **Методы** математического моделирования окружающей среды / А.В. Колдоба, Ю.А. Повещенко, Е.А. Самарская, В.Ф. Тишкин. – М.: Наука, 2000. – 256 с.

10. **Гарбарук А.В., Стрелец М.И., Шур М.Л.** Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений: учеб. пособие. – СПб.: Изд-во Политех. ун-та, 2012. – 88 с.

11. **Авраменко М.И.** О  $k-\epsilon$  модели турбулентности. – 2-е изд., перераб. и доп. – Снежинск: Изд-во РФЯЦ – ВНИИТФ, 2010. – 102 с.

#### References

1. Zhabo, V.V. *Okhrana okruzhayushchey sredy na TES i AES* [Environmental protection at thermal power plants and nuclear power plants]. Moscow: Energoatomizdat, 2012. 240 p.

2. Aleksandrov, S.V., Makarchuk, G.V., Medvedeva, L.V. *Ekologicheskie aspekty pri rabote dizel'noy teploelektrostantsii s aktivnym kotlom-utilizatorom vysokotemperaturnogo kipyashchego sloya* [Environmental issues during operation of a

diesel power plant with active high-temperature fluidized bed waste heat boiler]. *Nauchno-analiticheskiy zhurnal «Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta Gosudarstvennoy protivopozharnoy sluzhby MChS Rossii»*, 2019, no. 1, pp. 51–59.

3. Goremykin, V.A., Al'-Kudakh, M.K., Krasovitskiy, Yu.V., Boldyrev, A.M., Shapovalov, Yu.N. *Raschet i vybor pyleulavlivayushchego oborudovaniya* [Design and selection of dust collecting equipment]. Voronezh: Voronezhskaya gosudarstvennaya arkhitekturno-stroitel'naya akademiya, 2000. 326 p.

4. Belykh, O.N., Zinkovskiy, A.V., Momotov, V.S. *Osobennosti protsessa regeneratsii fil'troval'nykh peregorodok* [Characteristic properties of regeneration process of filter-shaft partitions]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta inzhenernykh tekhnologiy*, 2015, no. 1(63), pp. 175–179.

5. Shapovalov, Yu.N., Krasovitskiy, Yu.V., Nikitenko, D.V., Panova, O.A. *Izuchenie protsessa tangentsial'nogo fil'trovaniya s nizkoy dvizhushchey siloy pri razdelenii pylegazovykh potokov* [Study of process of tangential filtration with a low driving force in case of dust and gas flows separa-

tion]. *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie*, 2007, no. 3, pp. 11–12.

6. Devisilov, V.A., Sharay, E.Yu. *Gidrodinamicheskoe fil'trovanie* [Hydrodynamic filtration]. *Bezopasnost' v tekhnosfere*, 2015, no. 3, pp. 68–80.

7. Protsko, D.S., Khvostov, A.A., Bobkov, A.A., Shakhov, S.V., Panov, S.Yu. *Fil'tr-tsiklon* [Filter cyclone]. Zayavka № 2021109277/04(020023) RF, 2021.

8. Loytsyanskiy, L.G. *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid and gas mechanics]. Moscow: Drofa, 2003. 840 p.

9. Koldoba, A.V., Poveshchenko, Yu.A., Samarskaya, E.A., Tishkin, V.F. *Metody matematicheskogo modelirovaniya okruzhayushchey sredy* [Methods of mathematical modeling of the environment]. Moscow: Nauka, 2000. 256 p.

10. Garbaruk, A.V., Strelets, M.I., Shur, M.L. *Modelirovanie turbulentnosti v raschetakh slozhnykh techeniy* [Modeling turbulence in complex flow calculations]. Saint-Petersburg: Izdatel'stvo Politekhnicheskogo universiteta, 2012. 88 p.

11. Avramenko, M.I. *O k-ε modeli turbulentnosti* [On the k-ε model of turbulence]. Snezhinsk: Izdatel'stvo RFYaTs – VNIITF, 2010. 102 p.

---

## ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

### Выпуск 1

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-82616 от 18.01.2022 г.

Подписано в печать 10.02.2022. Выход в свет 28.02.2022. Формат 60x84 1/8.

Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 9,21. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Адрес редакции и издательства: Ивановский государственный энергетический университет, 153003, Ивановская область, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.  
Типография ООО «ПресСто», 153025, Ивановская обл., г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, оф. 307.