



Ивановский государственный энергетический университет

Вестник Ивановского государственного энергетического университета (Вестник ИГЭУ)

Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta (Vestnik IGEU)

Журнал издается с 2001 года

ISSN 2072-2672

Индекс 18079

Вып. 5 /2020

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

А.Д. Брекоткина, Е.Ю. Семакина, П.Н. Броднев, В.А. Черников. Обоснование нестандартной геометрии выходного тракта ЦНД паровой турбины на примере К-300-240-2ЛМЗ.....**5**

А.Д. Липагина, А.И. Хайбуллина, А.А. Сиянин, В.К. Ильин. Эффективность очистки пучка труб низкочастотным пульсационным потоком с твердыми включениями..... **14**

В.А. Черников, Э.Л. Китанин, Е.Ю. Семакина, Е.Э. Китанина. Теоретическое исследование применения выходного диффузора газовой турбины в качестве пароперегревателя парового контура комбинированной парогазовой установки.....**26**

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

А.Л. Куликов, Д.И. Бездушный, В.Ю. Осокин. Применение линейного дискриминантного анализа для классификации аварийных режимов электрической сети.....**38**

О.С. Мельникова, В.С. Кузнецов. Метод расчета электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов.....**48**

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

А.Е. Барочкин, А.Н. Беляков, Х. Отвиновски, Т. Wylecial, Е.В. Барочкин. Идентификация модели многоступенчатой классификации смеси разнородных компонентов.....**56**

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Е.Р. Пантелеев, А.А. Мукучян, М.А. Кузнецов, А.Л. Алыкова. Метод формирования контекстной помощи пользователю компьютерного приложения в процессе решения прикладной задачи.....**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

Issue 5 /2020

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. Panteleev, 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

A.D. Brekotkina, E.Yu. Semakina, P.N. Brodnev, V.A. Chernikov. Justification of non-standard geometry of exhaust duct of steam turbine low pressure cylinder: case study of K-300-240-2 LMZ.....**5**

A.D. Lipagina, A.I. Khaibullina, A.A. Sinyavin, V.K. Il'in. Efficiency of tube bundle cleaning by low-frequency flow pulsations with solid particles.....**14**

V.A. Chernikov, E.L. Kitanin, E.Yu. Semakina, E.E. Kitanina. Theoretical study of the application of the outlet diffuser of a gas turbine as a steam circuit superheater of a combined gas-steam plant.....**26**

ELECTRICAL POWER ENGINEERING

A.L. Kulikov, D.I. Bezdushnii, V.Y. Osokin. Application of linear discriminant analysis for classification of electrical grid emergency states.....**38**

O.S. Melnikova, V.S. Kuznetsov. Method of calculating the electric strength of oil channels of the main insulation of power transformers.....**48**

METHODS OF MATHEMATICAL SIMULATION

A.Ye. Barochkin, A.N. Belyakov, H. Otwinowski, T. Wylecial, E.V. Barochkin. Computational and experimental study of classification of a mixture of dissimilar components.....**56**

COMPUTER SCIENCE AND INFORMATION TECHNOLOGIES

E.R. Panteleev, A.A. Mukuchan, M.A. Kuznetzov, A.L. Alykova. Method of context-dependent assistance for software user solving an applied task.....**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 621.165

Анастасия Дмитриевна Брекоткина

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), магистр высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: brekotkina.ad@gmail.com

Елена Юрьевна Семакина

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), кандидат технических наук, доцент высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: g.semakinalena@gmail.com

Павел Николаевич Броднев

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), кандидат технических наук, доцент высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: pbrodnev@mail.ru

Виктор Александрович Черников

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» (СПбПУ), доктор технических наук, профессор высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: viktor.chernikov@gmail.com

Обоснование нестандартной геометрии выходного тракта ЦНД паровой турбины на примере К-300-240-2 ЛМЗ

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время потери кинетической энергии в выходных трактах ЦНД значительны, так как внутри них расположены многочисленные распорные стержни и направляющие пластины. Необходим принципиально новый подход к проектированию конструкции выходных трактов ЦНД, исключающий внутренние элементы в проточной части и обеспечивающий снижение потерь за счет улучшения формы диффузора и сборной камеры.

Материалы и методы. Моделирование течения в рассматриваемых вариантах конструкции выходного тракта проведено численным методом RANS с моделью турбулентности SST. Для валидации CFD-модели использованы результаты предыдущих экспериментальных исследований модели базового варианта конструкции. Сравнение проведено по интегральным аэродинамическим характеристикам выходного тракта.

Результаты. Для базового варианта конструкции выходного тракта, варианта без внутренних элементов, а также для варианта без внутренних элементов и с новой геометрией сборной камеры по результатам численного эксперимента получены распределения давлений и векторные поля скоростей в выходном сечении патрубка, по которым определены интегральные характеристики выходного тракта. Доказано преимущество выхлопного тракта без внутренних элементов и с новой формой сборной камеры по интегральным характеристикам: коэффициенту внутренних потерь выходного

тракта; коэффициенту кинематической неравномерности потока; коэффициенту восстановления давления в осерадиальном диффузоре.

Выводы. Предложенный новый подход к формированию геометрии выходных трактов ЦНД обеспечивает повышение их аэродинамических качеств при проектировании новых паровых турбин большой мощности для работы в составе ТЭС и АЭС. Выигрыш от снижения потерь энергии в одном тракте многократно увеличивается, так как в современных паровых турбинах количество потоков ЦНД может достигать восьми.

Ключевые слова: паровая турбина, выхлопной патрубок, диффузор, аэродинамика, энергетические потери

Anastasiia Dmitrievna Brekotkina

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Master degree student of Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: brekotkina.ad@gmail.com

Elena Yur'evna Semakina

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: g.semakinalena@gmail.com

Pavel Nikolaevich Brodnev

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: pbrodnev@mail.ru

Viktor Aleksandrovich Chernikov

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: viktor.chernikov@gmail.com

Justification of nonstandard geometry of exhaust duct of steam turbine low pressure cylinder: case study of K-300-240-2 LMZ

Abstract

Background. Presently the losses of kinetic energy in the exhaust duct of low-pressure cylinder are considerable, since numerous spacer bars and directing plates are located inside. A fundamentally new approach is required to design the exhaust duct of LPC without internal elements in water passage and providing the decline of losses due to improvement of the diffuser form and collapsible chamber.

Materials and methods. The flow modeling in the considered exhaust duct design was carried out by the numerical RANS method with the SST turbulence model. To validate the CFD model, the results of the previous experimental studies of the basic design model were used. The comparison of the integral aerodynamic characteristics of the exhaust duct was carried out.

Results. For the basic variant of the exhaust duct, the variant without internal elements, and also for the variant without internal elements and with new geometry of the collapsible chamber, according to the results of the numeral experiment, distribution of pressure and vector fields of speeds in the exhaust nozzle are received and the integral parameters of the exhaust duct are defined. Advantage of the integral descriptions of the exhaust duct without internal elements and with a new form of collapsible chamber is proven. They are the coefficient of internal losses of the exhaust duct, the coefficient of kinematics unevenness of the stream, and the coefficient of repressuring in an axial-radial diffuser.

Conclusions. It has been established that a new approach of geometry of the exhaust duct of LPC provides the improvement of their aerodynamic qualities when designing new high-powered steam-turbines to operate in TPP and NPP. The advantage of losses decline of energy in the exhaust duct is multiple, because the number of LPC streams in modern steam-turbines can amount up to eight.

Key words: steam turbine, exhaust nozzle, diffuser, aerodynamics, power losses

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.005-013

Введение. Проектирование выходных трактов (ВТ) мощных паровых турбин ведется в настоящее время с ориентацией в основном на экспериментальные данные, полученные на модельных стендах

при постоянных параметрах потока во входном сечении тракта [1–4]. Однако, согласно опыту эксплуатации и данным натурных испытаний ВТ мощных паровых турбин, коэффициенты потерь ВТ дей-

ствующих турбоустановок оказываются заметно большими, чем по результатам экспериментов на модельных стендах. Одна из главных причин указанного различия в коэффициентах потерь – радиальная и окружная неравномерности параметров на входе в реальный патрубок, существенно влияющие на трехмерный характер течения в ВТ [5–7].

По результатам экспериментальных исследований выходных трактов «диффузор–патрубок» [8–10], основным источником потерь являются многочисленные внутренние элементы (пластины и стержни), расположенные в проточной части выходного тракта. Пластины призваны перераспределять поток в патрубке. Стержни – обеспечивать его прочность. В [9] и [10] представлены результаты испытаний выходного тракта «диффузор–патрубок» для двухвальной ГТУ. Ее выходной тракт отличается от выходного тракта ЦНД более развитым диффузором. Но и в такой конструкции также происходит интенсивное окружное перераспределение потока, но наблюдается оно в диффузоре, где располагаются силовые стойки, что тоже ведет к дополнительным потерям.

Поиск новых геометрических форм проточных частей входных трактов с односторонним отводом рабочего тела ведется как на самих предприятиях, так и научно-исследовательскими организациями по заказу промышленности [2, 11, 12]. Значительные результаты в оптимизации проточных частей выходных трактов достигнуты в последние годы с помощью численного моделирования [13–18].

Необходимость уменьшения коэффициента потерь и организации более равномерного в окружном направлении отвода пара из тракта обуславливает актуальность выбранной темы.

Целью данной работы является обоснование использования геометрии выходного тракта, отличной от стандартной конструкции выходных трактов «диффузор–патрубок» с односторонним отводом, в целях снижения коэффициента внутренних потерь выходного тракта (коэффициента потерь полного давления). Для достижения этой цели необходимо определить пути выравнивания потока в окружном направлении в патрубке, не прибегая к многочисленным направляющим и перераспределяющим элементам в проточной части вы-

ходного тракта. Для этого проводится численное моделирование выходных трактов «диффузор–патрубок» с односторонним выхлопом и осесимметричным восьмисторонним выхлопом.

Постановка задачи. Выполняется исследование геометрии и внутренних элементов выходного тракта на возникающие потери в блоке «диффузор–патрубок». Моделирование нескольких вариантов геометрических моделей с односторонним и неодносторонним отводом рабочего тела в конденсатор и их последующий расчет проводится в программном пакете Ansys CFX. Для оценки полученных результатов в качестве основных критериев используются интегральные характеристики, такие как коэффициент внутренних потерь выходного тракта, коэффициент восстановления давления осерадиальным диффузором и коэффициент кинематической неравномерности потока.

Методы исследования. Результаты численного моделирования течения представлены для трех вариантов конструкции выходного тракта «диффузор–патрубок». В качестве базового варианта используется выходной тракт турбины ЛМЗ К-300-240-2. Расчеты выполнены в программном пакете ANSYS CFX v19.3. Моделирование проведено методом RANS. Для замыкания системы уравнений Навье-Стокса использована модель турбулентности SST.

Построение расчетной модели выполнено при предположении о равномерности полей полного давления и температуры во входном сечении. В базовом варианте выходного тракта «А», а также в варианте «Б», который отличается от «А» отсутствием внутренних загромождений, входным сечением было сечение 0-0 – вход подводящего канала (рис. 1).

Аэродинамические качества выходного тракта оценивались по интегральным характеристикам, рассчитываемым по трем контрольным сечениям: 1 – входное сечение осерадиального диффузора (INLET); 2 – сечение на выходе потока из осерадиального диффузора; 3 – выходное (OUTLET) сечение патрубка. В качестве основных (интегральных) аэродинамических характеристик тракта использованы следующие величины:

- коэффициент внутренних потерь выходного тракта (коэффициент потерь полного давления)

$$\zeta = \frac{p_{1cp}^* - p_{3cp}^*}{\rho_{1cp} \frac{c_{1cp}^2}{2}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где p_{1cp}^* и p_{3cp}^* – полное избыточное давление на входе и выходе из тракта, осредненное по всей поверхности; ρ_{1cp} – плотность потока на входе, осредненная по всей поверхности; c_{1cp} – скорость потока на входе, осредненная по всей поверхности;

- коэффициент кинематической неравномерности потока в выходном сечении патрубка

$$\chi_3 = \frac{c_{3max} - c_{3min}}{c_{3cp}}, \quad (2)$$

где c_{3max} , c_{3min} , c_{3cp} – величина скорости потока в исследуемом сечении, принимающая максимальное, минимальное и среднее значения;

- коэффициент восстановления давления осерадиальным диффузором

$$C_p = \frac{p_{2cp} - p_{1cp}}{\rho_{1cp} \frac{c_{1cp}^2}{2}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где p_{1cp} , p_{2cp} – статические давления во входном сечении и в сечении выхода потока из осерадиального диффузора при входе и выходе потока из осерадиального диффузора, осредненные по площади контрольного сечения.

Схемы расположения сечений 0-0, 1-1, 2-2 и 3-3 представлены на рис. 1–3.

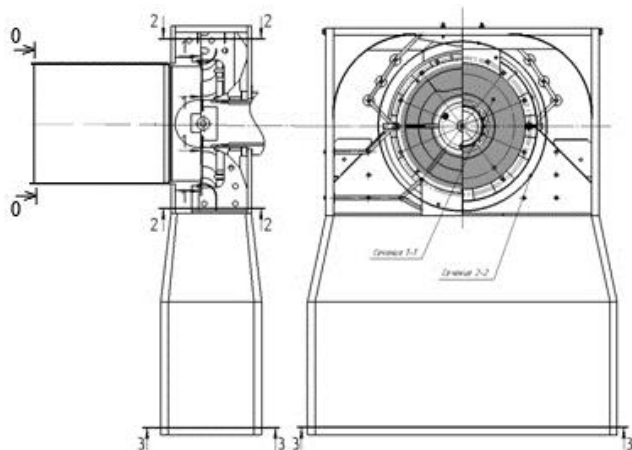


Рис. 1. Схема расположения основных сечений модели ВТ А

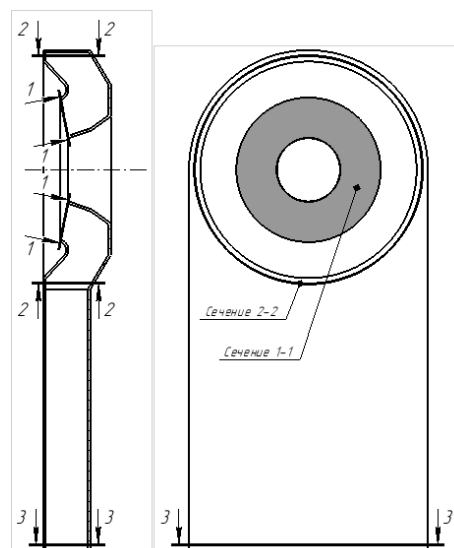


Рис. 2. Схема расположения основных сечений модели ВТ Б

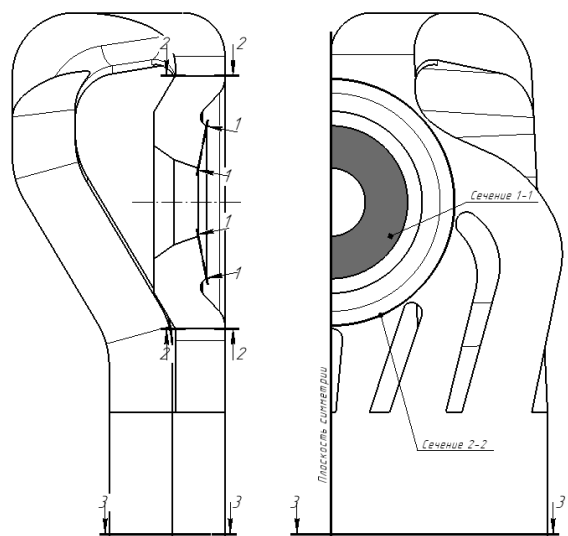


Рис. 3. Схема расположения основных сечений модели ВТ В

В ходе работы произведены расчеты трех вариантов геометрии выходного тракта. На рис. 4 представлена твердотельная модель выходного тракта А с односторонним отводом рабочего тела в конденсатор, проточная часть которого содержит распорные стержни и пластины для организации течения рабочего тела. Данная модель построена в соответствии с прототипом. Жесткость корпуса обеспечивается системой внутренних распорных стержней круглого сечения. Также в тракте после осерадиального диффузора находятся ребра, организующие поток и обеспечивающие жесткость конструкции.

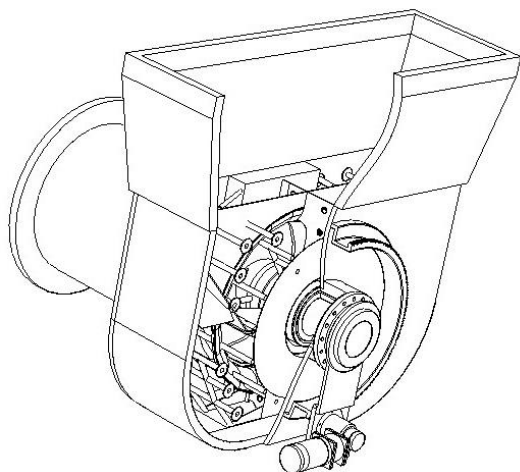


Рис. 4. Твёрдотельная модель выходного тракта А (модель конструкции лаборатории турбиностроения СПбПУ)

Вариант расчетной модели *Б* представляет собой упрощенную модель с односторонним отводом рабочего тела в конденсатор, созданную на основе продольного разреза паровой турбины К-300-240-2 ЛМЗ без учета внутренних элементов. Расчетная модель *В* представляет собой такой же единственный выходной патрубок, отводящий поток пара от последней ступени турбины в подвальный конденсатор. Коренное отличие модели *В* от классического выходного патрубка (модель А) состоит в том, что она сконструирована из восьми отдельных отводов (по четыре симметричных отвода с каждой стороны ЦНД). В случае моделей *Б* и *В* предполагается внешнее оребрение тракта для придания жесткости конструкции. Основные геометрические параметры диффузора расчетных моделей *Б* и *В* представлены на рис. 5.

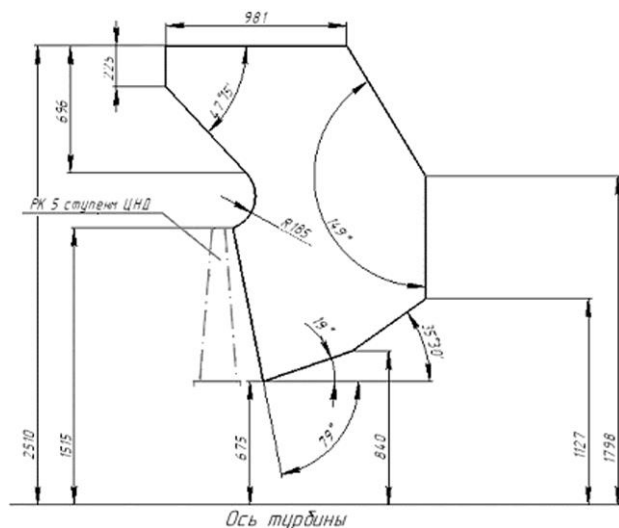


Рис. 5. Основные геометрические параметры диффузора

Для всех расчетов построена неструктурированная тетраэдральная сетка с пристеночными призматическими элементами. На входе в осерадиальный диффузор в качестве граничных условий задавались полная температура и полное давление пара (параметры на выходе из пятой ступени ЦНД), а на выходе из тракта – статическое давление в конденсаторе. Полное давление и температура получены в результате расчета по среднему сечению и оптимизации проточной части ЦНД. Начальные условия для трех моделей одинаковы и сведены в табл. 1.

Таблица 1. Граничные условия для расчета

№	Сечение	Граничные условия
1	Входное сечение в осерадиальный диффузор	$p_{in}^* = 7996 \text{ Па};$ $T_{in}^* = 314,5 \text{ К}$
2	Выходное сечение из выходного патрубка	$p_{out} = 5000 \text{ Па}$
3	Поверхности, ограничивающие расчетную область (стенки)	Mass and momentum – no slip wall; Wall roughness – smooth wall; Heat transfer – adiabatic.

Валидация расчетной модели течения проведена по результатам испытаний крупномасштабной (1:12) воздушной модели изолированного выходного тракта на стенде ЭС-ОВ-ЦНД.1 Лаборатории турбиностроения СПбПУ. Для числа Маха $M = 0,6$ результаты сравнения расчета и эксперимента по величине коэффициента потерь ζ представлены в табл. 2.

Таблица 2. Сравнение результатов расчета и эксперимента для варианта А

$\zeta_{\text{эксп}}$	$\zeta_{\text{расч}}$ по модели		Относительное отклонение $\frac{\zeta_{\text{эксп}} - \zeta_{\text{расч}}}{\zeta_{\text{эксп}}}, \%$	
	$k-\varepsilon$	$k-\omega \text{ SST}$	$k-\varepsilon$	$k-\omega \text{ SST}$
1,51	1,415	1,4241	8,26 %	7,47 %

Исходя из результатов валидации, в дальнейших расчетах использована модель турбулентности $k-\omega \text{ SST}$.

Результаты исследования. Анализ результатов численного моделирования. Наглядными результатами численного

моделирования трех разных численных моделей выходного тракта паровой турбины являются линии тока, векторные поля скоростей в характерных плоскостях и сечениях модели.

На рис. 6–8 представлены поля скоростей в выходном сечении трактов с различной геометрией. В выходном сечении тракта *A* наблюдается центральный парный вихрь, расположенный симметрично относительно оси турбины. В выходном сечении тракта *B* существуют два парных вихря, смещенные относительно оси. Разница обусловливается отсутствием направляющих пластин в проточной части тракта, позволяющих перенаправить поток рабочего тела. В выходном сечении тракта *B* количество вихрей увеличивается до четырех, расположенных во всей выходной плоскости тракта.

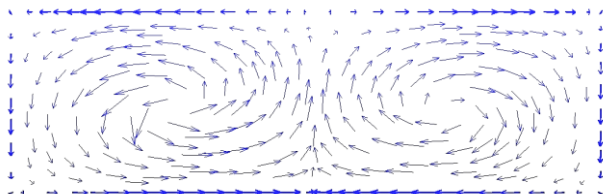


Рис. 6. Поле скоростей в выходном сечении тракта *A*

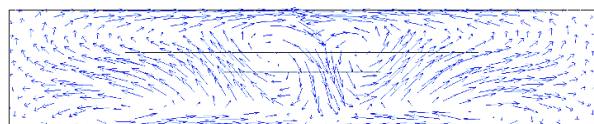


Рис. 7. Поле скоростей в выходном сечении тракта *B*

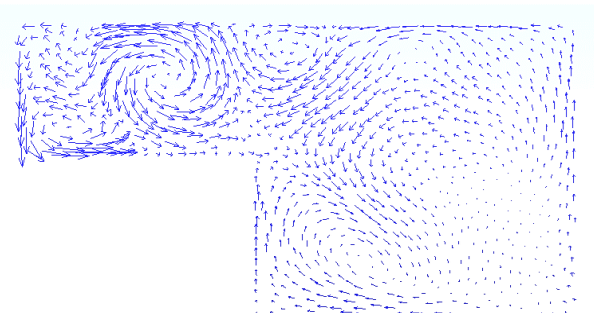


Рис. 8. Поле скоростей в выходном сечении тракта *B*

Распределения давлений в выходном сечении тракта представлены на рис. 9–11. Для моделей *A* и *B* характерны участки разряжения, находящиеся в центральной части выходного сечения. На рис. 9 данные участки занимают до 25 % площади всей плоскости. В случае восьмистороннего отвода рабочего тела в конденсатор имеется

один очаг разряжения, находящийся между двумя нижними патрубками. В остальной части выходного сечения тракта *B* наблюдается более равномерное распределение давлений, чем в конструкции одностороннего отвода рабочего тела в конденсатор.

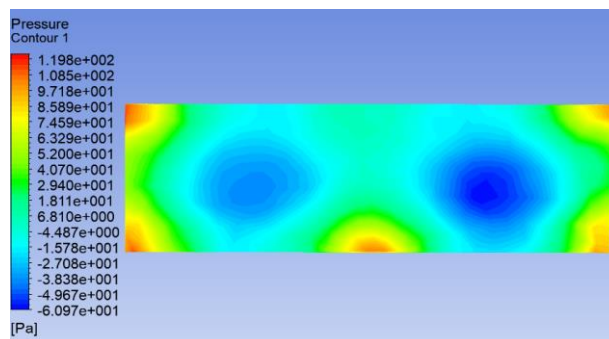


Рис. 9. Поле статического давления в выходном сечении тракта *A*

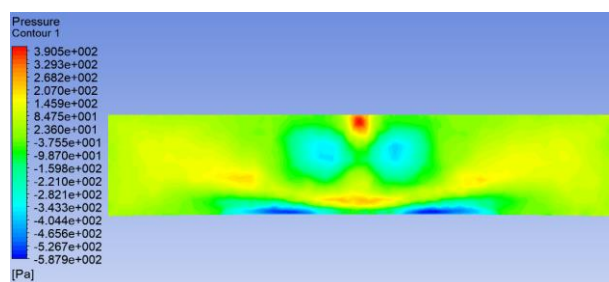


Рис. 10. Поле статического давления в выходном сечении тракта *B*

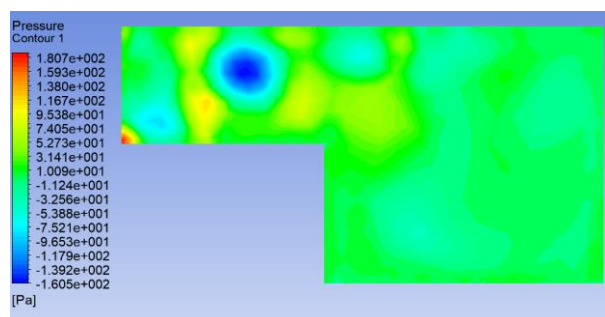


Рис. 11. Поле статического давления в выходном сечении тракта *B*

Результатами численного моделирования вариантов выходного тракта паровой турбины являются следующие интегральные характеристики:

- коэффициент внутренних потерь выходного тракта;
- коэффициент кинематической неравномерности потока;
- коэффициент восстановления давления осерадальным диффузором.

Расчет вышеперечисленных характеристик приведен в табл. 3.

Таблица 3. **Интегральные характеристики выходного тракта**

Параметр	Ед. изм.	Формула	Модель выходного тракта		
			А	Б	В
ρ_{1cp}^*	Па	—	2992	3557	2972
ρ_{3cp}^*	Па	—	447	2619	457
ρ_{1cp}	Па	—	714	1765	767
ρ_{2cp}	Па	—	858	2073	1756
ρ_{1cp}	кг/м ³	—	0,079	0,052	0,043
c_{1cp}	м/с	—	163	178	292
c_{3cp}	м/с	—	98,1	288,8	185,5
c_{3max}	м/с	—	170,6	383,7	321,4
c_{3min}	м/с	—	10,06	0,69	8,64
ζ	—	$\frac{\rho_{1cp}^* - \rho_{3cp}^*}{\rho_{1cp} \frac{c_{1cp}^2}{2}}$	1,524	1,234	1,209
χ_3	—	$\frac{c_{3max} - c_{3min}}{c_{3cp}}$	1,637	1,326	1,686
C_p	—	$\frac{\rho_{2cp} - \rho_{1cp}}{\rho_{1cp} \frac{c_{1cp}^2}{2}}$	0,137	0,372	0,541

Таким образом, более равномерный по окружности отвод пара из осерадиального диффузора (вариант В) обладает более высокими аэродинамическими характеристиками, чем модели традиционной геометрии (варианты А и Б). С учетом того, что в настоящее время развитие паровых турбин идет по пути увеличения мощности единичных агрегатов, эффект от снижения потерь в выхлопном тракте каждой турбины возрастает в несколько раз, так как увеличение мощности единичного агрегата достигается, в частности, за счет увеличения числа выхлопов, количество которых может достигать восьми.

Выводы. На основе выполненного численного моделирования предложен новый путь развития аэродинамического совершенствования выходных трактов паровых турбин большой единичной мощности.

Научная новизна предлагаемого подхода заключается в многостороннем отводе пара из выходного сечения осерадиального диффузора, который является неотъемле-

мой составляющей выхлопных трактов ЦНД паровых турбин. Это обеспечивает существенное снижение потерь кинетической энергии и заметное улучшение эффективности восстановительного процесса в диффузоре за счет более рациональной организации течения в нем.

Достоверность численного моделирования подтверждается удовлетворительным сопоставлением результатов расчета базового варианта конструкции с экспериментальными данными. Наименьшим внутренним сопротивлением (коэффициентом внутренних потерь) обладает вариант выходного тракта с неодносторонним отводом рабочего тела в конденсатор (в данном случае с четырьмя выходными патрубками). Коэффициент потерь выходного тракта модели В ниже базового варианта, построенного на основе прототипа, на 22,5 %.

Минимальный коэффициент неравномерности в выходном сечении тракта по результатам расчета получен в варианте выходного тракта без внутренних элементов и составляет 1,33. В случае вариантов модели А и В присутствует разброс, составляющий 3 % от величины коэффициента χ_{3A} , равной 1,637.

Наибольшей эффективностью отличается диффузор модели выходного тракта В, коэффициент восстановления давления которого C_{pB} равен 0,54. В случае с численной моделью прототипа данный параметр равен 0,14.

Изменение проточной части выходного тракта в сторону увеличения количества отводов в конденсатор влечет за собой более равномерное распределение потока в выходном сечении без использования направляющих пластин и прочих внутренних элементов. Уменьшение коэффициента внутренних потерь выходного тракта и увеличение значения коэффициента восстановления давления в случае модели с восьмью отводами в конденсатор превалирует над незначительным увеличением коэффициента кинематической неравномерности потока в варианте геометрии с внутренними элементами (стержнями и пластинами), который является численной моделью выходного тракта прототипа.

Список литературы

1. Дейч М.Е., Зарянкин А.Е. Газодинамика диффузоров и выходных трактов турбомашин. – М.: Энергия, 1970. – 384 с.

2. **Жирицкий О.Г., Федан В.Т.** Особенности конструкции, характеристики и доводка выхлопных патрубков газотурбинных двигателей НПП «Машпроект» // Известия акад. инж. наук Украины. – Николаев, 1999. – Вып. 1. – С. 189–194.

3. **Мигай В.К., Гудков Э.И.** Проектирование и расчет выходных диффузоров турбомашин. – Л.: Машиностроение. ЛО, 1981. – 222 с.

4. **Гоголев И.Г., Дроконов А.М.** Аэродинамические характеристики ступеней и патрубков тепловых турбин. – Брянск: Брянское областное издательство «Грани», 1995. – 258 с.

5. **Hoffman J.A., Ganzalez G.** Effects of Small-Scale, High Intensity Turbulence of Flow in a Two-Dimensional Diffuser // ASME Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME. – 1984. – Vol. 106, Jun. – P. 121–124.

6. **Черников В.А., Семакина Е.Ю.** Выходные тракты турбин [Электронный ресурс]: Методика экспериментального исследования и численного моделирования: учеб. пособие / Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Институт энергетики и транспортных систем, кафедра «Турбины, гидромашины и авиационные двигатели». – Электрон. текстовые дан. (1 файл: 5,49 Мб). – СПб., 2015.

7. **Модернизация** выхлопных трактов ЧНД паровых турбин производства ЗАО «УТЗ» / А.А. Ямалтдинов, Ю.А. Сахнин, А.Ю. Рябчиков и др. // Теплоэнергетика. – 2014. – № 12. – С. 19–23.

8. **Оптимизация** выходного тракта ЦНД мощной паровой турбины на базе экспериментальных исследований / А.С. Лисянский, В.А. Рассохин, Е.Ю. Семакина, В.А. Черников // Научно-технические ведомости СПбПУ. – 2012. – № 2–1(147). – С. 48–56.

9. **Семакина Е.Ю., Хоанг В.Ч., Черников В.А.** Аэродинамические процессы в выходном тракте стационарной газовой турбины // Научно-технические ведомости СПбПУ. Сер.: Естественные и инженерные науки. – 2017. – Т. 23, № 3. – С. 49–60.

10. **Семакина Е.Ю., Черников В.А., Хоанг В.Ч.** Экспериментальные аэродинамические исследования выходного тракта двухвальной ГТУ мощностью 100 МВт // Теплоэнергетика. – 2019. – № 6. – С. 1–11.

11. **Выхлопные** патрубки газотурбинных двигателей. Опыт создания и новые разработки / Ю.В. Бешинский, С.Н. Вершковский, О.Г. Жирицкий и др. // Судовое и энергетическое газотурбостроение: науч.-техн. сб. в 2 т. – Николаев, 2004. – С. 81–84.

12. **Особенности** проектирования выхлопного патрубка паровой турбины К-175/180-12,8 ТЭС / Н.Н. Гудков, В.И. Кириллов, С.А. Кошелев и др. // Российская энергетика – 2009: совершенствование теплотехнического оборудования, реконструкция ТЭС, внед-

рение систем сервиса: материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. – Екатеринбург: Урал. техн. ун-т – Урал. политех. ин-т, 2009. – С. 46–55.

13. **Адамсон Д.А., Галаев С.А., Кириллов А.И.** Проектирование выходных патрубков мощных паровых турбин на основе вариантных расчетов трехмерного течения // Проблемы машиностроения. – 2012. – Т. 15, № 3–4. – С. 37–43.

14. **Трухний А.Д., Ломакин Б.В.** Паровые и газовые турбины для электростанций: учеб. для вузов. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 560 с.

15. **Modernization** of exhaust hoods of low-pressure sections of steam turbines manufactured by the Ural Turbine Works / A.A. Yamaltdinov, Y.A. Sakhnin, A.Y. Ryabchikov, et al. // Thermal Engineering. – 2014. – Vol. 61, No. 12. – P. 864–867.

16. **Wang H., Zhu X., Du Z.** Aerodynamic optimization for low pressure turbine exhaust hood using Kriging surrogate model // International communications in heat and mass transfer. – 2010. – Vol. 37, No. 8. – P. 998–1003.

17. **St'astny M., Kolar P., Tucek A.** 3D flow in the axialradial exhaust hood of a steam turbine // Journal of Thermal Science. – 1997. – Vol. 6, No. 4. – P. 237–240.

18. **Ris V.V., Smirnov E.M., Kirillov A.I.** Numerical simulation of flow in a steam-turbine exhaust hood: Comparison results of calculations and data from a full-scale experiment // Thermal Engineering. – 2009. – No. 56. – P. 277–283.

References

1. Deych, M.E., Zaryankin, A.E. *Gazodinamika diffuzorov i vykhodnykh traktov turbomashin* [Gas dynamics of diffusers and exhaust ducts of turbo machine]. Moscow: Energiya, 1970. 384 p.

2. Zhiritskiy, O.G., Fedan, V.T. *Osobennosti konstruktсии, kharakteristiki i dovodka vykhlopykh patrubkov gazoturbinnnykh dvigateley NPP «Mashproekt»* [Structural features, parameters and debugging of exhaust ducts of gas turbine combustion engine of NPP «Mashproekt»]. *Izvestiya akademii inzhenernykh nauk Ukrainy*. Nikolaev, 1999, issue 1, pp. 189–194.

3. Migay, V.K., Gudkov, E.I. *Proektirovanie i raschet vykhodnykh diffuzorov turbomashin* [Design and calculation of exhaust diffusers of turbo machine]. Leningrad: Mashinostroenie. LO, 1981. 222 p.

4. Gogolev, I.G., Drokonov, A.M. *Aerodinamicheskie kharakteristiki stupeney i patrubkov teplovykh turbin* [Aerodynamic stage and nozzle characteristics of steam turbine]. Bryansk: Bryanskoe oblastnoe izdatel'stvo «Grani», 1995. 258 p.

5. Hoffman, J.A., Ganzalez, G. Effects of Small-Scale, High Intensity Turbulence of Flow in a Two-Dimensional Diffuser. *ASME Journal of*

Fluids Engeneering, Transactions of the ASME, 1984, vol. 106, Jun, pp. 121–124.

6. Chernikov, V.A., Semakina, E.Yu. *Vykhodnye trakty turbin: Metodika eksperimental'nogo issledovaniya i chislennogo modelirovaniya* [Experiment technique and numerical modeling: educational aid]. Saint-Petersburg, 2015.

7. Yamaltdinov, A.A., Sakhnin, Yu.A., Ryabchikov, A.Yu., Evdokimov, S.Yu., Sergach, S.V. Modernizatsiya vykhlopnykh traktov ChND parovykh turbin proizvodstva ZAO «UTZ» [Modernization of exhaust ducts of low pressure steam turbine of ZAO «UTZ»]. *Teploenergetika*, 2014, no. 12, pp. 19–23.

8. Lisyanskiy, A.S., Rassokhin, V.A., Semakina, E.Yu., Chernikov, V.A. Optimizatsiya vykhodnogo trakta TsND moshchnoy parovoy turbiny na baze eksperimental'nykh issledovaniy [Optimization of exhaust ducts of low-pressure cylinder of powerful steam turbine in the framework of experimental research]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU*, 2012, no. 2–1(147), pp. 48–56.

9. Semakina, E.Yu., Khoang, V.Ch., Chernikov, V.A. Aerodinamicheskie protsessy v vykhodnom trakte statsionarnoy gazovoy turbiny [Aerodynamic processes in exhaust duct of stationary gas turbine]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbPU. Ser.: Estestvennye i inzhenernye nauki*, 2017, vol. 23, no. 3, pp. 49–60.

10. Semakina, E.Yu., Chernikov, V.A., Khoang, V.Ch. Eksperimental'nye aerodinamicheskie issledovaniya vykhodnogo trakta dvukhval'noy GTU moshchnost'yu 100 MVt [Experimental aerodynamic research of exhaust duct of cross-compound gas turbine generator]. *Teploenergetika*, 2019, no. 6, pp. 1–11.

11. Beshinskiy, Yu.V., Vershkovskiy, S.N., Zhiritskiy, O.G., Isakov, B.V., Starodubets, V.A., Fedan, V.T. Vykhlopnye patrubki gazoturbinnnykh dvigateley. Opyt sozdaniya i novye razrabotki [Exhaust nozzles of gas turbine generators. Experience and innovations]. *Nauchno-tekhnicheskiy sbornik «Sudovoe i energeticheskoe gazoturbostroenie» v 2 t.* Nikolaev, 2004, pp. 81–84.

12. Gudkov, N.N., Kirillov, V.I., Koshelev, S.A. Osobennosti proektirovaniya vykhlopnoy patrubki parovoy turbiny K-175/180-12,8 TES [Peculiarities of design of exhaust nozzles of gas turbine K-175/180-12,8 TTP]. *Materialy VI Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Rossiyskaya energetika – 2009: sovershenstvovanie teplo-tekhnicheskogo oborudovaniya, rekonstruktsiya TES, vnedrenie sistem servisa»* [Russian power industry – 2009: perfection of phermal power equipumnt, TTP reconstruction/ service system introduction]. Ekaterinburg: Ural'skiy tekhnicheskiy universitet-Ural'skiy politekhnicheskiy institut, 2009, pp. 46–55.

13. Adamson, D.A., Galaev, S.A., Kirillov, A.I. Proektirovanie vykhodnykh patrubkov moshchnykh parovykh turbin na osnove variantnykh raschetov trekhmernogo techeniya [Design of exhaust nozzles of powerful steam turbine based on variants calculation of three-dimensional flow]. *Problemy mashinostroeniya*, 2012, vol. 15, no. 3–4, pp. 37–43.

14. Trukhniy, A.D., Lomakin, B.V. *Parovye i gazovye turbiny dlya elektrostantsiy* [Steam and gas turbine for PP]. Moscow: Izdatel'stvo MEI, 2008. 560 p.

15. Yamaltdinov, A.A., Sakhnin, Y.A., Ryabchikov, A.Y., Evdokimov, S.Y., Sergach, S.V. Modernization of exhaust hoods of low-pressure sections of steam turbines manufactured by the Ural Turbine Works. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, no. 12, pp. 864–867.

16. Wang, H., Zhu, X., Du, Z. Aerodynamic optimization for low pressure turbine exhaust hood using Kriging surrogate model. *International communications in heat and mass transfer*, 2010, vol. 37, no. 8, pp. 998–1003.

17. St'astny, M., Kolar, P., Tucek, A. 3D flow in the axialradial exhaust hood of a steam turbine. *Journal of Thermal Science*, 1997, vol. 6, no. 4, pp. 237–240.

18. Ris, V.V., Smirnov, E.M., Kirillov, A.I. Numerical simulation of flow in a steam-turbine exhaust hood: Comparison results of calculations and data from a full-scale experiment. *Thermal Engineering*, 2009, no. 56, pp. 277–283.

УДК 532.595.7, 519.63

Алена Дмитриевна Липагина

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», магистрант кафедры энергообеспечения предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, Россия, Казань, e-mail: konovalovaad@mail.ru

Айгуль Ильгизаровна Хайбуллина

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», кандидат технических наук, доцент кафедры энергообеспечения предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, Россия, Казань, телефон (843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

Алексей Александрович Синявин

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», заведующий учебной лабораторией кафедры энергообеспечения предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, Россия, Казань, телефон (843) 519-43-21, e-mail: alex_sinjawin@mail.ru

Владимир Кузьмич Ильин

ФГБОУВО «Казанский государственный энергетический университет», доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой энергообеспечения предприятий и энергоресурсосберегающих технологий, Россия, Казань, телефон (843) 519-42-06, e-mail: ilyinvk@mail.ru

Эффективность очистки пучка труб низкочастотным пульсационным потоком с твердыми включениями¹

Авторское резюме

Состояние вопроса. Отложения на поверхности труб в межтрубном пространстве кожухотрубных теплообменников снижают их эффективность. Поиск эффективного безразборного метода очистки остается актуальной задачей. Очистка трубных пучков низкочастотным несимметричным пульсационным потоком на данный момент мало изучена. Целью работы является численный анализ влияния подобных пульсаций на основные очищающие факторы (касательное напряжение на стенке, скорость эрозии).

Материалы и методы. Для численного эксперимента использован симметричный элемент шахматного пучка труб при поперечном обтекании турбинным маслом T22 ($Re = 100$; $Pr = 273$) с кварцевым песком в качестве очищающего агента. Модель движения несжимаемой жидкости включает уравнения Навье-Стокса, неразрывности, модели турбулентности Spalart–Allmaras. Движение дисперсий рассчитано методом дискретных элементов, а эрозия – методом Campos-Amezua. Численное исследование выполнено в Ansys Fluent с временным шагом 0,001 с. Пульсации генерированы на входном граничном условии. Для оценки эффективности пульсаций проведено сравнение касательного напряжения и скорости эрозии на стенке центральной трубки пучка при одинаковых средних по времени расходах в стационарном и нестационарном потоках.

Результаты. Установлено, что несимметричные пульсации потока (скважность 0,25) приводят к увеличению касательного напряжения во всех исследуемых режимах (амплитуда $25 \leq A/d \leq 35$, частота $0,3125 \leq f \leq 0,5$ Гц), а скорость эрозии увеличивается при максимальной частоте; изменение амплитуды приводит к изменению локализации усиливающего эффекта пульсаций на поверхности труб. Установлено, что наложение пульсаций усиливает касательное напряжение сдвига и скорость эрозии в лобовой и кормовой частях труб пучка, которые наиболее подвержены отложениям.

Выводы. Проведенный анализ подтверждает существенное влияние несимметричных пульсаций на очищающие факторы и перспективность их применения для интенсификации очистки пучков труб. Обнаруженные эффекты могут послужить основой для разработки новых технологий очистки межтрубного пространства теплообменников.

Ключевые слова: очистка теплообменников, пульсирующее течение, шахматный пучок труб, вычислительная гидродинамика, модель дискретных элементов, эрозия

Alyona Dmitrievna Lipagina

Kazan State Power University, Master degree student of the Power Supply of Enterprise and Power Resource-Saving Technology department, Russia, Kazan, e-mail: konovalovaad@mail.ru

¹ Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №18-79-10136).

Aigul' Il'gizarovna Khaibullina

Kazan State Power University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Power Supply of Enterprise and Power Resource-Saving Technology department, Russia, Kazan, telephone (843) 519-42-06, e-mail: haybullina.87@mail.ru

Aleksei Aleksandrovich Sinyavin

Kazan State Power University, Chief of the university laboratory of the Power Supply of Enterprise and Power Resource-Saving Technology department, Russia, Kazan, telephone (843) 519-43-21, e-mail: alex_sinjawin@mail.ru

Vladimir Kuz'mich Il'in

Kazan State Power University, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Power Supply of Enterprise and Power Resource-Saving Technology department, Russia, Kazan, telephone (843) 519-42-06, e-mail: ilynvk@mail.ru

Efficiency of tube bundle cleaning by low-frequency flow pulsations with solid particles

Abstract

Background. Scale buildup on the tube surface in the intertubular space of the shell-and-tube heat exchangers reduce their efficiency. The topical issue is the search for clean-in-place methods. The tube bundle cleaning by low-frequency nonsymmetrical pulsations is understudied. The aim of the paper is numerical analysis of the influence of pulsations on the key cleaning factors (wall shear stress, erosion rate).

Materials and methods. For the numerical experiment the symmetrical element of a staggered tube bundle with a crossflow of turbine oil (T22) ($Re = 100$; $Pr = 273$) and the quartz sand as a cleaning agent is used. The model of incompressible fluid flow comprises the system of Navier-Stokes and continuity equations, the turbulent model Spallart-Allmaras. The motion of solid particles is calculated by the discrete element method, and the erosion rate is calculated by the Campos-Amezcu method. In unsteady conditions with time step 0,001 sec, numerical simulations are performed in Ansys Fluent. Pulsations are generated on entry boundary condition. To estimate the flow pulsation efficiency, the wall shear stresses on the central tube of bundle and erosion rates are compared under the same average rate in steady and nonsteady flow.

Results. It is found that asymmetrical flow pulsations (duty cycle 0,25) increase of wall shear stress in all the modes under consideration ($amplitude\ 25 \leq A/d \leq 35$, frequency $0,3125 \leq f \leq 0,5\ Гц$), but an increase in erosion rate takes place only at maximal frequency. The amplitude variation displaces the localization of the reinforcing effect of flow pulsations on the tube surface. However, it is found that flow pulsations increase the wall shear stress and erosion rate in the front and rear sides of the tubes that are most susceptible to scale buildup.

Conclusions. The conducted analysis confirms the significant influence of asymmetrical pulsations on cleaning factors and the perspective of their application for intensification of tube bundle cleaning. The detected effects can be the base to develop new technologies of cleaning intertubular space of heat exchangers.

Key words: heat exchanger cleaning, pulsation flow, staggered tube bundle, CFD modeling, DEM model, erosion

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.014-025

Введение. Загрязнение теплообменников остается на сегодняшний день одной из основных нерешенных проблем в области теплоэнергетики, а нахождение лучшего метода для предотвращения или снижения скорости загрязнения продолжает быть актуальной задачей. Основным негативным последствием загрязнения является потеря теплопередачи. На сегодняшний день большинство отраслей промышленности терпит серьезные экономические убытки, вызванные загрязнением теплообменников.

Очистка теплообменного оборудования может производиться разборными и

неразборными методами. Ввиду трудоемкости процесса разборки агрегатов, использование неразборных методов предпочтительнее. Традиционный химический метод очистки теплообменников требует утилизации химических реагентов после очистки, а также остановки работы агрегата на время удаления загрязнений. В этом свете пульсационные методы интенсификации теплообменных процессов представляются перспективным способом очистки, так как они не требуют разборки агрегатов и остановки их работы. Импульсный поток создает высокие периодические ускорения жидкости, которые могут вызы-

вать более быстрое разрушение слоя отложений из-за увеличения напряжения сдвига, действующего на поверхность. Данный метод может решить проблему очистки внешней поверхности труб в пучке, наиболее труднодоступной части для очистки в теплообменном аппарате.

Периодический нестационарный поток хорошо зарекомендовал себя в качестве метода интенсификации теплообмена. Так, например, в [1] показано, что амплитуда колебаний скорости сильно увеличивает теплопередачу, особенно когда амплитуда превышает определенное значение. Наиболее важным механизмом усиления теплообмена, по мнению авторов, является большая скорость и реверсирование потока в течение периода пульсации.

Периодические колебания потока усиливают конвективное перемешивание и, соответственно, увеличивают локальное число Нуссельта. Исследования [2] показали, что усредненное по времени число Нуссельта может стать на 55 % больше, чем в случае с постоянным потоком.

В [3] исследовано влияние частоты и амплитуды пульсаций, а также числа Рейнольдса на коэффициент теплоотдачи. Результаты показали, что увеличение относительного среднего числа Нуссельта до 10 раз было получено при более высоких амплитудах и более высоких частотах пульсаций.

Эффективность в теплообменнике типа труба в трубе повышалась с 15 до 35 % в экспериментах авторов [4] при наложении пульсаций на поток. Значительное улучшение производительности происходило при условии использования высоких частот и относительно низких чисел Рейнольдса.

В [5] изучено повышение теплоотдачи с помощью наложения несимметричных пульсаций в диапазоне чисел Рейнольдса $100 \leq Re \leq 1000$, частот $0,2 \leq f \leq 0,5$ Гц, отношений амплитуд пульсаций к диаметру трубок пучка $15 \leq \beta \leq 35$. Во всем исследуемом диапазоне наблюдалось повышение теплоотдачи при наложении пульсаций, коэффициент теплопередачи повышался с увеличением значений амплитуды и частоты. В [5] также замечено, что при минимальных значениях Re прирост теплоотдачи был наибольшим.

Интенсификация теплообмена не единственный эффект от наложения пуль-

саций на поток. Как уже было сказано, импульсные потоки могут способствовать процессам очистки. Эксперименты [6] показывают, что наложение синусоидальных пульсаций на поток приводит к сокращению времени очистки до 50 %. Требуемое время уменьшается примерно с 25 до 10 мин.

Исследование влияния импульсного потока на стадии очистки [7] в диапазоне чисел Рейнольдса $580 \leq Re \leq 9120$, частот пульсаций $0,2 \leq f \leq 2$ Гц, амплитуд пульсаций $0,52 \leq A \leq 0,84$ показало, что пульсирующий поток имел незначительный эффект при очистке во время начальной фазы набухания отложений, но оказывал значительное влияние на однородную стадию, где скорость очистки относительно постоянна, и стадию распада, когда очистка включает в себя эрозию «островков» остаточного осадка. В целом ускорение процесса очистки контролируется комбинацией амплитуды и частоты импульсного потока. В [6] также выявлено, что пульсации эффективнее при более низких числах Re .

В [8] моделировался поток в условиях турбулентного режима ($Re > 25000$) внутри трубы со сгибом под прямым углом. Очистка отложений на внутренней стенке после изгиба при импульсном режиме оказалась более эффективной, так как наиболее сильный обратный поток возникает именно в этой области. В [8] также отмечено, что использование импульсного потока результативнее для более сложных геометрий, чем для прямых труб.

В [9] численным методом проведено сравнение стационарного решения без наложения пульсаций в условиях турбулентного потока ($Re > 25\,000$) и нестационарного решения с наложением синусоидальных колебаний. При переключении модели на импульсный поток скорость удаления отложений повысилась. В качестве действующей силы предложено касательное напряжение на стенке. На основе сравнения экспериментальных данных с результатами моделирования отмечено, что время очистки, полученное из эксперимента, и касательное напряжение на стенке, полученное моделированием, коррелируют и обратно пропорциональны.

Помимо этого, существуют исследования, например [10], показывающие, что иногда примеси, такие как песок или другие взвешенные частицы в потоках текущей среды, могут иметь очищающее дей-

ствие, которое уменьшает или удаляет отложения.

Несмотря на имеющиеся положительные результаты в применении пульсирующих потоков, экспериментальных и теоретических исследований их влияния на очистку внешней поверхности труб в пучке в настоящее время недостаточно. Более того, исследований совместного влияния пульсаций и эрозионных эффектов твердых частиц на степень очистки не проводилось. В связи с этим проведено исследование [5] влияния низкочастотных несимметричных пульсаций, которые показали свою эффективность в интенсификации теплообмена в присутствии твердых включений, на эффекты, способствующие удалению отложений на внешней поверхности пучков труб, такие как касательное напряжение на стенке и эрозия отложений.

Физическая постановка задачи. Для изучения влияния пульсаций на очистные эффекты был выбран кожухотрубный маслоохладитель с шахматным расположением труб, ввиду распространенности его использования, а также актуальности поиска наиболее эффективного способа очистки, так как из-за относительно небольших значений чисел Рейнольдса ($Re \approx 500$) такие теплообменники сильно подвержены загрязнению.

Для анализа физических явлений в плотном пучке межтрубного пространства теплообменников допустимо рассмотреть процессы в глубинном элементарном объеме пучка [5]. В соответствии с этим, геометрия численного эксперимента представляет элементарный объем межтрубного пространства в виде половинок труб, расположенных в шахматном порядке

(геометрические параметры приведены на рис. 1 и в табл. 1), снизу и сверху ограниченных заданным граничным условием «симметрия». Центральная половинка трубы была разделена на 3 равных части (по 60°) для более локального изучения влияния пульсаций.

В качестве жидкой фазы использовано турбинное масло Т22 при температуре 58°C , а в качестве очищающего агента кварцевый песок. Режим течения масла ламинарно-турбулентный (с учетом пульсаций): $Re = 100$.

Таблица 1. Геометрические параметры

Название параметра	Обозначение, ед. измерения	Значение
Диаметр трубы	$d_{\text{трубы}}$, м	0,01
Шаг	S , м	0,013
Длина	м	0,06
Высота	м	0,0065

Математическая модель. Модель включает в себя уравнение Навье-Стокса, осредненное по методу Рейнольдса для моделирования гидродинамики и уравнение непрерывности [11]:

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial \rho \bar{v}_i v_j}{\partial x_j}; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0, \quad (2)$$

где u_i – осредненная во времени скорость, м/с; \bar{v}_i – пульсационная составляющая скорости u_i , м/с; ρ – плотность жидкости, кг/м³; μ – динамическая вязкость, Па·с.

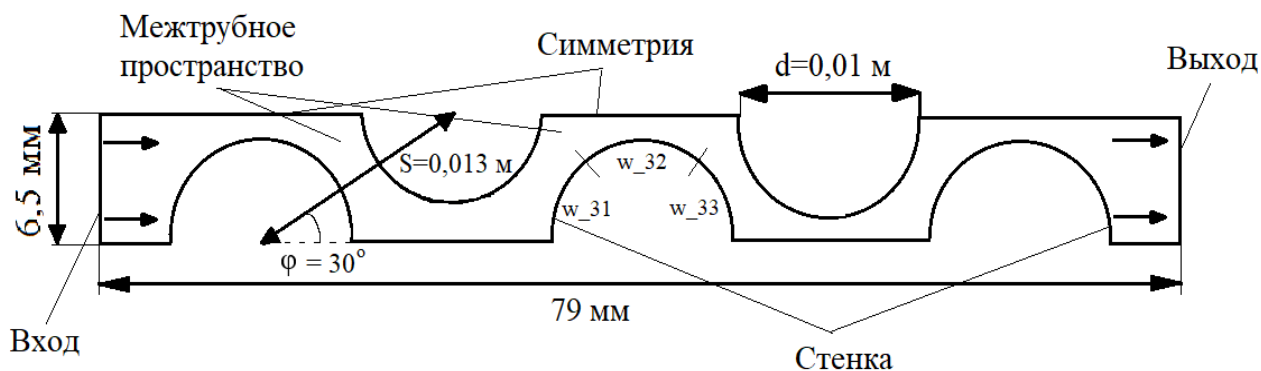


Рис. 1. Геометрия численного эксперимента: лобовая часть трубы (w_{31}), боковая (w_{32}) и кормовая (w_{33})

В качестве модели турбулентности выбрана модель Spalart–Allmaras (SA):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \tilde{v}) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \tilde{v} u_i) = G_v + \frac{1}{\sigma_{\tilde{v}}} \times \left[\frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\mu + \rho \tilde{v}) \frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_i} \right\} + C_{b2} \rho \left(\frac{\partial \tilde{v}}{\partial x_i} \right)^2 \right] - \varepsilon_v, \quad (3)$$

где G_v – производство турбулентной вязкости; ε_v – диссипация турбулентной вязкости, которая происходит в пристеночной области из-за стенок и вязкого затухания; $\sigma_{\tilde{v}}$ и C_{b2} – постоянные; v – кинематическая вязкость [12].

Модель SA выбрана в связи с тем, что она показала удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными при нестационарном теплообмене в пучке труб с числами $Re < 1000$ [5].

Для моделирования движения твердых включений использована модель дискретных элементов (DEM), которая учитывает взаимодействие частиц между собой. Данный метод успешно применяется в различных областях, показывая достаточно согласованные с экспериментами результаты. Авторы [13] считают модель надежной в воспроизведении гидродинамики твердых частиц, хотя, по их мнению, для большей точности расчетов модели необходимо лучше учитывать физические характеристики частиц, в частности их форму. В моделировании потоков частиц и жидкости со свободно движущимися крупными объектами сложной формы модель DEM также показала хорошо согласованные с экспериментом результаты [14], [15].

Движение частиц рассчитывается по второму закону Ньютона с учетом сил, возникающих в результате столкновения частиц. При упругом соударении сила, действующая на частицу, определяется следующим образом:

$$\vec{F}_1 = \delta K \vec{e}_{12}; \quad (4)$$

$$\vec{F}_2 = -\vec{F}_1, \quad (5)$$

где $\delta = \|x_2 - x_1\| - (r_1 + r_2)$; x – координата соответствующей частицы, м; r – радиус частицы, м; K – коэффициент упругости, Н/м.

Тангенциальная составляющая силы находится следующим образом:

$$F_{friction} = \mu F_{normal}, \quad (6)$$

где μ – коэффициент трения; F_{normal} – сила нормальной реакции на опору, Н.

Направление силы трения противоположно относительному тангенциальному движению и может препятствовать относительному тангенциальному движению. Коэффициент трения является функцией относительной величины тангенциальной скорости v_{rt} :

$$\mu(v_{rt}) = \mu_{stick} + (\mu_{stick} - \mu_{glide}) \times \left(\frac{v_{rt}}{v_{glide}} - 2 \right) \left(\frac{v_{rt}}{v_{glide}} \right), \quad (7)$$

где μ_{stick} – коэффициент трения прилипания; μ_{glide} – коэффициент трения скольжения; v_{glide} – скорость проскальзывания, м/с [12].

Эрозионный износ отложений определяется как материальный ущерб, вызванный воздействием частиц, увлеченных жидкой системой, воздействующей на поверхность с высокой скоростью. Воздействующие твердые или жидкие частицы, переносимые в газе или жидкости, постепенно удаляют отложения с поверхности посредством повторного контакта с ней.

Модель эрозии Campos-Amezcuа, как и другие модели [16], позволяет учитывать определяющие факторы и предназначена для использования совместно с моделью дискретных элементов:

$$E = \sum_{p=1}^{N_{particle}} \frac{\dot{m}_p C(d_p) f(\alpha) v^{b(v)}}{A_{face}}, \quad (8)$$

где \dot{m}_p – массовый расход потока частиц, соударившихся со стенкой, кг/с; $C(d_p)$ – функция диаметра частицы; $f(\alpha)$ – функция угла удара частицы о стенку; v – скорость удара частицы, м/с; $b(v)$ – функция скорости частицы; A_{face} – площадь стенки в ячейке сетки, м².

Для сравнительного анализа интенсивности эрозии были приняты следующие значения параметров: $b(v) = 1$, $C(d_p) = 1$, $f(\alpha) = 1$, скорость эрозии рассчитывалась следующим образом:

$$E = \sum_{p=1}^{N_{particle}} \frac{\dot{m}_p v}{A_{face}}. \quad (9)$$

В табл. 2–5 указаны значения параметров, используемых при моделировании.

Таблица 2. Физические свойства твердых включений, подаваемых на вход расчетной области

Название	Обозначение, ед. измерения	Значение
Диаметр частицы	$d_{\text{частицы}}$, м	0,001
Плотность	$\rho_{\text{частицы}}$, кг/м ³	2000
Массовая концентрация частиц, подающихся на вход	$C_{\text{частиц}}$, %	1

Таблица 3. Физические свойства среды в расчетной области при температуре 58 °С

Среда	Свойства среды	Значение
Масло	Плотность, кг/м ³	854
	Вязкость, Па·с	0,014

Таблица 4. Граничные условия

Расчетная область	Обозначение, ед. измерения	Значение
Вход	$v_{\text{ж}}$, м/с	0,0456 ($Re = 100$)
Выход	P , Па	101325

Таблица 5. Параметры столкновений частиц между собой и со стенкой в модели DEM

Название параметра	Обозначение, ед. измерения	Значение
Константа упругого удара	K , Н/м	1000
Коэффициент трения прилипания	μ_{stick}	0,5
Коэффициент трения скольжения	μ_{glide}	0,2
Скорость проскальзывания	v_{glide} , м/с	1

Методика численного эксперимента. Задача решена в нестационарной постановке с шагом по времени 0,001 с как для расчета потока жидкости, так и для расчета потока частиц. Для решения дифференциальных уравнений в частных производных применен метод конечных объемов. Для применения этого метода вся расчетная область поделена на 4220 ячеек. Для более точного моделирования столкновений частиц со стенкой в пристеночной области сетка сгущалась десятью

слоями с фактором расширения 1,2. Максимальный размер ячейки составлял 0,00025 м, соответственно, размер первой ячейки на сетке был равен примерно $4,04 \cdot 10^{-5}$ м. Моделирование проведено в ПО Ansys Fluent [12].

Изучено влияние амплитуды и частоты пульсаций на факторы, влияющие на очистные эффекты, такие как касательное напряжение сдвига на стенке и скорость эрозии отложений. Импульсный поток задавался аналогично [5]. При стационарном потоке на вход задавалась постоянная скорость потока. При пульсационном движении на входе скорость менялась периодически во времени (рис. 2). При этом скважность была постоянной: $\psi = T_1/T = 0,25$, где T_1 – время полупериода импульса, с; T – период колебаний, с. Частота пульсаций и относительная амплитуда определялись следующим образом:

$$f = \frac{1}{T}; \quad (10)$$

$$\beta = A/d, \quad (11)$$

где d – диаметр трубы, м; A – смещение частицы назад в самом узком сечении межтрубного пространства, м.

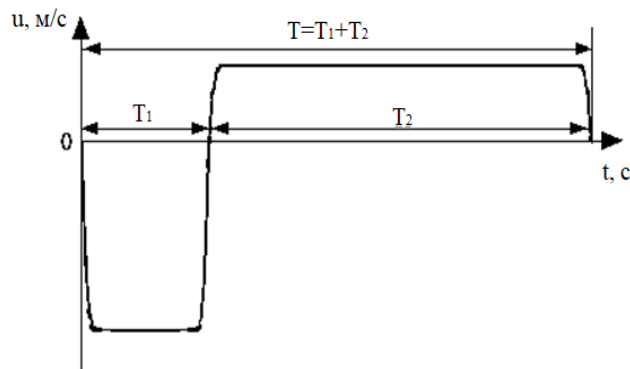


Рис. 2. Форма импульса, подаваемого на вход расчетной области

Соответственно, пульсации имели возвратно-поступательный характер. Осредненная за период пульсации скорость при импульсном потоке была равна скорости при стационарном потоке.

В численном эксперименте значения относительной амплитуды были в диапазоне $25 \leq A/d \leq 35$, частоты $0,3125 \leq f \leq 0,5$ Гц, значение числа $Re = 100$ во всех численных экспериментах оставалось постоянным.

В табл. 6 указаны параметры накладываемых пульсаций.

Таблица 6. Значения параметров импульсных режимов

Режим	Значение Re	Значение относительной амплитуды A/d	Значение частоты, Гц
Постоянный поток	100	–	–
Импульсный режим № 1	100	35	0,3
Импульсный режим № 2	100	25	0,5
Импульсный режим № 3	100	35	0,5

Результаты и обсуждение численного эксперимента. В [9], как уже было сказано, очистка теплообменного аппарата с помощью наложения пульсаций оценивалась сравнением касательных напряжений на стенке, такой метод показал удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными. Поэтому в нашей работе оценка напряжением сдвига на стенке также была произведена.

Касательное напряжение на стенке, осредненное по поверхности части центрального цилиндра, находилось следующим образом:

$$\langle \tau_\varphi \rangle = \frac{3}{\pi} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \tau d\varphi, \quad (12)$$

где τ – мгновенное локальное значение касательного напряжения; φ_i – угловая отметка сектора.

Из-за того, что значения искомых величин при импульсном режиме меняются во времени, они усредняются за период пульсации:

$$\bar{\tau} = \langle \tau_{\varphi,t} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \langle \tau_\varphi \rangle(t) dt, \quad (13)$$

где T – период пульсации.

На рис. 3–5 показано относительное касательное напряжение, представляющее собой отношение средних напряжений сдвига для импульсного и стационарного режимов:

$$\delta_\tau = \frac{\langle \tau_\varphi \rangle_{\text{имп}}}{\langle \tau_\varphi \rangle_{\text{стац}}}. \quad (14)$$

Анализ полученных данных (рис. 3) показывает, что напряжение сдвига возросло для всех частей стенки (значения выше 1). Можно предположить, что флуктуации в начале периода связаны с изменением количества соударений частиц о стенку, т.е. с поворотом потока в противоположную сторону частицы сначала останавливаются, затем меняют направление своего движения (значения времени примерно в диапазоне от 0,1 до 0,25), разгоняются и ударяются о стенку, повышая напряжение сдвига на стенке.

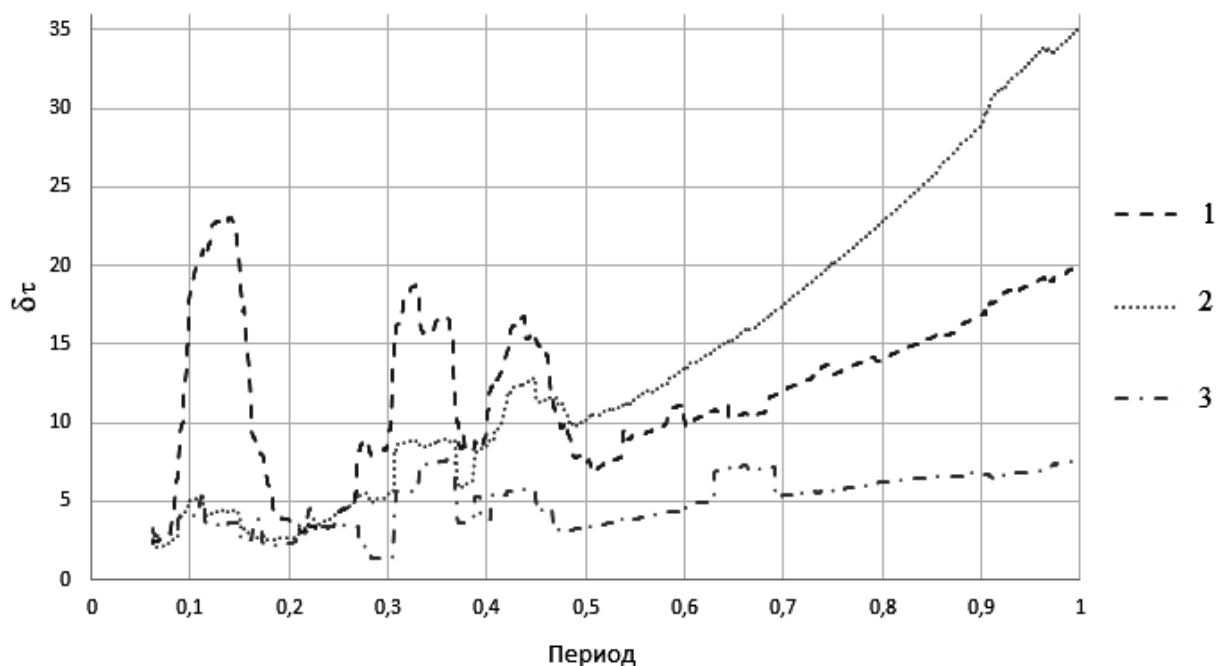


Рис. 3. Относительное напряжение сдвига на стенке для режима №1 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – боковая часть; 3 – кормовая часть

Затем направление движения опять изменяется, частицы опять разгоняются в направлении потока, но к частицам, подающимся с поверхности входа, добавляются частицы, унесенные обратным ходом, т.е. количество частиц увеличивается и, соответственно, повышается их влияние на значение напряжения сдвига на стенке (значения времени в диапазоне от 0,25 до 0,5). После поток частиц становится более равномерным, его влияние на напряжение сдвига снижается.

Режим пульсаций №2 (рис. 4) оказывает максимальное влияние на значения напряжения сдвига на кормовой части. При наложении пульсаций с частотой $f = 0,5$ Гц и амплитудой $A/d = 35$ (режим №3) касательное напряжение сдвига при импульсном потоке заметно возрастает для всех частей стенки (рис. 5).

Для количественного определения влияния пульсаций на значения касательного напряжения на стенке в табл. 7 приведены отношения усредненных за период пульсации значений напряжения на стенке при импульсном потоке и средних значений напряжения на стенке в постоянном потоке для каждой части полутрубы:

$$\delta_{\tau,t} = \frac{\bar{\tau}_{\text{имп}}}{\bar{\tau}_{\text{стац}}} \quad (15)$$

В целом при всех режимах пульсаций наблюдается увеличение напряжения сдвига на стенке, но на значения напряжения сдвига в лобовой части больше всего

повлиял режим №1 (см. табл. 6), а в кормовой части – режим №2, т.е. при более высокой амплитуде и низкой частоте может повыситься эффект очистки в лобовой части, а при меньшей амплитуде и большей частоте – в кормовой.

Таблица 7. Отношение усредненных за период касательных напряжений ($\delta_{\tau,t}$)

Режим импульсного потока	Лобовая часть	Боковая часть	Кормовая часть
1	10,3	15,3	4,5
2	4,5	6,6	6,2
3	7,8	7,3	5,4

Как уже было сказано, в качестве критерия оценки также использовано значение скорости эрозии отложений. Скорость эрозии оценивалась только для лобовой и кормовой частей, так как они наиболее подвержены загрязнению.

Скорость эрозии, осредненная по поверхности части центрального цилиндра, находилась следующим образом:

$$\langle E_{\varphi} \rangle = \frac{3}{\pi} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} E d\varphi, \quad (16)$$

где E – мгновенное локальное значение скорости эрозии; φ_i – угловая отметка сектора.

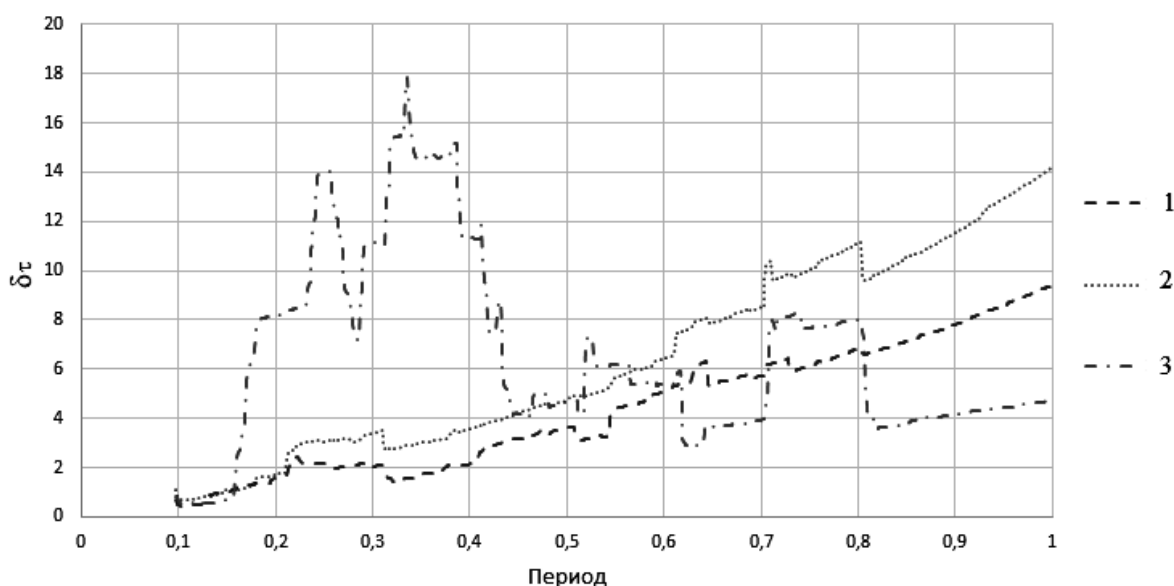


Рис. 4. Относительное напряжение сдвига на стенке для режима №2 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – боковая часть; 3 – кормовая часть

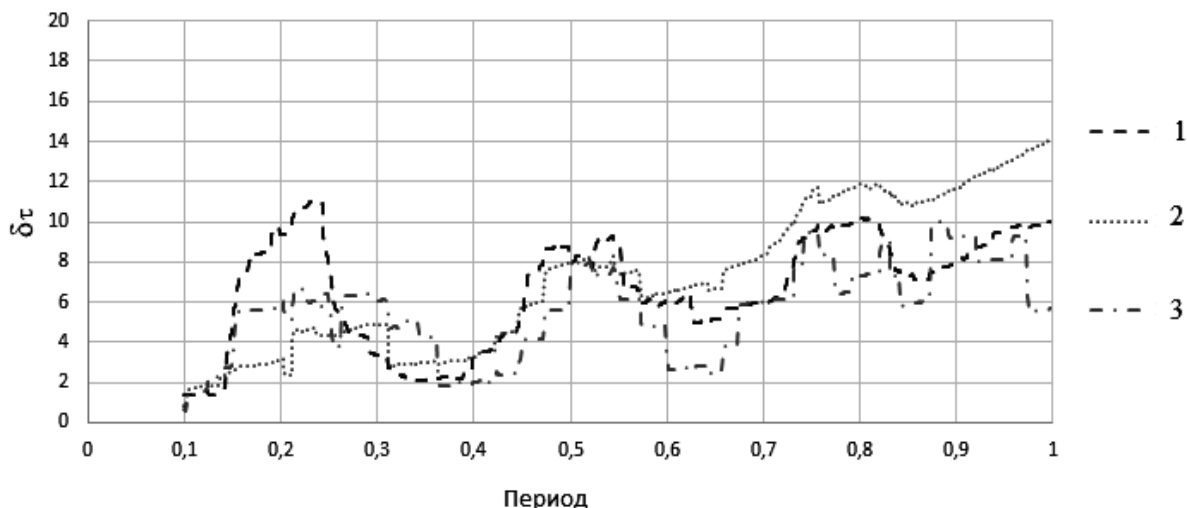


Рис. 5. Относительное напряжение сдвига на стенке для режима №3 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – боковая часть; 3 – кормовая часть

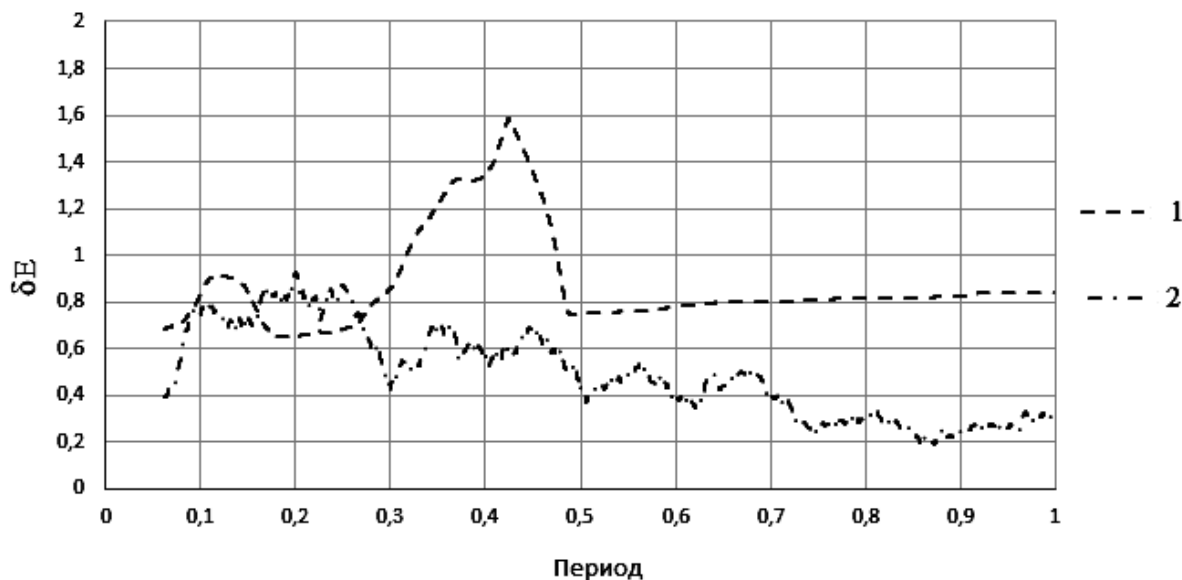


Рис. 6. Относительная скорость эрозии для режима №1 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – кормовая часть

Значения скорости эрозии, усредненные за период пульсации, определяются как

$$\bar{E} \equiv \langle E_{\varphi,t} \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T \langle E_{\varphi} \rangle(t) dt. \quad (17)$$

На рис. 6–8 показана относительная скорость эрозии, представляющая собой отношение средних скоростей эрозии для импульсного и стационарного режимов:

$$\delta_E = \frac{\langle E_{\varphi} \rangle_{\text{имп.}}}{\langle E_{\varphi} \rangle_{\text{стац.}}} \quad (18)$$

Импульсный режим №1, как показало моделирование, не увеличил скорость эрозии ни для одной части полутрубы (рис. 6). С другой стороны, режим №2 существенно увеличил скорость эрозии в кормовой части,

которая обычно является наиболее загрязненной, но снизил в лобовой части (рис. 7). Режим №3 также интенсифицировал процесс эрозии для кормовой части, но в меньшей степени, по сравнению с режимом №2. Тем не менее при этом режиме скорость эрозии повысилась как в лобовой, так и в кормовой части трубы (рис. 8).

В табл. 8 приведены отношения усредненных за период пульсации значений скорости эрозии при импульсном потоке и средних значений в постоянном потоке для каждой части полутрубы:

$$\delta_{E,t} = \frac{\bar{E}_{\text{имп.}}}{\bar{E}_{\text{стац.}}} \quad (19)$$

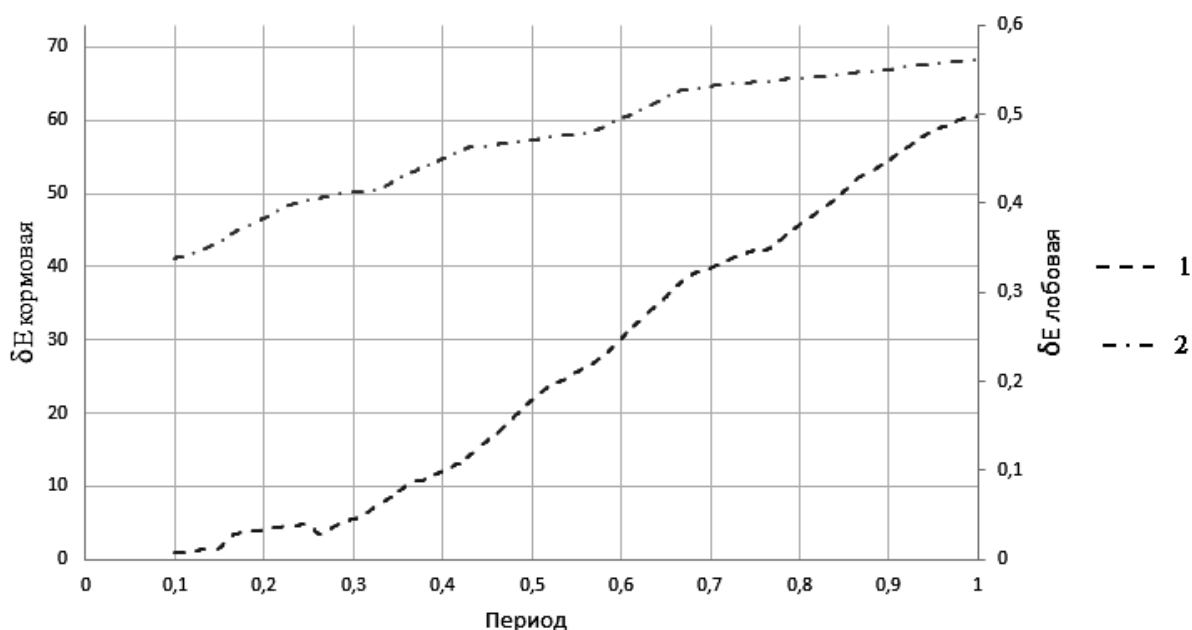


Рис. 7. Относительная скорость эрозии для режима №2 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – кормовая часть

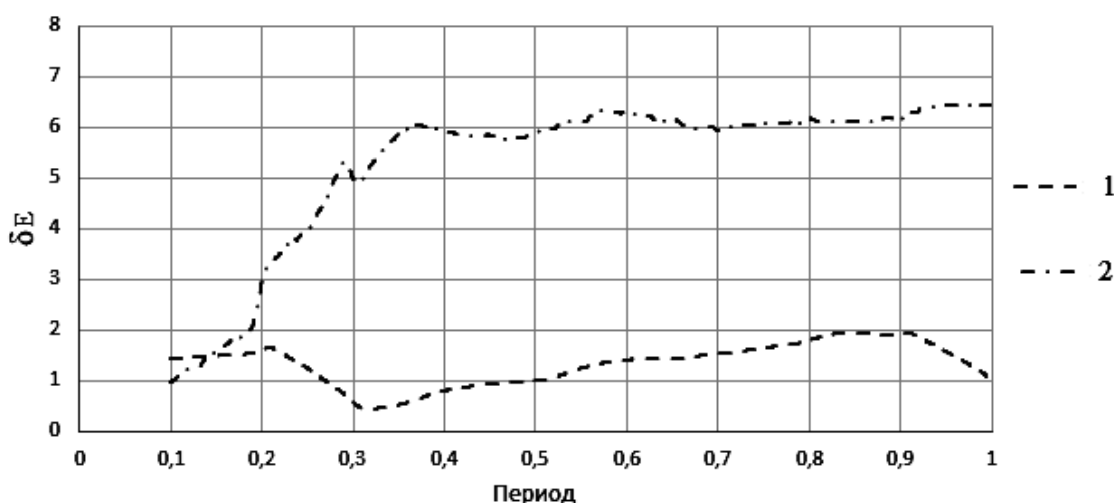


Рис. 8. Относительная скорость эрозии для режима №3 для одного периода: 1 – лобовая часть; 2 – кормовая часть

Таблица 8. Отношение усредненных за период скоростей эрозии ($\delta_{E,t}$)

Режим импульсного потока	Лобовая часть	Кормовая часть
1	0,9	0,48
2	0,23	57,6
3	1,3	5,2

Согласно результатам численного эксперимента, увеличение частоты повышает скорость эрозии и, следовательно, возможно, ускорит очистку теплообменного аппарата. Также можно сказать, что увели-

чение амплитуды пульсаций интенсифицировало процесс эрозии и в лобовой, и в кормовой части, при этом более низкая амплитуда пульсаций снижает эрозию в лобовой части, но существенно усиливает в кормовой, а это наиболее традиционно загрязняемая часть трубы в пучке труб теплообменных аппаратов.

Выводы. Численно исследовано влияние пульсаций, а также их частоты и амплитуды на факторы, оказывающие влияние на интенсивность очистки пучка труб. Установлено, что изменение амплитуды меняет локализацию усиливающих эффектов пульсаций на поверхности трубы, т.е. меньшая амплитуда увеличивает действие

очищающих факторов в кормовой зоне, в то время как большая – в лобовой. Изменение частоты оказывает различное влияние на скорость эрозии и касательное напряжение, уменьшение частоты увеличивает значения касательного напряжения сдвига, но снижает скорость эрозии, увеличение частоты, соответственно, оказывает обратное воздействие.

Окончательно ответить, какой режим более перспективен для очистки, на данный момент трудно, так как для этого требуются дальнейшие исследования влияния чисел Рейнольдса и геометрии, а также не лишним будет провести численное моделирование в большем диапазоне амплитуд и частот.

Список литературы

1. **Wang X., Zhang N.** Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2005. – Vol. 47. – P. 3957–3970. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.011
2. **Velazquez A., Arias J.R., Mendez B.** Laminar heat transfer enhancement downstream of a backward facing step by using a pulsating flow // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2008. – Vol. 51. – P. 2075–2089. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.06.009
3. **Zohir A.E.** Heat transfer characteristics in a heat exchanger for turbulent pulsating water flow with different amplitudes // *J. Am. Sci.* – 2012. – Vol. 8. – P. 241–250. DOI: 10.7537/marsjas080212.37
4. **Zohir A.E.** The Influence of Pulsation on Heat Transfer in a Heat Exchanger for Parallel and Counter Water Flows // *New York Science Journal*. – 2011. – Vol. 4, No. 6. – P. 61–71. DOI: 10.7537/marsnys040611.12
5. **Хайбуллина А.И.** Повышение эффективности теплообменных аппаратов наложением на поток в межтрубном пространстве низкочастотных пульсаций: дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. – Казань, 2017. – 229 с.
6. **Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling** / K. Bode, R.J. Hooper, W.R. Paterson, et al. // *Heat Transfer Engineering*. – 2007. – Vol. 28, No. 3. – P. 202–209. DOI: 10.1080/01457630601064611
7. **Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows** / C.R. Gillham, P.J. Fryer, A.P.M. Hasting, D.I. Wilson // *Journal of Food Engineering*. – 2000. – Vol. 46. – P. 199–209. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00083-2
8. **Monitoring of the Local Cleaning Efficiency of Pulsed Flow Cleaning Procedures** / M. Scholer, T. Fuchs, W. Augustin, et al. // *Proc. 8th Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*. – 2009. – P. 455–463. http://heatexchanger-fouling.com/papers/papers2009/64_Schoeler_F.pdf
9. **Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing** / W. Augustina, T. Fuchs, H. Föste, et al. // *Food and Bioproducts Processing*. – 2010. – Vol. 8. – P. 384–391. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.08.007
10. **Gudmundsson J.S.** Particulate fouling: fouling of heat transfer equipment // *Proceedings of the International Conference on the Fouling of Heat Transfer Equipment*, Hemisphere Publishers, Washington, D.C., 1981. – P. 357–388.
11. **Филиппов А.С.** Турбулентность и ее моделирование [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ibrae.ac.ru/docs/Kafedra/Филиппов%20МТТ%20март16.pdf>, свободный (дата обращения: 21.03.18)
12. **ANSYS Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide**, 18.2.0, 2017.
13. **Discrete element method for the prediction of the onset velocity in a spouted bed** / F. Marchelli, D. Bove, C. Moliner, et al. // *Powder Technology*. – 2017. – Vol. 321. – P. 119–131. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.08.032
14. **He Y., Bayly A.E., Hassanpou A.** Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid structure interaction in particle-fluid flows // *Powder Technology*. – 2018. – Vol. 325. – P. 620–631. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.11.045
15. **Liu D., Bu C., Chen X.** Development and test of CFD-DEM model for complex geometry: A coupling algorithm for Fluent and DEM // *Computers and Chemical Engineering*. – 2013. – Vol. 58. – P. 260–268. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.07.006
16. **Numerical investigation of the solid particle erosion rate in a steam turbine nozzle** / A. Campos-Amezcu, A. Gallegos-Munoz, C.A. Romero, et al. // *Applied Therm. Eng.* – 2007. – Vol. 27. – P. 2394–2403. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.03.010

References

1. Wang, X., Zhang, N. Numerical analysis of heat transfer in pulsating turbulent flow in a pipe. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, vol. 47, pp. 3957–3970. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.04.011
2. Velazquez, A., Arias, J.R., Mendez, B. Laminar heat transfer enhancement downstream of a backward facing step by using a pulsating flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2008, vol. 51, pp. 2075–2089. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.06.009
3. Zohir, A.E. Heat transfer characteristics in a heat exchanger for turbulent pulsating water flow with different amplitudes. *J. Am. Sci*, 2012, vol. 8, pp. 241–250. DOI: 10.7537/marsjas 080212.37
4. Zohir, A.E. The Influence of Pulsation on Heat Transfer in a Heat Exchanger for Parallel and

Counter Water Flows. New York Science Journal, 2011, vol. 4, no. 6, pp. 61–71.

5. Khaibullina, A.I. *Povyshenie effektivnosti teploobmennyykh apparatov nalozheniem na potok v mezhtrubnom prostranstve nizkochastotnykh pul'satsiy*. Diss. kand. tekhn. nauk [Improving the efficiency of heat exchangers by imposing low-frequency pulsations on the flow in the intertubular space. Cand. tech. sci. diss.]. Kazan, 2017. 229 p. (in Russian)

6. Bode, K. Hooper, R.J., Paterson, W.R., Wilson, D.I., Augustin, W., Scholl, S. Pulsed Flow Cleaning of Whey Protein Fouling Layers. *Heat Transfer Engineering*, 2007, vol. 28, no. 3, pp. 202–209. DOI: 10.1080/01457630601064611

7. Gillham, C.R., Fryer, P.J., Hasting, A.P.M., Wilson, D.I. Enhanced cleaning of whey protein soils using pulsed flows. *Journal of Food Engineering*, 2000, vol. 46, pp. 199–209. DOI: 10.1016/S0260-8774(00)00083-2

8. Scholer, M., Fuchs, T., Augustin, W., Scholl, S., Majschak, J.P. Monitoring of the Local Cleaning Efficiency of Pulsed Flow Cleaning Procedures. *Proc. 8th Int. Conf. on Heat Exchanger Fouling and Cleaning*, 2009, pp. 455–463. http://heatexchanger-fouling.com/papers/papers_2009/64_Schoeler_F.pdf

9. Augustina, W. Pulsed flow for enhanced cleaning in food processing. *Food and Bioproducts Processing*, 2010, vol. 8, pp. 384–391. DOI: 10.1016/j.fbp.2010.08.007

10. Gudmundsson, J.S. Particulate fouling: fouling of heat transfer equipment. *Proceedings of the International Conference on the Fouling of Heat Transfer Equipment*, Hemisphere Publishers, Washington, D.C., 1981, pp. 357–388.

11. Filippov, A.S. *Turbulentnost' i ee modelirovaniye* [Turbulence and its modeling]. Available at: <http://www.ibrae.ac.ru/docs/Kafedra/Филиппов%20МТТ%20март16.pdf>

12. ANSYS Inc., ANSYS FLUENT Theory Guide, 18.2.0, 2017.

13. Marchelli, F. Discrete element method for the prediction of the onset velocity in a spouted bed. *Powder Technology*, 2017, vol. 321, pp. 119–131. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.08.032

14. He, Y. Coupling CFD-DEM with dynamic meshing: A new approach for fluid structure interaction in particle-fluid flows. *Powder Technology*, 2018, vol. 325, pp. 620–631. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.11.045

15. Liu, D. Development and test of CFD-DEM model for complex geometry: A coupling algorithm for Fluent and DEM. *Computers and Chemical Engineering*, 2013, vol. 58, pp. 260–268. DOI: 10.1016/j.compchemeng.2013.07.006

16. Campos-Amezcu, A. Numerical investigation of the solid particle erosion rate in a steam turbine nozzle. *Applied Therm. Eng.*, 2007, vol. 27, pp. 2394–2403. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2007.03.010

УДК 621.165

Виктор Александрович Черников

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)», доктор технических наук, профессор высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: viktor.chernikov@ gmail.com

Эдуард Леонтьевич Китанин

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)», доктор технических наук, профессор высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: elkitanin@mail.ru

Елена Юрьевна Семакина

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)», кандидат технических наук, доцент высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: g.semakinalena@gmail.com

Екатерина Эдуардовна Китанина

ФГАУВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)», кандидат технических наук, доцент высшей школы энергетического машиностроения, Россия, Санкт-Петербург, e-mail: kkitanina@mail.ru

Теоретическое исследование применения выходного диффузора газовой турбины в качестве пароперегревателя парового контура комбинированной парогазовой установки

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время для теплоизоляции выходных диффузоров газовых турбин используется изоляция их внутренней поверхности. Это дорогостоящая и сложная технологическая процедура. Для ГТ в составе ПГУ в целях снижения стоимости изоляции и одновременно увеличения полезной мощности турбины альтернативой внутренней изоляции может стать охлаждение внешней поверхности диффузора паровым потоком из парового контура. В связи с этим актуальным является разработка технологии охлаждения диффузора потоком пара из парового контура.

Материалы и методы. Использованы параметры пара и газа парогазовой установки с котлом утилизатором ПГУ-450Т, а также данные экспериментальных и расчетных исследований модели выходного тракта ГТУ SGT5-3000E. Расчеты эффективности поверхностного охлаждения диффузора паром, поступающим из парового контура, выполнены аналитическим методом по предложенному алгоритму.

Результаты. Предложена схема пароперегревателя, расположенного на внешней поверхности выходного диффузора ГТУ, работающей в комбинированном цикле. Аналитическая оценка его эффективности показала, что площади поверхности диффузора ГТУ типа SGT5-3000E достаточно для обеспечения необходимого перегрева пара низкого давления. Установка такого теплообменника с использованием внешней поверхности диффузора обеспечивает снижение температуры его наружной стенки с 537 до 200 °С. Достоверность результатов подтверждена патентом на изобретение.

Выводы. Использование внешней поверхности выходного диффузора ГТУ вместо теплообменной поверхности пароперегревателя низкого давления котла-утилизатора может быть применено в ПГУ для снижения тепловых и гидравлических потерь в диффузоре и в тракте котла-утилизатора.

Ключевые слова: паровая турбина, газовая турбина, комбинированный парогазовый цикл, выходной диффузор, теплоизоляция, пароперегреватель, гидравлические потери

Viktor Aleksandrovich Chernikov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: viktor.chernikov@ gmail.com

Eduard Leont'evich Kitandin

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: elkitanin@mail.ru

Elena Yur'evna Semakina

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: g.semakinalena@gmail.com

Ekaterina Eduardovna Kitanina

Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Higher School of Power Engineering, Russia, Saint-Petersburg, e-mail: kkitanina@mail.ru

Theoretical study of the application of the outlet diffuser of a gas turbine as a steam circuit superheater of a combined gas-steam plant

Abstract

Background. Currently, thermal insulation of GTU output diffusers uses insulation of their inner surface. This is an expensive and complicated technological procedure. For gas turbines as part of CCGT, in order to reduce the cost of insulation and at the same time increase the useful power of the turbine, cooling the diffuser outer surface with a steam stream of a steam circuit can be an alternative way of internal insulation

Materials and methods. Steam and gas parameters of a combined cycle plant with a CCGT-450T, as well as the results of experimental and computational studies of the GTU SGT5-3000E gas turbine exhaust channel model were used. The calculations of the efficiency of the surface cooling of the diffuser with the steam coming from the steam circuit were carried out using the analytical method.

Results. A scheme of a superheater located on the outer surface of the GTU outlet diffuser operating in a combined cycle is proposed. Analytic evaluation of its effectiveness showed that the surface area of the GTU diffuser of the type SGT5-3000E is sufficient to provide the necessary overheating of low-pressure steam. Installation of such a heat exchanger using the outer surface of the diffuser provides a decrease of the temperature of its outer wall from 537 to 200 °C. The study validity is confirmed by a patent for an invention.

Conclusions. It has been established that the use of the outer surface of the GTU outlet diffuser instead of the heat exchange surface of the low pressure superheater of the utilizer boiler can be applied at CCGT unit to reduce heat and hydraulic losses in the diffuser path and in the utilizer boiler path.

Key words: steam turbine, gas turbine, combined gas-steam cycle, exhaust diffuser, thermal isolation, steam superheater, hydraulic losses

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.026-037

Введение. Выходной диффузор газовой турбины (ГТ) парогазовой установки (ПГУ) с котлом-утилизатором (КУ) представляет собой значительное сооружение по габаритам (длина 10–15 м, диаметр 3–6 м), металлоемкости и сложности. Основное назначение диффузора – восстановление давления за счет снижения кинетической энергии потока за последней ступенью ГТ, а следовательно, повышение перепада энтальпий в турбине и полезной мощности ГТУ.

Для решения этой задачи используются диффузоры с малым углом раскрытия, а значит, большой длины (10–15 м), так как газовый тракт котла-утилизатора имеет сечение ~100 м². В современных ПГУ температура газов, выходящих из газовой турбины, составляет 560–600 °C [1], поэтому при такой большой площади поверхности диффузора весьма актуальна проблема снижения потерь теплоты от наружного охлаждения через стенки диффузора в окружающую среду. Теплоизоляционное

покрытие диффузора выполняется на его внутренней поверхности. Это дорогостоящая процедура, так как необходимо покрыть изнутри криволинейную поверхность с площадью порядка 100–180 м² термостойкими теплоизоляционными элементами. В то же время имеется возможность иного решения задачи снижения тепловых потерь: *использовать поверхность диффузора в качестве промежуточного пароперегревателя низкого давления для передачи теплового потока через его стенку от газов непосредственно паровому потоку. Такое решение снизит температуру стенки диффузора, уменьшит потери напора в тракте КУ и, кроме того, упростит и удешевит технологию теплоизоляции.* Этот способ можно реализовать, если поток пара, вышедшего из барабана КУ, направить в каналы, расположенные на внешней поверхности выходного диффузора ГТ. Возможная схема пароперегревателя, расположенного на поверхности диффузора, представлена на рис. 1.

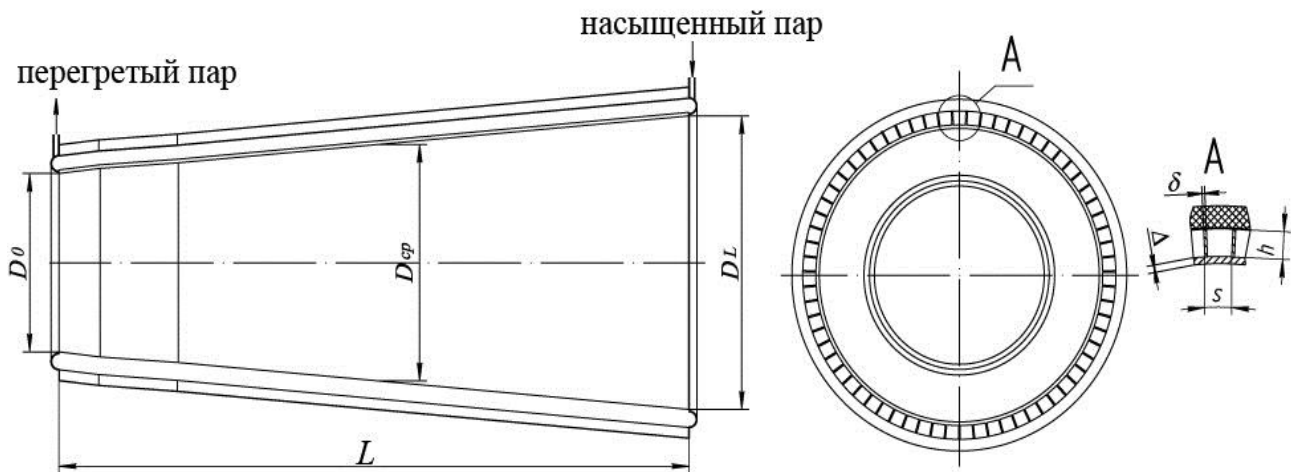


Рис. 1. Возможная схема промежуточного парогенератора на поверхности диффузора

Современные котлы-утилизаторы обычно выполняются с двумя или тремя барабанами (низкого – НД, среднего – СД и высокого – ВД давления) и, следовательно, с одним или двумя промежуточными пароперегревателями (ППНД, ППСД), после которых пар с определенными параметрами поступает в соответствующие зоны проточной части паровой турбины. Остальной поток пара поступает в пароперегреватель высокого давления (ППВД), после которого пар направляется в цилиндр высокого давления паровой турбины. Расходы пара, поступающего в промежуточные пароперегреватели и в основной ППВД, значительно различаются.

Сказанное дает основание полагать, что предлагаемая возможность перегрева пара на поверхности диффузора может быть реализована при замене одного или двух штатных трубчатых промежуточных пароперегревателей КУ на пароперегреватель, расположенный на поверхности диффузора. Это должно привести к понижению давления как за диффузором, так и за последней ступенью турбины, увеличивая перепад энтальпий в ней. Такое решение позволило бы снизить потери кинетической энергии потока газа в КУ, сократить потери теплоты через наружные стенки диффузора и упростить технологию нанесения его теплоизоляции.

Методы исследования. Для оценки возможности использования поверхности выходного диффузора ГТ в ГПУ с котлом-утилизатором в качестве ППНД необходимо рассчитать коэффициент теплопереда-

чи от газового потока к потоку пара в каналах, расположенных на его внешней поверхности и образованных радиальными перегородками, разделяющими кольцевое пространство между диффузором и внешней крышкой (рис. 1). Необходимо учитывать как конвективный, так и радиационный теплообмен между газом и внутренней поверхностью диффузора, так как в продуктах сгорания всегда имеются трехатомные газы: водяной пар и углекислый газ. При расчете теплообмена между внешней стенкой диффузора и паром также необходимо учитывать как конвективную, так и радиационную составляющую теплового потока. Теплообменом между внешним кожухом и окружающей средой в предварительных оценках можно пренебречь, полагая, что наружная теплоизоляция кожуха делает эти потери тепла незначительными. Зная коэффициент теплопередачи, можно рассчитать площадь поверхности, необходимую для заданного перегрева пара, и сопоставить ее с общей поверхностью диффузора.

Для оценок были использованы параметры пара и газа парогазовой установки с котлом-утилизатором ПГУ-450Т (рис. 2), приведенные в [1].

Параметры газа на входе в диффузор и параметры пара на входе и выходе ППНД и ППВД представлены в табл. 1. Схема проточной части модели выходного диффузора ГТУ SGT5-3000E в масштабе 1: 6,389 принята по данным [2] и представлена на рис. 3.

окружности диффузора; δ , l – толщина и длина ребра; Δ – толщина стенки диффузора.

Принцип расчета теплообмена между потоком газов, выходящих из газовой турбины, и паровым потоком через стенку диффузора хорошо известен и выражается формулой

$$Q = \bar{k}(T_1 - T_{\text{пар}})F_{\text{диф}}, \quad (1)$$

где Q – тепловой поток от газа к пару при данных условиях; k – коэффициент теплопередачи; T_1 – температура потока газа; T_2 – температура потока пара; $F_{\text{диф}}$ – площадь теплопередающей поверхности диффузора (по существу, это вся площадь его поверхности).

Средний коэффициент теплопередачи через гладкую стенку определяется соотношением

$$\bar{k} = \frac{1}{1/\alpha_1 + \Delta/\lambda_w + 1/\alpha_2}, \quad (2)$$

где λ_w – коэффициент теплопроводности стенки; α_1 и α_2 – коэффициенты теплоотдачи от газа к стенке и от стенки к пару, т.е. коэффициенты теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях диффузора.

Если стенка имеет какие-либо ребра, то вместо формулы (2) необходимо использовать соотношение

$$\bar{k} = \frac{1}{1/(\alpha_{1\text{эф}}\varphi_1) + \Delta/\lambda_w + 1/(\alpha_{2\text{эф}}\varphi_2)}. \quad (3)$$

В (3) $\varphi_1 = F_{1\text{ореб}}/F_{\text{диф}}$ и $\varphi_2 = F_{2\text{ореб}}/F_{\text{диф}}$ – коэффициенты оребрения внутренней и внешней поверхностей диффузора; $\alpha_{1\text{эф}}$, $\alpha_{2\text{эф}}$ – эффективные коэффициенты теплоотдачи, определяются соотношениями:

$$\alpha_{1\text{эф}} = \alpha_1[E_1 \cdot F_{1\text{р}}/F_{1\text{ореб}} + F_{1\text{мр}}/F_{1\text{ореб}}]; \quad (4)$$

$$\alpha_{2\text{эф}} = \alpha_2[E_2 \cdot F_{2\text{р}}/F_{2\text{ореб}} + F_{2\text{мр}}/F_{2\text{ореб}}], \quad (5)$$

где E_1 и E_2 – коэффициенты эффективности ребер, расположенных на внутренней и внешней поверхностях; $F_{\text{р}}$ – суммарная поверхность ребер; $F_{\text{мр}}$ – суммарная поверхность межреберных промежутков; $F_{\text{ореб}} = F_{\text{р}} + F_{\text{мр}}$ – общая теплообменная поверхность на внутренней ($F_{1\text{ореб}}$) и наружной ($F_{2\text{ореб}}$) поверхностях диффузора.

На рис. 1 изображен случай, когда в диффузоре отсутствуют ребра со стороны газа. В этом случае $\varphi_1 = 1$, $F_{1\text{р}}/F_{1\text{ореб}} = 0$, $F_{1\text{мр}}/F_{1\text{ореб}} = 1$ и, следовательно, $\alpha_{1\text{эф}} = \alpha_1$. Что касается теплообмена потока пара, то

его необходимо рассматривать как теплообмен с поверхностью канала.

Методика расчета коэффициентов теплоотдачи на внутренней и наружной поверхностях диффузора. Поток газа за последней ступенью турбины имеет высокую скорость (число Маха $M_{\text{с2}} = 0,40-0,45$) и температуру T_1^* в пределах $560-600$ °С. В этом потоке, кроме двухатомных газов (CO и N_2), не участвующих в теплообмене излучением, имеются и трехатомные газы (CO_2 и H_2O), которые, как известно, излучают и поглощают тепловое излучение пропорционально произведению их парциальных давлений p_{CO_2} и $p_{\text{H}_2\text{O}}$ и приведенной длины луча $l_{\text{рад}}$. Поэтому при расчете теплообмена потока газов с поверхностью диффузора необходимо учитывать конвективный и радиационный коэффициенты теплоотдачи: $\alpha_{1\Sigma} = \alpha_{1\text{к}} + \alpha_{1\text{рад}}$. Необходимо также оценить влияние конвективной и радиационной составляющих на теплообмен между паром и стенками внутри паровых каналов на наружной поверхности диффузора.

Расчет коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности диффузора. Расчет конвективного коэффициента теплоотдачи. Для достаточного строгого расчета коэффициента теплоотдачи на внутренней поверхности выходного диффузора требуется достоверная информация о гидродинамике процесса. Течение за последней ступенью газовой турбины многократно исследовалось экспериментальными и численными методами [2–5]. Все авторы отмечают, что структура потока за ступенью газовой турбины, при входе в диффузор, имеет сложный трехмерный вихревой характер. Особенно сложным этот поток является в периферийной области, так как здесь значительную роль играют вторичные явления в направляющем аппарате и в рабочем колесе, а также поток из радиального зазора над рабочим колесом. Этот поток обладает большой кинетической энергией и входит в диффузор с большим углом закрутки [2, 3]. Его взаимодействие с периферийным пристеночным слоем и с основным потоком определяется режимом нагрузки ГТУ. На начальном входном участке у периферии диффузора указанное взаимодействие иногда приводит к образованию квазистационарных крупномасштабных вихревых структур, которые в дальнейшем диссипируют и превращаются в турбулентный по-

граничный слой. Следовательно, на удаленных участках периферийного обвода диффузора теплообмен должен описываться традиционными закономерностями турбулентного пограничного слоя.

В [4] приведены результаты численного исследования теплообмена между стенками стоек подшипника, периферийным обводом диффузора и газом. Однако непосредственно использовать данные [4] в нашем случае невозможно, так как расчеты коэффициентов теплоотдачи были выполнены для модели, в 6,389 раз меньшей натурного диффузора. Поэтому необходимо провести оценку коэффициента теплоотдачи в натурном диффузоре, используя методы теории подобия.

Оценивать коэффициент теплоотдачи на внутренней поверхности диффузора по законам канального течения в данном случае неправомерно, так как относительная длина его невелика: длина $L_{\text{диф}} \approx 12$ м, средний диаметр $D_{\text{ср}} \approx 4,22$ м и $L_{\text{диф}}/D_{\text{ср}} \approx 3$. Из этого следует, что пограничные слои на противоположных образующих диффузора на выходе из него не сливаются, как это имеет место в длинных каналах, и составляют очень малую часть поперечного сечения потока. Толщина пограничного слоя существенно меньше его радиуса, поэтому допустимо рассматривать теплообмен внутри диффузора, используя закономерности плоского турбулентного пограничного слоя. Как отмечалось, в потоке за рабочим колесом турбины сохраняются вихри, образовавшиеся при обтекании лопаток, которые сильно турбулезируют поток, в этом же направлении действуют закрутка основного потока и поток, выходящий из радиального зазора над рабочим колесом турбины. Поэтому очевидно, что оценка, сделанная с использованием традиционных методик, не учитывающих эти дополнительные факторы, должна дать заниженное значение коэффициента теплоотдачи. Вопрос состоит в том, насколько велико это отличие. Данные [4] позволяют оценить это количественно.

Расчет локального теплообмена со стороны газа в плоском турбулентном слое обычно проводится по формуле

$$Nu_{1x} = 0,0296 Re_{1x}^{0,8} Pr_1^{0,4}, \quad (6)$$

где $Nu_{1x} = \alpha_{1kx} x / \lambda_1$ – локальное число Нуссельта; $Re_{1x} = w_{01} x / \nu_1$ – локальное число Рейнольдса; Pr_1 – число Прандтля; x – продольная координата вдоль поверхности;

α_{1kx} – локальный конвективный коэффициент теплоотдачи от газа к стенке диффузора; w_{01} – скорость газового потока за пределами пограничного слоя; λ_1 и ν_1 – коэффициенты теплопроводности и кинематической вязкости потока газа при локальных параметрах температуры и давления потока.

В нашем случае скорость в ядре потока изменяется, так как изменяется площадь поперечного сечения диффузора, поэтому при расчете числа Нуссельта будем использовать формулу (6), но подставляя в нее локальную скорость ядра потока w_{1x} , следовательно, в нашем случае $Re_{1x} = w_{1x} x / \nu_1$, из чего следует

$$Nu_{1x} = 0,0296 Re_{1x}^{0,8} Pr_1^{0,4} = 0,0296 (w_{1x} x / \nu_1)^{0,8}. \quad (7)$$

Используя формулу (7), можно рассчитать средний конвективный коэффициент теплоотдачи на заданном участке ($x_0 \dots L$):

$$\alpha_{1kx} = 0,0296 \lambda_1 \left(\frac{w_{1x}}{\nu_1} \right)^{0,8} x^{-0,2} Pr_1^{0,4}, \quad (8)$$

$$\alpha_{1kx} = \frac{0,0296 \lambda_1 Pr_1^{0,4}}{(L - x_0) \nu_1^{0,8}} \int_{x_0}^L w_{1x}^{0,8} x^{-0,2} dx. \quad (9)$$

Принимая, что зависимость площади от x имеет степенной характер, и учитывая, что среда несжимаемая, а $f_0(x_0 = 0,932 \text{ м}) = 6,03 \text{ м}^2$ и $f_L(L = 12 \text{ м}) = 21,54 \text{ м}^2$, получим:

$$n = \frac{\ln(f_0/f_L)}{\ln(x_0/L)} = 0,401, \quad (10)$$

$$w_{1x} = w_{10} \left(\frac{x_0}{x} \right)^{0,51189} \approx w_{10} \left(\frac{x_0}{x} \right)^{0,51}, \quad (11)$$

где w_{10} – скорость потока на входе, т.е. при $x = x_0$. В результате получим

$$\alpha_{1kx} = 0,0296 \lambda_1 Re_{x0}^{0,8} x^{-0,61} Pr_1^{0,4}, \quad (12)$$

где $Re_{x0} = w_{10} x_0 / \nu_1$ – число Рейнольдса, вычисленное по входным параметрам газа в диффузоре.

Понятно, что показатель степени $n = 0,51$ характерен для данного диффузора. Для канала с другим углом раскрытия он может отличаться от показателя, полученного в настоящей работе. Выполняя интегрирование (8), находим средний на участке конвективный коэффициент теплоотдачи

$$\bar{\alpha}_{1k} = 0,0759 \lambda_1 \cdot Re_{x0}^{0,8} Pr_1^{0,4} \frac{(L/x_0)^{0,39} - 1}{L - x_0} \quad (13)$$

или в безразмерной форме среднее число Нуссельта

$$\overline{Nu}_1 = \frac{\overline{\alpha}_{1k}(L - x_0)}{\lambda_1} = 0,0759 Re_{x0}^{0,8} Pr^{0,4} \left[\left(\frac{L}{x_0} \right)^{0,39} - 1 \right]. \quad (14)$$

Сопоставление результатов, полученных при численном моделировании течения и теплообмена [4], с расчетами с помощью формул (12) и (13) приведено на рис. 4.

Анализ полученных данных (рис. 4) показывает, что различие коэффициентов теплоотдачи на входе в диффузор достигает величины порядка 35 %, к середине канала разница составляет 15 %, в конце канала при $x = 1,803$ м – порядка 5 %. При расчетах коэффициента теплопередачи используются обычно средние по поверхности коэффициенты теплоотдачи, которые в данном случае составляют $136,4$ Вт/(м²·К) (по данным [4]) и $120,0$ Вт/(м²·К) (по формуле (11)). Полагаем, что такая точность достаточна для оценки коэффициента теплопередачи от газа к пару. Расхождение эффективных коэффициентов теплопередачи, рассчитанных по этим двум методикам, еще уменьшится при учете радиационного теплообмена.

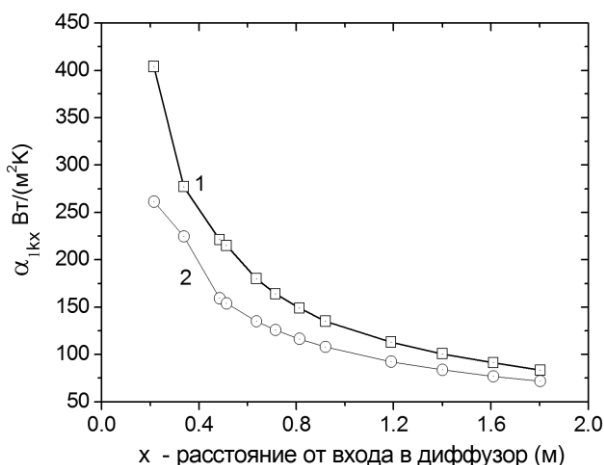


Рис. 4. Изменение среднего по периметру коэффициента теплоотдачи вдоль поверхности модельного диффузора ($w_{10} = 82,9$ м/с, $T = 20$ °С): 1 – по данным [4]; 2 – по формуле (12)

Расчет радиационного коэффициента теплоотдачи. Теплообмен излучением между газом и твердыми стенками целесообразно рассчитывать с помощью хорошо проверенного метода, изложенного в [5], в котором тепловой поток излучением вычисляется по формуле

$$q_{\text{рад}} = \frac{c_0 \left[\frac{\overline{\varepsilon}_g \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \overline{\varepsilon}_{\text{ст}} \left(\frac{T_{\text{ст}}}{100} \right)^4}{\frac{\overline{\varepsilon}_g}{\varepsilon_g} + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} - 1} \right]}{\varepsilon_g + \frac{1}{\varepsilon_{\text{ст}}} - 1}, \quad (15)$$

где $c_0 = 5,67$ Вт/м² – постоянная Стефана-Больцмана; ε_g , $\varepsilon_{\text{ст}}$ – степени черноты трехатомного газа при температуре газа T_1 и температуре стенки $T_{\text{ст}}$; $\overline{\varepsilon}_g$, $\overline{\varepsilon}_{\text{ст}}$ – предельные степени черноты газа при температуре газа T_1 и температуре стенки $T_{\text{ст}}$; $q_{\text{рад}}$ – удельный тепловой поток излучения от газа к стенке диффузора.

Величины ε_g и $\overline{\varepsilon}_g$ определяются соотношениями

$$\varepsilon_g = \varepsilon_{\text{CO}_2} + \beta \varepsilon_{\text{H}_2\text{O}}, \quad \overline{\varepsilon}_g = \overline{\varepsilon}_{\text{CO}_2} + \beta \overline{\varepsilon}_{\text{H}_2\text{O}}, \quad (16)$$

где $\varepsilon_{\text{CO}_2} = f((p_{\text{CO}_2} \cdot l_{\text{рад}}), T)$, $\varepsilon_{\text{H}_2\text{O}} = f((p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l_{\text{рад}}), T)$ – степени черноты углекислого газа и водяного пара в зависимости от температуры и произведений их парциального давления и приведенной длины луча $l_{\text{рад}}$; $\overline{\varepsilon}_{\text{CO}_2} = f((p_{\text{CO}_2} \cdot l_{\text{рад}})_{\text{max}}, T)$, $\overline{\varepsilon}_{\text{H}_2\text{O}} = f((p_{\text{H}_2\text{O}} \cdot l_{\text{рад}})_{\text{max}}, T)$ – предельные значения этих величин. Значения этих параметров и коэффициента β представлены в виде графиков в [5]. Приведенная длина луча оценивается по приближенной эмпирической формуле $l_{\text{рад}} = 3,6 V/F$, где V и F – объем газа (в данном случае объем диффузора) и площадь поверхности диффузора.

Теперь из закона Ньютона можно рассчитать радиационный коэффициент теплоотдачи ($\alpha_{1\text{рад}}$), если известен средний перепад температуры $\Delta T_{\text{ср}} = T_1 - T_{\text{ст}}$, а затем найти суммарный коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_{1\text{рад}} = q_{\text{рад}} / (\overline{T}_1 - \overline{T}_{\text{ст}}); \quad (17)$$

$$\overline{\alpha}_{1\Sigma} = \overline{\alpha}_{1k} + \alpha_{1\text{рад}}.$$

Для определения средней температуры стенки $\overline{T}_{\text{ст}}$, $\alpha_{1\text{рад}}$ и F требуется итерационная процедура, обсуждение которой приводится ниже.

Методика расчета коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности диффузора к пару. На внешней поверхности диффузора находятся каналы почти прямоугольного поперечного сечения, разделенные перегородками, которые расположены между диффузором и наружным кожухом и которые работают как теплопе-

редающие ребра (рис. 1). Количество паровых каналов вполне определяется, если известен шаг ребер s и периметр диффузора $\pi D_{\text{ср}}$. Для расчета площади их поперечного сечения, которая требуется для определения скорости пара в каналах, необходимо задать дополнительно толщину ребра δ_p и его длину в радиальном направлении l_p . Понятно, что продольная длина ребра равна или меньше длины диффузора L . Снаружи ребра покрыты дополнительной стенкой-кожухом, поверх которой находится слой теплоизоляции. Тепловой поток в такой системе передается пару, движущемуся в каналах от стенки диффузора через межреберные промежутки и через боковые поверхности ребер. Будем, как обычно, считать, что температура в основании ребер равна температуре поверхности межреберного промежутка $T_{\text{ст2}}$. Далее вдоль ребра (т.е. в радиальном направлении) температура изменяется в зависимости от толщины ребра, его теплопроводности $\lambda_{\text{ст}}$ и коэффициента теплоотдачи α_{2k} , который полагается, тоже как обычно, одинаковым и для ребер, и для межреберных промежутков.

Поскольку диаметр диффузора сильно изменяется по длине, количество каналов для движения пара, которое формально рассчитывается по формуле $N = \pi D_2 / s$, будет получаться различным. Это, конечно, неудобно как технологически, так и для расчетов, поэтому лучше, сохраняя число каналов N постоянным, изменять их ширину, а значит, шаг ребер будет зависеть от x , т.е. от $s_p(x)$. Постоянство площади проходного сечения каналов $f_{\text{кан}}$ по длине можно обеспечить за счет изменения их высоты по координате x , т.е. $l_p(x) = f_{\text{кан}} / [s_p(x) - \delta]$. В настоящей работе при оценочных расчетах число каналов рассчитывается по среднему по длине диаметру диффузора и по шагу ребер на этом диаметре.

Как при рассмотрении течения в диффузоре по газу, так и при анализе теплообмена в паровых каналах необходимо учитывать влияние не только конвективного, но и радиационного теплообмена, т.е. будем считать, что $\alpha_{2\Sigma} = \alpha_{2k} + \alpha_{2\text{рад}}$. Методика расчета радиационного коэффициента теплоотдачи совершенно аналогична методике, изложенной выше. Отличие заключается в том, что весь поток состоит из пара, а значит, парциальное давление пара равно его полному давлению $p_{\text{H}_2\text{O}} = p_2$, а

парциальное давление углекислого газа составляет $p_{\text{CO}_2} = 0$. Поперечные размеры паровых каналов могут быть очень малы, но давление пара может быть значительным, поэтому произведение $p l_{\text{рад}}$ может быть не малым и, следовательно, влияние радиационной составляющей на теплообмен в паровых каналах следует оценивать в каждом конкретном случае.

Расчет конвективного коэффициента теплоотдачи в паровых каналах может быть проведен для турбулентного течения традиционным образом:

$$\text{Nu}_2 = 0,023 \text{Re}_2^{0,8} \text{Pr}_2^{0,4}, \quad (18)$$

где $\text{Nu}_2 = \bar{\alpha}_{2k} d_{\text{экв}} / \lambda_2$ – число Нуссельта парового потока; $\text{Re}_2 = w_2 d_{\text{экв}} / \nu_2$ – число Рейнольдса парового потока; Pr_2 – число Прандтля пара; $d_{\text{экв}} = 4f_{\text{кан}} / \Pi$, $f_{\text{кан}} = (s_p - \delta_p) l_p$, $\Pi = 2(s_p - \delta_p) + 2l_p = 2(s_p - \delta_p + l_p)$, ν_2 и λ_2 – кинематическая вязкость и теплопроводность пара при заданных температуре и давлении пара T_2 и p_2 .

Как было сказано выше, число паровых каналов определяется на основе среднего по длине диаметра диффузора и среднего шага ребер: $N = D_{\text{ср}} / s_p$, где $D_{\text{ср}} = (D_0 + D_L) / 2$, после чего легко рассчитать среднюю скорость пара в параллельных каналах:

$$w_2 = \frac{G_2}{N(s_p - \delta_p) l_p \rho_2}, \quad (19)$$

где ρ_2 – плотность пара при температуре T_2 и давлении пара p_2 .

Предельным случаем течения пара является вариант, когда число каналов $N = 1$, т.е. случай течения пара в кольцевом канале без ребер. При этом в уравнении (3) $\varphi_2 = 1$, $\alpha_{2\text{эф}} = \alpha_2$, а критериальное уравнение теплообмена имеет вид

$$\text{Nu}_2 = 0,017 \text{Re}_2^{0,8} \text{Pr}_2^{0,4} \left(\frac{D_{\text{нар,ср}}}{D_{\text{ср}}} \right)^{0,18}. \quad (20)$$

Характерным размером для чисел Re_2 и Nu_2 в этом случае является удвоенная ширина зазора $d_{\text{экв}} = (D_{\text{нар}} - D_{\text{ср}})$, где $D_{\text{нар}}$ – наружный диаметр кольцевого канала, а скорость пара вычисляется из уравнения расхода $w_2 = G_2 / (\pi D_{\text{ср}} d_{\text{экв}} \rho_2)$.

Таким образом, при заданном расходе, давлении и температуре пара и заданных размерах паровых каналов по форму-

лам (18) и (20) рассчитывается число Нуссельта и затем вычисляется коэффициент теплоотдачи от стенки к пару:

$$\alpha_{2k} = Nu_2 \lambda_2 / d_{эв}.$$

Расчет коэффициента теплопередачи и необходимой поверхности теплообмена по пару. Конкретизируем общую формулу (3) для расчета коэффициента теплопередачи k для актуальных условий теплообмена между газом внутри диффузора и паровым потоком на его поверхности. Первые два соотношения, необходимые для вывода k , имеют вид:

$$Q = \alpha_{1\Sigma} F (T_1 - T_{ст1}); \quad (21)$$

$$Q = \lambda_{ст} (T_{ст1} - T_{ст2}) F / \Delta, \quad (22)$$

где $T_{ст1}$ и $T_{ст2}$ – температуры на внутренней и наружной поверхностях диффузора.

На наружной поверхности диффузора уравнение теплообмена включает тепловой поток, переданный межреберными промежутками и ребрами к пару:

$$Q = \alpha_2 (1 + N\delta_p / \pi D_{2cp} (2l_p E_2 / \delta_p - 1)) F (T_{ст2} - T_2), \quad (23)$$

где $\alpha_{2эф} = \alpha_2 (1 + N\delta_p / \pi D_{2cp} (2l_p E_2 / \delta_p - 1))$;

$$F = \pi D_{2cp} (L - x_0); E_2 = \frac{th(ml_p)}{ml_p}; m = \sqrt{\frac{2\alpha_2}{\lambda_{ст}\delta_p}}.$$

Из уравнений (21)–(23) получим $Q = kF(\bar{T}_1 - \bar{T}_2)$, где k вычисляется по формуле

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{1\Sigma}} + \frac{\Delta}{\lambda_{ст}} + \frac{1}{\alpha_2 \left(1 + \frac{N\delta_p}{\pi D_{2cp}} \left(\frac{2l_p E_2}{\delta_p} - 1 \right) \right)}} + \alpha_{2рад}. \quad (24)$$

Тепловой поток, передаваемый от газа к пару, записывается через изменение энтальпии парового потока и изменение энтальпии газового потока. Потери в окружающую среду пренебрежимо малы, поэтому

$$Q = G_2 (h_{2ввых} - h_{2вх}) = G_1 c_{1p} (T_{1вх} - T_{1ввых}). \quad (25)$$

Разность энтальпий на входе в пароперегреватели и на выходе из них определяются и оптимизируются при термодинамическом расчете ПГУ, т.е. являются заданными величинами. Температура газа на выходе из газовой турбины также задана, следовательно, уравнение (25) позволяет рассчитать температуру газа на выходе из охлаждаемого паром диффузора и

средний перепад температуры между газом и паром:

$$T_{1ввых} = T_{1вх} - \frac{G_2 (h_{2ввых} - h_{2вх})}{G_1 c_{1p}};$$

$$\Delta \bar{T}_{1-2} = (\bar{T}_1 - \bar{T}_2) = \frac{(T_{1ввых} - T_{2вх}) - (T_{1вх} - T_{2ввых})}{\ln \frac{(T_{1ввых} - T_{2вх})}{(T_{1вх} - T_{2ввых})}}. \quad (26)$$

Затем можно найти площадь поверхности, необходимую для перегрева пара до заданной температуры:

$$F = \frac{G_2 (h_{2ввых} - h_{2вх})}{k \cdot \Delta \bar{T}_{1-2}}, \quad (27)$$

и сопоставить ее с поверхностью диффузора $F_{диф}$ на участке, где расположены паровые каналы (от x_0 до L). Если считать, что диффузор представляет собой усеченный конус, то площадь его боковой поверхности равна $147,97 \text{ м}^2$.

Для расчета радиационных тепловых потоков и радиационного коэффициента теплоотдачи необходимо знать среднюю температуру внутренней поверхности диффузора $T_{ст}$, которую можно определить из закона Ньютона:

$$Q = \alpha_{1\Sigma} F (\bar{T}_1 - \bar{T}_{ст}); \quad (28)$$

$$\bar{T}_{ст} = \bar{T}_1 - Q / (\alpha_{1\Sigma} \cdot F).$$

Уравнение (28) представляет собой неявное трансцендентное уравнение для расчета температуры стенки, так как $\alpha_{1\Sigma}$ и F являются функцией $T_{ст}$, поэтому для решения уравнения требуется итерационная процедура. Учитывая, что при заданных условиях $\alpha_{1к} \gg \alpha_{1рад}$, в начальном приближении радиационным теплообменом можно пренебречь и считать, что $\alpha_{1\Sigma}^{(0)} = \alpha_{1к}$. Тогда по формуле (23) вычисляется $k^{(0)}$ – начальное значение коэффициента теплопередачи, затем по формулам (24), (25), (26) определяется начальное значение поверхности теплообмена $F^{(0)}$, перепад температуры между газом и стенкой $\Delta \bar{T}_{1-ст}^{(0)} = (Q / \alpha_{1\Sigma}^{(0)} F^{(0)})$ и температура стенки

$\bar{T}_{ст}^{(0)} = \bar{T}_1 - \Delta \bar{T}_{1-ст}^{(0)}$. Далее по формуле (12) вычисляется радиационный тепловой поток $q_{рад}^{(0)}$ и по формуле (14) радиационный коэффициент теплоотдачи $\alpha_{1рад}^{(0)}$. Затем вычисляется новое значение $\alpha_{1\Sigma}^{(i+1)} = \alpha_{1к} + \alpha_{1рад}^{(i)}$ (здесь i – номер итерации), после чего рассчитывается новое значение $k^{(i)}$, новое зна-

чение $F^{(i)}$ и цикл повторяется до тех пор, пока не будет получена требуемая точность. Практика показала, что для получения окончательного решения достаточно 5–6 итераций. Достоверность представленной методики подтверждена патентом на изобретение [6].

Оценка отбора теплоты от потока в выходном диффузоре. Поток энтальпии газов $H_{\text{вх}}$, выходящих из газовой турбины, можно оценить следующим образом:

$$H_{\text{вх}} \approx t_{\text{вх}} G_{\text{газ}} C_p, \quad (29)$$

где $t_{\text{вх}}$ – входная температура газов в диффузоре; $G_{\text{газ}}$ – массовый расход газов, выходящих из турбины и поступающих в котел-утилизатор; C_p – изобарная теплоемкость газов.

В нашем случае при рассмотрении схемы котла-утилизатора ПГУ450Е (см. табл. 1) $t_{\text{вх}} = 527^\circ\text{C}$, $G_{\text{газ}} = 525 \text{ кг/с}$, $C_p = 1080 \text{ Дж} = 1,08 \text{ кДж}$. Следовательно, величина потока энтальпии газов составляет величину $H_{\text{вх}} = 300000 \text{ кВт}$.

Поток энтальпии, затрачиваемый на перегрев пара, также легко оценивается по формуле

$$\Delta H_{\text{пер}} = (h_{\text{вх}} - h_{\text{вых}}) G_{\text{пар}}, \quad (30)$$

где $h_{\text{вх}}$ – энтальпия пара на входе в пароперегреватель низкого давления; $h_{\text{вых}}$ – энтальпия пара на выходе из пароперегревателя низкого давления; $G_{\text{пар}}$ – расход пара через пароперегреватель низкого давления.

По данным табл. 1, $h_{\text{вх}} = 2758 \text{ кДж/кг}$, $h_{\text{вых}} = 2842 \text{ кДж/кг}$, $G_{\text{пар}} = 56 \text{ т/час}$. Следовательно, на перегрев пара будет затрачено $\Delta H_{\text{пер}} = (2842 - 2758) \cdot 56000/3600 = 1307 \text{ кВт}$. Если оценить дополнительно тепло, теряемое в окружающую среду через наружную обечайку диффузора-пароперегревателя, в 10 % от теплоты, затраченной на перегрев пара, то суммарная потеря теплоты потоком газов составит $\Delta H_{\text{пер}\Sigma} = 1307 \cdot 1,1 = 1437 \text{ кВт}$.

Такая потеря составляет 0,47 % от располагаемой энтальпии потока, а снижение температуры газового потока, связанное с затратами на перегрев и на потери в окружающую среду, составит

$$\Delta t_{\text{газ}} = \frac{\Delta H_{\text{пер}\Sigma}}{G_{\text{газ}} c_p} = \frac{1437}{525 \cdot 1,08} = 2,53^\circ\text{C}.$$

Таким образом, изменение температуры потока газов в охлаждаемом диффузоре в данном случае оказывается настолько незначительным, что на стадии оценок им можно пренебречь и, следовательно, пересчитывать параметры во всех остальных точках предлагаемой схемы не требуется. При расчете других ПГУ с диффузором-пароперегревателем, в которых расход пара, направляемого на вторичный перегрев, может быть значительно большим, эти потери в диффузоре должны учитываться, а расчет всей схемы при этом становится итерационным.

Результаты. По представленной выше методике выполнены варианты расчетов необходимой поверхности теплопередачи при использовании выходного диффузора ГТ в качестве ППНД ПГУ-450Т.

Исходные данные. Для оценок были использованы параметры пара и газа парогазовой установки с котлом-утилизатором ПГУ-450Т, приведенные в [1]. Расходные характеристики газа и пара, а также энтальпия пара на входе и выходе пароперегревателя низкого давления по данным [4] приведены в табл. 1. Характерные размеры диффузора и паровых каналов, представленных на рис. 1, приведены в табл. 2.

На рис. 5, 6 представлены результаты расчетов необходимой площади поверхности диффузора для различных вариантов конструкции промежуточного парогенератора на его поверхности. Варианты различались высотой и шириной паровых каналов, а значит, и их количеством N . Во всех расчетах в качестве материала стенок диффузора использовалась нержавеющая сталь с теплопроводностью $\lambda_{\text{ст}} = 15 \text{ Вт/(м К)}$.

Анализ полученных зависимостей (рис. 5) показывает, что с ростом шага ребер и их высоты необходимая площадь поверхности теплообмена для перегрева пара до заданных параметров растет, но во всех случаях необходимая площадь поверхности меньше, чем общая поверхность диффузора $F_{\text{диф}}$ (табл. 2).

Таблица 2. Размеры элементов проточной части диффузора и число паровых каналов

L	12	м	s	20, 40, 60, 100, 200	мм	δ	4	мм
D_0	3,175	м	l_p	20, 40, 60, 100	мм	Δ	10	мм
D_L	5,328	м	N	1, 66, 132, 220, 330, 660	–	$F_{\text{диф}}$	147,97	м ²

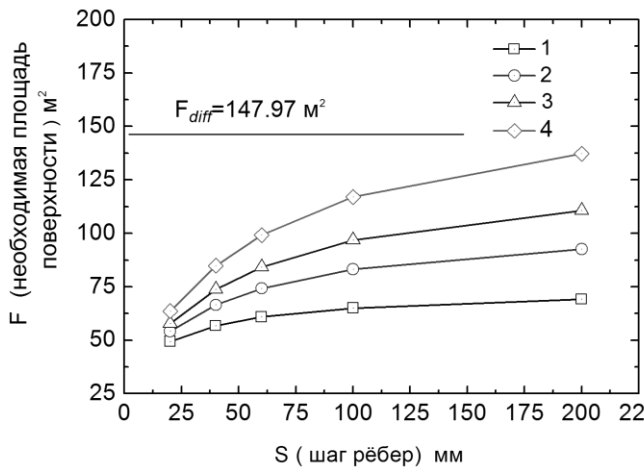


Рис. 5. Зависимость площади поверхности диффузора ГТУ типа SGT-5-3000E (для необходимого перегрева пара низкого давления в ПГУ-450Т от 169 до 200 °С) от шага ребер s и их длины l_p ($G_n = 56$ т/час, $G_r = 525$ кг/с): 1 – $l_p = 20$ мм; 2 – $l_p = 40$ мм; 3 – $l_p = 60$ мм; 4 – $l_p = 100$ мм

Анализ зависимостей (рис. 6) показывает, что только при кольцевом течении пара, т.е. при $N = 1$ и при $l_p \geq 60$ мм, необходимая площадь поверхности теплообмена превышает общую площадь поверхности диффузора, в остальных случаях $F < F_{\text{диф}}$. Понятно, что при использовании диффузора, изготовленного из более теплопроводных металлов (например, из углеродистых сталей с $\lambda_{\text{ст}} = 30\text{--}40$ Вт/(м·К)), потребная площадь окажется еще меньше.

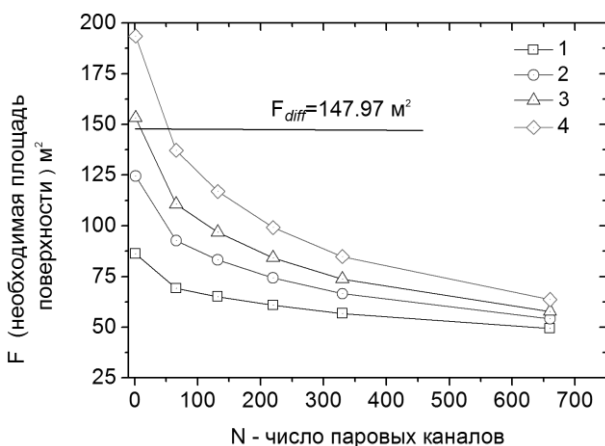


Рис. 6. Зависимость площади поверхности диффузора (для необходимого перегрева пара) от числа каналов N и их высоты h : 1 – $l_p = 20$ мм; 2 – $l_p = 40$ мм; 3 – $l_p = 60$ мм; 4 – $l_p = 100$ мм (при $N = 1$ – кольцевое течение)

Остается оценить гидравлические потери при течении пара по каналам. Такая оценка была выполнена при самых жестких условиях, т.е. при течении пара через са-

мые узкие каналы: $s_p = 20$ мм, $l_p = 40$ мм, $n = 660$. Число Рейнольдса при выбранной геометрии паровых каналов и заданных параметрах $p_2 = 6,5$ бар, $T_2 = 200^\circ\text{C}$ и $G_n = 56$ т/час равно $Re_2 = 54132$. Коэффициент трения при этом составит $\xi = 0,3164 / Re^{0,25} = 0,0207$, а потеря напора в каналах, по формуле Дарси-Вейсбаха, составит

$$\Delta p_{\text{пот}} = \xi \frac{\rho_{2\text{ср}} w^2}{2} \frac{L - x_0}{d_{\text{экв}}} = 0,0207 \cdot \frac{4,076 \cdot 9,035^2}{2} \cdot \frac{11}{0,02285} = 1661,26 \text{ Па.}$$

На наш взгляд, эта величина не является критической, так как в [1] изменение давления в тракте ППНД (см. рис. 2) существенно выше: $7,7\text{--}6,5 = 1,2$ бар.

Выводы. Охлаждаемый выходной диффузор ГТУ комбинированной парогазовой установки с котлом-утилизатором может быть технически реализован за счет его охлаждения паром второй ступени перегрева, отбираемым из парового контура ПГУ. Расчеты теплообмена, выполненные на примере ПГУ-450Т для газовой турбины SGT5-3000E, подтверждают эту возможность. Площадь поверхности диффузора достаточна для обеспечения перегрева пара низкого давления. Количество каналов на поверхности диффузора должно быть $N \geq 2$. Температура наружной поверхности диффузора за счет охлаждения паром может быть снижена с 537 до 200 °С.

Охлаждение паром позволяет отказаться от теплоизоляции внутренней поверхности диффузора и изолировать только его внешнюю поверхность, что снижает тепловые потери и значительно упрощает технологию нанесения теплоизоляции.

Размещение пароперегревателя низкого давления ПГУ-450Т на поверхности выходного диффузора позволяет уменьшить гидравлические потери в газовом тракте котла-утилизатора, что увеличивает перепад энтальпий, срабатываемый в газовой турбине, и ее мощность.

Список литературы

1. Трухний А.Д. Парогазовые установки электростанций. – М.: Изд. дом МЭИ, 2013. – 647 с.
2. Черников В.А., Зандер М.С. Исследование аэродинамических характеристик блока «ступень – выходной диффузор» стационарной

газовой турбины при различных режимах работы // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2011. – № 2(123). – С. 61–68.

3. **Черников В.А., Семакина Е.Ю.** Аэродинамические характеристики выходного осевого диффузора стационарной газовой турбины при различных режимах ее работы // Энергетические машины и установки. – 2009. – № 2. – С. 42–48.

4. **Численное** моделирование нестационарного течения и теплообмена в выходном диффузоре газовой турбины / С.А. Галаев, А.И. Кириллов, Е.М. Смирнов, Д.О. Панов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2016. – № 4 (254). – С. 59–68.

5. **Теория** тепломассообмена / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; под ред. акад. А.И. Леонтьева. – М.: Высш. шк., 1979. – 495 с.

6. **Пат.** 2715073 С1 Российская Федерация. Парогазовая установка с охлаждаемым диффузором / В.А. Черников, Э.Л. Китанин, Е.Ю. Семакина, Е.Э. Китанина. Опубл. 25.02.2020.

References

1. Trukhniy, A.D. *Parogazovye ustanovki elektrostantsiy* [Combined-cycle plant of power stations]. Moscow: Izdatel'skiy dom MEI, 2013. 647 p.

2. Chernikov, V.A., Zander, M.S. Issledovanie aerodinamicheskikh kharakteristik bloka «stupen' – vykhodnoy diffuzor» statsionarnoy

gazovoy turbiny pri razlichnykh rezhimakh raboty [Study of aerodynamic characteristic of «tap-exhaust diffuser» unit of stationary gas turbine under different operation modes]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2011, no. 2(123), pp. 61–68.

3. Chernikov, V.A., Semakina, E.Yu. Aerodinamicheskie kharakteristiki vykhodnogo oseвого diffuzora statsionarnoy gazovoy turbiny pri razlichnykh rezhimakh ee raboty [Aerodynamic characteristics of the exhaust axial diffuser of the stationary gas turbine under different operation modes]. *Energeticheskie mashiny i ustanovki*, 2009, no. 2, pp. 42–48.

4. Galaev, S.A., Kirillov, A.I., Smirnov, E.M., Panov, D.O. Chislennoe modelirovanie nestatsionarnogo techeniya i teploobmena v vykhodnom diffuzore gazovoy turbiny [Numerical simulation of unsteady flow and heat transfer in a gas turbine exhaust diffuser]. *Nauchno-tekhnicheskie vedomosti SPbGPU*, 2016, no. 4(254), pp. 59–68.

5. Isaev, S.I., Kozhinov, I.A., Kofanov, V.I., Leont'ev, A.I., Mironov, B.M., Nikitin, V.M., Petrazhitskiy, G.B., Samoylov, M.S., Khvostov, V.I., Shishov, E.V. *Teoriya teplomassoobmena* [Theoretical issues of heat-mass exchange]. Moscow: Vysshaya shkola, 1979. 495 p.

6. Chernikov, V.A., Kitanin, E.L., Semakina, E.Yu., Kitanina, E.E. *Parogazovaya ustanovka s okhlazhdaemym diffuzorom* [Combined-cycle plant with cooled diffuser]. Patent RF, no. 2715073, 2020.

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

Александр Леонидович Куликов

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», доктор технических наук, профессор кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники, Россия, Нижний Новгород, e-mail: inventor61@mail.ru

Дмитрий Игоревич Бездушный

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», аспирант кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники, Россия, Нижний Новгород, e-mail: dimok.93@mail.ru

Владислав Юрьевич Осокин

ФГБОУВО «Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева», аспирант кафедры электроэнергетики, электроснабжения и силовой электроники, Россия, Нижний Новгород, e-mail: osokin-v92@mail.ru

Применение линейного дискриминантного анализа для классификации аварийных режимов электрической сети

Авторское резюме

Состояние вопроса. Развивающийся в настоящее время подход к построению алгоритмов релейной защиты на основе статистического анализа данных предлагает переход от традиционных видов защит к принципиально новым многомерным алгоритмам распознавания, способным эффективно использовать доступную информацию для выявления аварийных режимов. Используемые для распознавания параметры режима, как правило, объединяются в многомерное пространство и анализируются совместно. Это приводит к росту вычислительной сложности распознающего алгоритма. Таким образом, может быть целесообразно построение алгоритмов РЗА на основе обобщенных признаков. Указанное решение позволит снизить размерность признакового пространства и повысить быстродействие защиты.

Материалы и методы. Используется линейный дискриминантный анализ для снижения размерности признакового пространства при распознавании режимов электрической сети. Формирование обучающей выборки для статистического анализа осуществляется при помощи имитационной модели анализируемого участка электрической сети. В качестве критерия эффективности принята матрица ошибок, полученная в результате применения метода k -ближайших соседей для классификации режимов сети в исследуемом признаковом пространстве.

Результаты. Предложен способ снижения размерности признакового пространства для алгоритмов многомерной РЗА, заключающийся в переходе к обобщенным признакам срабатывания, полученным

в результате применения линейного дискриминантного анализа. Способ позволяет сформировать уставочную плоскость, наиболее эффективную для классификации различных видов коротких замыканий и обеспечивающую безошибочную классификацию, в то время как уставочные плоскости, образованные парами исходных признаков, демонстрируют погрешность, достигающую 50 %. Поставленная цель по снижению размерности признакового пространства при сохранении исходной информативности достигнута.

Выводы. Линейный дискриминантный анализ может применяться производителями РЗА для снижения размерности признакового пространства при разработке алгоритмов многомерной релейной защиты, в том числе в задачах множественной классификации.

Ключевые слова: линейный дискриминантный анализ, информационный подход, имитационное моделирование, метод Монте-Карло

Aleksandr Leonidovich Kulikov

State Technical University of Nizhny Novgorod, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Power Industry, Electric Supply and Power Electronics department, Russia, Nizhny Novgorod, e-mail: inventor61@mail.ru

Dmitriy Igorevich Bezdushnii

State Technical University of Nizhny Novgorod, Post graduate student of the Power Industry, Electric Supply and Power Electronics department, Russia, Nizhny Novgorod, e-mail: dimok.93@mail.ru

Vladislav Yurievich Osokin

State Technical University of Nizhny Novgorod, Post graduate student of the Power Industry, Electric Supply and Power Electronics department, Russia, Nizhny Novgorod, e-mail: osokin-v92@mail.ru

Application of linear discriminant analysis for classification of electrical grid emergency states

Abstract

Background. The approach of development of relay protection algorithms based on statistical data analysis suggests a transition from traditional protections to innovative multidimensional algorithms of recognition which are able to use the available information for emergency states identification more efficiently. The state parameters used for recognition are usually combined into a single multidimensional space. This results in computational complexity of the recognition algorithm. Thus, it is advisable to implement relay protection algorithms based on generalized features. This decision will make it possible to decrease the dimension of the feature space and increase response time of the protection.

Materials and methods. The linear discriminant analysis is used to reduce the feature space dimension when recognizing the states of an electrical grid section. The training sampling for statistical analysis is formed using a simulation model of the analyzed network section. The error matrix obtained as a result of the application of k-nearest neighbors algorithm for the state classification in the developed feature space was taken as a criterion for the feature space efficiency.

Results. A method of feature space dimension reduction for the task of multidimensional relay protection was proposed. It involves generalized features of response obtained via linear discriminant analysis. The method allowed formation of a setting plane which is the most effective for different types of short-circuit classification. This setting plane provides an error-free state classification while the setting planes obtained by pairs of initial features demonstrate an error of up to 50 %. The set goal of the feature space dimension reduction was achieved.

Conclusions. Linear discriminant analysis is advisable to use by relay protection manufacturers for reduction of the feature space dimension in multidimensional relay protection problems, including multiple classification problems.

Key words: linear discriminant analysis, information approach, simulation modeling, Monte Carlo method

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.038-047

Введение. Подход к формированию алгоритмов релейной защиты и автоматики (РЗА), основанный на элементах матема-

тической статистики, получает распространение как в России [1, 2], так и за рубежом [3]. Реализация указанного подхода стала

возможной благодаря широкому распространению цифровых устройств интеллектуальной релейной защиты, способных выполнять сложные алгоритмы обработки информации в реальном времени, внедрению внутривыпускных коммуникационных протоколов, обеспечивающих цифровым устройствам доступ к большому объему данных о текущем режиме, а также благодаря развитию средств имитационного моделирования электроэнергетических систем (ЭЭС), позволяющих формировать статистические выборки о режимах защищаемого участка сети для обучения алгоритмов РЗА.

Статистический анализ данных по характерным режимам защищаемого объекта позволяет исследовать множество возможных режимов функционирования защищаемого объекта, включая маловероятные схемные варианты. Кроме того, при формировании правил и условий срабатывания устройств РЗА статистический подход обеспечивает учет не только диапазонов изменения наблюдаемых величин, но и неоднородностей распределений их вероятностей, а также корреляцию между переменными. Таким образом, возможен выбор параметров срабатывания защиты, минимизирующий вероятность ее ошибочного действия в тех случаях, когда абсолютное распознавание режимов не представляется возможным. Однако количество контролируемых величин, на основе которых осуществляется классификация режимов, как правило, выбирается произвольно и приводит к формированию многомерных признаков пространств.

Увеличение размерности признакового пространства способствует повышению качества распознавания [4], однако несет в себе ряд недостатков, связанных с ростом вычислительных затрат, необходимых для классификации режимов устройствами РЗА, а также времени обучения алгоритма защиты. Кроме того, распределения режимов и границы области срабатывания алгоритма РЗА в признаковом пространстве высокой размерности не могут быть наглядно визуализированы. В связи с этим целесообразно применение алгоритмов РЗА на основе обобщенных признаков, являющихся взвешенными комбинациями наблюдаемых величин [5]. Использование таких обобщенных признаков позволяет осуществить переход от исходного признакового пространства к

искусственно сформированному пространству существенно меньшей размерности, обладающему, однако, сопоставимой эффективностью с точки зрения распознавания режимов электрической сети.

Сжатие признакового пространства, получившее наибольшее распространение в задачах анализа данных, как правило, связывают с методом главных компонент [5]. Такой метод позволяет сформировать признаковое пространство меньшей размерности, образованное некоррелированными величинами, максимально сохраняющими дисперсию исходного признакового пространства. Пример применения метода главных компонент в бинарной задаче классификации режимов ЭЭС рассматривается в [6]. Тем не менее можно показать, что преобразование, обеспечивающее максимальную дисперсию, не всегда является оптимальным с точки зрения разделения классов. В качестве примера рассмотрим распределения двух случайных величин (рис. 1).

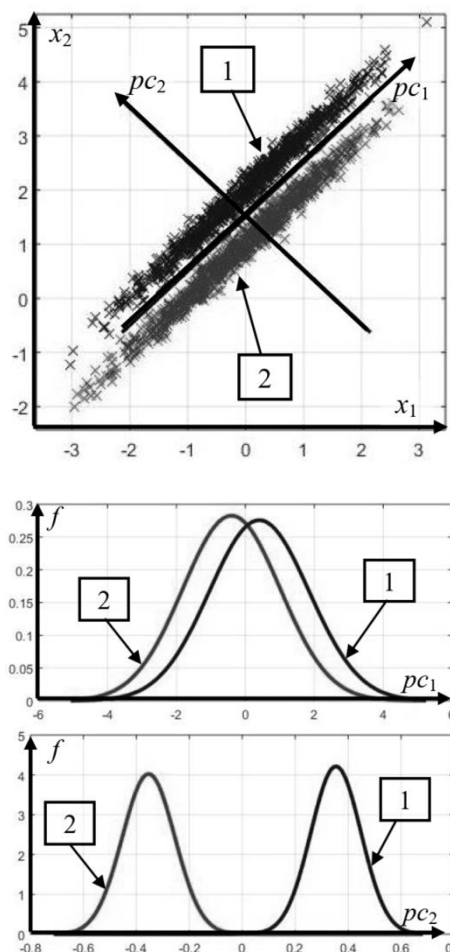


Рис. 1. Распределения точек обучающей выборки

Направление оси, проекция на которую обеспечивает максимальную диспер-

сию, обозначена как pc_1 , а ортогональная ей ось, соответствующая наименьшей дисперсии, – как pc_2 . Несмотря на максимальное значение дисперсии, проекции обучающей выборки на ось pc_1 не позволяют эффективно различить объекты обучающей выборки, относящиеся к разным классам. Вместе с тем использование в качестве информационного признака проекций данных на pc_2 позволяет безошибочно разделить обучающие выборки на классы.

Для получения обобщенных признаков, оптимальных для решения задач классификации режимов электрической сети, целесообразно учитывать статистические характеристики не только обучающей выборки в целом, но и классов в отдельности. Указанного эффекта позволяет достичь линейный дискриминантный анализ [7].

Аналогично методу главных компонент, линейный дискриминантный анализ обеспечивает выделение из исходного признакового пространства подпространства меньшей размерности, а его выбор реализуется исходя из следующих принципов:

- максимизация расстояния между математическими ожиданиями признаков различных классов;
- минимизация дисперсии признаков внутри каждого класса.

Линейный дискриминантный анализ направлен на снижение размерности пространства признаков таким образом, чтобы проекции классов представляли собой области с минимальным разбросом параметров и находились на наибольшем удалении друг от друга. Формирование решающего правила, разделяющего классы, в таком подпространстве потенциально более эффективно, чем в подпространстве, полученном с применением метода главных компонент.

Преобразование, позволяющее осуществить переход к обобщенным признакам в соответствии с линейным дискриминантным анализом, может быть получено в результате решения задачи оптимизации:

$$\max_{\mathbf{w}} \frac{\sum_{i=1}^c d_i^2}{\sum_{i=1}^c s_i^2}, \quad (1)$$

где \mathbf{w} – матрица, осуществляющая преобразование исходного признакового пространства в искомое; d_i – суммарное евклидово расстояние между математиче-

ским ожиданием i -го класса и математическим ожиданием всей выборки в искомом пространстве; s_i – дисперсия i -го класса в искомом пространстве; c – количество различных классов в выборке.

Согласно [7], (1) может быть выражено через статистические характеристики исходной обучающей выборки:

$$\max_{\mathbf{w}} \frac{\mathbf{w}^T \mathbf{S}_B \mathbf{w}}{\mathbf{w}^T \mathbf{S}_W \mathbf{w}}; \quad (2)$$

$$\mathbf{S}_B = \sum_{i=1}^c (n_i (\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu})^2) = \sum_{i=1}^c (n_i (\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu})^T (\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu})); \quad (3)$$

$$\mathbf{S}_W = \sum_{i=1}^c n_i \text{cov}(\mathbf{x}_i) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^{n_i} ((\mathbf{x}_{i,j} - \boldsymbol{\mu}_i)^2) = \sum_{i=1}^c \sum_{j=1}^{n_i} ((\mathbf{x}_{i,j} - \boldsymbol{\mu}_i)^T (\mathbf{x}_{i,j} - \boldsymbol{\mu}_i)), \quad (4)$$

где \mathbf{S}_B – ковариационная матрица различий между классами; \mathbf{S}_W – взвешенная сумма ковариационных матриц классов; n_i – длина i -го класса; $\boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\mu}$ – векторы-строки математических ожиданий i -го класса и всей выборки соответственно; $\mathbf{x}_{i,j}$ – вектор-строка, содержащий координаты j -го экземпляра i -го класса.

Для решения поставленной задачи оптимизации (2) требуется отыскание собственных векторов $\mathbf{V}_1 - \mathbf{V}_m$ и собственных значений $\lambda_1 - \lambda_m$ матрицы $\mathbf{r} = \mathbf{S}_W^{-1} \mathbf{S}_B$. Аналогично методу главных компонент, результирующая матрица \mathbf{w} , осуществляющая переход в пространство обобщенных признаков, формируется путем объединения собственных векторов, соответствующих наибольшему собственному значению: $\mathbf{w} = [\mathbf{V}_1 \mathbf{V}_2 \dots \mathbf{V}_k]$, где k – размерность формируемого пространства.

Тогда координаты в новом признаковом пространстве могут быть получены путем матричного преобразования:

$$\mathbf{x}^{LDA} = \mathbf{x} \mathbf{w}. \quad (6)$$

Материалы и методы. Проиллюстрируем применение линейного дискриминантного анализа для снижения размерности признакового пространства на примере разработки селектора поврежденных фаз, устанавливаемого для линии ω_1 участка электрической сети, изображенного на рис. 2.

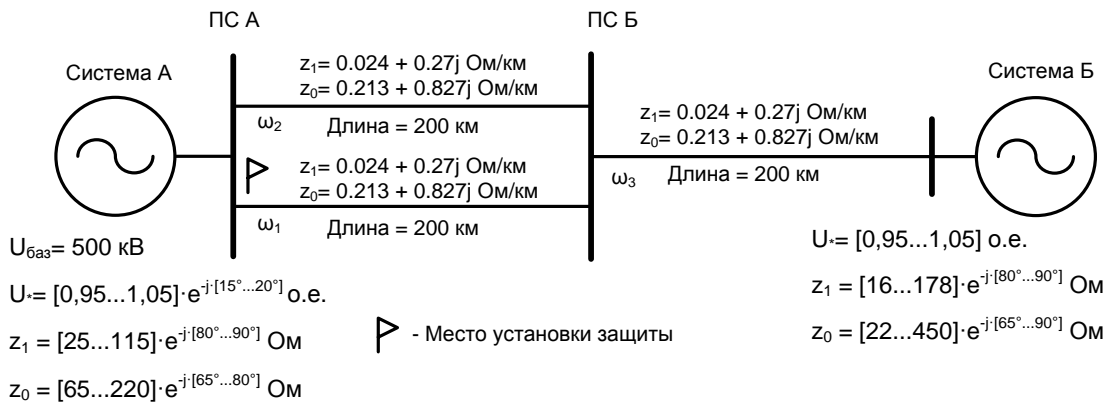


Рис. 2. Анализируемый участок электрической сети

В отличие от типовых решающих правил устройств РЗА, связанных с отключением или неотключением защищаемого объекта, задача селекции поврежденных фаз не является бинарной, а предполагает множественную классификацию. Перечень классов разрабатываемого селектора поврежденных фаз защиты (рис. 2) приведен в табл. 1.

Таблица 1. Перечень классов разрабатываемого селектора поврежденных фаз

Обозначение класса	Описание
K^{ABC}	Трехфазное короткое замыкание
K^{AB}	Двухфазное короткое замыкание фаз А и В (в т.ч., на землю)
K^{BC}	Двухфазное короткое замыкание фаз В и С (в т.ч., на землю)
K^{CA}	Двухфазное короткое замыкание фаз С и А (в т.ч., на землю)
K^{A0}	Однофазное короткое замыкание фазы А
K^{B0}	Однофазное короткое замыкание фазы В
K^{C0}	Однофазное короткое замыкание фазы С

Сформируем обучающую выборку путем многократного имитационного моделирования коротких замыканий (КЗ), перечисленных в табл. 1, на защищаемой линии ω_1 . Постоянные и переменные параметры схемы замещения представлены на рис. 2. Для каждого вида КЗ (табл. 1) реализовалось 2000 имитационных экспериментов с переменными параметрами, взятыми случайно из заданных диапазонов (рис. 2). При этом двухфазные КЗ и двухфазные КЗ на

землю моделировались разными сериями экспериментов. Таким образом, по результатам имитационного моделирования получены выборки размером 4000 элементов для классов K^{AB} , K^{BC} , K^{CA} и 2000 элементов для остальных классов. В качестве исходных информационных признаков выберем действующие значения токов трех фаз I_a , I_b , I_c линии ω_1 , замеренных со стороны ПС А. Таким образом, размерность m исходного признакового пространства равна 3.

Рис. 3 иллюстрирует расположение результатов имитационного моделирования рассматриваемых видов КЗ в исходном трехмерном признаковом пространстве, а также их проекции на плоскости, образованные парами признаков.

Анализ полученных результатов показывает, что плоскости, образованные парами исходных признаков, не способны обеспечить требуемое качество распознавания режимов, так как различные режимы накладываются друг на друга, образуя области взаимного пересечения.

Сформируем уставочную плоскость, образованную двумя обобщенными признаками, полученными в результате сжатия исходного трехмерного пространства признаков до двухмерного методом линейного дискриминантного анализа.

Для того чтобы исключить влияние различий в динамических диапазонах изменения переменных, выполним нормировку результатов имитационного моделирования с использованием выражения

$$x_{i,j} = \frac{\hat{x}_{i,j} - \bar{x}_j}{\sigma_j}, \quad (7)$$

где i – номер текущего эксперимента; j – номер текущего признака; $\hat{x}_{i,j}$ – значение j -го признака в i -м модельном эксперименте.

те; \bar{x}_j – математическое ожидание значений признака j по всем модельным экспериментам; σ_j – среднее квадратичное отклонение признака j по всем модельным экспериментам.

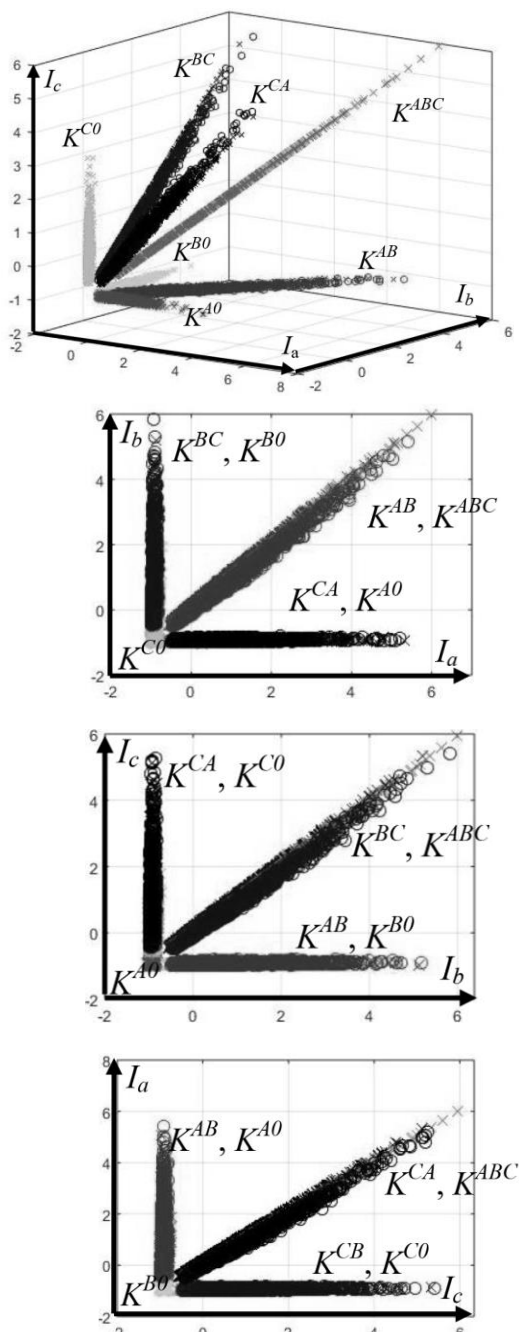


Рис. 3. Расположение результатов имитационного моделирования в исходном признаковом пространстве

В результате нормировки все признаки (токи) будут иметь нулевое математическое ожидание и единичную дисперсию:

$$\mathbf{x} = [x_{i,j}],$$

где \mathbf{x} – нормированная обучающая выборка.

Расчеты коэффициентов матрицы преобразования в соответствии с представленным выше алгоритмом требуют определения векторов математических ожиданий и ковариационных матриц каждого класса в отдельности, а также всей выборки в целом (табл. 2).

Таблица 2. Статистические характеристики выборки и отдельных классов в исходном пространстве признаков

Класс	Статистические характеристики
Выборка в целом	$\mu = (0 \ 0 \ 0)$ $\text{cov}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} 1 & 0,184 & 0,199 \\ 0,184 & 1 & 0,202 \\ 0,199 & 0,202 & 1 \end{pmatrix}$
K^{ABC}	$\mu_1 = (0,896 \ 0,889 \ 0,88)$ $\text{cov}(\mathbf{x}_1) = \begin{pmatrix} 0,896 & 0,867 & 0,867 \\ 0,867 & 0,864 & 0,858 \\ 0,861 & 0,858 & 0,852 \end{pmatrix}$
K^{AB}	$\mu_2 = (0,647 \ 0,649 \ -0,932)$ $\text{cov}(\mathbf{x}_2) = \begin{pmatrix} 0,691 & 0,662 & 0,008 \\ 0,662 & 0,645 & 0,007 \\ 0,008 & 0,007 & 0,001 \end{pmatrix}$
K^{BC}	$\mu_3 = (-0,934 \ 0,667 \ -0,671)$ $\text{cov}(\mathbf{x}_3) = \begin{pmatrix} 0,001 & 0,008 & 0,007 \\ 0,008 & 0,737 & 0,704 \\ 0,007 & 0,704 & 0,686 \end{pmatrix}$
K^{CA}	$\mu_4 = (0,667 \ -0,937 \ -0,643)$ $\text{cov}(\mathbf{x}_4) = \begin{pmatrix} 0,711 & 0,008 & 0,715 \\ 0,008 & 0,001 & 0,008 \\ 0,715 & 0,008 & 0,732 \end{pmatrix}$
K^{A0}	$\mu_5 = (0,208 \ -0,944 \ -0,92)$ $\text{cov}(\mathbf{x}_5) = \begin{pmatrix} 0,269 & 0,004 & 0,002 \\ 0,004 & 0,002 & 0 \\ 0,002 & 0 & 0,003 \end{pmatrix}$
K^{B0}	$\mu_6 = (-0,92 \ -0,225 \ -0,94)$ $\text{cov}(\mathbf{x}_6) = \begin{pmatrix} 0,003 & 0,003 & 0 \\ 0,003 & 0,281 & 0,004 \\ 0 & 0,004 & 0,002 \end{pmatrix}$
K^{C0}	$\mu_7 = (-0,943 \ -0,928 \ -0,214)$ $\text{cov}(\mathbf{x}_7) = \begin{pmatrix} -0,002 & 0 & 0,004 \\ 0 & 0,003 & 0,003 \\ 0,004 & 0,003 & 0,291 \end{pmatrix}$

Выполним расчет ковариационной матрицы различий между классами \mathbf{S}_B по выражению (3), а также взвешенной суммы ковариационных матриц отдельных классов \mathbf{S}_W по выражению (4):

$$\mathbf{S}_B = \sum_{i=1}^c (n_i (\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu})^T (\boldsymbol{\mu}_i - \boldsymbol{\mu})) =$$

$$= \begin{pmatrix} 1,211 & -0,078 & -0,068 \\ -0,078 & 1,216 & -0,056 \\ -0,068 & -0,056 & 1,203 \end{pmatrix} \cdot 10^4;$$

$$\mathbf{S}_W = \sum_{i=1}^c n_i \cdot \text{cov}(\mathbf{x}_i) =$$

$$= \begin{pmatrix} 7,89 & 4,46 & 4,65 \\ 4,46 & 7,84 & 4,6 \\ 4,65 & 4,6 & 7,968 \end{pmatrix} \cdot 10^3.$$

Тогда получаем

$$\mathbf{r} = \mathbf{S}_W^{-1} \mathbf{S}_B = \begin{pmatrix} 2,76 & -1,03 & -1,12 \\ -1,02 & 2,76 & -1,07 \\ -1,11 & -1,07 & 2,78 \end{pmatrix}.$$

Получим матрицу \mathbf{w} , объединив два собственных вектора матрицы \mathbf{r} , обладающие наибольшими собственными значениями:

$$\mathbf{V}_1 = \begin{pmatrix} 0,583 \\ 0,213 \\ -0,784 \end{pmatrix}; \quad \lambda_1 = 3,9;$$

$$\mathbf{V}_2 = \begin{pmatrix} 0,567 \\ -0,795 \\ 0,217 \end{pmatrix}; \quad \lambda_2 = 3,77;$$

$$\mathbf{V}_3 = \begin{pmatrix} 0,581 \\ 0,57 \\ 0,582 \end{pmatrix}; \quad \lambda_3 = 0,631;$$

$$\mathbf{w} = [\mathbf{V}_1 \ \mathbf{V}_2] = \begin{pmatrix} 0,583 & 0,567 \\ 0,213 & -0,795 \\ -0,784 & 0,217 \end{pmatrix}.$$

Проекция обучающей выборки на искомую уставочную плоскость, рассчитанные в соответствии с выражением (6), представлены на рис. 4, где области, соответствующие различным видам КЗ на ЛЭП

ω_1 , расположились на достаточном расстоянии друг от друга для реализации их корректной классификации.

Сравним полученную уставочную плоскость и плоскость, полученную в результате применения метода главных компонент на тех же модельных данных. Матрицу перехода к пространству главных компонент сформируем из двух собственных векторов корреляционной матрицы обучающей выборки \mathbf{x} , соответствующих наибольшему собственному значению.

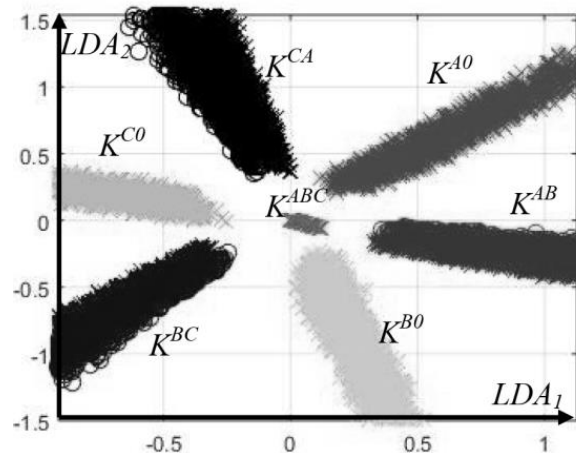
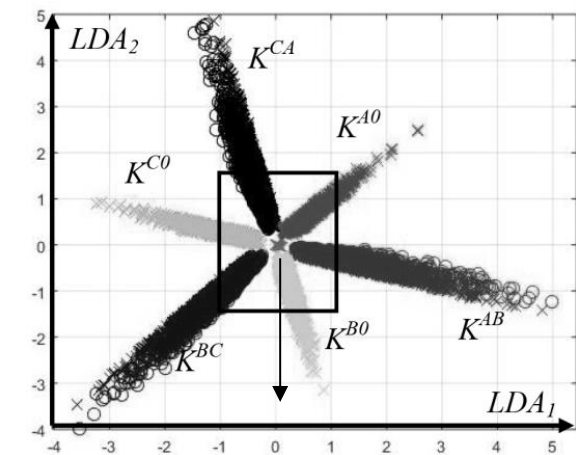


Рис. 4. Проекция обучающей выборки на уставочную плоскость, полученную методом линейного дискриминантного анализа

Результаты проецирования обучающей выборки на оси главных компонент показаны на рис. 5. Несмотря на максимальное возможное значение дисперсии обобщенных признаков, области, соответствующие различным классам на полученной уставочной плоскости, расположены более сгруппировано, чем на рис. 4, и образуют участки взаимного пересечения.

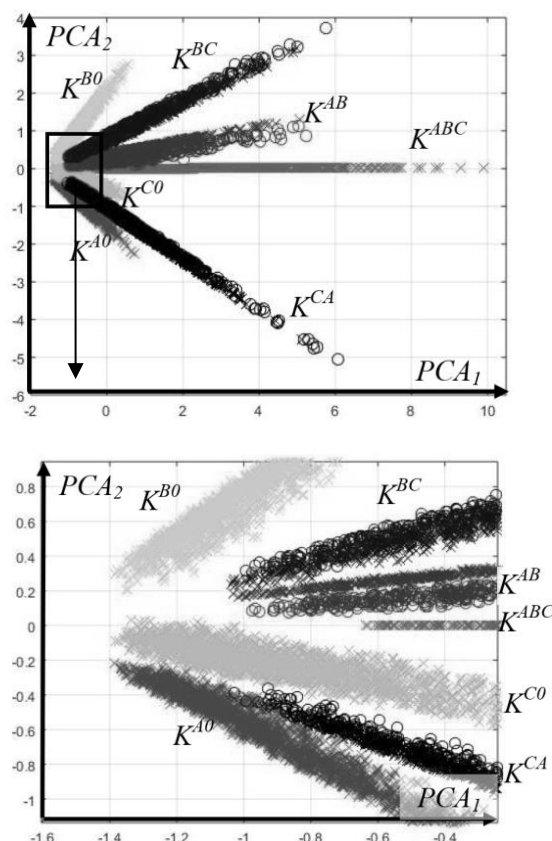


Рис. 5. Проекция обучающей выборки на уставочную плоскость, полученную методом главных компонент

Результаты. Оценим эффект от применения линейного дискриминантного анализа в задаче классификации электрических режимов, сопоставив информативность полученных уставочных плоскостей и уставочных плоскостей, образованных различными парными комбинациями исходных признаков. Критерием информативности признакового пространства может выступать вероятность правильной классификации заданного алгоритма, прошедшего обучение применительно к выбранному признаковому пространству. При этом результаты имитационного моделирования, характеризующие режимы участка электрической сети (см. рис. 2), случайным образом разделим на обучающую выборку, использующуюся для обучения алгоритма классификации, и тестовую выборку для оценки вероятности распознаваемости режимов. По результатам реализации процедуры классификации тестовой выборки обосновывается вывод об эффективности функционирования алгоритма защиты. Выберем в качестве алгоритма распознавания метод k ближайших соседей [8, 9], согласно которому анализируемый режим будет от-

несен к тому классу, представителей которого больше среди k элементов обучающей выборки, расположенных ближе всего к анализируемому электрическому режиму. Параметр k примем равным 100. Поскольку решаемая задача классификации является множественной, конечные результаты функционирования алгоритма распознавания удобнее всего отображать в виде матрицы ошибок (англ. *confusion matrix*) [10]. Матрицы ошибок, полученные с использованием уставочных плоскостей, образованных исходными признаками (рис. 3), сведены в табл. 3.

Таблица 3. Матрицы ошибок двухмерных классификаторов, полученные на основе комбинаций пар исходных признаков (%)

Уставочная плоскость Ia-Ib							
	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}
K^{ABC}	97	3	0	0	0	0	0
K^{AB}	51	49,1	0	0	0	0	0
K^{BC}	0	0	79,1	0	0	20,9	0
K^{CA}	0	0	0	72,2	27,9	0	0
K^{A0}	0	0	0	40,2	59,8	0	0
K^{B0}	0	0	45,4	0	0	54,6	0,1
K^{C0}	0	0	0	0	0	0	100
Уставочная плоскость Ib-Ic							
	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}
K^{ABC}	97,45	0	2,55	0	0	0	0
K^{AB}	0	76,9	0	0	0	23,1	0
K^{BC}	50,25	0	49,75	0	0	0	0
K^{CA}	0	0	0	78,5	0	0	21,5
K^{A0}	0	0	0	0	100	0	0
K^{B0}	0	44,5	0	0	0	55,5	0
K^{C0}	0	0	0	45,9	0	0	54,1
Уставочная плоскость Ic-Ia							
	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}
K^{ABC}	96,4	0	0	3,6	0	0	0
K^{AB}	0	79,9	0	0	20,2	0	0
K^{BC}	0	0	79,9	0	0	0	20,1
K^{CA}	52,3	0	0	47,7	0	0	0
K^{A0}	0	48	0	0	52	0	0
K^{B0}	0	0	0	0	0	100	0
K^{C0}	0	0	47,75	0	0	0	52,25

Анализ матриц ошибок (табл. 3) показывает, что уставочные плоскости, образованные исходными признаками, в целом демонстрируют довольно низкую распознающую способность. Наименьшая вероятность правильной классификации наблюдается при междофазных КЗ, когда в качестве информационных признаков используют токи соответствующих фаз. Наибольшая вероятность характерна для

трехфазных КЗ, а также однофазных КЗ, ток фазы которых не является частью уставочной плоскости.

Оценим распознающую способность алгоритмов классификации режимов с применением обобщенных признаков, полученных на основе методов главных компонент (см. рис. 5) и линейного дискриминантного анализа (см. рис. 4). Результирующие матрицы ошибок сведены в табл. 4.

Таблица 4. Матрицы ошибок двухмерных классификаторов, полученные на основе обобщенных признаков (%)

Признаки, полученные методом главных компонент							
	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}
K^{ABC}	99,9	0,1	0	0	0	0	0
K^{AB}	0,6	99,4	0	0	0	0	0
K^{BC}	0	0,35	99,65	0	0	0	0
K^{CA}	0	0	0	98,8	1,15	0	0,05
K^{AO}	0	0	0	1,25	98,6	0	0,15
K^{BO}	0	0	0	0	0	100	0
K^{CO}	0	0	0	0,05	0	0	99,95

Признаки, полученные линейным дискриминантным анализом							
	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}	K^{ABC}
K^{ABC}	100	0	0	0	0	0	0
K^{AB}	0	100	0	0	0	0	0
K^{BC}	0	0	100	0	0	0	0
K^{CA}	0	0	0	100	0	0	0
K^{AO}	0	0	0	0	100	0	0
K^{BO}	0	0	0	0	0	100	0
K^{CO}	0	0	0	0	0	0	100

Анализ данных табл. 4 показывает, что переход к обобщенным признакам обеспечил существенное увеличение вероятности правильного распознавания электрических режимов. На уставочной плоскости, образованной обобщенными признаками, полученными методом главных компонент, распознающий алгоритм позволяет корректно классифицировать любой режим с вероятностью не менее 98,6 %. Обобщенные признаки, сформированные с применением линейного дискриминантного анализа, обеспечивают реализацию уставочной плоскости, на которой безошибочно идентифицируются все виды коротких замыканий.

Выводы. Снижение размерности признакового пространства является важной задачей при использовании большого количества параметров режима электрической сети в качестве информационных признаков. Оно позволяет снизить вычисли-

тельную нагрузку на реализацию алгоритма распознавания без существенной потери его эффективности.

Линейный дискриминантный анализ обеспечивает переход от исходного признакового пространства к пространству обобщенных признаков. Эффективность метода обуславливается учетом статистических характеристик каждого из классов в отдельности при формировании матрицы преобразования в искомое признаковое пространство.

На примере построения простейшего фазового селектора устройства релейной защиты, использующего в качестве исходных признаков действующие значения токов фаз, проиллюстрирован эффект «сжатия информации» при понижении размерности признакового пространства с 3 до 2 с одновременным увеличением вероятности правильного распознавания режимов участка электрической сети.

Список литературы

1. Куликов А.Л., Шарыгин М.В. Применение статистических критериев распознавания режима релейной защиты сетей электроснабжения // Электротехника. – 2019. – № 2. – С. 58–64.
2. Куликов А.Л., Бездушный Д.И. Анализ реализаций информационного подхода в релейной защите // Релейщик. – 2016. – № 2. – С. 28–33.
3. Hasan, A.N., Pouabe-Eboule P.S., Twala B. The Use of Machine Learning Techniques to Classify Power Transmission Line Fault Types // International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. – Brasov, Romania: IEEE, 2017. – P. 221–226.
4. Лямец Ю.Я., Нудельман Г.С., Зиновьев Д.В. Многомерная релейная защита. Ч. 2. Анализ распознающей способности реле // Электричество. – 2009. – № 11. – С. 9–15.
5. Гладков, Б.В., Роговина И.В., Трофимова Н.А. Метод главных компонент. – М.: МИЭМ, 2010. – 28 с.
6. Куликов А.Л., Бездушный Д.И. Формирование обобщенных признаков срабатывания релейной защиты на основе метода главных компонент // Релейная защита и автоматизация. – 2019. – Т. 34, № 1. – С. 20–27.
7. Linear discriminant analysis: A detailed tutorial / A. Tharwat, T. Gaber, A. Ibrahim, A.E. Hassanien // AI Commun. – 2017. – No. 30. – P. 169–190.
8. Bishop C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. – Berlin: Springer, 2006. – 738 p.

9. **Hastie T., Tibshirani R., Friedman J.** The Elements of Statistical Learning. – Second Edition. – Berlin: Springer, 2001. – 745 p.

10. **Michie D., Spiegelhalter D., Taylor C.** Machine Learning, Neural and Statistical Classification. – Ellis Horwood, 1994. – 290 p.

11. **Гантмахер Ф.Р.** Теория матриц. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 560 с.

12. **Шнеерсон Э.М.** Цифровая релейная защита. – М.: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

13. **Методика** оценки информационных признаков, характеризующих режимы работы электрических сетей, по критерию распознаваемости релейной защитой / И.В. Нагай, В.И. Нагай, С.В. Сарры, С.Ю. Березкина // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2017. – № 4. – С. 27–33.

14. **Нагай И.В.** Обеспечение функций дальнего резервирования релейной защиты трансформаторов в условиях продольно-поперечной несимметрии // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 5. – С. 19–24.

15. **Измайлов А.Ф., Солодов М.В.** Численные методы оптимизации. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. – 320 с.

16. **Папков Б.В.** Токи короткого замыкания в электрических системах. – Н. Новгород: Типография НГТУ, 2005. – 276 с.

References

1. Kulikov, A.L., Sharygin, M.V. Primenenie statisticheskikh kriteriev raspoznavaniya rezhima releynoy zashchity setey elektrosnabzheniya [Application of statistic criteria of state parameters recognition of relay protection of electrical grid]. *Elektrotehnika*, 2019, no. 2, pp. 58–64.

2. Kulikov, A.L., Bezdushnyy, D.I. Analiz realizatsiy informatsionnogo podkhoda v releynoy zashchite [Analysis of information approach application]. *Releyshchik*, 2016, no. 2, pp. 28–33.

3. Hasan, A.N., Pouabe-Eboule, P.S., Twala, B. The Use of Machine Learning Techniques to Classify Power Transmission Line Fault Types. International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment. Brasov, Romania: IEEE, 2017, pp. 221–226.

4. Lyamets, Yu.Ya., Nudel'man, G.S., Zinov'ev, D.V. Mnogomernaya relejnaya zashchita. Ch. 2. Analiz raspoznaushchej sposobnosti rele [Multidimensional relay protection. Part 2. Analysis

of recognition property of relay]. *Elektrichestvo*, 2009, no. 11, pp. 9–15.

5. Gladkov, B.V., Rogovina, I.V., Trofimova, N.A. *Metod glavnih komponent* [Principal components method]. Moscow: MIEM, 2010. 28 p.

6. Kulikov, A.L., Bezdushnyy, D.I. Formirovanie obobshchennykh priznakov srabyvaniya releynoj zashchity na osnove metoda glavnih komponent [Development of generalized features of actuation of relay protection based on principal components method]. *Relejnaya zashchita i avtomatizatsiya*, 2019, vol. 34, no. 1, pp. 20–27.

7. Tharwat, A., Gaber, T., Ibrahim, A., Hassani, A.E. Linear discriminant analysis: A detailed tutorial. *AI Commun*, 2017, no. 30, pp. 169–190.

8. Bishop, C.M. Pattern Recognition and Machine Learning. Berlin: Springer, 2006. 738 p.

9. Hastie, T., Tibshirani, R., Friedman, J. The Elements of Statistical Learning. Berlin: Springer, 2001. 745 p.

10. Michie, D., Spiegelhalter, D., Taylor, C. Machine Learning, Neural and Statistical Classification. Ellis Horwood, 1994. 290 p.

11. Gantmakher, F.R. *Teoriya matrits* [Theory of matrices]. Moscow: FIZMATLIT, 2010. 560 p.

12. Shneerson, E.M. *Tsifrovaya releytnaya zashchita* [Digital relay protection]. Moscow: Energoatomizdat, 2007. 549 p.

13. Nagay, I.V., Nagay, V.I., Sarry, S.V., Bezezina, S.Yu. Metodika otsenki informatsionnykh priznakov, kharakterizuyushchikh rezhimy raboty elektricheskikh setey, po kriteriyu raspoznavaniya releynoy zashchity [Evaluation method of informing features of operation modes of electrical grid in a context of recognition of relay protection]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2017, no. 4, pp. 27–33.

14. Nagay, I.V. Obespechenie funktsiy dal'nego rezervirovaniya releynoy zashchity transformatorov v usloviyakh prodol'no-poperechnoy nesimmetrii [Providing function of distant backup protection of transformers in a context of direct and quadrature asymmetry]. *Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki*, 2011, no. 5, pp. 19–24.

15. Izmaylov, A.F., Solodov, M.V. *Chislennyye metody optimizatsii* [Numerical methods of optimization]. Moscow: FIZMATLIT, 2008. 320 p.

16. Papkov, B.V. *Toki korotkogo zamykaniya v elektricheskikh sistemakh* [Short-circuit current in electrical grids]. Nizhniy Novgorod: Tipografiya NGTU, 2005. 276 p.

УДК 621.321

Ольга Сергеевна Мельникова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Владимир Сергеевич Кузнецов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры высоковольтных электроэнергетики, электротехники и электрофизики, Россия, Иваново, e-mail: vldmirk@ya.ru

Метод расчета электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов

Авторское резюме

Состояние вопроса. К числу наиболее повреждаемых узлов силовых трансформаторов относится главная изоляция маслябарьерного типа. Нарушение такой изоляции происходит в результате пробоя масляного канала вблизи обмотки высшего напряжения. В соответствии с традиционными методами расчета электрической изоляции, значение пробивной напряженности определяется с помощью эмпирических формул в зависимости от выбранной ширины канала. В существующих методах не учитываются влияния объема канала, статистических характеристик прочности масла, конструктивных особенностей изоляции трансформаторов и не содержатся рекомендации по созданию расчетных моделей. В связи с этим актуальным является повышение точности расчета путем разработки метода оценки электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов с учетом объема и параметров распределения пробивной напряженности масла, особенностей конструкции.

Материалы и методы. Использованы результаты исследований пробивной напряженности в масляных каналах с различным объемом масла. Для повышения точности расчета и с учетом особенностей конструкции модель главной изоляции силовых трансформаторов выполнена в программе ANSYS с учетом граничных условий и с допущением линейного распределения напряжения по обмоткам трансформатора.

Результаты. Предложен метод расчета электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов с учетом объема и параметров распределения пробивной напряженности масла. В отличие от существующих методов, при расчете минимальной пробивной напряженности в модели главной изоляции учтены конструктивные особенности силовых трансформаторов и обоснованы допущения для повышения точности расчета. В соответствии с методикой выполнен расчет электрической прочности масла в масляном канале обмотки высшего напряжения и установлено, что по мере увеличения относительного значения пробивной напряженности электрическая прочность масляного канала уменьшается, что соответствует физическому смыслу формирования пробоя.

Выводы. Предложенный метод расчета электрической прочности трансформаторного масла может быть использован при выборе главной изоляции силовых трансформаторов в проектировании.

Ключевые слова: силовые трансформаторы, трансформаторное масло, маслябарьерная изоляция, масляные каналы, главная изоляция, электрическая прочность, пробивная напряженность

Olga Sergeevna Melnikova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the High-voltage Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electrophysics department (HvETP), Russia, Ivanovo, e-mail: o.c.melnikova@mail.ru

Vladimir Sergeevich Kuznetsov

Ivanovo State Power Engineering University, Master student of the High-voltage Electric Power Engineering, Electrotechnics and Electrophysics department (HvETP), Russia, Ivanovo, e-mail: vldmirk@ya.ru

Method of calculating the electric strength of oil channels of the main insulation of power transformers

Abstract

Background. The most damage-sensitive unit of power transformers is the main insulation of the oil barrier type. The breakdown of such insulation occurs as a result of the breakdown of the oil channel near the high voltage winding. In accordance with traditional methods of calculating the dielectric strength of insulation, the value of the breakdown strength is determined by empirical formulas depending on the selected width of the oil channel. The existing methods do not consider the influence of the oil channel volume, of the electric strength the statistical characteristics of the oil, the design features of the insulation of power transformers, and do not contain recommendations for creating design models. Thus, to improve the calculation accuracy, it is relevant to develop the evaluation method of dielectric strength of the main insulation of power transformers taking into account the volume and parameters of the breakdown voltage distribution of transformer oil, design features

Materials and methods. The research results of the breakdown tension in oil channels with different volumes of transformer oil were used. To improve the accuracy of the calculation and taking into account the design features, the model of the main insulation of power transformers was made in the ANSYS program. Boundary data and assumption of linear stress distribution of transformer coils were considered.

Results. A method for calculating the dielectric strength of oil channels of the main insulation of power transformers, considering the volume and parameters of the breakdown voltage distribution of transformer oil was proposed. Unlike the existing methods, when calculating the minimum breakdown strength in the model of the main insulation, the design features of power transformers are taken into account and assumptions are justified to improve the accuracy of the calculation. In accordance with the methodology, the parameters of the dielectric strength of the transformer oil in the oil channel of the high voltage winding of the transformer were calculated. It was concluded that with increase of relative value of breakdown tension, dielectric strength of oil channel is decreasing, and it corresponds to physical sense of breakdown.

Conclusions. The method for calculating the dielectric strength of transformer oil can be used when choosing the main insulation of power transformers in design.

Key words: power transformers, transformer oil, oil barrier insulation, oil channels, main insulation, dielectric strength, breakdown voltage

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.048-055

Введение. Основной причиной отказов силовых маслонаполненных трансформаторов является снижение электрической прочности внутренней изоляции [1, 2]. Главная изоляция в полной мере относится к числу наиболее повреждаемых узлов внутренней изоляции [3]. Такая повреждаемость обусловлена конструктивными особенностями силовых трансформаторов, изоляция которых выполняется маслобарьерного типа и представляет собой чередование барьеров из электротехнического картона и масляных каналов.

Нарушение маслобарьерной изоляции происходит в результате пробоя масляного канала вблизи обмотки высшего напряжения. Электрическая прочность трансформаторного масла существенно меньше, чем у электротехнического картона, в связи с этим наибольшая напряженность электрического поля наблюдается именно в масляном канале. К повреждениям масляного канала приводят частичные разряды при интенсивности 10^{-7} – 10^{-6} Кл и

более, в результате которых происходят необратимые повреждения барьеров [4]. Поэтому пробой масляного канала обмотки ВН является критерием нарушения электрической прочности электроизоляционной конструкции силового трансформатора.

С ростом номинальных напряжения и мощности силовых трансформаторов повышаются требования к их изоляции. При одном и том же заданном номинальном напряжении мощность трансформатора может изменяться в широком диапазоне¹, и также стоит отметить обратное. Увеличение мощности при переходе на более высокие классы номинального напряжения приводит в значительной мере к возрастанию габаритов электроизоляционной конструкции [5], что влечет за собой увеличение габаритов трансформаторов и, соот-

¹ ГОСТ 9680-77. Трансформаторы силовые мощностью 0,01 кВА и более. Ряд номинальных мощностей: введ. 1979-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 2007. – 4 с.

ветственно, объема трансформаторного масла в каналах главной изоляции. В этом случае важно отметить, что с ростом объема масла происходит снижение электрической прочности маслобарьерной изоляции [6]. Это обусловлено статистической природой формирования пробивных процессов в трансформаторном масле [7, 8].

Методы выбора главной изоляции трансформаторов в настоящее время основаны на результатах экспериментального определения пробивной напряженности трансформаторного масла на моделях [9, 10]. Исследования электрической прочности маслобарьерной изоляции проводят при различной ширине масляного канала, характерной для реальных силовых трансформаторов. Для сравнения допустимых напряженностей, полученных на моделях маслобарьерной изоляции трансформаторов, с расчетными значениями в действующих отечественных² и зарубежных методиках [11, 12, 13] используются зависимости минимальной пробивной напряженности от ширины масляного канала, прилегающего к обмотке ВН, при различных электрических воздействиях. Зависимость пробивной напряженности масляного канала $E_{м.к.,пр}$ от его ширины $S_{м.к.}$ определяется с применением эмпирических формул:

$$E_{м.к.,пр} = A/S_{м.к.}^{-0,37}, \quad (1)$$

$$E_{м.к.,пр} = B + C/S_{м.к.}^{0,5}, \quad (2)$$

где A , B , C – эмпирические коэффициенты, зависящие от различных электрических воздействий.

В расчетах допустимой напряженности электрического поля при соответствующих испытательных воздействиях принимается

$$E_{доп. м.к.} = k_{\Pi} E_{м.к.,пр. мин}, \quad (3)$$

где $E_{м.к., пр. мин}$ – минимальная пробивная напряженность; k_{Π} – коэффициент, учитывающий влияние различных факторов. Обычно значение этого коэффициента при расчетах принимается равным $k_{\Pi} = 0,8–0,9$.

Однако исследования электрической прочности трансформаторного масла позволили установить, что значения пробивной напряженности зависит не только от ширины масляного канала, но и от площа-

ди электродов [14, 15]. Вместе с тем в существующих методиках выбора главной изоляции трансформаторов учет влияющих факторов осуществляется лишь косвенным введением постоянного поправочного коэффициента.

Таким образом, при выборе электрических характеристик маслобарьерной изоляции одним из направлений решения этой задачи можно рассматривать разработку метода определения электрической прочности трансформаторного масла для различных его объемов.

Метод расчета. Сложность при расчетах главной изоляции силовых трансформаторов заключается в том, что электрическое поле в масляных каналах является неоднородным.

Неоднородные электрические поля по коэффициенту неоднородности k_n разделяются на два вида [9]: слабонеоднородные и резко неоднородные. Коэффициент неоднородности рассчитывается по формуле

$$k_n = \frac{E_{\max}}{E_{\text{ср}}}, \quad (4)$$

где E_{\max} – максимальная напряженность электрического поля; $E_{\text{ср}}$ – средняя напряженность электрического поля, определяемая по

$$E_{\text{ср}} = \frac{U}{S}, \quad (5)$$

где U – воздействующее напряжение; S – расстояние между электродами.

Принято считать, что слабонеоднородные электрические поля имеют место при коэффициентах неоднородности электрического поля $k_n < 2$. В случаях, когда $k_n \geq 4$, электрическое поле принято считать резко неоднородным. В слабо неоднородных полях происходит постепенное развитие разряда. То есть при таких электрических полях возникновение критических разрядов приводит к образованию разрядного канала, как и в случае однородного поля. Нарушение маслобарьерной изоляции в неоднородных электрических полях происходит вблизи электродов с наибольшей кривизной, где напряженность электрического поля максимальна.

Таким образом, следует отметить, что появление критических частичных разрядов в жидком диэлектрике приводит к полному пробоем промежутков в случае однородных и слабо неоднородных полей или к

² РТМ 16.800.853-81. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжения 110–750 кВ. Методика расчета изоляции между обмотками. 1981.

постепенному электрическому старению под действием критических частичных разрядов для резко неоднородных полей.

Основываясь на рассмотренных выше физических процессах, ряд исследователей полагают [8], что образование критических разрядов в объеме масла происходит у электрода с максимальной напряженностью. С учетом этого объем масла оценивается как объем, расположенный между поверхностями с напряженностями, соответственно, E_{\max} и $0,9E_{\max}$, получивший название «напряженного объема» масла.

При расчетах главной изоляции в качестве объекта выбраны трехфазные двухобмоточные силовые трансформаторы с номинальным напряжением 110 кВ (рис. 1). Для таких трансформаторов удается сохранять принцип подобия конструкции электродов при широком диапазоне номинальных мощностей. Также стоит отметить, что число трансформаторов данного класса напряжения в электрических сетях, по сравнению с другими классами, достаточно велико. При этом рассматривается плоская стержневая система с концентрическим расположением обмоток, каналы между обмотками заполнены трансформаторным маслом.

Наибольшее значение напряженности, как отмечалось выше, имеет место в первом масляном канале вблизи обмотки ВН. Напряженный объем масла в первом масляном канале оценивается как объем, расположенный между поверхностями, соответствующими обмотке ВН, и первым барьером из электрокартона. Следующие результаты представлены для этого случая.

С учетом отмеченного выше и в соответствии с обозначениями на рис. 1

объем масла в первом масляном канале обмотки ВН составляет

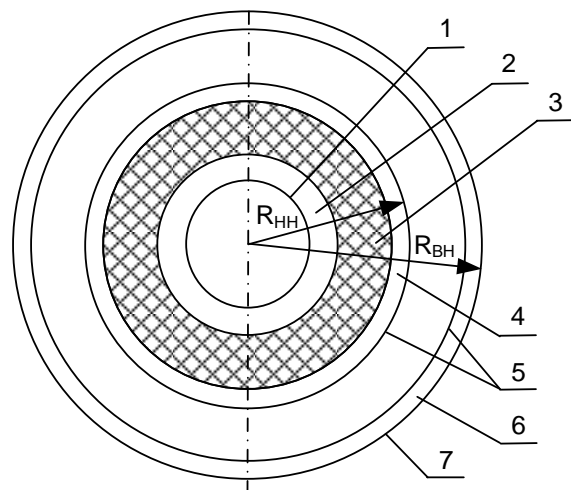
$$V_{\text{м.к.ВН}} = \pi H S_{\text{м.к.ВН}} (2 \cdot R_{\text{ВН}} - S_{\text{м.к.ВН}}). \quad (6)$$

В [16] для конструкции таких трансформаторов были получены выражения для определения основных размеров изоляции и объема масла в первом масляном канале с учетом минимальной пробивной напряженности:

$$V_{\text{м.к.ВН}} = \pi H S_{\text{м.к.ВН}} (1,02 \cdot 10^{-2} \times \\ \times 4 \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3 \cdot U_{\text{р}}}} \left(\frac{k_{\text{из}} U_{\text{расч}}}{k_{\text{П}} E_{\text{м.к.пр мин}}} + 1,1 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3}} \right) + \\ + 2 \cdot S_{\text{с-НН}} + 2,42 \cdot 10^{-3} \sqrt[4]{\frac{S_{\text{Н}}}{3}} + \frac{2 \cdot k_{\text{из}} U_{\text{расч}}}{k_{\text{П}} E_{\text{м.к.пр мин}}} - S_{\text{м.к.ВН}}), \quad (7)$$

где $S_{\text{м.к.ВН}}$ – ширина масляного канала обмотки ВН; $S_{\text{Н}}$ – номинальная мощность трансформатора; $U_{\text{расч}}$ – воздействующее испытательное напряжение; $k_{\text{из}} = 1,1-1,2$ – коэффициент, учитывающий влияние наличия барьеров и цилиндричности конструкции изоляции; $S_{\text{с-НН}}$ – толщина изоляции обмотки НН от стержня.

Как отмечалось выше, в соответствии с традиционными методиками расчета электрической прочности изоляции, значение минимальной пробивной напряженности определяется с помощью эмпирических формул (1), (2) в зависимости от выбранной ширины первого масляного канала без учета влияния объема и статистических характеристик электрической прочности масла и конструктивных особенностей изоляции силовых трансформаторов. А также традиционные методики не содержат рекомендаций по созданию расчетных моделей.



- 1 – стержень магнитопровода;
- 2 – толщина изоляции обмотки НН от стержня;
- 3 – обмотка низшего напряжения;
- 4 – масляный канал вблизи обмотки НН
- 5 – барьеры из электрокартона;
- 6 – масляный канал вблизи обмотки ВН
- 7 – обмотка высшего напряжения;

Рис. 1. Схема главной изоляции двухобмоточного силового трансформатора 110 кВ

В настоящее время существуют программные комплексы, которые с достаточной точностью выполняют расчеты электрических полей высокого напряжения [17]. В основе программных комплексов лежит метод конечных элементов. Расчетная область разбивается на малые участки, называемые конечными элементами, в которых и происходит точечный расчет электрических характеристик. Однако для повышения точности расчета необходимо создание модели главной изоляции трансформатора с учетом конструктивных особенностей и статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла.

Расчет электрического поля главной изоляции сводится к расчету минимальной напряженности поля в первом масляном канале обмотки ВН. Силовые трансформаторы имеют достаточно сложную систему, состоящую из множества различных участков и элементов. Основными элементами являются обмотки с межвитковой изоляцией, цилиндрические барьеры и угловые шайбы из электрокартона, емкостные кольца, улучшающие конфигурацию электрического поля на краю обмотки, шайбы, прессующие кольца, различные прокладки и прошивные рейки, и все эти элементы должны быть представлены в расчетной модели.

Обмотки ВН силовых трансформаторов 110 кВ и выше состоят из катушек, содержащих несколько витков провода, обмотки НН выполняются винтовыми. Поэтому для обеспечения высокой точности расчета напряженностей электрического поля необходимо обмотки представить в виде прямоугольных катушек с учетом витковой изоляции.

Напряжение в обмотках распределяется неравномерно, в зависимости от электрических воздействий. В качестве расчетных принимаются наибольшие напряжения, воздействующие на участки главной изоляции при испытательных воздействиях. При испытаниях трансформатора рабочим и одноминутным напряжениями промышленной частоты имеет место практически линейное распределение напряжения по обмоткам. Поэтому в расчетной модели принимается допущение о линейном распределении потенциала на катушках обмотки при испытании рабочим напряжением.

В соответствии с результатами, полученными в [8], значение пробивной напряженности при различных объемах трансформаторного масла с заданными исходными характеристиками находится по выражению с применением распределения Гнеденко-Вейбулла:

$$E_{0,V_i} = E_H + \frac{E_{0,1} - E_H}{V_{\text{м.к.ВН}}^{1/\alpha}}, \quad (8)$$

где $E_{0,1}$ – величина пробивной напряженности единичного масляного канала, при которой $F(E_{0,1}) = 1 - e^{-1}$; E_H – нижний предел пробивной напряженности; α – безразмерный параметр.

В качестве единичного объема выбирается объем масла в первом канале главной изоляции $V = V_{\text{м.к.ВН}}$.

Алгоритм расчета электрической прочности масляных каналов изоляции трансформаторов с различным объемом масла в неоднородных полях представляет последовательность действий:

1. Определяются основные размеры трансформатора в соответствии с методикой расчета и с учетом значения изменения мощности в заданном классе номинального напряжения.

2. Определяется минимальная пробивная напряженность трансформаторного масла при заданной ширине первого масляного канала.

3. Определяется напряженный объем масла в наиболее нагруженном первом масляном канале обмотки ВН.

4. При заданном первичном объеме трансформаторного масла определяются параметры распределения пробивной напряженности $E_{0,1}$, E_H , α .

5. Определяется пробивная напряженность трансформаторного масла E_{0,V_i} при объеме масла в первом масляном канале $V_{\text{м.к.ВН}}$.

Результаты. Для исследования электрического поля трансформатора и определения пробивной напряженности в первом масляном канале используется программа ANSYS MAXWEL. Данная программа позволяет с высокой точностью воспроизвести реальное распределение напряженности электрического поля внутри бака трансформатора.

Для принятой ширины первого масляного канала определяется расчетная допустимая напряженность в масляном канале при соответствующем нормативном ис-

пытательном напряжении, в качестве которого принимается испытательное одноминутное напряжение промышленной частоты $U_{50Гц,1мин}$, равное 200 кВ для рассматриваемых трансформаторов класса 110 кВ. При этом в расчете изоляции силовых трансформаторов учитывается, что электрическая прочность масляного канала определяется средней напряженностью вдоль силовых линий от угла катушки до изоляционного барьера.

Для создания простых элементов модели используется встроенная система проектирования ANSYS, а для создания более сложных элементов, в частности емкостных колец и угловых шайб, используется AutoCAD – двух- и трехмерная система автоматизированного проектирования и черчения. Расчетная модель соответствует главной изоляции двухобмоточного трансформатора 110 кВ (рис. 2).

При испытании изоляции одноминутным напряжением промышленной частоты напряжение по обмотке трансформатора распределяется нелинейно. Здесь имеет место сложный электромагнитный переходный процесс. Для задачи потенциала на катушках обмотки принята разность потенциала между соседними катушками, равная 1 %. Далее потенциал будет сни-

жаться на 1 % симметрично вверх и вниз обмотки. В данной задаче необходимо задать граничные условия на стенки бака трансформатора и на стержень. Для задания граничных условий необходимо выбрать все линии, ограничивающие расчетную область, которые соответствуют стенкам бака и стержню, и задать на них потенциал, равный нулю. Следующим этапом является задание физических свойств каждому элементу модели. Обмотки выполнены из меди. Изоляция обмоток выполнена из конденсаторной бумаги с диэлектрической проницаемостью 3,5, удельная проводимость 9 нСм/м. Далее цилиндрам, емкостным кольцам, угловым шайбам и остальной части изоляции присваиваются свойства электрокартона с диэлектрической проницаемостью 4, проводимостью 1 пСм/м. Пространству вокруг обмоток присваивается среда «Трансформаторное масло». Диэлектрическая проницаемость масла – 2,2, проводимость – 1 пСм/м.

С учетом таких допущений получены значения пробивной напряженности: в верхнем крае обмотки ВН в первом масляном канале $E_{МК} = 7,75$ кВ/мм; в середине обмотки ВН в первом масляном канале $E_{МК} = 4,83$ кВ/мм; в нижнем крае обмоток в первом масляном канале $E_{МК} = 11,43$ кВ/мм.

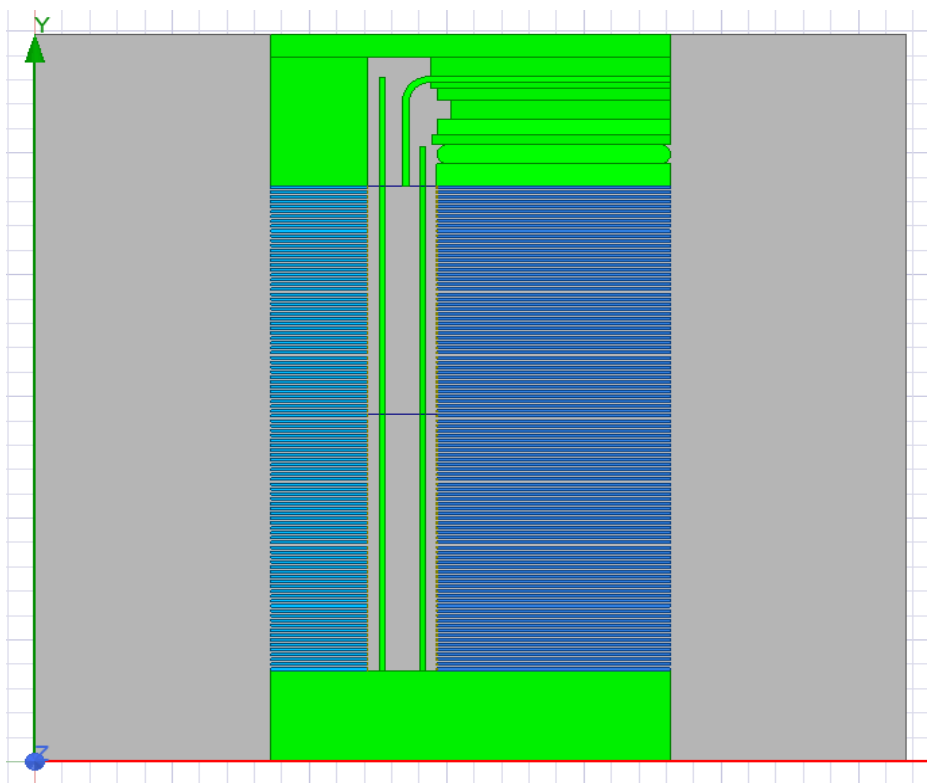


Рис. 2. Модель для расчета электрического поля двухобмоточного трансформатора 110 кВ

Для применения предложенного метода расчета необходимо знать параметры распределения пробивной напряженности трансформаторного масла для масляного канала E_H , $E_{0,1}$, α . Параметры распределения напряженности определяются по результатам экспериментов для заданных моделей [9, 10]. В настоящее время такие данные отсутствуют, поэтому при расчете рассматриваются изменения соотношений $E_{0,1}/E_H$. По (5) определяется напряженный объем масла в наиболее нагруженном первом масляном канале обмотки высшего напряжения $V_{\text{мк ВН}}$.

Ниже рассчитаны параметры электрической прочности трансформаторного масла в масляном канале обмотки ВН трансформатора. При этом выражение (8) получено в безразмерном виде:

$$\frac{E_{0,Vi}}{E_{0,1}} = \frac{1 + \frac{\left(\frac{E_{0,1}}{E_H} - 1\right)}{V_{\text{мк ВН}}^{1/\alpha}}}{\frac{E_{0,1}}{E_H}}. \quad (9)$$

На рис. 3 представлена расчетная зависимость относительной пробивной напряженности трансформаторного масла $E_{0,Vi}/E_{0,1}$ при заданной мощности от отношения $E_{0,1}/E_H$. Отмечается, что по мере увеличения относительного значения $E_{0,1}/E_H$ электрическая прочность масляного канала $E_{0,Vi}/E_{0,1}$ при заданной мощности трансформатора уменьшается, что соответствует физическому смыслу формирования пробоя.

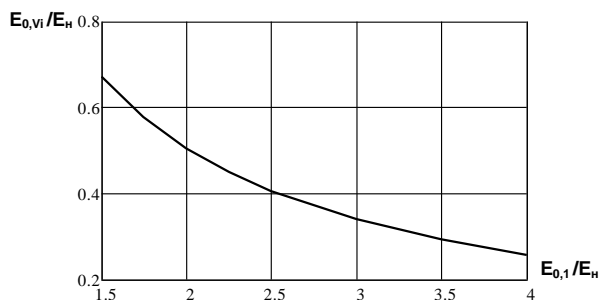


Рис. 3. Расчетная зависимости относительной пробивной напряженности масла $E_{0,Vi}/E_{0,1}$ при заданной мощности от отношения $E_{0,1}/E_H$ для параметра $\alpha = 2,5$

Выводы. Предложенный метод расчета электрической прочности масляных каналов главной изоляции силовых трансформаторов, в отличие от существующих методов, при расчете минимальной пробив-

ной напряженности в модели главной изоляции учитывает конструктивные особенности (объем и параметры распределения пробивной напряженности трансформаторного масла) силовых трансформаторов и обосновывает допущения для повышения точности расчета.

На основе предложенного метода разработан алгоритм расчета для выбора главной изоляции силовых трансформаторов. В соответствии с методикой и алгоритмом выполнен расчет параметров электрической прочности трансформаторного масла в масляном канале обмотки ВН трансформатора.

Список литературы

1. **Серебряков А.С., Семенов Д.А.** Определение оставшегося ресурса главной изоляции распределительных трансформаторов // Электротехника. – 2013. – № 6. – С. 2–8.
2. **Львов М.Ю.** Анализ повреждаемости силовых трансформаторов напряжением 110 кВ и выше // Электричество. – 2010. – № 2. – С. 27–31.
3. **Алексеев Б.А.** Крупные силовые трансформаторы. Эксплуатационная надежность, контроль состояния и оценка работоспособности // Энергетика за рубежом: прил. к журн. «Энергетик». – М., 2008. – Вып. 2. – С. 3–56.
4. **Кучинский Г.С.** Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 224 с.
5. **Видмар М.** Трансформатор в эксплуатации. – М.; Л.: ГНТИ, 1931. – 292 с.
6. **Мельникова О.С.** Влияние мощности и номинального напряжения действующих силовых трансформаторов на объем масла в главной изоляции // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 6. – С. 14–18.
7. **Митькин Ю.А., Мельникова О.С.** Определение статистических характеристик электрической прочности трансформаторного масла с учетом его объема в трансформаторах // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 2. – С. 21–25.
8. **Сканави Г.И.** Физика диэлектриков (область сильных полей). – М.: ГИФМЛ, 1958. – 907 с.
9. **Чорноготский В.М., Джунь Л.П.** Методология выбора изоляции трансформаторного оборудования УВН переменного тока / Электро. – 2009. – № 4. – С. 19–25.
10. **Панов А.В., Морозова Т.И.** Электрические характеристики и методы расчета главной изоляции мощных высоковольтных трансформаторов // Труды ВЭИ. Вопросы трансформаторостроения. – 1969. – Вып. 79. – С. 12–32.

11. Moser H. Transformerboard // Scientia Electrica. – 1979.

12. Development of a Design Method for Insulating Structures Exposed to Electric Stress in Long Oil Gaps and Along Oil / F. Derver, H.J. Kirch, Ch. Krause, E. Schneider. Transformerboard Interface: 7-th International Symposium on High Voltage Engineering. – Dresden, 1991.

13. Davindenm V., Schultz K., Kuchler A. Function of Solid Insulation in Transformers // Transform, 98.

14. Ушаков В.Я., Лопатин В.В., Багин В.В. Эффект площади электродов при пробое трансформаторного масла // Изв. вузов. Физика. – 1964. – № 4. – С. 147–149.

15. Palmer S., Scharpley W.A. Electric strength of transformer oil. Proc. IEE. – 1966. – Vol. 116, No.12. – P. 2029–2035.

16. Митькин Ю.А., Мельникова О.С. Влияние мощности и напряжения трансформаторов на статистические характеристики электрической прочности масляных каналов главной изоляции // Вестник ИГЭУ. – 2012. – Вып. 4. – С. 17–21.

17. Лоханин А.К., Ларин В.С., Матвеев Д.А. Инженерный метод расчета электрической прочности главной изоляции силовых трансформаторов высокого напряжения // Электричество. – 2005. – № 3. – С. 82–85.

References

1. Serebryakov, A.S., Semenov, D.A. Opredelelenie ostavshegosya resursa glavnoy izolyatsii raspredelitel'nykh transformatorov [Determination of usable lifespan of the main insulation of distribution transformers]. *Elektrotehnika*, 2013, no. 6, pp. 2–8.

2. L'vov, M.Yu. Analiz povrezhdaemosti silovykh transformatorov napryazheniem 110 kV i vyshe [Damage analysis of power transformers with voltage of 110 kV and higher]. *Elektrichestvo*, 2010, no. 2, pp. 27–31.

3. Alekseev, B.A. Krupnye silovye transformatory. Ekspluatatsionnaya nadezhnost', kontrol' sostoyaniya i otsenka rabotosposobnosti [Large power transformers. Operational reliability, condition monitoring and assessment of performance]. *Energetika za rubezhom: prilozhenie k zhurnalu «Energetik»*, 2008, issue 2, pp. 3–56.

4. Kuchinskiy, G.S. Chastichnye razryady v vysokovol'tnykh konstruksiyakh [Partial discharges in high voltage structures]. Leningrad: Energiya, 1979. 224 p.

5. Vidmar, M. Transformator v ekspluatatsii [Transformer in operation]. Moscow; Leningrad: GNTI, 1931. 292 p.

6. Mel'nikova, O.S. Vliyanie moshchnosti i nominal'nogo napryazheniya deystvuyushchikh silovykh transformatorov na ob'em masla v glavnoy izolyatsii [Definition of transformer oil elec-

trical strength statistical performances with account of its volume in transformers]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 6, pp. 14–18.

7. Mit'kin, Yu.A., Mel'nikova, O.S. Opredele-nie statisticheskikh kharakteristik elektricheskoy prochnosti transformatornogo masla s uchetom ego ob'ema v transformatorakh [Definition of transformer oil electrical strength statistical performances with account of its volume in transformers]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 2, pp. 21–25.

8. Skanavi, G.I. *Fizika dielektrikov (oblast' sil'nykh poley)* [Physics of dielectrics (strong fields)]. Moscow: GIFML, 1958. 907 p.

9. Chornogotskiy, V.M., Dzhun', L.P. Metodologiya vybora izolyatsii transformatornogo oborudovaniya UVN peremennogo toka [Methodology of isolation transformer equipment UHV AC selection]. *Elektro*, 2009, no. 4, pp. 19–25.

10. Panov, A.V., Morozova, T.I. Elektricheskie kharakteristiki i metody rascheta glavnoy izolyatsii moshchnykh vysokovol'tnykh transformatorov [Electrical performances and calculation methods of power high-voltage transformers basic insulation]. *Trudy VEI. Voprosy transformatorostroeniya*, 1969, issue 79, pp. 12–32.

11. Moser, H. Transformerboard. Scientia Electrica, 1979.

12. Derver, F., Kirch, H.J., Krause, Ch., Schneider, E. Development of a Design Method for Insulating Structures Exposed to Electric Stress in Long Oil Gaps and Along Oil. Transformerboard Interface: 7-th International Symposium on High Voltage Engineering. Dresden, 1991.

13. Davindenm, V., Schultz, K., Kuchler, A. Function of Solid Insulation in Transformers. Transform, 98.

14. Ushakov, V.Ya., Lopatin, V.V., Bagin, V.V. Effekt ploshchadi elektrodov pri probroe transformatornogo masla [The effect of the area of the electrodes during the breakdown of transformer oil]. *Izvestiya vuzov. Fizika*, 1964, no. 4, pp. 147–149.

15. Palmer, S., Scharpley, W.A. Electric strength of transformer oil. Proc. IEE, 1966, vol. 116, no. 12, pp. 2029–2035.

16. Mit'kin, Yu.A., Mel'nikova, O.S. Vliyanie moshchnosti i napryazheniya transformatorov na statisticheskie kharakteristiki elektricheskoy prochnosti maslyanykh kanalov glavnoy izolyatsii [Effect of capacity basic insulation and voltage of transformer on statistical performances of oil channels electrical strength]. *Vestnik IGEU*, 2012, issue 2, pp. 17 – 21.

17. Lokhanin, A.K., Larin, V.S., Matveev, D.A. Inzhenernyy metod rascheta elektricheskoy prochnosti glavnoy izolyatsii silovykh transformatorov vysokogo napryazheniya [Engineering method for calculating the dielectric strength of the main insulation of high voltage power transformers]. *Elektrichestvo*, 2005, no. 3, pp. 82–85.

МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

УДК 621.165

Алексей Евгеньевич Барочкин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru

Антон Николаевич Беляков

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, доцент кафедры прикладной математики, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-45, e-mail: ab_pm@mail.ru

Хенрик Отвиновски

Ченстоховский политехнический университет, доктор технических наук, профессор кафедры термического машиностроения, Польша, Ченстохова, телефон +48 34 3250 579, e-mail: henryk_ot@go2.pl

Tomasz Wylecial

Ченстоховский политехнический университет, доктор технических наук, профессор кафедры управления производством, Польша, Ченстохова, телефон +48 32 3250 583.

Евгений Витальевич Барочкин

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры тепловых электрических станций, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

Идентификация модели многоступенчатой классификации смеси разнородных компонентов

Авторское резюме

Состояние вопроса. Классификация частиц по крупности традиционно рассматривается применительно к однородным материалам, которые необходимо разделить на крупный и мелкий продукты. Однако часто в классифицируемом материале присутствуют примеси, которые отличаются по своим физическим свойствам от базового компонента. При классификации таких смесей различие физических свойств может быть использовано для выделения, очистки или обогащения основного компонента. Выбор технологии для такой переработки разнородных компонентов возможен на базе простых и адекватных моделей. Их разработка является актуальной задачей, стоящей перед энергетикой и смежными отраслями промышленности.

Материалы и методы. Для моделирования процесса классификации используются уравнения материального баланса, методы параметрической и структурной идентификации, фундаментальные законы динамики дисперсных систем.

Результаты. Приведены результаты экспериментальных исследований разделения смеси разнородных компонентов в двухступенчатой классифицирующей системе. С использованием полученных экспериментальных данных выполнена структурная и параметрическая идентификация модели и показана ее адекватность.

Выводы. Представленные экспериментальные результаты и расчетная модель могут применяться для постановки и решения оптимизационных задач фракционирования дисперсных материалов в сложных классифицирующих системах. Полученные результаты могут быть использованы в энергетической, химической и других отраслях промышленности для разработки ресурсо- и энергосберегающих технологий при получении дисперсных продуктов с допустимым содержанием примесей.

Ключевые слова: многоступенчатая аэродинамическая классификация, смеси разнородных компонентов, крупность зерен, параметрическая и структурная идентификация, целевая функция, математическая модель

Aleksei Yevgenyevich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: acorp27@yandex.ru

Anton Nikolaevich Belyakov

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor of the Applied Mathematics Department, Russia, Ivanovo, e-mail: ab_pm@mail.ru

Henryk Otwinowski

Czestochowa University of Technology, Doctor of Engineering Sciences, professor of Department of Thermal Machinery, Poland, Czestochowa, telephone +48 34 3250 579, e-mail: henryk_ot@go2.pl

Tomasz Wylecial

Czestochowa University of Technology, Doctor of Engineering Sciences, professor of Department of Production Management, Poland, Czestochowa, telephone +48 32 3250 583.

Evgeny Vitalievich Barochkin

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Heat Power Plants Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-99-13, e-mail: bar@ivenser.com

Computational and experimental study of classification of a mixture of dissimilar components

Abstract

Background. The classification of particles by size is traditionally considered in relation to homogeneous materials, which must be divided into coarse and fine products. However, often there are the impurities in the material that differ in their physical properties from the base component. When classifying such mixtures, the difference in physical properties can be used to isolate, purify, or enrich the main component. The choice of the technology for such processing dissimilar components is possible based on simple and adequate models. The formulation and solution of classification problems for mixtures of dissimilar components on the basis of adequate models is the relevant issue for the power industry and related industries.

Materials and methods. Fundamental laws of dispersed systems dynamics are used to simulate the classification process; mathematical programming methods are used to identify models and improve separation technology.

Results. Experimental study of the separation of a mixture of dissimilar components in a two-stage classifying system has been carried out. Using the obtained experimental data, the model was identified, and its adequacy was shown.

Conclusions. The presented experimental results and computational model can be used to formulate and solve optimization problems of fractionation of dispersed materials and to increase the efficiency of the process in classifying systems. The results obtained can be used in the energy, chemical and other industries to improve the efficiency of resource and energy-saving technologies for obtaining dispersed products with acceptable content of impurities.

Key words: classification, dissimilar components, mixtures, grain size, identification, objective function, identification parameters, mathematical model

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.056-063

Введение. В технологии приготовления твердого топлива в энергетике процесс классификации частиц традиционно осуществляется по их крупности [1–3]. В том случае, если в исходном топливе встречаются частицы балластовых компонентов, обусловленные условиями добычи, транспортировки или переработки топлива, присутствие этих компонентов может приводить к снижению эффективности работы оборудования или даже к его механическому повреждению [4–6]. Для энергетической и смежных отраслей промышленности задача выделения балластовых или вредных компонентов на стадии механической переработки сырья является актуальной как с научной, так и с практической точек зрения.

Объектом исследования является процесс аэродинамической классификации порошкообразных материалов [5, 7–9]. В качестве предмета исследования рассматривается процесс многоступенчатой аэродинамической классификации смеси разнородных компонентов [8–10].

Целью исследования является разработка адекватных математических моделей классификации смеси разнородных компонентов.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- проведение экспериментальных исследований классификации смеси разнородных компонентов на лабораторной установке;
- проведение идентификации и проверки адекватности расчетной модели на основе полученных экспериментальных результатов.

Методы исследования. Для моделирования процессов классификации используются фундаментальные законы динамики дисперсных систем, для идентификации модели и совершенствования технологии разделения применяются методы математического программирования [11–13].

Экспериментальные исследования. Целью проведения экспериментальных исследований является получение опытных данных для идентификации модели разделения смеси разнородных компонентов. Экспериментальные исследования проводились в рамках международного договора о сотрудничестве с Ченстоховским политехническим университетом (Польша) на специальной лабораторной установке с двухступенчатым классифика-

тором. Фотография экспериментальной установки и эскиз двухступенчатого классификатора представлены на рис. 1.

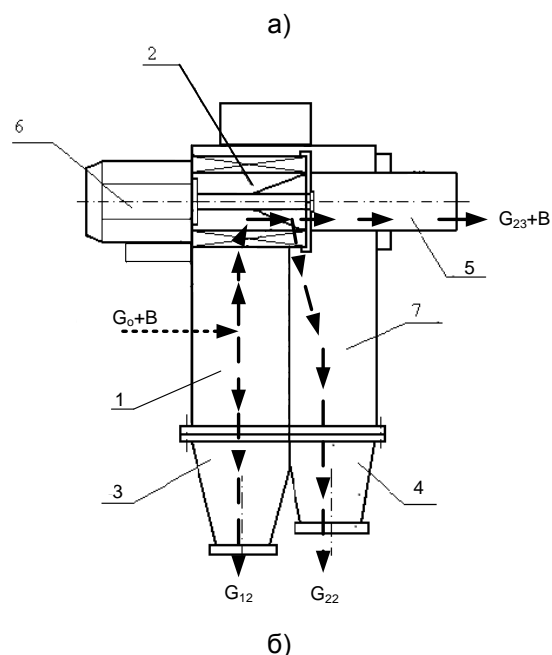


Рис. 1. Фотография экспериментальной установки (а) и эскиз двухступенчатого классификатора (б): 1 – гравитационная ступень разделения; 2 – центробежная ступень классификации; 3 – бункер возврата гравитационной ступени; 4 – бункер возврата центробежной ступени; 5 – выход мелкодисперсного материала центробежной ступени; 6 – электрический двигатель; 7 – патрубок возврата второй ступени

Исходная смесь G_0 с воздухом B подается в гравитационную ступень классификатора 1, после которой мелкий продукт разделения направляется в центробежную ступень 2, а грубый продукт G_{12} – в бункер 3. Грубый продукт второй ступени классификации G_{22} направляется в бункер 4, а мелкий продукт G_{23} выносится воздухом из аппарата через патрубок 5. Для вращения ротора центробежной ступени установлен электрический двигатель 6. Эвакуация крупного продукта из второй ступени осуществляется через патрубок 7.

В ходе экспериментальных исследований изучалось влияние содержания целевого компонента в смеси на результаты разделения. Перед опытом исходная смесь формировалась в заданной пропорции из известняка и кварцевого песка, которые использовались в качестве модельных материалов. Содержание известняка в смеси варьировалось в диапазоне от 0 до 100 %. После проведения каждого опыта продукты взвешивались и рассеивались. Следует отметить, что исходные компоненты анализировались по крупности отдельно, а гранулометрический состав продуктов после классификации определялся для смеси компонентов.

Во всех опытах скорость вращения ротора классификатора составляла 30 об/с; продолжительность каждого опыта – 360 с; расход воздуха через классификатор – 11,9 м³/час; избыточное давление воздуха – 400 кПа; масса порции загружаемой смеси оставалась постоянной и составляла 1000 г; температура воздуха в лаборатории – 23 °С; относительная влажность – 29 %; температура атмосферного воздуха – 9 °С; атмосферное давление – 100,9 кПа. Масса компонентов смеси в серии проведенных опытов представлена в табл. 1, где индекс s относится к кварцевому песку, индекс c – к известняку.

Таблица 1. Рецепт смеси в опытах

$N_{\text{опыта}}$	1	2	3	4	5	6
$G_{OS}, \text{ г}$	1000	800	600	400	200	0
$G_{OC}, \text{ г}$	0	200	400	600	800	1000

Исходные гранулометрические составы для отдельных компонентов и гранулометрические составы смеси после проведения экспериментов для разных исходных составов смеси показаны на рис. 2, где гранулометрические составы исходных

компонентов представлены пунктирными линиями, при этом верхняя пунктирная линия относится к известняку, а нижняя – к кварцевому песку; гранулометрический состав грубого продукта разделения, который определяется смесью возврата первой и второй ступеней, представлен штриховой линией; гранулометрический состав мелко-го продукта разделения показан сплошной линией.

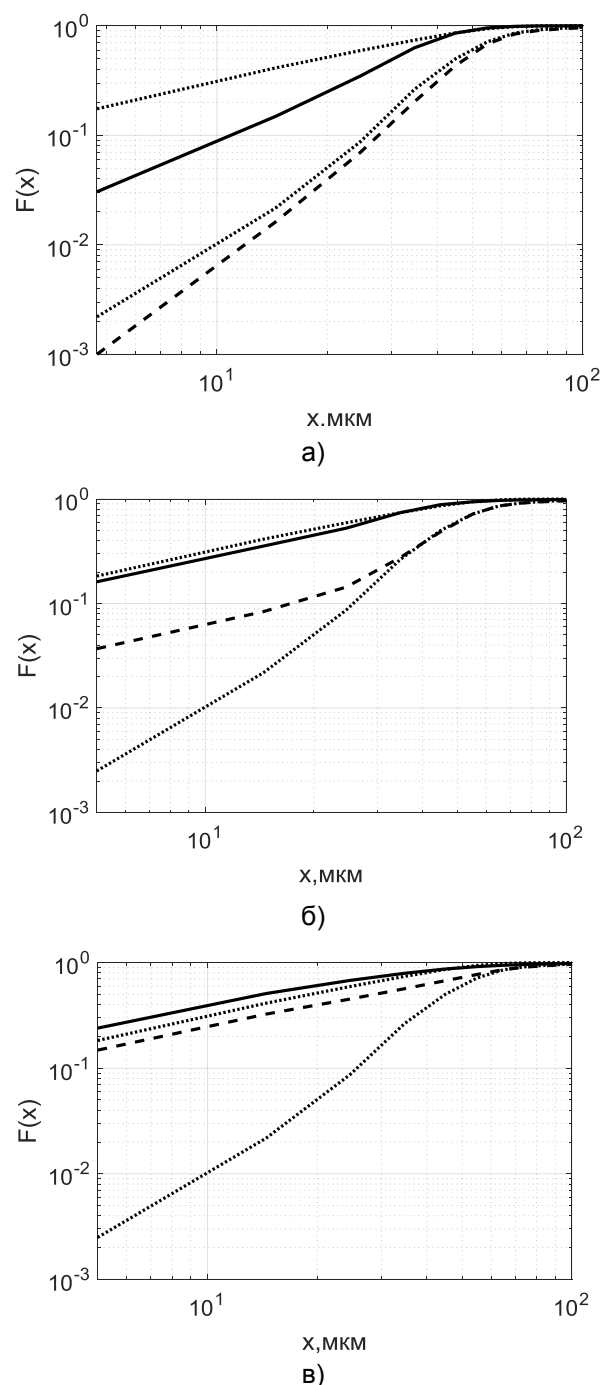


Рис. 2. Гранулометрические составы исходных компонентов (пунктирные линии), грубого (штриховая) и мелкого (сплошная) продуктов разделения при разных составах исходной смеси: а – 0; б – 40; в – 100 % известняка

Анализ полученных результатов показывает, что состав исходной смеси существенно влияет на результаты классификации. Расчет и совершенствование процесса классификации смеси с учетом возможных требований к готовым продуктам как в отдельном аппарате, так и в каскаде классификаторов является актуальной технологической задачей. Для проведения проектных расчетов и в целях совершенствования процесса целесообразно использовать простые и адекватные модели. Для идентификации моделей и проверки их адекватности проведены специальные расчетные исследования.

При выборе математической модели анализируются два подхода: использование общей кривой разделения классификации [8] для обоих компонентов (модель 1) и применение индивидуальных кривых разделения для каждого компонента смеси [14] (модель 2).

На первом этапе моделирования для описания процесса применяется общая кривая разделения для смеси в каждой ступени и модель многоступенчатой классификации для системы [9, 15]. Расчетная схема модели приведена на рис. 3,а. Основные расчетные зависимости представлены ниже.

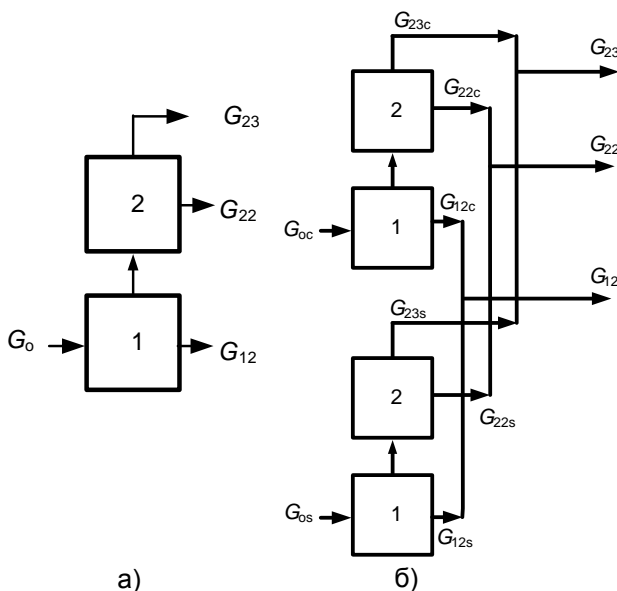


Рис. 3. Расчетные схемы модели 1 (а) и модели 2 (б) двухступенчатой системы классификации, представленной на рис. 1: B_o – подача сырья; B_{ij} – выходы готовых продуктов; индекс i – номер ступени; j – номер продукта; c – известняк; s – кварцевый песок

Матричная модель многоступенчатой классификации, разработанная в рамках

матричной формализации [9] для расчетной схемы рис. 3,а, имеет вид

$$K F = -F_0, \quad (1)$$

$$\text{где } K = \begin{bmatrix} -I & 0 \\ C_1 & -I \end{bmatrix}, \quad (2)$$

I – единичная матрица размера $m \times m$, матрица C_1 соответствует матрице классификации для 1-й ступени, m – число анализируемых фракций крупности; матрица K является блочной матрицей размера 2×2 блока; F – блочная матрица-столбец размера 2×1 блоков-столбцов, описывающая фракционные составы продуктов на входе в элементы схемы; F_0 – блочная матрица такого же размера, описывающая фракционные составы внешних продуктов, подаваемых в систему.

Диагональная матрица классификации C размера $m \times m$, на главной диагонали которой находятся вероятности попадания соответствующих фракций в тонкий продукт разделения ступени, вычисляется через кривую разделения $\varphi(x)$ [8] согласно выражению

$$C = \begin{bmatrix} \varphi_1(x) & \dots & 0 \\ \dots & \varphi_j(x) & \dots \\ 0 & \dots & \varphi_m(x) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

В качестве основной характеристики разделения в ступени предлагается использовать общую для компонентов смеси кривую разделения в виде зависимости [10]

$$\varphi(x) = \frac{1}{1 + (x/x_o)^{k_s}}, \quad (4)$$

где x_o – граничное значение размера зерен, при котором вероятность фракции перейти в тонкий продукт равна 0,5; k_s – параметр эффективности или остроты разделения, которая характеризует качество процесса.

Идентификация расчетной модели (1)–(4) проводилась методом наименьших квадратов посредством минимизации суммы квадратов рассогласований отклонений расчетных и экспериментальных данных [11–13]. В ходе идентификации определялись значения четырех параметров: эффективность разделения и граничный размер для каждой ступени классификации. Задача идентификации решается численно методом Монте-Карло (ММК) согласно алгоритму, который подробно представлен в [16]. Для численного решения задачи идентификации с использованием ММК по предложенному алгоритму разработана

компьютерная программа для его реализации в среде MATLAB.

На стадии предварительных исследований [16] проверялась сходимость найденного численного решения к оптимальному. В [16] показана зависимость минимального значения целевой функции от числа генераций вариантов, которое варьировалось в ходе численных экспериментов от 10^2 до $2 \cdot 10^6$. Согласно данной зависимости, значение целевой функции стабилизируется при числе генераций порядка 10^6 .

Результаты решения задачи идентификации показали, что модель 1 неудовлетворительно описывает экспериментальные данные: в ряде случаев результаты расчета существенно отличаются от эксперимента. Очевидно, это связано с игнорированием при построении модели специфики совместной классификации разнородных компонентов.

Для повышения достоверности результатов моделирования дальнейшее развитие модели выполнено в направлении специфики описания классификации с выбором своих параметров идентификации для каждого компонента. Согласно расчетной схеме, в рамках этой модели, представленной на рис. 3,б, каждый компонент классифицируется независимо от другого компонента, после чего соответствующие потоки компонентов смешиваются.

В этом случае матричная модель многоступенчатой классификации (1) записывается отдельно для каждого компонента:

$$K_c F_c = -F_{0c}; \quad (5)$$

$$K_s F_s = -F_{0s}, \quad (6)$$

где индекс c относится к известняку; s – к кварцевому песку.

В ходе идентификации модели (5)–(6) определяются значения уже восьми параметров: эффективность разделения и граничный размер для каждого компонента в каждой ступени классификации. Задача идентификации решается также численно с помощью ММК согласно описанному выше алгоритму.

Значения параметров, найденные в ходе численного решения задачи идентификации, приведены в табл. 2.

Сопоставление расчетных и экспериментальных зависимостей массы продуктов разделения для двухступенчатой системы классификации от содержания

известняка в исходной смеси представлено на рис. 4.

Таблица 2. Параметры идентификации модели

Параметры	Ступень 1		Ступень 2	
	песок	известняк	песок	известняк
x_0 , мкм	98,67	26,80	37,57	8,20
k_s	10,51	7,06	6,50	1,01

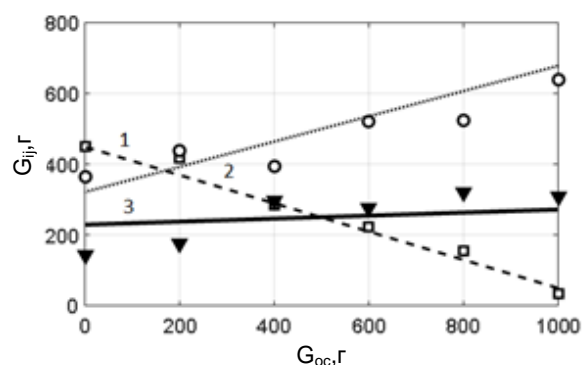


Рис. 4. Сопоставление экспериментальных (точки) и расчетных (линии) зависимостей массы возврата первой ступени (1), возврата второй ступени (2), мелкого продукта установки (3) от содержания известняка в исходной смеси

Анализ полученных результатов показывает, что среднее рассогласование экспериментальных и расчетных значений составляет 4,6 относительных процентов, что следует признать удовлетворительным результатом, так как полученное значение находится в диапазоне погрешности экспериментального определения результатов расстановок и массопотоков в установке. Таким образом, модель (5)–(6) достоверно описывает экспериментальные результаты.

В качестве ограничений предложенного подхода следует отметить необходимость решения задачи идентификации для восьми параметров, связь между которыми в модели не учитывается. Определение связи между параметрами компонентов при классификации возможно в рамках дискретных моделей уравнения Больцмана [17], где взаимодействие компонентов учитывается через их столкновения в потоке. Однако использование данного подхода существенно усложняет расчет и делает его малоприменимым при решении инженерных задач.

Выводы. Полученные в рамках проведенных исследований экспериментальные результаты классификации смеси разнородных компонентов на лабораторной

установке, на основе которых проведена идентификация и проверки адекватности двух моделей, показали, что модель с определением параметров идентификации для каждого компонента при достаточной простоте вычислений позволяет достоверно описывать фракционирование и формирование массопотоков в многоступенчатой системе классификации для смеси разнородных компонентов.

Представленные экспериментальные результаты и расчетная модель могут применяться для постановки и решения оптимизационных задач фракционирования дисперсных материалов и повышения эффективности протекания процесса в классифицирующих системах. Полученные результаты могут быть также использованы в энергетической, химической и других отраслях промышленности для повышения эффективности ресурсо- и энергосберегающих технологий при получении продуктов с допустимым содержанием примесей.

Список литературы

1. **Ромадин В.П.** Пылеприготовление. – М.: Госэнергоиздат, 1953. – 519 с.
2. **Лебедев А.Н.** Подготовка и размол топлива на электростанциях. – М.: Энергия, 1969. – 520 с.
3. **Летин Л.А., Роддатис К.Ф.** Среднеходные и тихоходные мельницы. – М.: Энергоиздат, 1981. – 360 с.
4. **Ревнивцев В.И.** Селективное разрушение минералов. – М.: Недра, 1988. – 286 с.
5. **Жуков В.П., Катылов А.В., Мизонов В.Е.** Расчетно-экспериментальное исследование разделения разнородных материалов в совмещенном распределенном процессе дробления классификации // Теоретические основы химической технологии. – 1997. – Т. 31, № 3. – С. 333–335.
6. **Справочник** по обогащению руд. Подготовительные процессы / под ред. О.С. Богданова, В.А. Олевского. – М.: Недра, 1982. – 366 с.
7. **Касаткин А.Г.** Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 2006. – 829 с.
8. **Мизонов В.Е., Ушаков С.Г.** Аэродинамическая классификация порошков. – Иваново, 2014. – 160 с.
9. **Mizonov V.E., Zhukov V.P., Bernotat S.** Simulation of Grinding: New Approaches. – Ivanovo, 1997. – 108 p.
10. **Шувалов С.И., Новосельцева С.С., Жуков В.П.** Обоснование выбора зависимости, используемой для аппроксимации кривой раз-

деления Тромпа // Вестник ИГЭУ. – 2018. – Вып. 6. – С. 15–23.

11. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. – М.: Дрофа, 2004. – 207 с.

12. **Корн Г., Корн Т.** Справочник по математике (для научных работников и инженеров). – М.: Высш. шк., 1973. – 500 с.

13. **Моисеев Н.Н.** Математические задачи системного анализа. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.

14. **Осипов Д.А., Жуков В.П., Мизонов В.Е.** Совместная переработка смеси разнородных компонентов в замкнутом цикле измельчения // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. – 2019. – Т. 57, № 1. – С. 108–115.

15. **Математическое** моделирование и структурная оптимизация сложных технологических систем измельчения / В.Е. Мизонов, З. Бернотат, В.П. Жуков, С.С. Новосельцева // Теор. основы хим. технологии. – 1998. – Т. 32, № 3. – С. 288–293.

16. **Оптимизация** структуры и режима работы сложных тепломассообменных систем с многокомпонентными теплоносителями / А.Е. Барочкин, В.П. Жуков, М.С. Шумилова и др. // Вестник ИГЭУ. – 2020. – № 4. – С. 55–63.

17. **Zhukov V.P., Belyakov A.N.** Simulation of combined heterogeneous processes based on discrete models of the Boltzmann equation // Theoretical Foundations of Chemical Engineering. – 2017. – Vol. 51, No. 1. – P. 88–93.

References

1. Romadin, V.P. *Pyleprigotovlenie* [Dust preparation]. Moscow: Gosenergoizdat, 1953. 519 p.
2. Lebedev, A.N. *Podgotovka i razmol topliva na elektrostantsiyakh* [Fuel preparation and grinding in power plants]. Moscow: Energiya, 1969. 520 p.
3. Letin, L.A., Roddatis, K.F. *Srednekhodnye i tikhokhodnye mel'nitsy* [Medium and low speed mills]. Moscow: Energoizdat, 1981. 360 p.
4. Revnivitsev, V.I. *Selektivnoe razrushenie mineralov* [Selective destruction of minerals]. Moscow: Nedra, 1988. 286 p.
5. Zhukov, V.P., Katalymov, A.V., Mizonov, V.E. *Raschetno-eksperimental'noe issledovanie razdeleniya raznorodnykh materialov v sovmeshchennom raspredelennom protsesse drobleniya klassifikatsii* [Calculation and field research of separation of heterogeneous material in combined distributed process of classification]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 1997, vol. 31, no. 3, pp. 333–335.
6. *Spravochnik po obogashcheniyu rud. Podgotovitel'nye protsessy* [Handbook of ore beneficiation. Preparatory processes]. Moscow: Nedra, 1982. 366 p.

7. Kasatkin, A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical technology]. Moscow: Khimiya, 2006. 829 p.

8. Mizonov, V.E., Ushakov, S.G. *Aerodinamicheskaya klassifikatsiya poroshkov* [Aerodynamic classification of powders]. Ivanovo, 2014. 160 p.

9. Mizonov, V.E., Zhukov, V.P., Bernotat, S. *Simulation of Grinding: New Approaches*. Ivanovo, 1997. 108 p.

10. Shuvalov, S.I., Novosel'tseva, S.S., Zhukov, V.P. Obosnovanie vybora zavisimosti, ispol'zuemoy dlya approksimatsii krivoy razdeleniya Trompa [Justifying the choice of a dependence for the Tromp separation curve approximation]. *Vestnik IGEU*, 2018, issue 6, pp. 15–23.

11. Venttsel', E.S. *Issledovanie operatsiy: zadachi, printsipy, metodologiya* [Operation research: goals, principles, methodology]. Moscow: Drofa, 2004. 207 p.

12. Korn, G., Korn, T. *Spravochnik po matematike (dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov)* [Mathematics book of reference (for academic researchers and engineers)]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. 500 p.

13. Moiseev, N.N. *Matematicheskie zadachi sistemnogo analiza* [Mathematical problems for system analysis]. Moscow: Nauka. Glav-

naya redaktsiya fiziko-matematicheskoy literatury, 1981. 488 p.

14. Osipov, D.A., Zhukov, V.P., Mizonov, V.E. *Sovmestnaya pererabotka smesi raznorodnykh komponentov v zamknutom tsikle izmel'cheniya* [Co-processing of heterogenous component mixture in fining closed cycle]. *Sovremennye naukoemkie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie*, 2019, vol. 57, no. 1, pp. 108–115.

15. Mizonov, V.E., Bernotat, Z., Zhukov, V.P., Novosel'tseva, S.S. *Matematicheskoe modelirovanie i strukturnaya optimizatsiya slozhnykh tekhnologicheskikh sistem izmel'cheniya* [Mathematic simulation and structural optimization of complex technological fining systems]. *Teoreticheskie osnovy khimicheskoy tekhnologii*, 1998, vol. 32, no. 3, pp. 288–293.

16. Barochkin, A.E., Zhukov, V.P., Shumilova, M.S., Barochkin, E.V., Belyakov, A.N. *Optimizatsiya struktury i rezhima raboty slozhnykh teplomassoobmennyykh sistem s mnogokomponentnymi teplonositel'yami* [Optimization of the structure and mode of operation of complex heat and mass transfer multicomponent systems]. *Vestnik IGEU*, 2020, issue 4, pp. 55–63.

17. Zhukov, V.P., Belyakov, A.N. *Simulation of combined heterogeneous processes based on discrete models of the Boltzmann equation. Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 88–93.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.031.6

Евгений Рафаилович Пантелеев

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», доктор технических наук, профессор кафедры программного обеспечения компьютерных систем, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-98-60, e-mail: erp@poks.ispu.ru

Арман Арсенович Мукучян

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры программного обеспечения компьютерных систем, Россия, Иваново, e-mail: 15508@gapps.ispu.ru

Михаил Алексеевич Кузнецов

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», магистрант кафедры программного обеспечения компьютерных систем, Россия, Иваново, e-mail: 15502@gapps.ispu.ru

Алевтина Леонидовна Алыкова

ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», кандидат технических наук, доцент кафедры программного обеспечения компьютерных систем, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-98-60, e-mail: alla.ispu@yandex.ru

Метод формирования контекстной помощи пользователю компьютерного приложения в процессе решения прикладной задачи

Авторское резюме

Состояние вопроса. Применение программного обеспечения для решения прикладных задач вызывает проблему реализации необходимого пользователю действия при помощи интерфейса приложения. Частично она снимается в ходе изучения справочников и консультаций у разработчиков приложения. Однако справочники структурированы в контексте описания общего функционала приложения, а затруднения возникают в контексте состояния данных решаемой задачи. Консультации лишены этого недостатка, но дороги и не всегда оперативно доступны. Это стимулировало разработку компьютерных методов контекстной помощи, однако до сих пор задача формирования рекомендаций по выполнению запрошенной операции из текущего состояния данных приложения не решена. Цель исследования – сокращение временных затрат на получение помощи путем разработки модели представления знаний, обуславливающей действия пользователя контекстом данных приложения, и метода вывода рекомендаций на ее основе.

Материалы и методы. Модель сценария действий пользователя представлена в виде раскрашенной сети Петри. Это решение обосновано аналогией между сценариями действий пользователя и сценариями управления потоками работ (workflow), для представления которых аппарат сетей Петри давно

и успешно используется. Для топологического анализа сети Петри применена стратегия исчерпывающего поиска вглубину.

Результаты. Предложен метод формирования контекстных рекомендаций по выполнению запрошенной пользователем операции на основе модели сценария в виде раскрашенной сети Петри. Метод отличается применением топологического анализа сети Петри для построения множества альтернативных сценариев выполнения операции с последующей фильтрацией альтернатив в процессе пошагового исполнения рекомендованных действий. Метод апробирован при решении существенно интерактивных задач редактирования инженерных моделей.

Выводы. Предложенный метод обеспечивает получение контекстной помощи за одно обращение. При использовании для этой цели традиционных справочных файлов количество обращений определяется количеством возможных вариантов выполнения операции.

Ключевые слова: контекстная помощь, компьютерное приложение, сети Петри, топологический анализ

Evgeny Rafailovich Panteleev

Ivanovo State Power Engineering University, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Professor of the Computer Systems Software Support Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-98-60, e-mail: erp@poks.ispu.ru

Arman Arsenovich Mukuchan

Ivanovo State Power Engineering University, Master degree student of the Computer Systems Software Support Department, Russia, Ivanovo, e-mail: 15508@gapps.ispu.ru

Michael Alekseevich Kuznetsov

Ivanovo State Power Engineering University, Master degree student of the Computer Systems Software Support Department, Russia, Ivanovo, e-mail: 15502@gapps.ispu.ru

Alevtina Leonidovna Alykova

Ivanovo State Power Engineering University, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Computer Systems Software Support Department, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-98-60, e-mail: alla.ispu@yandex.ru

Method of context-dependent assistance for software user solving an applied task

Abstract

Background. When using software to solve the applied tasks, the problem to implement the action in need by means of user interface arises. Partly, this problem is solved by studying reference manuals and consultations with the application developers. However, reference manuals are structured in the context of overall application functionality while difficulties arise in the data state context of the task being solved. Consultations lack this flaw, but they are costly and not always available in time. This fact stimulated the development of computer-based methods of contextual help. Yet the task of development of recommendations for performing the requested operation from the current state of the application data has not been solved so far. The research is aimed to reduce the time to get help by developing a knowledge representation model that determines user actions across the application data context, and a method for deriving model based recommendations.

Materials and methods. The model of the user action scenario is presented in the form of a colored Petri net. This decision content is based on the analogy between user action scenarios and workflow scenarios, for which Petri nets notation has been successfully used for years. For the topological analysis of the Petri net, the strategy of exhaustive depth-first search was applied.

Results. The method of the contextual recommendations is proposed to execute the operation requested by the user based on a scenario model in the form of a colored Petri net. The method novelty is application of topological analysis of the Petri net to construct a set of alternative scenarios for performing the operation, followed by filtering alternatives in the process of stepwise execution of the recommended actions.

Conclusion. The suggested method provides context-dependent assistance in just one click. When using traditional reference manuals and files for the purpose, the number of clicks is determined by the number of options available to perform the operation.

Key words: context-dependent assistance, computer application, Petri nets, topological analysis

DOI: 10.17588/2072-2672.2020.5.064-076

Введение. Потенциал повышения эффективности решения прикладных задач, заложенный в специализированном программном обеспечении, часто не реализуется в полной мере из-за неумения пользователя транслировать известный ему алгоритм решения задачи в соответствующую этому алгоритму последовательность действий с элементами интерфейса приложения.

Использование традиционных ресурсов методического сопровождения не позволяет устранить это противоречие. Справочные руководства описывают общий функционал приложения, тогда как проблемы чаще всего возникают в связи с использованием этого общего функционала для решения конкретной задачи. Поэтому пользователь вынужден выстраивать цепочку действий, необходимых для решения задачи, трудоемким методом проб и ошибок. Например, в графическом редакторе схем электроснабжения системы EnergyCS [1] добавление ветви в схему предполагает, что на момент выполнения этой операции в схеме уже существует хотя бы один узел и этот узел выделен в качестве точки привязки ветви. Пользователю может потребоваться до трех обращений к традиционному справочному ресурсу, чтобы выяснить, как создать ветвь, как выделить узел и как создать узел. Такой подход часто оказывается неприемлемым, так как решение задач входит в круг производственных обязанностей и имеет жесткие временные регламенты. Кроме того, зачастую эмпирически построенная цепочка действий может оказаться неоптимальной, и многократное использование ошибочного стереотипа в будущем также повлечет за собой неоправданные затраты времени. Например, при добавлении ветви «Трансформатор» в редакторе схем электроснабжения системы EnergyCS нет необходимости создавать для этой ветви два узла привязки. Достаточно задать один на стороне высокого напряжения, второй узел будет создан системой автоматически. Хотя система не препятствует созданию второго узла вручную, такой вариант действий пользователя не является оптимальным. Консультации разработчиков программного обеспечения, конечно, решают эту проблему, но они не всегда мгновенно доступны и, как правило, оказываются на платной договорной основе. Поэтому становится очевидной актуальность

альность разработки компьютерных моделей, увязывающих общий функционал приложения с контекстом его применения (определяется состоянием данных решаемой задачи), и механизмов построения сценариев рекомендованных действий на этой основе. Попытки разработки подобных моделей и методов их интерпретации как в качестве инструмента обучения решению прикладных задач вообще, так и в качестве инструмента, обучающего использованию для этой цели специализированного программного обеспечения, предпринимались многими исследователями.

В качестве примера обучения решению прикладных задач можно привести интеллектуальную обучающую систему SlideTutor для диагностики заболеваний по визуальным признакам [2] с использованием форматов представления предметных знаний (онтологий и правил продукции) и механизмов их интерпретации, делающих этот подход потенциально применимым и для других (не медицинских) областей применения. Контекстная помощь SlideTutor предоставляется в виде пошаговых инструкций и диагностики ошибочных шагов студента. К недостаткам этого подхода можно отнести необходимость совместного использования двух различных формализмов представления знаний для представления их декларативной (онтологии) и процедурной (продукции) составляющих, а также недостаточную глубину предоставляемых системой инструкций (один шаг), обусловленную спецификой интерпретации правил продукции.

В качестве примера системы, реализующей обучение контекстному использованию специализированного программного обеспечения, можно привести систему распознавания стратегии действий пользователя с элементами интерфейса приложения [3]. Под распознаванием стратегии понимается ее сопоставление с эталонным выполнением операции, представленным в виде дерева. Листьям дерева сопоставлены базовые действия, а внутренним вершинам – построенные на их базе операции. Дополнительно на этой древовидной структуре специфицируются ограничения на последовательность выполнения операций во времени. Процедуру распознавания реализует специальный алгоритм, который отображает линейную последовательность действий пользователя

на один из путей в эталонном дереве. К недостаткам этого подхода следует отнести моделирование динамической системы (стратегии действий) в виде статической древовидной структуры. Это потребовало расширения базового формализма (дерева) связями, отражающими временную зависимость операций, и построения специализированного алгоритма распознавания на этой гибридной структуре.

Обсуждение этих примеров позволяет сделать вывод, что задача разработки компьютерных моделей, увязывающих общий функционал приложения с контекстом его применения, и механизмов построения сценариев рекомендованных действий на этой основе, сохраняет свою актуальность. Основанием для подобного утверждения является тот факт, что известные решения используют формализмы представления моделей, которые, несмотря на их популярность, не отражают динамическую природу задачи построения контекстной помощи, а построенные на их базе механизмы вывода либо ограничивают глубину подсказок, либо являются узкоспециализированными.

Цель исследования – повышение эффективности контекстной помощи, выражающееся в сокращении числа обращений к справочному ресурсу при решении прикладной задачи в среде специализированного программного обеспечения путем разработки модели представления знаний, обуславливающей действия пользователя контекстом данных приложения, и метода вывода рекомендаций на ее основе.

Материалы и методы. Обсуждаемый ниже подход к формированию контекстных рекомендаций пользователю специализированного программного обеспечения основан на следующих допущениях.

1. Решаемая при помощи приложения задача имеет конечное множество дискретных состояний, каждое из которых характеризует определенное качественное состояние данных этой задачи (ее контекст).

2. Контекст задачи определяет подмножество доступных в этом контексте действий, которые пользователь может активировать при помощи элементов интерфейса приложения.

3. Выполнение действия, активированного пользователем, меняет контекст приложения.

Из перечисленных допущений следует, что модель, лежащая в основе метода вывода контекстных рекомендаций, должна учитывать дискретную природу контекста, наличие условной связи контекста и доступных в этом контексте действий и изменение контекста в результате выполнения любого из доступных действий. Этим требованиям удовлетворяют модели, построенные в формате правил продукции, фреймов или сетей Петри [4]. Однако из приведенных альтернатив наиболее предпочтительной является последняя. Это объясняется тем, что формализм сетей Петри построен на строгом математическом основании и имеет наглядную графическую интерпретацию, которая описана далее с некоторыми упрощениями. Сеть Петри (СП) – это направленный двудольный граф. Вершины одного из подмножеств называются позициями (традиционно изображаются в виде окружности или эллипса), они могут быть использованы для хранения контекста, обуславливающего возможность выполнения действий. Значение контекста определяет разметка (маркировка) позиций: каждой позиции сопоставляются маркеры, совокупность которых определяет дискретное состояние данных приложения. Вершины второго подмножества – переходы (изображаются в виде прямоугольников) – могут быть интерпретированы как действия. Позиции и переходы СП связывают дуги. Дуга, направленная из позиции в переход, делает эту позицию входной по отношению к данному переходу. Дуга, направленная из перехода в позицию, делает позицию выходной по отношению к переходу. Динамический аспект СП определяют аксиомы активности и срабатывания переходов. Переход называется активным, если во всех его входных позициях присутствуют маркеры. Из нескольких активных в данном состоянии переходов один может сработать, в результате чего маркеры изымаются из входных позиций и помещаются в выходные позиции, моделируя тем самым изменение контекста задачи в результате действия пользователя.

Приведенное описание соответствует «плоской» черно-белой СП. Все переходы «плоской» сети находятся на одном уровне иерархии. Учитывая размерность модели, связывающей контекст задачи с возможными в этом контексте действиями, имеет смысл обсуждать СП иерархической струк-

туры (ИСП). Элементами, образующими иерархию, являются переходы. Внутренние вершины этой иерархии называются подстановочными переходами. Подстановочный переход моделирует операцию, для выполнения которой требуется несколько действий с элементами интерфейса приложения. Например, операция добавления ветви в уже упоминавшемся графическом редакторе схем EnergyCS требует выбора узла подключения, выбора типа ветви и отрисовки ее сегментов. Подстановочные переходы раскрываются в подсеть СП, топологически идентичную подстановочному переходу по множествам входных и выходных позиций. На уровне «листьев» иерархии ИСП превращается в «плоскую» СП, переходы которой соответствуют элементарным действиям пользователя с интерфейсом приложения. К таким действиям относится, например, выбор узла в редакторе схем EnergyCS. Маркер черно-белой сети можно интерпретировать как признак выполнения условия, относящегося к состоянию данных. Однако существуют раскрашенные (цветные) СП, маркеры которых можно рассматривать как типизированные переменные и структуры данных. Такая возможность, учитывая наличие параметризованных условий (например, тип ветви в редакторе схем EnergyCS), также должна быть представлена в модели. Поэтому далее будет обсуждаться модель, построенная на базе раскрашенной иерархической сети Петри (РИСП).

В пользу выбора СП в качестве формата представления модели сценариев говорит и тот факт, что СП давно и успешно используются для компьютеризации управления бизнес-процессами [5–9] путем создания систем управления потоками работ – workflow management systems (WFMS). В рамках WFMS задания моделируются переходами СП, условия их выполнения – разметкой позиций, что с точностью до обозначений совпадает с предлагаемым подходом. Отличие заключается только в целях использования модели. Если в системах управления потоками работ модель инициирует реальные процессы, то в системе контекстной помощи реальные действия пользователя инициируют смену состояния модели.

Кроме уже упомянутых преимуществ использования аппарата СП для представления моделей сценариев, необходи-

мо также отметить использование XML-формата для долговременного хранения моделей. Например, в [9] описан язык XML Color Petri Net Language (XCPNL). Это XML-схема, в которой описаны все разрешенные теги языка. Форма XML позволяет использовать для парсинга XML-документов существующие библиотеки программ. В качестве инструментальной основы разработки и отладки моделей сценариев в [9] использовалось приложение CPN Tools [10]. Для интерпретации действий пользователя на модели сценариев было разработано собственное программное обеспечение, которое основывается на описанной выше аксиоматике.

Принципиально важным моментом в создании системы является метод интерпретации запроса помощи для выполнения заданной пользователем операции из текущего контекста задачи. Так как в результате выполнения этой операции модель сценариев должна перейти в некое новое качественное состояние, для поиска возможных путей перехода РИСП из текущего состояния в новое можно воспользоваться стандартным аппаратом анализа достижимости разметок [10]. Однако процедура анализа достижимости имеет экспоненциальную вычислительную эффективность и потому применима только для СП небольшого размера. В [11] обсуждается альтернативный подход к решению этой задачи, предполагающий инвертирование (изменение направления дуг) сети. Но если для черно-белых сетей Петри задача инвертирования успешно решена, то для РИСП ее решение, помимо инверсии дуг, сопряжено с необходимостью инвертирования условий на дугах и значений цветных маркеров. Решение этих проблем сопряжено со значительными теоретическими сложностями, поэтому [11] носит исследовательский характер и ее результаты имеют преимущественно академический интерес. Их практическое применение ограничено описанными шаблонными структурами. Таким образом, разработка метода интерпретации запроса помощи для выполнения заданной пользователем операции из текущего контекста задачи сохраняет свою актуальность.

Результаты. Основным результатом исследования является метод интерпретации запроса контекстной помощи на модели сценариев в формате РИСП, из описа-

ния которых исключены ингибированные дуги. Данное ограничение упрощает разработку метода и при этом не является существенным, так как в любом случае для фрагмента РИСП, содержащего ингибированные дуги, можно построить эквивалентный фрагмент, который таких дуг не содержит, путем явного введения противоположного состояния – состояние Off (рис. 1). Можно заметить, что поведение этих двух фрагментов сети идентично: после срабатывания перехода В становится активным переход А.

Созданный в среде CPN Tools пример модели сценария добавления ветви в схему электроснабжения в графическом редакторе схем EnergyCS приведен на рис. 2. Показанный здесь фрагмент РИСП связан с остальной частью модели через входные In и выходные Out позиции, выделенные двойным контуром. Наряду с обычными переходами, соответствующими элементарным действиям пользователя, в модели представлены так называемые подстановочные переходы, выделенные двойным контуром. Подстановочные переходы в контексте решаемой задачи соответствуют операциям, требующим выполнения нескольких элементарных действий и/или операций. Например, подстановочный переход Draw Branch (нарисовать ветвь) раскрывается произвольным количеством

действий по созданию отдельных сегментов ветви. В целом логика приведенного сценария сводится к следующему. Создание ветви требует выполнения определенных предусловий (в схеме имеются узлы nodes, один из которых выбран (Node Selected), и никакая другая операция в данный момент не выполняется – Empty State). Если предусловия выполнены, пользователь должен выбрать тип ветви (с одной или двумя точками подключения). Затем для узла типа «Шина» (Bar), имеющего протяженность, выбирается точка привязки ветви к этому узлу. Для узла типа «Точка» (Point) это действие не требуется. На заключительном этапе выполняется операция отрисовки ветви в виде произвольного количества смежных горизонтальных и вертикальных участков, по завершении которой формируются пост-условия выполнения операции «Создание ветви». Ветвь добавляется к множеству Branches ветвей схемы, устанавливаются флаги отсутствия выполняемой операции Empty State и отсутствия выделенного узла No Node Selected. Для реализации этой логики модель использует типизированные переменные (цветные маркеры), условия на дугах и переходах, что приближает возможности графической модели к возможностям алгоритмических языков.

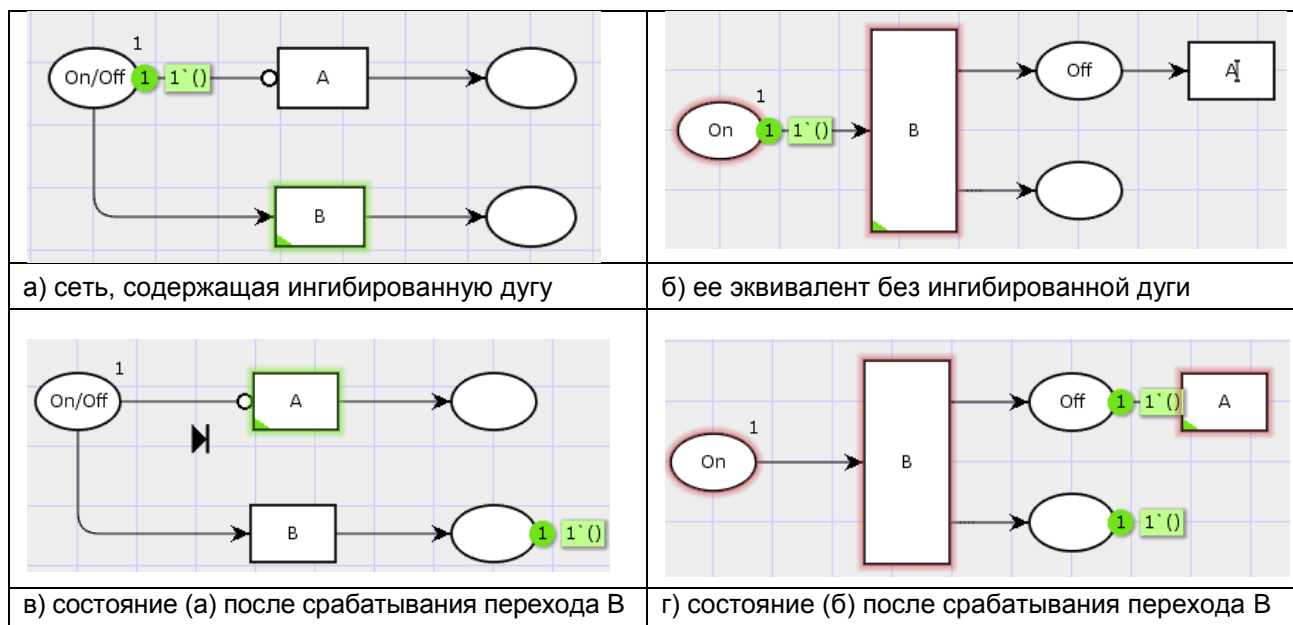


Рис. 1. Исключение ингибированных дуг

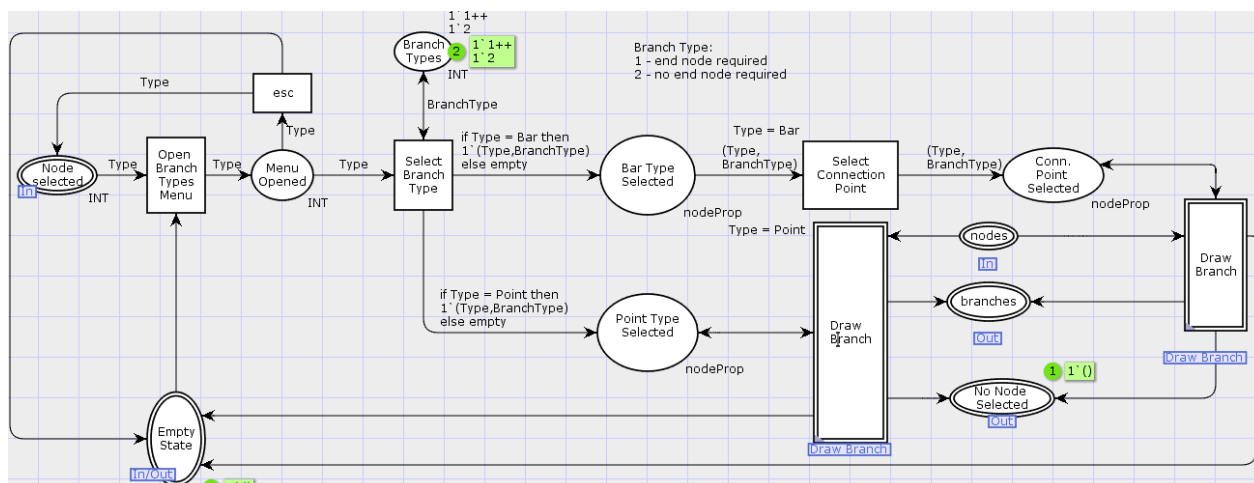


Рис. 2. Модель сценария создания ветви в формате РИСП

Запрос пользователя осуществляется в форме указания операции, которую он хотел бы выполнить из текущего качественного состояния данных (контекста) задачи. Например, пользователь хочет узнать, как выполнить операцию добавления ветви. Текущий контекст ее выполнения (типа «в схеме присутствуют узлы и ни один из них не выбран») устанавливается автоматически по состоянию разметки РИСП. Контекстная помощь предоставляется в форме инструкций по осуществлению действий с интерфейсом приложения, последовательность которых приводит к выполнению запрошенной операции.

Метод интерпретации запроса базируется на допущении, что состояние модели сценариев, в которое она переходит в результате выполнения запрошенной операции, достижимо из текущей разметки. Это допущение не ограничивает общность метода, так как обратное означало бы, что в приложении, для которого построена модель сценариев, существуют операции, активация которых при помощи интерфейса невозможна. Иначе говоря, приложение ограничивает доступ пользователя к своему функционалу, что, безусловно, не должно иметь места в действительности.

Анализ представленной на рис. 2 модели показывает, что переход из текущего контекста в контекст, соответствующий выполненной операции, допускает множество альтернативных вариантов действий, из которых пользователь должен выбрать единственный. Поэтому метод интерпретации запроса включает два последовательных этапа. Сначала строится множество допустимых вариантов, представленное

подсетью РИСП, из которого затем действиями пользователя выделяется единственный вариант. Научный интерес представляет первый этап предлагаемого метода, основанный на инвертировании сети Петри. Отличительной особенностью подхода к реализации инверсии является игнорирование раскраски РИСП, обоснованное следующими допущениями:

- 1) топология РИСП отражает вариативность виртуальных сценариев;
- 2) раскраска РИСП ограничивает вариации сценариев.

Таким образом, построение множества допустимых вариантов может быть выполнено путем анализа топологии РИСП без учета раскраски и выражений на дугах, а раскраска – использована для детерминирования вариативного сценария действиями пользователя.

Процедура топологического анализа строит И/ИЛИ дерево [13] альтернативных вариантов выполнения запрошенной операции, которые затем используются для управления последовательностью срабатываний переходов (действий, необходимых для выполнения операции). Корнем И/ИЛИ дерева (И-вершиной) является инвертированный подстановочный переход, соответствующий запрошенной операции, внутренними узлами – промежуточные переходы (И-вершины) и позиции (ИЛИ-вершины), листьями – позиции, которые содержат маркеры. Для построения И/ИЛИ дерева использована стратегия исчерпывающего поиска вглубину, комбинаторная сложность которой уменьшается за счет иерархической организации РИСП.

Введем обозначения и определения, необходимые для описания алгоритма построения дерева:

- P – множество позиций РИСП;
- T – множество переходов РИСП;
- текущая вершина И/ИЛИ дерева $n \in P \cup T$ имеет тип «И», если $n \in T$, иначе n имеет тип «ИЛИ», tn – вершина И/ИЛИ дерева, смежная n ;
- I – множество вершин-предшественниц n ;
- O – множество вершин-последователей n ;
- V – множество переходов и позиций СП, которые были посещены в ходе рекурсивного построения ветви дерева. Узлы из V во избежание заикливания далее не рассматриваются при построении ветви;
- N – множество необходимых позиций, используется для проверки условия выполнения перехода. Под необходимыми понимаются позиции, в которых в процессе выполнения запрошенной операции обязательно должен оказаться маркер. Если в процессе построения дерева в позиции оказывается маркер, она удаляется из N ;
- B – множество заблокированных позиций. Заблокированными помечаются позиции с маркерами, которые связаны с рассматриваемым переходом входной дугой. Позиции из B , во избежание конфликта при передаче маркера, далее не рассматриваются в процессе построения дерева. Исключение составляют позиции, связанные с переходом двунаправленной дугой, так как после срабатывания перехода маркер будет возвращен в позицию.

Ниже описана рекурсивная функция построения дерева. СП позволяют описывать параллельные процессы, причем ветвление происходит из позиций, а синхронизация происходит в переходах, поэтому алгоритм построения И/ИЛИ дерева разбит на 2 блока – обработка позиций и обработка переходов. Если рассматриваемый на данном уровне рекурсии узел принадлежит V или B , функция возвращает *null*, иначе узел добавляется в множество V .

Обработка позиции начинается с проверки достижения листа (наличия в позиции маркера). В случае его отсутствия позиция удаляется из множества N , построение дерева запрашивается для всех вершин из I . Ненулевые результаты образуют множество потомков ИЛИ-вершины, а в

списке N остаются позиции, не получившие маркер.

При рассмотрении перехода все входные позиции добавляются в список N (условие срабатывания перехода СП), для всех позиций из I запрашивается построение дерева, предварительно V дополняется оставшимися узлами из I (за исключением узлов из $I \cap O$), полученные результаты запоминаются в буферный список. Дочерними tn становится множество результатов, для которых пересечение оставшихся N с I пусто (множество таких действий, в результате которых все входные позиции имеют маркеры). Если такие множества найдены, из N вычитается I .

Ниже приведен псевдокод:

```

ЕСЛИ  $n \in V \vee n \in B$ 
    ВЕРНУТЬ null
КОНЕЦ ЕСЛИ
 $V = V \cup \{n\}$ 
ЕСЛИ  $n \in P$ 
     $N = N \setminus \{n\}$ 
    ЕСЛИ  $n$  содержит маркер
        ВЕРНУТЬ  $tn$ 
    КОНЕЦ ЕСЛИ
    ДЛЯ КАЖДОГО  $i \in I$ 
         $tn.child$ 
         $= tn.child \cup$  Построение дерева  $\{i, N, V, B\}$ 
        Оставить в  $N$  позиции без маркера
    КОНЕЦ ЦИКЛА
    ВЕРНУТЬ  $tn$ 
КОНЕЦ ЕСЛИ
ЕСЛИ  $n \in T$ 
     $N = N \cup I$ 
    ДЛЯ КАЖДОГО  $i \in I$ 
        Добавить в  $V$  остальные входные позиции
         $buffer = buffer \cup$ 
        Построение дерева  $\{i, N, V, B\}$ 
    КОНЕЦ ЦИКЛА
    Добавить в дочерние  $tn$  множество таких действий из  $buffer$ , в результате которых, все входные позиции имеют маркеры
    ВЕРНУТЬ  $tn$ 
КОНЕЦ ЕСЛИ

```

Дерево альтернативных вариантов далее используется для выделения конкретной последовательности действий (И/ИЛИ-поддерева, обеспечивающего доставку маркеров из листьев во все выходные позиции корня, соответствующего запрошенной операции). И-вершины построенного методом поиска вглубину поддерева

ва образуют список необходимых действий. Позиция действия в списке определяется дисциплиной извлечения соответствующих переходов из стека (последним пришел – первым вышел), в который они попадают в процессе построения поддерева. Первыми в списке оказываются действия, доступные из текущего контекста. Порядок выполнения квазипараллельных действий детерминирован порядком обхода поддерева. Таким образом, множество возможных вариантов действий отображается в множество соответствующих списков. Текущие элементы этих списков соответствуют рекомендованным вариантам действий пользователя на текущем шаге. Интерпретация действия пользователя приводит к изменению текущего контекста приложения и состояния РИСП, отсечению неактуальных вариантов и продвижению по оставшимся спискам.

Описанный метод был апробирован на приложении – эмуляторе графического редактора схем EnergyCS. При открытии эмулятора EnergyCS запускается вспомогательное приложение, которое обрабатывает события графического редактора и

интерпретирует их как действия по активации переходов РИСП, обеспечивая, таким образом, изменение разметки РИСП в соответствии с контекстом приложения. Кроме того, приложение использует описанный выше метод для интерпретации запросов пользователя.

Рассмотрим запрос помощи «Построение ветви» в контексте «Существуют узлы (маркер в позиции nodes), ни один из них не выбран (маркер в позиции No Node Selected), нет активных действий (маркер в позиции Empty State)». Создается корень дерева – переход RequestedOp, входными позициями для которого являются branches и No Nodes Selected, и запрашивается построение дерева из нового узла. Фрагмент полученного дерева (не представлены элементарные действия перехода Draw Branch) показан на рис. 3. Для удобства сопоставления СП и построенного на нем дерева И/ИЛИ его узлы изображены в соответствии со стандартом визуализации СП: позиции представлены в виде овалов, переходы – в виде прямоугольников.

Отображение возможных вариантов действий на РИСП показано на рис. 4.

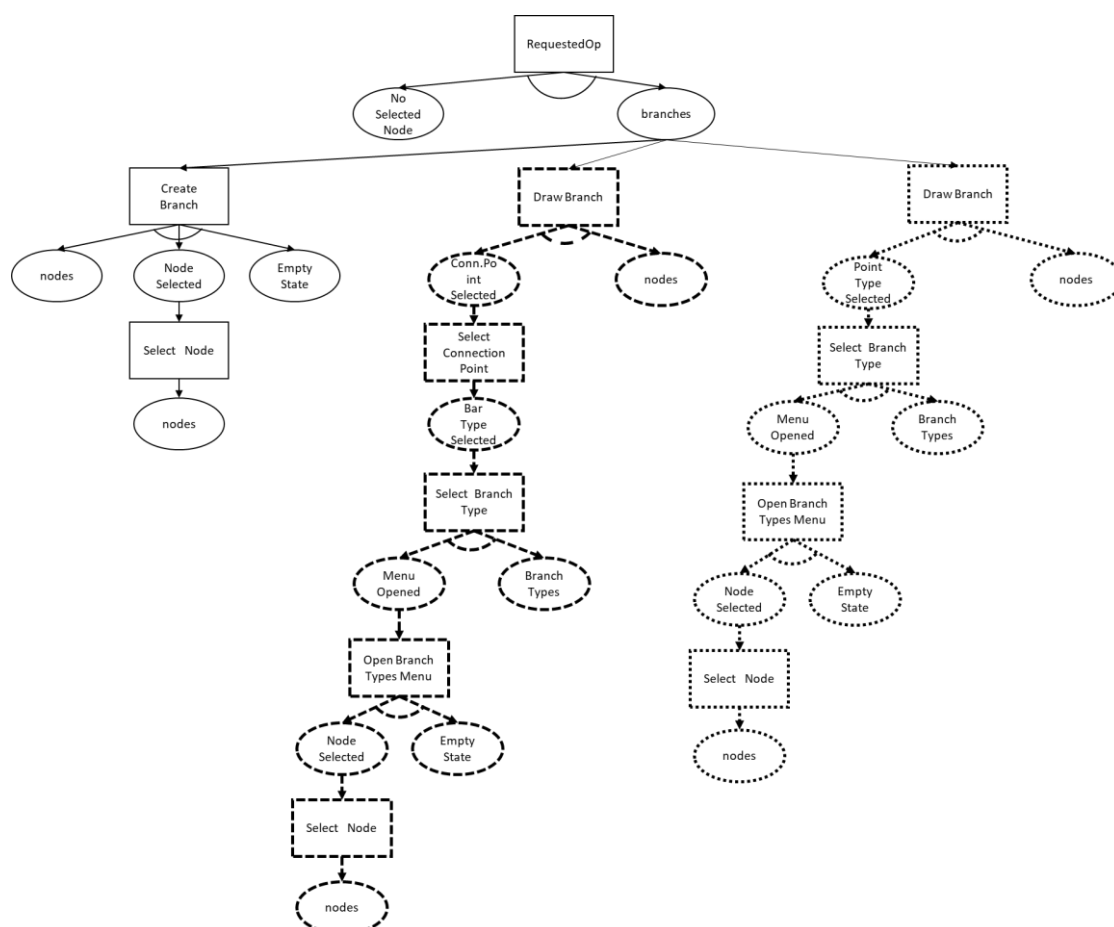


Рис. 3. Фрагмент дерева для запрошенной операции «Построение ветви»

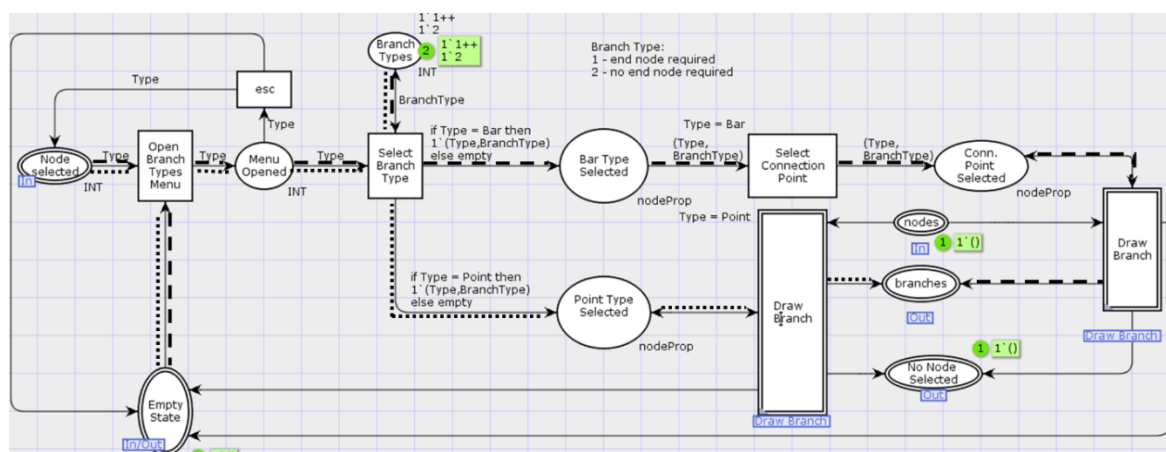


Рис. 4. Сопоставление СП и построенного на ней дерева

Пример работы комплекса представлен на рис. 5–8. Вспомогательное приложение показывает все возможные действия, которые способствуют достижению запрошенной цели. Для каждого действия возможен просмотр стандартной справки. По нажатию на соответствующую кнопку откроется необходимая страница. В пред-

ставленном примере есть 2 альтернативных варианта завершения построения ветви – выбор существующего узла и создание нового.

После выделения узла пользователю предлагается выбрать режим рисования ветви и тип ветви. Далее необходимо указать точку подключения на шине (рис. 6).

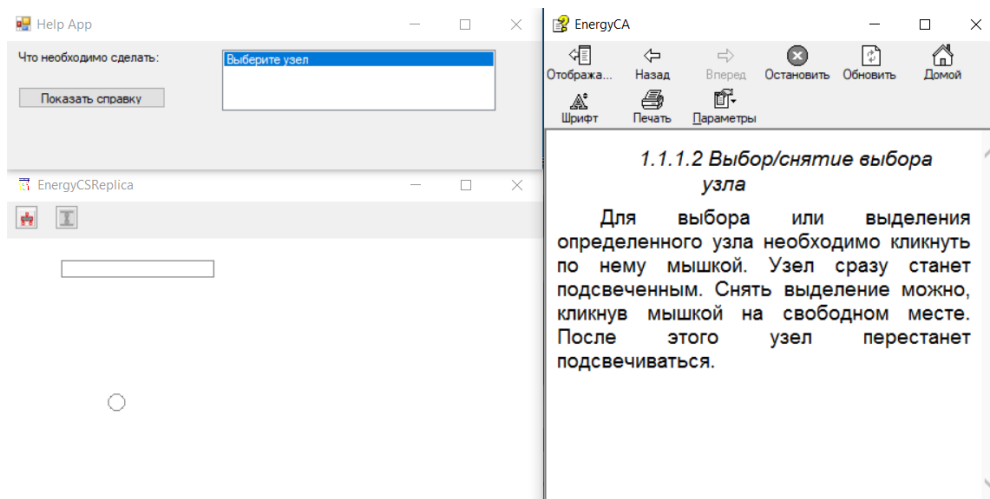


Рис. 5. Выделение узла

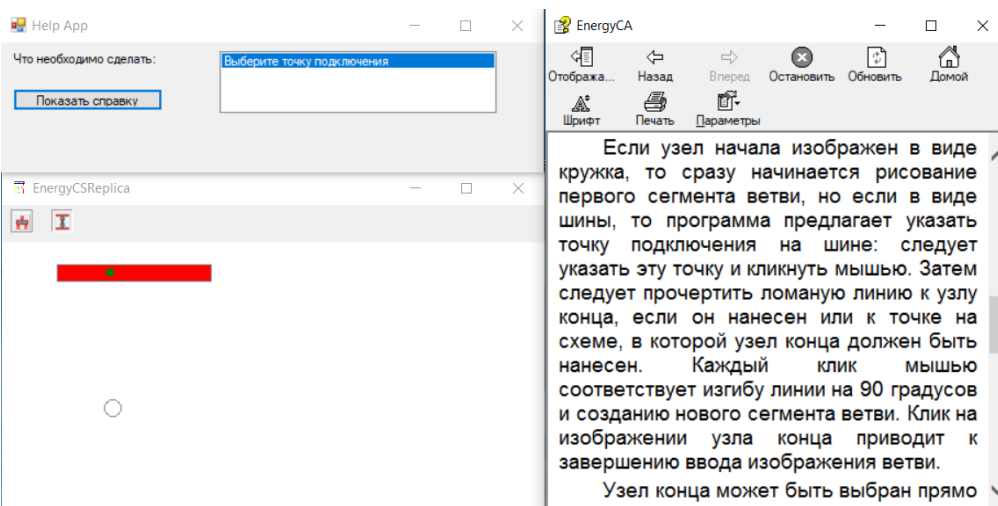


Рис. 6. Выбор точки подключения на шине

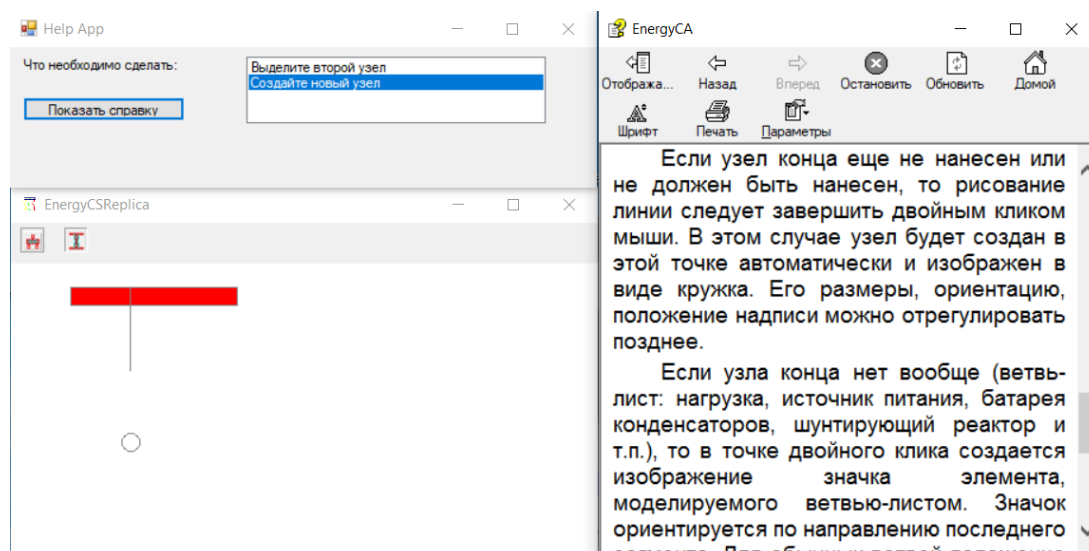


Рис. 7. Рисование ветви

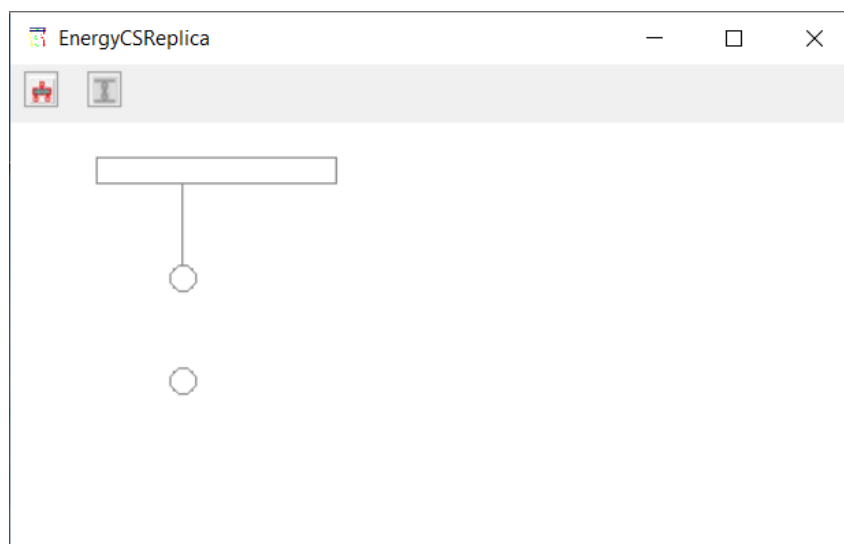


Рис. 8. Завершение построения ветви созданием нового узла

Выводы. Экспериментальное исследование программной реализации предложенного метода показало, что получение помощи о способах выполнения указанной пользователем операции из текущего контекста приложения доступно в результате единственного запроса. Таким образом, цель научного исследования – сокращение временных затрат на получение помощи – достигнута.

Достоверность результатов исследования подтверждается как обоснованным выбором и корректным применением математического аппарата сетей Петри, так и адекватностью полученных при помощи предложенного метода контекстных рекомендаций.

Полученные результаты могут быть использованы в процессе разработки и ме-

тодического сопровождения существенно интерактивного программного обеспечения, в частности приложений CAD/CAE. Приложения, которые могут использовать предложенный метод (приложения-клиенты), должны иметь открытый исходный код и быть построенными на использовании событийной связи между интерфейсом пользователя и обработчиками событий. Предложенный метод программно реализован в виде динамической библиотеки (сервера), которая предоставляет функционал по интерпретации сетей Петри и построению маршрутов достижения заданной маркировки. Интерфейс этой библиотеки предоставляет возможности передачи от клиента данных о совершенных пользователем действиях, а также исполнения запроса на формирование контекстной по-

мощи. Для редактирования и отладки модели сценариев действий пользователя в формате РИСП доступно бесплатное приложение CPN Tools. Для создания .CHM-файлов справки можно использовать бесплатные инструменты (Microsoft HTML Help Workshop, Htm2Chm, плагины для Total Commander и т.п.). Для просмотра .CHM-файлов доступно стандартное средство просмотра, встроенное во все версии Microsoft Windows или сторонние программы просмотра.

Список литературы

1. **Свид.** 2016660884 Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации в Реестре программы для ЭВМ. Система информационного моделирования электроэнергетических сетей для расчета установившихся режимов, токов короткого замыкания, потерь электрической энергии, технико-экономических показателей с отображением результатов на однолинейных схемах и схемах на картах местности (СИМЭС) / Н.Б. Ильичев, А.И. Кулешов, В.А. Серов и др. – М.: РОСПАТЕНТ, 2016.
2. **Crowley R., Medvedeva O., Jukic D.** SlideTutor: A model-tracing Intelligent Tutoring System for teaching microscopic diagnosis // Proceedings of the 11th international conference on artificial intelligence in education. – 2003. – P. 157–164.
3. **Towards** collaborative intelligent tutors: Automated recognition of users' strategies / Y. Gal, E. Yamangil, S.M. Shieber, et al. // International Conference on Intelligent Tutoring Systems. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. – P. 162–172.
4. **Котов В.Е.** Сети Петри. – М.: Наука, 1984. – 160 с.
5. **Van der Aalst W.M.P.** The application of Petri nets to workflow management // Journal of circuits, systems, and computers. – 1998. – Vol. 8, No. 01. – P. 21–66.
6. **Zhao X., Choi Y.** Hierarchical Structuring of a Workflow Model in Petri-Net // ICEB. – 2004. – P. 117–121.
7. **INCOME/WF** – A Petri net based approach to workflow management / A. Oberweis, R. Schätzle, W. Stucky, et al. // Wirtschaftsinformatik'97. – Physica. – Heidelberg, 1997. – P. 557–580.
8. **Verbeek H.M.W., Hirnschall A., van der Aalst W.M.P.** XRL/Flower: Supporting inter-organizational workflows using XML/Petri-net technology // International Workshop on Web Services, E-Business, and the Semantic Web. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2002. – P. 93–108.
9. **Александров Д.В., Фадин Д.Н.** Методика трансляции графического представления бизнес-процесса предприятия в раскрашенную сеть Петри // Вестник Тамбовского государственного технического университета. – 2007. – Т. 13, № 2.
10. **CPN** tools for editing, simulating, and analysing coloured Petri nets / A.V. Ratzer, L. Wells, H.M. Lassen, et al. // International Conference on Application and Theory of Petri Nets. – Springer, Berlin, Heidelberg, 2003. – P. 450–462.
11. **Bouali M., Barger P., Schon W.** Coloured Petri Net inversion for Backward reachability analysis // IFAC Proceedings Volumes. – 2009. – Vol. 42, No. 5. – P. 227–232.
12. **Tavana M.** Knowledge-based expert system development and validation with petri nets // Journal of Information & Knowledge Management. – 2008. – Vol. 7, No. 01. – P. 37–46.
13. **Нильсен Н.** Искусственный интеллект: методы поиска решений: пер. с англ. – М., 1973.

References

1. Il'ichev, H.B., Kuleshov, A.I., Serov, V.A., Shershnev, K.G., Il'ichev, A.N., Eliceeva, E.N. *Sistema informatsionnogo modelirovaniya elektro-energeticheskikh setey dlya rascheta ustanovivshikhsya rezhimov, tokov korotkogo zamykaniya, poter' elektricheskoy energii, tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley s otobrazheniem rezul'tatov na odnolineynykh skhemakh i skhemakh na kartakh mestnosti (SIMES)* [Information modeling systems for electric power networks for calculations of steady-state modes, short-circuit current, energy losses, technical and economic indicators with the results displayed on single-line diagrams and diagrams on terrain maps]. *Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii v Reestre programmy dlya EVM no. 2016660884* [Certificate of state registration in the Register of computer programs no. 2016660884]. Moscow: ROSPATENT, 2016.
2. Crowley, R., Medvedeva, O., Jukic, D. SlideTutor: A model-tracing Intelligent Tutoring System for teaching microscopic diagnosis. Proceedings of the 11th international conference on artificial intelligence in education, 2003, pp. 157–164.
3. Gal, Y., Yamangil, E., Shieber, S.M., Rubin, A., Grosz, B.J. Towards collaborative intelligent tutors: Automated recognition of users' strategies. International Conference on Intelligent Tutoring Systems, Springer, Berlin, Heidelberg, 2008, pp. 162–172.
4. Kotov, V.E. *Seti Petri* [Petri Nets]. Moscow: Nauka, 1984. 160 p.
5. Van der Aalst, W.M.P. The application of Petri nets to workflow management. Journal of circuits, systems, and computers, 1998, vol. 8, no. 01, pp. 21–66.

6. Zhao, X., Choi, Y. Hierarchical Structuring of a Work-flow Model in Petri-Net. ICEB, 2004, pp. 117–121.

7. Oberweis, A., Schätzle, R., Stucky, W., Weitz, W., Zimmermann, G. INCOME/WF–A Petri net based approach to workflow management. Wirtschaftsinformatik'97, Physica. Heidelberg, 1997, pp. 557–580.

8. Verbeek, H.M.W., Hirnschall, A., van der Aalst, W.M.P. XRL/Flower: Supporting inter-organizational work-flows using XML/Petri-net technology. International Workshop on Web Services, E-Business, and the Semantic Web, Springer, Berlin, Heidelberg, 2002, pp. 93–108.

9. Aleksandrov, D.V., Fadin, D.N. Metodika translyatsii graficheskogo predstavleniya biznes-protsessa predpriyatiya v raskrashennuyu set' Petri [Method of translating a graphical representation of an enterprise's business process into a colored Petri net]. *Vestnik Tambovskogo gosudarstven-*

nogo tekhnicheskogo universiteta, 2007, vol. 13, no. 2.

10. Ratzer, A.V., Wells, L., Lassen, H.M., Laursen, M., Qvortrup, J.F., Stissing, M.S., Westergaard, M., Christensen, S., Jensen, K. CPN tools for editing, simulating, and analysing coloured Petri nets. International Conference on Application and Theory of Petri Nets, Springer, Berlin, Heidelberg, 2003, pp. 450–462.

11. Bouali, M., Barger, P., Schon, W. Colored Petri Net inversion for Backward reachability analysis. IFAC Proceedings Volumes, 2009, vol. 42, no. 5, pp. 227–232.

12. Tavana, M. Knowledge-based expert system development and validation with petri nets. Journal of Information & Knowledge Management, 2008, vol. 7, no. 01, pp. 37–46.

13. Nil'sen, N. *Iskusstvennyy intellekt: metody poiska resheniy* [Artificial intelligence: methods of finding solutions]. Moscow, 1973.

ВЕСТНИК ИВАНОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Выпуск 5

Издание зарегистрировано в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.
Свидетельство о регистрации ПИ N 77-13527 от 20.09.02 г.

Подписано в печать 14.10.2020. Выход в свет 31.10.2020. Формат 60х84 1/8.

Усл. печ. л. 8,83. Уч.-изд. л. 9,62. Тираж 100 экз. Цена свободная. Заказ

Ивановский государственный энергетический университет, 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.
Типография ООО «ПресСто», 153025, г. Иваново, ул. Дзержинского, 39, оф. 307.