

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 12, 2023

С Днем энергетика, дорогие читатели!

Атомные электростанции

Использование теплогидравлического модуля HYDRA-IBRAE/LM интегрального кода ЕВКЛИД для расчета парогенераторов установок с натриевым теплоносителем

И. А. Климонов, Н. А. Мосунова, В. Ф. Стрижов, Э. В. Усов, В. И. Чухно 5

Экспериментальные исследования поплавково-дискретного метода измерения уровня тяжелого жидкометаллического теплоносителя

*Т. А. Бокова, А. Г. Мелузов, Н. С. Волков, А. Р. Маров, Т. К. Зырянова,
Р. В. Сумин, М. Д. Погорелов* 12

Тепло- и массообмен, свойства рабочих тел и материалов

Расчет мощности обогрева газовых камер линейной ячейки КРУЭ для установки в районах с холодным климатом

И. С. Антаненкова, А. Ю. Баринов, Ю. А. Геллер, В. И. Кузнецов 21

Моделирование процессов конденсации насыщенного пара из нисходящего потока на поверхности горизонтальной трубы методом VOF

К. Б. Минко, В. И. Артемов, А. А. Клементьев, С. Н. Андреев 31

Гидродинамика и теплообмен при течении двухфазного потока в обогреваемом вертикальном мини-канале при высоких приведенных давлениях

А. В. Беляев, Н. Е. Сидельников, А. В. Дедов 47

Модифицированное соотношение для чисел Нуссельта на боковой поверхности плоского металлического слоя расплава, нагреваемого снизу

В. Д. Локтионов 65

Численное исследование влияния молекулярного числа Прандтля теплоносителя и проницаемости стенки трубы на турбулентный теплообмен

В. Г. Луцкич, М. С. Макарова, С. С. Попович 77

Численное исследование тепловых характеристик стены Тромба новой конструкции со стеклблоком для холодных климатических условий

С. А. Костилов, М. С. Гринкруг, С. А. Гордин, J. Yiqiang 90

Возобновляемые источники энергии, гидроэнергетика

Выбор накопителя энергии для микрогазотурбинной установки, автономно работающей в условиях Севера

А. Б. Тарасенко, О. С. Попель, С. В. Монин 101

Математическое моделирование и численное исследование аэродинамического следа за ветротурбиной Ульяновского ветропарка

М. И. Корнилова, Ю. А. Хахалев, В. Н. Ковальногов, А. В. Чукалин, Е. В. Цветова 114

Технико-экономическое сравнение простого и каскадного органического цикла Ренкина для распределенной энергетики

O. J. Eyunibo, S. O. Otuagoma, D. O. Ofotoku, N. U. Enyinnaya, K. Owebor

126

Экспериментальное исследование характеристик сопл Лавалея для реактивных турбин

*O. O. Мильман, А. С. Голдин, Б. А. Шифрин, В. Б. Перов, Л. Н. Серезжин,
А. В. Птахин, В. С. Крылов, А. Ю. Картуесова*

138

Паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование

Выбор варианта пуска энергоблока 800 МВт Сургутской ГРЭС-2 при отсутствии собственного источника пара

*А. В. Скуратов, В. И. Гомболевский, М. В. Лазарев, А. С. Шабунин, П. А. Березинец,
Ю. С. Васильконов, А. Н. Синельников, С. Г. Филиппов*

158

Contents

Vol. 70, No. 12, 2023

Nuclear Power Plants

- Application of the EUCLID Integrated Code's HYDRA-IBRAE/LM Thermal Hydraulic Module for Analyzing the Steam Generators of Sodium Cooled Reactor Plants
I. A. Klimonov, N. A. Mosunova, V. F. Strizhov, E. V. Usov, and V. I. Chukhno 5
- Experimental Studies of the Float-Discrete Method for Measuring the Level of a Heavy Liquid-Metallic Coolant
T. A. Bokova, A. G. Meluzov, N. S. Volkov, A. R. Marov, T. K. Zyryanova, R. V. Sumin, and M. D. Pogorelov 12
-

Heat and Mass Transfer and Properties of Working Fluids and Materials

- Calculation of Heating Power of Gas Cameras of a GIS Linear Cell for Installation in Areas with a Cold Climate
I. S. Antanenkova, A. Y. Barinov, Yu. A. Geller, and V. I. Kuznetsov 21
- Simulation of Saturated Vapor Condensation from a Downflow on the Surface of a Horizontal Pipe by the VOF Method
K. B. Minko, V. I. Artemov, A. A. Klementiev, and S. N. Andreev 31
- Hydrodynamics and Heat Transfer for a Two-Phase Flow in a Heated Vertical Minichannel at High Reduced Pressures
A. V. Belyaev, N. E. Sidel'nikov, and A. V. Dedov 47
- Modified Relationship for Nusselt Numbers on the Side Surface of a Flat Metal Layer of Melt Heated from Below
V. D. Loktionov 65
- Numerical Investigation of the Influence of the Coolant's Prandtl Molecular Numbers and the Permeability of the Pipe Wall on Turbulent Heat Transfer
V. G. Lushchik, M. S. Makarova, and S. S. Popovich 77
- Numerical Investigation of Thermal Performance of a Trombe Wall of a New Design with Glazing for Cold Climatic Conditions
S. A. Kostikov, M. S. Grinkrug, S. A. Gordin, and J. Yiqiang 90
-

Renewable Energy, Hydropower

- The Selection of Energy Storage for a Micro-Gas-Turbine Plant Operating Autonomously in the Conditions of the North
A. B. Tarasenko, O. S. Popel, and S. V. Monin 101
- Mathematical Modeling and Numerical Research of the Aerodynamic Wake Behind the Wind Turbine of the Ulyanovsk Wind Farm
M. I. Kornilova, Yu. A. Khakhalev, V. N. Kovalnogov, A. V. Chukalin, and E. V. Tsvetova 114
- Techno-Economic Comparison of Simple and Cascade Organic Rankine Cycle for Distributed Energy
O. J. Eyenubo, S. O. Otuagoma, K. Owebor, N. U. Enyinnaya, and D. O. Ofotoku 126

Experimental Investigation into Performance of Laval Nozzles for Reaction Turbines

*O. O. Mil'man, A. S. Goldin, B. A. Shifrin, V. B. Perov, L. N. Serezhkin,
A. V. Ptakhin, V. S. Krylov, and A. Yu. Kartuesova*

138

**Steam-Turbine, Gas-Turbine, and Combined-Cycle Plants
and Their Auxiliary Equipment**

Selecting the Startup Option for the Surgut GRES-2 800-MW Power Unit in the Absence
of Its Own Steam Source

*A. V. Skuratov, V. I. Gombolevskii, M. V. Lazarev, A. S. Shabunin, P. A. Berezinets,
Yu. S. Vasil'konov, A. N. Sinel'nikov, and S. G. Filippov*

158

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКОГО МОДУЛЯ HYDRA-IBRAE/LM ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ЕВКЛИД ДЛЯ РАСЧЕТА ПАРОГЕНЕРАТОРОВ УСТАНОВОК С НАТРИЕВЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ¹

© 2023 г. И. А. Климонов^а, Н. А. Мосунова^а, В. Ф. Стрижов^а, Э. В. Усов^а *, В. И. Чухно^а

^аИнститут проблем безопасного развития атомной энергетики РАН,
просп. Академика Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090 Россия

*e-mail: usovev@gmail.com

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 12.07.2023 г.

Принята к публикации 01.08.2023 г.

Применение расчетных средств, опирающихся на современные физические и математические модели, для обоснования конструкторских решений различных элементов теплообменного оборудования позволяет экономить время, человеческие и финансовые ресурсы проектных организаций. Разнообразие проектируемых и существующих реакторов, различающихся как по конструкции, так и по типу теплоносителей, требует наличия универсального расчетного теплогидравлического кода широкого спектра использования. Разработанный в рамках проекта “Прорыв” теплогидравлический модуль нового поколения HYDRA-IBRAE/LM интегрального кода ЕВКЛИД удовлетворяет этим требованиям. Работа теплогидравлического модуля в составе интегрального кода позволяет существенно расширить спектр моделируемых режимов работы реакторных установок и, как следствие, отдельных элементов теплообменного оборудования. С помощью разработанного и аттестованного в НТЦ ЯРБ теплогидравлического модуля можно рассчитать теплогидравлику натриевого, свинцового, свинцово-висмутowego, газового и водного теплоносителей в различном оборудовании АЭС. К наиболее сложным для моделирования относятся парогенераторы (ПГ) реакторных установок вследствие возможного присутствия в них теплоносителей двух типов. В настоящей работе представлены результаты исследований, демонстрирующие возможности кода корректно рассчитывать процессы в парогенераторах установок только с натриевым охлаждением, поскольку данные установки существуют и активно эксплуатируются в России и мире. Приведенные в статье данные позволяют сделать вывод, что созданный в ИБРАЭ РАН теплогидравлический модуль является эффективным средством для выполнения численного анализа сложных теплообменных процессов в реакторных установках. С помощью развитой системы замыкающих соотношений модуля можно проводить обоснование проектных теплотехнических решений применительно к отдельным элементам теплообменного оборудования.

Ключевые слова: теплогидравлический модуль, быстрый реактор, парогенератор, ядерная энергетическая установка, жидкометаллический теплоноситель, ЕВКЛИД, HYDRA-IBRAE/LM

DOI: 10.56304/S0040363623120056

Application of the EUCLID Integrated Code's HYDRA-IBRAE/LM Thermal Hydraulic Module for Analyzing the Steam Generators of Sodium Cooled Reactor Plants

I. A. Klimonov^a, N. A. Mosunova^a, V. F. Strizhov^a, E. V. Usov^{a, *}, and V. I. Chukhno^a

^a Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences (IBRAE RAS), Novosibirsk, 630090 Russia

*e-mail: usovev@gmail.com

Abstract—Application of computation tools resting on contemporary physical and mathematical models for substantiating the design solutions adopted for various heat-transfer equipment components helps save time, manpower, and financial resources of design institutions. The variety of both existing reactors and those being designed, which differ from one another both in design and type of coolants calls for the availability of a versatile thermal hydraulic computer code suited for a wide range of applications. The new-generation HYDRA-IBRAE/LM thermal hydraulic module of the EUCLID integrated code, which has been developed as part of the Proryv (Breakthrough) Project, meets these requirements. The operation of this thermal hydraulic module as part of the integrated code opens the possibility to simulate an essentially wider range of reactor plant operation modes and, as a consequence, those of individual heat-transfer equipment components. The developed thermal hydraulic module, which has been certified at the Scientific and Engineering Center for Nuclear and Radiation Safety (SEC NRS), offers the possibility to analyze the thermal hydraulics of sodium, lead, lead–bismuth, gas, and water coolants in various NPP equipment items. Reactor plant steam generators (SGs) belong to the category of equipment components most complex for modeling since they may contain two types of coolants. The article presents study results demonstrating the code's abilities to analyze in a correct way the processes in the steam generators of only sodium cooled reactor plants, because these plants exist and are actively operated in Russia and around the world. The data presented in the article allow a conclusion to be drawn that the thermal hydraulic module developed at IBRAE RAS is an efficient tool for numerically analyzing complex heat-transfer processes in reactor plants. By using an extended system of closing correlations implemented in the module, it is possible to perform substantiation of design thermal engineering solutions as applied to individual heat-transfer equipment components.

Keywords: thermal hydraulic module, fast reactor, steam generator, nuclear power facility, liquid metal coolant, EUCLID, HYDRA-IBRAE/LM

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОПЛАВКОВО-ДИСКРЕТНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ УРОВНЯ ТЯЖЕЛОГО ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ¹

© 2023 г. Т. А. Бокова^а, *, А. Г. Мелузов^а, Н. С. Волков^а,
А. Р. Маров^а, Т. К. Зырянова^а, Р. В. Сумин^а, М. Д. Погорелов^а

^аНижегородский государственный технический университет (НГТУ) им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, д. 24, г. Нижний Новгород, 603155 Россия

*e-mail: tatabo@bk.ru

Поступила в редакцию 31.03.2023 г.

После доработки 14.07.2023 г.

Принята к публикации 01.08.2023 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований применимости поплавково-дискретного метода измерения уровня тяжелого жидкометаллического теплоносителя (ТЖМТ) с использованием герметизированных магнитоуправляемых контактов в качестве чувствительного элемента. Данные контакты регистрируют уровень теплоносителя в поле постоянного магнита, находящегося на поверхности тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Работоспособность такого уровнемера была изучена с применением контрольной емкости со свинцово-висмутовым теплоносителем в условиях, приближенных к натурным. Этот метод прост, но его основная проблема – сохранение целостности герметизированных магнитоуправляемых контактов при воздействии высоких температур. Эксперименты выполнялись с помощью прототипа поплавково-дискретного уровнемера (ПДУ) на высокотемпературном стенде со свинцово-висмутовым теплоносителем. Данные, собранные в ходе обработки результатов, с достоверной точностью подтверждают применимость поплавково-дискретного метода контроля уровня тяжелого жидкометаллического теплоносителя. Устройство измерения уровня ТЖМТ, работающее по такому методу, позволяет следить за уровнем в емкостях с сохранением герметичности контура. Благодаря этому можно отказаться от распространенных в настоящее время способов определения уровня ТЖМТ с помощью электроконтактных уровнемеров, при которых герметизация контура невозможна. Данное устройство можно использовать на различных экспериментальных стендах с жидкометаллическими теплоносителями, а также в реакторных установках и ускорительно-управляемых системах в температурном диапазоне 210–230°C, например MYRRHA. Для обеспечения работоспособности уровнемера при более высоких температурах необходима модернизация системы охлаждения герконов.

Ключевые слова: ядерные энергетические установки, реактор на быстрых нейтронах, жидкометаллический теплоноситель, уровень ТЖМТ, методы измерения, поплавково-дискретный уровнемер

DOI: 10.56304/S0040363623120032

Experimental Studies of the Float-Discrete Method for Measuring the Level of a Heavy Liquid-Metallic Coolant

T. A. Bokova^{a, *}, A. G. Meluzov^a, N. S. Volkov^a, A. R. Marov^a, T. K. Zyryanova^a,
R. V. Sumin^a, and M. D. Pogorelov^a

^a *Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (NSTU), Nizhny Novgorod, 603155 Russia*

**e-mail: tatabo@bk.ru*

Abstract—The results of experimental studies of the applicability of the float-discrete method for measuring the level of a heavy liquid-metal coolant (HLMC) using sealed magnetically controlled contacts as a sensitive element are presented. These contacts register the coolant level in the field of a permanent magnet located on the surface of a heavy liquid-metal coolant. The performance of such a level sensor was studied using a control tank with a lead-bismuth coolant under conditions close to natural ones. This method is simple, but its main problem is maintaining the integrity of sealed magnetically controlled contacts when exposed to high temperatures. The experiments were carried out using a float-discrete level sensor prototype on a high-temperature stand with a lead-bismuth coolant. The data collected during the processing of the results confirm with reliable accuracy the applicability of the float-discrete method for monitoring the level of a heavy liquid-metal coolant. An HLMC level measuring device operating according to this method makes it possible to monitor the level in tanks while maintaining the tightness of the circuit. Due to this, it is possible to abandon the currently common methods for determining the level of HLMC using electric contact level sensors in which the sealing of the circuit is impossible. This device can be used on various experimental stands with liquid-metal coolants as well as in reactor plants and accelerator-controlled systems in the temperature range of 210–230°C, for example MYRRHA. To ensure the operability of the level transmitter at higher temperatures, it is necessary to upgrade the reed switch cooling system.

Keywords: nuclear power plants, fast neutron reactor, liquid-metal coolant, HLMC level, measurement methods, float-discrete level sensor

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

**РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ОБОГРЕВА ГАЗОВЫХ КАМЕР
ЛИНЕЙНОЙ ЯЧЕЙКИ КРУЭ ДЛЯ УСТАНОВКИ В РАЙОНАХ
С ХОЛОДНЫМ КЛИМАТОМ¹**

© 2023 г. И. С. Антаненкова^а*, А. Ю. Баринов^б, Ю. А. Геллер^а, В. И. Кузнецов^а

^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

^бООО “Евроконтракт – Высоковольтные аппараты”,
Объездное шоссе, д. 12, г. Балашиха, Московская обл., 143900 Россия

*e-mail: antanenkovais@mail.ru

Поступила в редакцию 29.05.2023 г.

После доработки 21.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

В настоящее время большинство крупных электротехнических фирм мира занимаются разработкой и выпуском высоковольтного оборудования с использованием SF₆ (электротехнического газа или, как его чаще называют, элегаза). Элегаз – нетоксичное, стойкое, химически инертное, негорючее соединение, не имеющее цвета, запаха и вкуса, которое при 20°C и 0.1 МПа находится в газообразном состоянии. По совокупности своих свойств элегаз является наиболее предпочтительным для использования в качестве изолирующей и дугогасящей среды в электрических аппаратах. Однако при низких температурах элегаз переходит из газообразного в сжиженное состояние, что приводит к снижению его отключающей способности. С этой проблемой приходится сталкиваться при разработке аппаратов, предназначенных для установки на открытом воздухе в районах с холодным климатом. Этот недостаток может быть скомпенсирован с помощью обогрева аппаратов при температуре окружающей среды ниже температуры насыщения элегаза. Рассматривается решение данной задачи применительно к линейной ячейке комплектного распределительного устройства с элегазовой изоляцией (КРУЭ) ZF7-126 производства China XD Group и ЕК ВВА. Определена необходимая мощность устройства для обогрева камер КРУЭ, заполненных элегазом, при условии вывода оборудования из холодного состояния при температуре окружающей среды –45°C в течение 2 ч. Мощность должна быть достаточной для обеспечения перехода элегаза из сжиженного состояния в газообразное (при температуре на внутренней стенке камеры –20°C), а также обогрева элементов корпуса камер КРУЭ и компенсации тепловых потерь с поверхности камер. Представлены результаты сравнения тепловых потерь с поверхности камер при размещении КРУЭ на открытом воздухе и в закрытом (неотапливаемом) помещении. Сформулированы рекомендации по выбору удельной мощности и длины греющего кабеля при обогреве участков цилиндрической поверхности камер КРУЭ. Приведены результаты расчета изменения температуры на внутренней стенке камеры по мере удаления от участков обогреваемой теплоизолированной поверхности.

Ключевые слова: элегаз, комплектное распределительное устройство, конденсация, удельная мощность греющего кабеля, надежность, тепловые потери, высоковольтное оборудование

DOI: 10.56304/S0040363623120019

Calculation of Heating Power of Gas Cameras of a GIS Linear Cell for Installation in Areas with a Cold Climate

I. S. Antanenkova^{a, *}, A. Y. Barinov^b, Yu. A. Geller^a, and V. I. Kuznetsov^a

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

^b OOO Eurocontract, Balashiha, Moscow oblast, 143900 Russia

*e-mail: antanenkovais@mail.ru

Abstract—At present, the majority of large electrotechnical firms of the world develop and produce high-voltage equipment using SF₆ (electronegative gas or, as it is more often called, elegas). Elegas is a nontoxic, stable, chemically inert, nonflammable compound, having no color, smell, and taste, which exists at normal condition (20°C and 0.1 MPa) in a gaseous state. In complex of its properties, elegas is more preferential to use as insulation and arc-damping environment in electrical equipment. However, at low temperatures, elegas transfers from a gaseous to a liquid state, which leads to a decrease of breaking properties. This problem occurs during development of equipment for outside placement in areas with a cold climate. This disadvantage can be compensated for by heating the equipment at an ambient temperature lower than the saturation temperature of elegas. The solving of this task is considered in respect to the linear cell of complete switchgear gas-insulated (GIS) ZF7-126 by XD GROUP CHINA and EK BBA. The power of a unit needed to heat GIS cameras with elegas is determined under conditions of defreezing of equipment at an ambient temperature of –45°C for 2 h. The power must be enough for ensuring elegas transformation from a liquid state to a gaseous state (at inside wall of camera temperature of –20°C) and also be enough to heat units of GIS cameras frames and to compensate the heat losses from cameras surface. The results present a comparison of heat losses from the camera surface with placing GIS in the outside and in an enclosed (unheated) location. Recommendations were made to choose specific capacity and length of heating cable with heat of the area of cylindrical surface of GIS cameras. The results demonstrated a change in calculation on the inside wall of the camera with distance from area of the insulation surface.

Keywords: elegas, electronegative gas, integrated switchgear, condensation, specific capacity of heat cable, reliability, heat losses, high-voltage equipment

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНДЕНСАЦИИ НАСЫЩЕННОГО
ПАРА ИЗ НИСХОДЯЩЕГО ПОТОКА НА ПОВЕРХНОСТИ
ГОРИЗОНТАЛЬНОЙ ТРУБЫ МЕТОДОМ VOF¹**

© 2023 г. К. Б. Минко^а, *, В. И. Артемов^а, А. А. Клементьев^а, С. Н. Андреев^а

^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: minkokb@gmail.com

Поступила в редакцию 19.05.2023 г.

После доработки 07.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

В различных литературных источниках представлены результаты экспериментов, которые проводились с целью исследовать процесс конденсации на горизонтальном цилиндре движущегося пара хладона R-113. Эти результаты демонстрируют качественное рассогласование с тенденциями, следующими из имеющихся теоретических зависимостей. Авторами этих экспериментальных данных были указаны некоторые возможные причины такого различия, однако детальная проверка высказанных предположений затруднена из-за сложностей получения информации о локальных характеристиках процесса конденсации. В настоящей работе методом VOF (Volume of Fluid) выполнено моделирование экспериментальных режимов конденсации хладона R-113 на поверхности горизонтального цилиндра из нисходящего потока, движущегося со скоростью до 6 м/с при давлении близком к атмосферному. Для моделирования межфазного массообмена применялась модель Lee. Подбор ее константы осуществлялся с помощью алгоритма, предложенного авторами настоящей работы ранее. Представлены данные об изменении локальных характеристик теплоотдачи при конденсации из движущегося потока пара, полученные с использованием метода VOF. Результаты расчетов хорошо согласуются с “необычными” экспериментальными данными и подтверждают зафиксированный в эксперименте аномальный (по сравнению с существующими теоретическими зависимостями) рост коэффициента теплоотдачи при увеличении скорости набегающего потока. Показано, что одна из причин повышения коэффициента теплоотдачи – взаимодействие стекающей пленки конденсата с вихревыми структурами, образующимися за обтекаемым цилиндром. При определенной скорости набегающего потока происходит периодическое “захлебывание” стекающей пленки конденсата, что, в свою очередь, приводит к существенной интенсификации теплообмена вблизи нижней образующей цилиндра. Данный механизм не учитывается в существующих моделях, так как в них, как правило, полагается, что после отрыва потока пленка стекает только вследствие действия гравитационных сил. Предложена критериальная зависимость для определения границы “аномальной” (по сравнению с теоретическим значением) интенсификации теплообмена.

Ключевые слова: конденсация, массообмен, горизонтальная труба, межфазная поверхность, численное моделирование, метод VOF, модифицированная модель Lee, движущийся пар

DOI: 10.56304/S004036362312010X

Simulation of Saturated Vapor Condensation from a Downflow on the Surface of a Horizontal Pipe by the VOF Method

K. B. Minko^{a, *}, V. I. Artemov^a, A. A. Klementiev^a, and S. N. Andreev^a

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: minkokb@gmail.com

Abstract—Various literary sources present the results of experiments that were carried out in order to investigate the process of condensation on a horizontal cylinder of a moving steam of freon R-113. These results demonstrate a qualitative disagreement with the trends following from the available theoretical dependencies. The authors of these experimental data indicated some possible reasons for this difference, but a detailed verification of the above assumptions is difficult due to the difficulties in obtaining information about the local characteristics of the condensation process. In this work, the VOF (Volume of Fluid) method is used to simulate the experimental modes of R-113 freon condensation on the surface of a horizontal cylinder from a downward flow moving at a speed of up to 6 m/s at a pressure close to atmospheric. The Lee model was used to simulate interfacial mass transfer. The selection of its constant was carried out using the algorithm proposed earlier by the authors of this work. Data on changes in the local characteristics of heat transfer during condensation from a moving vapor flow, obtained using the VOF method, are presented. The calculation results are in good agreement with the “unusual” experimental data and confirm the experimentally recorded anomalous (compared to the existing theoretical dependences) increase in the heat-transfer coefficient with an increase in the oncoming flow velocity. It is shown that one of the reasons for the increase in the heat-transfer coefficient is the interaction of the falling condensate film with the vortex structures formed behind the streamlined cylinder. At a certain velocity of the oncoming flow, the falling condensate film is periodically “flooded,” which, in turn, leads to a significant intensification of heat transfer near the lower generatrix of the cylinder. This mechanism is not taken into account in the existing models since, as a rule, it is assumed in them that, after flow separation, the film flows down only due to the action of gravitational forces. A criterion dependence is proposed for determining the boundary of “anomalous” (compared to the theoretical value) heat-transfer intensification.

Keywords: condensation, mass transfer, horizontal pipe, interface, numerical simulation, VOF method, modified Lee model, moving vapor

**ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ**

**ГИДРОДИНАМИКА И ТЕПЛООБМЕН ПРИ ТЕЧЕНИИ ДВУХФАЗНОГО
ПОТОКА В ОБОГРЕВАЕМОМ ВЕРТИКАЛЬНОМ МИНИ-КАНАЛЕ
ПРИ ВЫСОКИХ ПРИВЕДЕННЫХ ДАВЛЕНИЯХ¹**

© 2023 г. А. В. Беляев^а, *, **, Н. Е. Сидельников^а, А. В. Дедов^а

^аНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

*e-mail: BeliaevAVL@mpei.ru

**e-mail: belyaevalek@yandex.ru

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 08.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Актуальность исследований гидродинамики и теплообмена в мини-каналах обусловлена повышенным интересом к энергетическим системам высокого давления и высокотехнологичным устройствам, в которых используются компактные и эффективные теплообменники с большой плотностью теплового потока. На сегодняшний день активно изучается возможность применять каналы малого диаметра в разных отраслях промышленности, в том числе при производстве теплообменных устройств, в которых в качестве теплоносителя могут использоваться различные диэлектрические жидкости и хладоны при умеренных и высоких значениях приведенных давлений. Тепловые потоки большой плотности целесообразно снимать с помощью процесса кипения как самого эффективного механизма отвода тепла. Для проектирования теплообменных аппаратов, в которых используется процесс кипения, требуются надежные методы расчета теплообмена и потерь давления в двухфазных потоках. Авторами проверена работоспособность известных и наиболее достоверных методов расчета потерь давления и коэффициента теплоотдачи, разработанных для обычных каналов и мини-каналов, в условиях повышенных приведенных давлений – до $p_r = p/p_{cr} = 0.7$. Представлен обзор наиболее известных методов, применимых для каналов различного диаметра (0.16–32 мм), проведено сравнение результатов расчета с экспериментальными данными. Эксперименты выполнены при значениях приведенного давления 0.43, 0.56 и 0.70 в диапазоне массовых скоростей $G = 200–1000$ кг/(м² · с). Даны описание экспериментальной установки, рабочего участка и порядок проведения эксперимента. Исследования выполнялись с использованием фреона R125 в вертикальном круглом канале внутренним диаметром 1.1 мм и длиной обогреваемого участка 50 мм. При сравнении экспериментальных данных о теплоотдаче с результатами, полученными по рассмотренным в обзоре методам, отмечена хорошая работоспособность тех методов расчета, которые были разработаны для обычных каналов и для конкретных жидкостей в условиях близких к условиям проведенных экспериментов. Потери давления, рассчитанные по гомогенной модели при высоких приведенных давлениях, хорошо согласуются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: каналы малого диаметра, высокие приведенные давления, пузырьковое кипение в потоке, двухфазный поток, гидродинамика, теплообмен, коэффициент теплоотдачи, конвекция

DOI: 10.56304/S0040363623120020

Hydrodynamics and Heat Transfer for a Two-Phase Flow in a Heated Vertical Minichannel at High Reduced Pressures

A. V. Belyaev^{a, *, **}, N. E. Sidel'nikov^a, and A. V. Dedov^a

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: BelyaevAVL@mpei.ru

**e-mail: belyaevalek@yandex.ru

Abstract—The relevance of studies into hydrodynamics and heat transfer in minichannels is driven by the increased interest in high-pressure power systems and high-tech devices that employ compact and efficient heat exchangers with a high heat flux. The potential for application of small-diameter channels in various industries, including production of heat exchangers, in which various dielectric liquids or freons can be used as a coolant at moderate and high reduced pressures, is being actively investigated today. High heat fluxes should be removed by boiling as the most efficient heat removal mechanism. Proper designing of heat exchangers employing the boiling process requires reliable methods for calculating heat transfer and pressure drop in two-phase flows. The authors have tested the applicability of the known and most reliable methods for calculating pressure drops and heat-transfer coefficient, which have been developed for conventional channels and minichannels, under conditions of increased reduced pressures as high as $p_r = p/p_{cr} = 0.7$. A review of the best-known methods applicable to various diameter (0.16–32 mm) channels is presented, and the predictions by these methods are compared with experimental data. The experiments were performed at a reduced pressure of 0.43, 0.56, and 0.70 in the mass velocity range of $G = 200\text{--}1000 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$. The experimental setup, the test section, and the experimental procedure are described. The studies were done with R125 refrigerant in a 1.1 mm ID vertical round channel with a heated length of 50 mm. The comparison of the experimental data with predictions by the reviewed procedures demonstrated good performance of calculation methods that had been developed for conventional channels. The best results yielded formulas developed for specific liquids and conditions close to the conditions of the performed experiments.

Keywords: small diameter channels, high reduced pressures, flow nucleate boiling, two-phase flow, hydrodynamics, heat transfer, heat-transfer coefficient, convection

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

**МОДИФИЦИРОВАННОЕ СООТНОШЕНИЕ ДЛЯ ЧИСЕЛ НУССЕЛЬТА
НА БОКОВОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПЛОСКОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ
РАСПЛАВА, НАГРЕВАЕМОГО СНИЗУ¹**

© 2023 г. В. Д. Локтионов^{a, b, *}

^aНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
ул. Красноказарменная, д. 14, Москва, 111250 Россия

^bЭлектрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электрических станций
(АО “ЭНИЦ”), ул. Святого Константина, д. 6, г. Электрогорск, Московская обл., 142530 Россия

*e-mail: LoktionovVD@mpei.ru

Поступила в редакцию 05.04.2023 г.

После доработки 26.05.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Выполнен анализ разработанного модифицированного соотношения чисел Нуссельта Nu для оценки тепловых нагрузок на поверхностях плоского горизонтального слоя металлического расплава [жидкометаллические теплоносители, металлические слои расплава, формирующиеся внутри корпусов ядерной энергетической установки (ЯЭУ) при тяжелой аварии и др.], подогреваемого по его нижней поверхности и имеющего неравномерное радиальное температурное распределение. Необходимость проведения такого анализа объясняется тем, что использование известных соотношений для чисел Нуссельта Nu для слоя жидкости/расплава с неравномерным продольным распределением температуры приводит к значительным погрешностям при определении условий теплообмена на граничных поверхностях слоя, что является критичным, например, при реализации концепции удержания расплавленных материалов внутри корпуса ЯЭУ при тяжелой аварии (ТА). В предложенном соотношении для числа Nu на боковой поверхности слоя расплава используются как традиционные (число Рэлея), так и дополнительные параметры, учитывающие температурные условия на его граничных поверхностях (в том числе на боковой), а также размеры слоя. Для нахождения неизвестных коэффициентов в модифицированном соотношении применялись результаты нескольких серий численных экспериментов с использованием отечественного CFD-кода ANES. С помощью полученного соотношения для числа Nu был проведен параметрический анализ условий теплообмена на боковой поверхности металлического слоя расплава, формирующегося при ТА. Согласно результатам анализа предложенное соотношение дает хорошую точность при расчетах (в среднем погрешность не превышала 7%) и предсказательную эффективность разработанного модифицированного соотношения для чисел Nu в диапазоне значений числа Рэлея от 10^6 до 10^{12} . Такое соотношение для чисел Nu на боковой поверхности слоя расплава может применяться при оценке тепловых нагрузок на корпус ЯЭУ при ТА и в других задачах, где имеется радиальная неравномерность температурного распределения в плоском слое жидкости/расплава, подогреваемого снизу.

Ключевые слова: число Нуссельта, слой расплава кориума, CFD-моделирование, реактор, тяжелая авария, тепловая нагрузка

DOI: 10.56304/S0040363623120081

Modified Relationship for Nusselt Numbers on the Side Surface of a Flat Metal Layer of Melt Heated from Below

V. D. Loktionov^{a, b, *}

^a National Research University Moscow Energy Institute, Moscow, 111250 Russia

^b Elektrogorsk Research Center for the Safety of Nuclear Power Plants (AO ENITs), Elektrogorsk, Moscow oblast, 142530 Russia

*e-mail: LoktionovVD@mpei.ru

Abstract—An analysis was made of the developed modified Nusselt number ratio Nu for estimating thermal loads on the surfaces of a flat horizontal layer of metal melt (liquid-metal coolants, metal melt layers formed inside nuclear power plant (NPP) containers during a severe accident, etc.), heated along its lower surface and having an uneven radial temperature distribution. The need for such an analysis is explained by the fact that the use of known relations for the Nusselt numbers Nu for a liquid/melt layer with an uneven longitudinal temperature distribution leads to significant errors in determining the heat transfer conditions at the boundary surfaces of the layer, which is critical, for example, when implementing the concept of retaining molten materials inside the nuclear power plant in case of a severe accident (SA). In the proposed relation for the Nu number on the lateral surface of the melt layer, both traditional (Rayleigh number) and additional parameters are used, taking into account the temperature conditions on its boundary surfaces (including the lateral one) as well as the dimensions of the layer. To find the unknown coefficients in the modified ratio, the results of several series of numerical experiments were used by the domestic ANES CFD code. Using the ratio obtained for the Nu number, a parametric analysis of the heat-transfer conditions on the side surface of the metal layer of the melt formed during an SA was carried out. According to the results of the analysis, the proposed ratio gives good accuracy in calculations (on average, the error did not exceed 7%) and the predictive efficiency of the developed modified ratio for Nu numbers in the range of Rayleigh numbers from 10^6 to 10^{12} . Such a relation for the Nu numbers on the side surface of the melt layer can be used in assessing the thermal loads on the nuclear power plant container during an SA and in other problems where there is a radial nonuniformity of the temperature distribution in a flat liquid/melt layer heated from below.

Keywords: Nusselt number, corium melt layer, CFD simulation, reactor, severe accident, thermal load

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЛЕКУЛЯРНОГО ЧИСЛА
ПРАНДТЛЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ И ПРОНИЦАЕМОСТИ СТЕНКИ ТРУБЫ
НА ТУРБУЛЕНТНЫЙ ТЕПЛООБМЕН¹**

© 2023 г. В. Г. Лущик^а, М. С. Макарова^а, С. С. Попович^а, *

^аНаучно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова,
Мичуринский просп., д. 1, Москва, 119192 Россия

*e-mail: pss@imec.msu.ru

Поступила в редакцию 21.03.2023 г.

После доработки 06.07.2023 г.

Принята к публикации 01.08.2023 г.

Предложена методика моделирования турбулентного течения в канале с непроницаемыми и проницаемыми стенками при наличии теплопровода к стенке. Для замыкания уравнений пограничного слоя используется трехпараметрическая дифференциальная модель сдвиговой турбулентности, дополненная уравнением переноса для турбулентного потока тепла. Проведены расчеты для развитого турбулентного течения в круглой трубе с непроницаемыми и проницаемыми стенками для воздуха и бинарных газовых смесей с низким значением молекулярного числа Прандтля при параметрах, соответствующих таковым при выполнении более ранних экспериментов. Результаты исследований по влиянию числа Прандтля на теплообмен в трубе с непроницаемыми стенками для теплоносителя с постоянными физическими свойствами согласуются с экспериментальными данными и эмпирическими зависимостями Кейса и Петухова для числа Нуссельта в диапазоне чисел Прандтля 0.2–0.7. Показано, что возникающий в трубе при сильном отсосе газа положительный градиент давления приводит к нарушению подобия профилей скорости и температуры и, как следствие, к нарушению аналогии Рейнольдса. Использование уравнения переноса для турбулентного потока тепла позволяет учесть сложную зависимость турбулентного числа Прандтля от молекулярного числа Прандтля в вязком подслое и в логарифмическом пограничном слое. Проведена оценка влияния переменности теплофизических свойств и турбулентного числа Прандтля на характеристики теплообмена в трубе. Так, отличие числа Nu , определенного в предположении постоянства турбулентного числа Прандтля, от результатов, полученных в расчетах с использованием уравнения для турбулентного потока тепла, возрастает с уменьшением молекулярного числа Прандтля и увеличением интенсивности отсоса газа.

Ключевые слова: течение в трубе, теплообмен, модель турбулентности, проницаемая стенка, отсос газа, молекулярное число Прандтля, градиент давления, коэффициент аналогии Рейнольдса

DOI: 10.56304/S0040363623120093

Numerical Investigation of the Influence of the Coolant's Prandtl Molecular Numbers and the Permeability of the Pipe Wall on Turbulent Heat Transfer

V. G. Lushchik^a, M. S. Makarova^a, and S. S. Popovich^{a, *}

^a *Research Institute of Mechanics, Moscow State University, Moscow, 119192 Russia*

**e-mail: pss@imec.msu.ru*

Abstract—A technique for modeling turbulent flow in a channel with impermeable and permeable walls in the presence of heat supply to the wall is proposed. To close the equations of the boundary layer, a three-parameter differential model of shear turbulence is used, which is supplemented by a transfer equation for a turbulent heat flux. Calculations are carried out for a developed turbulent flow in a round pipe with impermeable and permeable walls for air and binary gas mixtures with a low molecular Prandtl number with parameters corresponding to those in earlier experiments. The results of studies on the effect of the Prandtl number on heat transfer in a pipe with impermeable walls for a coolant with constant physical properties are consistent with the experimental data and empirical dependences of Case and Petukhov for the Nusselt number in the range of Prandtl numbers of 0.2–0.7. It is shown that a positive pressure gradient arising in a pipe under strong gas suction leads to a violation of the similarity of the velocity and temperature profiles and, as a consequence, to a violation of the Reynolds analogy. The use of the transport equation for a turbulent heat flux makes it possible to take into account the complex dependence of the turbulent Prandtl number on the molecular Prandtl number in the viscous sublayer and in the logarithmic boundary layer. The influence of the variability of thermophysical properties and the turbulent Prandtl number on the characteristics of heat transfer in a pipe is estimated. Thus, the difference between the Nu number determined under the assumption of a constant turbulent Prandtl number and the results obtained in calculations using the equation for turbulent heat flow increases with a decrease in the molecular Prandtl number and an increase in the intensity of gas suction.

Keywords: flow in a pipe, heat transfer, turbulence model, permeable wall, gas suction, molecular Prandtl number, pressure gradient, Reynolds analogy coefficient

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК
СТЕНЫ ТРОМБА НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ СО СТЕКЛОБЛОКОМ
ДЛЯ ХОЛОДНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ**

© 2023 г. С. А. Костиков^а *, М. С. Гринкруг^б, С. А. Гордин^б, J. Yiqiang^а

^аХарбинский политехнический университет (НПТ), Xida, 92, г. Харбин, 150001 Китай

^бКомсомольский-на-Амуре государственный университет (КнАГУ), просп. Ленина, д. 27,
г. Комсомольск-на-Амуре, 681013 Россия

*e-mail: 300gloof@mail.ru

Поступила в редакцию 20.10.2022 г.

После доработки 27.04.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Статья посвящена проблемам, возникающим при использовании стены Тромба в холодных климатических условиях. Такие стены имеют существенный недостаток в условиях холодного климата. При восходе солнца и попадании солнечной энергии через воздушную прослойку на стену Тромба воздух в прослойке очень быстро нагревается. Это приводит к недостаточному аккумулярованию тепла в стене Тромба и повышению потерь тепловой энергии в окружающий воздух из помещения через остекление. Основная цель исследования – разработка нового конструктивного решения для стены Тромба, которое позволит сократить тепловые потери через остекление при сохранении достаточного уровня аккумулирующей способности в холодных климатических условиях. Использование такой стены будет наиболее эффективно на территориях, расположенных в диапазоне широт от 40 до 50°. В работе представлено подробное описание и техническое обоснование нового конструктивного решения для стены Тромба. Разработана математическая модель процессов теплообмена и алгоритм решения, на основе которого проводился численный эксперимент. В течение всего отопительного периода средняя температура воздуха в исследуемом помещении поддерживалась в диапазоне значений, комфортных для постоянного пребывания человека. При использовании стены Тромба новой конструкции может быть сокращено годовое потребление внешних энергоресурсов и снижены выбросы CO₂ на 58%, т.е. их поступит в атмосферу на 18% меньше, чем при применении классической стены Тромба, в тех же климатических условиях. Таким образом, благодаря проведению данного исследования получена полезная информация о возможности улучшить тепловые характеристики стены Тромба в холодных климатических условиях.

Ключевые слова: улучшенная стена Тромба, аккумулирующая эффективность стены Тромба, комбинированная система теплоснабжения, энергосберегающие технологии, сокращение выбросов парниковых газов

DOI: 10.56304/S004036362312007X

Numerical Investigation of Thermal Performance of a Trombe Wall of a New Design with Glazing for Cold Climatic Conditions

S. A. Kostikov^{a, *}, M. S. Grinkrug^b, S. A. Gordin^b, and J. Yiqiang^a

^a Harbin Institute of Technology (HIT), Harbin, 150001 China

^b Komsomolsk-on-Amur State University (KnASU), Komsomolsk-on-Amur, 681013 Russia

*e-mail: 300gloof@mail.ru

Abstract—The paper is devoted to the problems arising in using a Trombe wall under cold climatic conditions. These walls have a considerable disadvantage in cold climates. After sunrise, the solar energy falls on a Trombe wall through the air and heats up the air in it very quickly. This results in insufficient heat storage in the Trombe wall and an increase in thermal energy losses to the ambient air from the room through the glazing. The main purpose of the study is to develop a new design solution for the Trombe wall, which will reduce heat losses through the glazing while maintaining a sufficient level of heat storage capacity in cold climates. Application of this wall will be most effective in areas located in the range of latitudes from 40° to 50°. A detailed description and engineering substantiation of the new design solution for the Trombe wall are presented. A mathematical model of heat-transfer processes and a solution algorithm used as the basis for the numerical experiment were developed. During the entire heating period, the average air temperature in the studied room was kept in the range comfortable for continuous attendance. Introduction of the newly designed Trombe wall will reduce the annual consumption of external energy resources and cut down CO₂ emission by 58%, i.e., its amount entering the atmosphere will be decreased by 18% as compared to the classical Trombe wall under the same climatic conditions. Thus, this study has yielded meaningful information about measures that can be used for improvement of the thermal performance of the Trombe wall for its proper operation in a cold climate.

Keywords: improved Trombe wall, heat-storage effectiveness of a Trombe wall, combined heat supply system, energy-saving technologies, greenhouse gas emission reduction

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

ВЫБОР НАКОПИТЕЛЯ ЭНЕРГИИ ДЛЯ МИКРОГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ, АВТОНОМНО РАБОТАЮЩЕЙ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА¹

© 2023 г. А. Б. Тарасенко^а, *, О. С. Попель^а, С. В. Мони^б

^аОбъединенный институт высоких температур РАН, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, Москва, 125412 Россия

^бНаучно-производственное объединение “Лианозовский электромеханический завод”,
Дмитровское шоссе, д. 110, Москва, 127411 Россия

*e-mail: tarasenkoab@inbox.ru

Поступила в редакцию 14.07.2023 г.

После доработки 31.07.2023 г.

Принята к публикации 01.08.2023 г.

На примере микрогазотурбинной установки (МГТУ) типа С30 Capstone выполнен анализ различных вариантов применения современных накопителей электрической энергии в составе буферной батареи и проведено их сопоставление. Газовые микротурбины единичной мощностью от нескольких десятков до сотен киловатт появились на рынке в 70-х годах прошлого столетия и стали все более широко применяться в системах автономной и распределенной генерации. Их конкурентоспособность по сравнению с дизельными и газопоршневыми энергоустановками обеспечивается прежде всего достижением сопоставимых с конкурентами значений КПД в результате использования регенеративного термодинамического цикла с высокоэффективными рекуперативными теплообменниками и высокооборотного турбогенераторного оборудования с воздушными подшипниками вместо масляных. Это значительно снижает эксплуатационные требования к периодичности (частоте) обслуживания энергоустановок, а также расширяет возможности применения различных видов жидких и газообразных топлив (политопливность), доступных в районе эксплуатации. Важная особенность микрогазотурбинных энергоустановок – звено постоянного тока и буферный накопитель электрической энергии в схеме выдачи мощности, которые позволяют эффективно управлять параметрами тока (регулировать их) без изменения частоты вращения двигателя. В традиционных вариантах таких энергоустановок в качестве буферного накопителя энергии, как правило, используются свинцово-кислотные аккумуляторы. Авторами рассмотрены варианты их замены на суперконденсаторы и аккумуляторы различных видов с учетом таких эксплуатационных факторов, как преобладание в течение большей части года низких температур окружающей среды (арктические условия), трудности в логистике, условия обслуживания энергоустановок этих аккумуляторов и их немалая стоимость. Выполнены оценки массогабаритных характеристик накопителей на основе разных типов элементов с акцентом на изделия российских производителей. Сделан вывод, что при эксплуатации МГТУ в суровых климатических условиях в их буферном накопителе целесообразно использовать суперконденсаторные батареи, несмотря на их малую удельную энергоемкость и высокую стоимость.

Ключевые слова: Арктическая зона России, микрогазотурбинная установка, аккумулятор, суперконденсатор, буферный накопитель, распределенная генерация

DOI: 10.56304/S0040363623120123

The Selection of Energy Storage for a Micro–Gas-Turbine Plant Operating Autonomously in the Conditions of the North

A. B. Tarasenko^{a, *}, O. S. Popel^a, and S. V. Monin^b

^a *Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, Moscow, 125412 Russia*

^b *Research and Production Association Lianozovsky Electromechanical Plant, Moscow, 127411 Russia*

**e-mail: tarasenkoab@inbox.ru*

Abstract—On the example of a micro–gas-turbine plant (MGTU) of the C30 Capstone type, an analysis of various options for the use of modern electric energy storage devices as part of a buffer battery was carried out and compared. Gas microturbines with a unit capacity of several tens to hundreds of kilowatts appeared on the market in the 1970s and have become increasingly widely used in autonomous and distributed generation systems. Their competitiveness in comparison with diesel and gas reciprocating power plants is ensured primarily by achieving comparable efficiency values with competitors as a result of the use of a regenerative thermodynamic cycle with highly efficient recuperative heat exchangers and high-speed turbogenerator equipment with air bearings instead of oil bearings. This significantly reduces the operational requirements for the frequency of maintenance of power plants, and also expands the possibilities of using various types of liquid and gaseous fuels (polyfuel) available in the operation area. An important feature of micro–gas-turbine power plants is the DC link and the buffer storage of electrical energy in the power output circuit, which allow one to effectively control the current parameters (regulate them) without changing the engine speed. In traditional versions of such power plants, as a rule, lead-acid batteries are used as a buffer energy storage. The authors considered options for replacing them with supercapacitors and batteries of various types, taking into account such operational factors as the predominance of low ambient temperatures during most of the year (arctic conditions), difficulties in logistics, maintenance conditions for power plants of these batteries, and their considerable cost. The weight and size characteristics of drives are estimated based on different types of elements with an emphasis on products of Russian manufacturers. It is concluded that when operating an MGTU in harsh climatic conditions, it is advisable to use supercapacitor batteries in their buffer storage, despite their low specific energy consumption and high cost.

Keywords: Arctic zone of Russia, micro–gas-turbine plant, battery, supercapacitor, buffer storage, distributed generation

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
И ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО СЛЕДА
ЗА ВЕТРОТУРБИНОЙ УЛЬЯНОВСКОГО ВЕТРОПАРКА¹**

© 2023 г. М. И. Корнилова^а, *, Ю. А. Хахалев^а,
В. Н. Ковальногов^а, А. В. Чукалин^а, Е. В. Цветова^а

^аУльяновский государственный технический университет, ул. Северный Венец, д. 32, г. Ульяновск, 432027 Россия

*e-mail: masha.kornilova.1995@mail.ru

Поступила в редакцию 18.10.2022 г.

После доработки 09.06.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Поставлена задача моделирования приземного атмосферного пограничного слоя (АПС) в зоне ветротурбины в локации Ульяновского ветропарка. Достоверное и точное прогнозирование эволюции АПС, взаимодействующего с ветропарком, в широком диапазоне пространственных и временных масштабов дает ценную количественную информацию о его потенциальном воздействии на местную метеорологическую обстановку и имеет большое значение для оптимизации как проектирования (размещения турбин), так и эксплуатации ветропарков. Рассматриваются основные проблемы моделирования и численного исследования атмосферного пограничного слоя в комплексе с ветротурбиной. К основным проблемам моделирования относятся: многомасштабность, учет сильно шероховатой неоднородной поверхности, нерегулярность ветра по амплитуде, направлению и частоте, учет конвекции, солнечной радиации, стратификации и фазовых переходов и осадков, генерация турбулентности, выбор метода и инструмента моделирования. Рассматривается проблема многомасштабности исследования системы АПС – ветротурбина, приводится обзор вычислительных технологий для решения задач аэродинамики в масштабах одной установки и ветропарков. Проводится аналитический обзор методов моделирования АПС и его взаимодействия с ветротурбиной. Рассматриваются подходы к исследованию АПС на базе систем уравнений, осредненных по Рейнольдсу, вихререзающих моделей, а также прямого численного моделирования, приводятся их достоинства и ограничения для решения задачи исследования системы АПС – ветрогенератор. Описывается математическая модель системы АПС – ветротурбина. Приведены результаты математического моделирования и численного исследования аэродинамики системы АПС – ветротурбина Ульяновского ветропарка, получены и проанализированы численные данные по затуханию аэродинамического следа за ветротурбиной и восстановлению профиля скорости, а также по сопротивлению трения на поверхности лопасти ветроколеса. Выполнен анализ результатов математического моделирования АПС в зоне ветротурбины.

Ключевые слова: ветротурбина, математическое моделирование, численное исследование, атмосферный пограничный слой, модель турбулентности, сопротивление трения, профиль скорости, аэродинамическая характеристика

DOI: 10.56304/S0040363623120068

Mathematical Modeling and Numerical Research of the Aerodynamic Wake Behind the Wind Turbine of the Ulyanovsk Wind Farm

M. I. Kornilova^{a, *}, Yu. A. Khakhalev^a, V. N. Kovalnogov^a, A. V. Chukalin^a, and E. V. Tsvetova^a

^a Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, 432027 Russia

*e-mail: masha.kornilova.1995@mail.ru

Abstract—The task of modeling the surface atmospheric boundary layer (ABL) in the wind turbine zone at the location of the Ulyanovsk wind farm is set. Reliable and accurate prediction of the evolution of ABL interacting with a wind farm over a wide range of spatial and temporal scales provides valuable quantitative information about its potential impact on the local meteorological situation and is of great importance for optimizing both the design (placement of turbines) and the operation of wind farms. The main problems of modeling and numerical investigation of the atmospheric boundary layer in combination with a wind turbine are considered. The main modeling problems include: multiscale, accounting for a highly rough inhomogeneous surface, wind irregularity in amplitude, direction and frequency, accounting for convection, solar radiation, stratification and phase transitions and precipitation, turbulence generation, and choice of modeling method and tool. The problem of multiscale research of the ABL-wind turbine system is considered and an overview of computational technologies for solving aerodynamic problems on the scale of one installation and wind farms is given. An analytical review of methods for modeling ABL and its interaction with a wind turbine is carried out. Approaches to the study of ABL based on systems of equations averaged by Reynolds, eddy-resolving models, and direct numerical modeling are considered; their advantages and limitations are given for solving the problem of studying the ABL–wind generator system. The mathematical model of the ABL–wind turbine system is described. The results of mathematical modeling and numerical study of the aerodynamics of the ABL–wind turbine system of the Ulyanovsk wind farm are presented, and numerical data on the attenuation of the aerodynamic wake behind the wind turbine and the restoration of the velocity profile, as well as on the friction resistance on the surface of the wind turbine blade, are obtained and analyzed. The analysis of the results of mathematical modeling of ABL in the wind turbine zone is carried out.

Keywords: wind turbine, mathematical modeling, numerical study, atmospheric boundary layer, turbulence model, friction drag, velocity profile, aerodynamic characteristic

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ СРАВНЕНИЕ ПРОСТОГО
И КАСКАДНОГО ОРГАНИЧЕСКОГО ЦИКЛА РЕНКИНА
ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

© 2023 г. **О. J. Eyenubo^a, S. O. Otuagoma^a, D. O. Ofotoku^b, N. U. Enyinnaya^c, K. Owebor^d, ***

^a*The Department of Electrical/Electronics Engineering, Delta State University, P.M.B. 1, Abraka – Oleh Campus, Delta State, Nigeria*

^b*The Department of Mechanical Engineering, Afe Babalola University, PMB 5454, Ado-ekiti, Ekiti, Nigeria*

^c*The Department of Mechanical Engineering, University of Port Harcourt, PMB 5323, Choba, Port Harcourt, Rivers State, Nigeria*

^d*The Department of Mechanical Engineering, Delta State University, P.M.B. 1, Abraka – Oleh Campus, Delta State, Nigeria*

**e-mail: kesiena_owebor@uniport.edu.ng*

Поступила в редакцию 10.06.2022 г.

После доработки 03.09.2022 г.

Принята к публикации 12.09.2022 г.

В работе предложены, смоделированы, проанализированы и сопоставлены с технической и экономической точек зрения две системы для распределенной энергетики: простая и каскадная, работающие по органическому циклу Ренкина (Organic Rankine Cycle – ORC). В качестве топлива предлагается использовать рисовую шелуху с типовой мельницы в Нигерии, в то время как рабочими жидкостями для исследуемых ORC-установок являются хладагенты толуол и R245fa. Моделирование энергетических установок проводилось с помощью фундаментальных технических и экономических подходов. Ключевыми техническими параметрами при исследовании служили выработка электроэнергии, энергетическая и эксергетическая эффективность, искомым экономическим параметром являлась удельная стоимость энергии. Установлено, что при использовании рисовой шелухи в качестве возобновляемого источника энергии ORC-электростанция может обеспечить 27–38 МВт · ч суточной потребности в электроэнергии самой рисовой фабрики и находящихся поблизости объектов. Представлены результаты анализа энергетической и эксергетической эффективности простой и каскадной ORC-электростанции, свидетельствующие о перспективности последней. Проанализированы рабочие/тепловые мощности элементов установок и потери эксергии в них. Определены направления повышения эффективности работы электростанции на рисовой шелухе, это прежде всего совершенствование высокотемпературных теплообменных аппаратов. Представлены результаты экономического анализа жизнеспособности проектов на основе простого и каскадного циклов Ренкина. У простой ORC-установки экономические показатели лучше: удельная стоимость энергии составляет 0.115 дол/(кВт · ч), тогда как у каскадной – 0.124 дол/(кВт · ч). Однако при комплексном исследовании технических, экономических, социальных и экологических показателей обоих циклов установлено, что необходимо разрабатывать каскадные ORC-установки. В работе приводятся также результаты анализа зависимости производительности установок от объемов образования рисовой шелухи в течение года, температуры уходящих газов на устье дымовой трубы и таможенных тарифов. Представлено технико-экономическое обоснование перспективности предлагаемого технического решения для слабо электрифицированных стран.

Ключевые слова: рисовая шелуха, биомасса, органический цикл Ренкина, распределенная энергетика, каскадная электростанция, толуол, R245fa, эксергия

DOI: 10.56304/S0040363623120044

Techno-Economic Comparison of Simple and Cascade Organic Rankine Cycle for Distributed Energy

O. J. Eyenubo^a, S. O. Otuagoma^a, K. Owebor^b, N. U. Enyinnaya^c, and D. O. Ofotoku^d, *

^a*The Department of Electrical/Electronics Engineering, Delta State University, P.M.B. 1, Abraka – Oleh Campus, Delta State, Nigeria*

^b*The Department of Mechanical Engineering, Afe Babalola University, PMB 5454, Ado-ekiti, Ekiti, Nigeria*

^c*The Department of Mechanical Engineering, University of Port Harcourt, PMB 5323, Choba, Port Harcourt, Rivers State, Nigeria*

^d*The Department of Mechanical Engineering, Delta State University, P.M.B. 1, Abraka – Oleh Campus, Delta State, Nigeria*

**e-mail: kesiena_owebor@uniport.edu.ng*

Abstract—In this paper, two power plant configurations for distributed energy, simple and cascaded Organic Rankine Cycle (ORC), were proposed, modeled, analyzed and compared from a technical and economic point of view. It is proposed to use rice husks from a typical mill in Nigeria as fuel for the operation of the power plant, while the working fluids for the studied ORC plants are toluene and R245fa refrigerants. Power plants are modeled on the basis of fundamental technical and economic approaches. At the same time, power generation, as well as energy and exergy efficiency were selected as key technical parameters for the study. The desired economic parameter determines the cost of a unit of energy. It has been established that with proper use of rice husks as a renewable energy source, the energy generated by the ORC power plant can help to meet 27–38 MWh daily needs of the rice factory and its surroundings. The results of the analysis of the energy and exergy efficiency of a simple and cascade ORC power plant as presented indicates a better prospect for the latter. The working/thermal capacities of the plant elements and the loss of exergy in them are analyzed. The directions of increasing the efficiency of the rice husk power plant have been identified, primarily by improving high-temperature heat exchangers. The results of an economic analysis of the viability of the simple and cascade ORC power plants are presented. A simple ORC demonstrates the best economic performance with a unit energy cost of \$0.115 per kWh compared to \$0.124 per kWh of a cascade ORC. However, a holistic study of technical, economic, social and environmental indicators creates prerequisites for the research and development of a cascade ORC installation. The paper also presents the results of an analysis of the sensitivity of plant performance on the volume of annual production of rice husks, the temperature of the exhaust gases at the outlet of the chimney and the coefficient of the import tariff. A feasibility study of the prospects of the proposed technical solution for poorly electrified countries is presented.

Keywords: rice husk, biomass, organic Rankine cycle, distributed energy, cascade power plant, toluene, R245fa, exergy

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК
СОПЛА ЛАВАЛЯ ДЛЯ РЕАКТИВНЫХ ТУРБИН¹**

© 2023 г. О. О. Мильман^{a, b, *}, А. С. Голдин^a, Б. А. Шифрин^a, В. Б. Перов^a, Л. Н. Сережкин^b,
А. В. Птахин^{a, b, c}, В. С. Крылов^{a, b}, А. Ю. Картуесова^{a, b}

^aНаучно-производственное внедренческое предприятие “Турбокон”,
ул. Комсомольская Роцца, д. 43, г. Калуга, 248010 Россия

^bКалужский государственный университет им. К.Э. Циолковского,
ул. Степана Разина, д. 26, г. Калуга, 248023 Россия

^cКалужский филиал Национального исследовательского университета “Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана”, ул. Баженова, д. 2, г. Калуга, 248000 Россия

*e-mail: turbokon@kaluga.ru

Поступила в редакцию 28.06.2023 г.

После доработки 04.08.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

Значительные запасы термальных и промышленных вод температурой 100–150°C могут служить для выработки электроэнергии как по одноконтурной тепловой схеме с непосредственным применением природного пара в конденсационных турбинах, так и по двухконтурной схеме с низкокипящим рабочим телом. И в том и в другом случае неизбежны большие капитальные затраты на их реализацию. Новый способ выработки электроэнергии с помощью низкопотенциального тепла заключается в установке в одноконтурную тепловую схему полнопоточной гидропаровой турбины (ГПТ), использующей тепло сепарата геотермальной станции или тепло промышленных вод. Капитальные затраты на такие установки значительно ниже, так как специального оборудования для подготовки рабочего тела не требуется. Коэффициент полезного действия гидропаровой турбины непосредственно связан с эффективностью ее основного элемента – сопла Лавалья. Для проектирования этой турбины необходимо иметь достоверные данные по работе сопла Лавалья с большой степенью расширения при подаче в него воды, сильно недогретой до температуры насыщения. Такую информацию можно получить только экспериментальным путем, поскольку эта область работы сопла Лавалья мало изучена. Для выявления необходимых характеристик сопла был спроектирован и изготовлен стенд с комплектом сопел Лавалья, в том числе с разными углами раскрытия расширяющейся части и сопел с косым срезом. В качестве рабочей среды использовалась вода с параметрами, близкими к условиям работы в составе ГПТ. Представлены результаты экспериментального исследования сопел Лавалья в широком диапазоне степеней расширения, работающих на вскипающей воде. Опыты проводились при различных давлениях за соплом, и их результаты были сопоставлены с данными, собранными ранее также опытным путем. Описаны экспериментальная установка и конструктивные особенности сопла. Проведен анализ полученных данных по коэффициенту расхода, коэффициенту скорости, степени расширения, начальным параметрам, формам сопел, фактору размерности, на основе которых сделаны выводы. Выявлены характеристики, с помощью которых можно выполнить оценку эффективности реактивной гидропаровой турбины и корректно рассчитать ее мощность.

Ключевые слова: сопло Лавалья, эффективность, горло сопла, коэффициент расхода, коэффициент скорости, степень расширения, сила, тяга, давление, температура, пароводяная смесь

DOI: 10.56304/S0040363624010065

Experimental Investigation into Performance of Laval Nozzles for Reaction Turbines

O. O. Mil'man^{a, b, *}, A. S. Goldin^a, B. A. Shifrin^a, V. B. Perov^a, L. N. Serezhkin^b,
A. V. Ptakhin^{a, b, c}, V. S. Krylov^{a, b}, and A. Yu. Kartuesova^{a, b}

^aResearch, Production, and Innovation Company Turbocon, Kaluga, 248010 Russia

^bTsiolkovski Kaluga State University, Kaluga, 248023 Russia

^cNational Research University Bauman Moscow State Technical University, Kaluga Branch, Kaluga, 248000 Russia

*e-mail: turbokon@kaluga.ru

Abstract—Large resources of thermal and industrial waters at a temperature of 100–150°C can be employed to generate electricity in both a single-circuit thermal cycle with direct usage of natural steam in condensing turbines and a double-circuit cycle with a low-boiling working fluid. Both options require high capital expenditures for their implementation. A new power-generation method on the basis of low-grade heat is to install a full-flow hydro-steam turbine (HST), which utilizes the heat of separated liquid from a geothermal station or the heat of industrial waters, in a single-circuit thermal cycle. Capital expenditures for these units are much lower since special equipment for preparation of the working fluid is not required. The efficiency of a hydro-steam turbine is directly related to the efficiency of its main element, which is the Laval nozzle. Designing this turbine requires reliable data on the performance of a Laval nozzle with a high expansion ratio when it operates on highly subcooled water. Such information can only be obtained experimentally since this region of operation of Laval nozzles has been poorly studied as of yet. To determine the required characteristics of the nozzles, an experimental setup was designed and manufactured with a set of Laval nozzles, including nozzles with different opening angles of the diverging section and nozzles with an oblique cut. The working fluid was water under conditions close to the operating conditions in an HST. The results are presented of the experimental study of Laval nozzles in a wide range of expansion ratios for operation on boiling water. The experiments were performed at different pressures downstream of the nozzle, and their results were compared with previously obtained experimental data. The experimental setup and design features of the nozzle are described. The experimental data on the flow coefficient, velocity coefficient, expansion ratio, initial conditions, nozzle shapes, and size effect, on which the conclusions made are based, have been analyzed. Characteristics have been found that enable us to predict the efficiency of a reaction hydro-steam turbine and properly calculate its output.

Keywords: Laval nozzle, efficiency, nozzle throat, flow coefficient, velocity coefficient, expansion ratio, force, thrust, pressure, temperature, steam-water mixture

**ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ**

**ВЫБОР ВАРИАНТА ПУСКА ЭНЕРГОБЛОКА 800 МВт СУРГУТСКОЙ
ГРЭС-2 ПРИ ОТСУТСТВИИ СОБСТВЕННОГО ИСТОЧНИКА ПАРА**

© 2023 г. А. В. Скуратов^а *, В. И. Гомболевский^а, М. В. Лазарев^а, А. С. Шабунин^а,
П. А. Березинец^а, Ю. С. Васильконов^б, А. Н. Синельников^б, С. Г. Филиппов^б

^а*Всероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия*

^б*Сургутская ГРЭС-2 – Филиал ПАО “Юнипро”, ул. Энергостроителей, д. 23, г. Сургут,
Ханты-Мансийский автономный округ – Югра, 628406 Россия*

**e-mail: AVSkuratov@vti.ru*

Поступила в редакцию 21.11.2022 г.

После доработки 14.04.2023 г.

Принята к публикации 27.06.2023 г.

Вопросы живучести тепловых электростанций по-прежнему актуальны для отечественной энергетики. В связи с концентрацией энергетических мощностей в пределах одной электростанции возникают различного рода нештатные ситуации (аварии), а, поскольку старение действующего оборудования продолжается, вероятность их возникновения значительно возрастает. К числу непредвиденных ситуаций такого рода и относится рассмотренная в статье ситуация для Сургутской ГРЭС-2 (СуГРЭС-2) с полным остановом генерирующего паросилового оборудования электростанции (так называемая “посадка на нуль”). Для выхода из такого рода системных аварий требуется наличие соответствующих возможностей и средств. Сургутская ГРЭС-2 имеет две очереди – шесть энергоблоков паросилового оборудования (ПСУ) по 800 МВт и два энергоблока парогазовой установки (ПГУ) по 400 МВт. Представлены решения поставленной задачи во взаимодействии оборудования двух очередей электростанции. Рассмотрены пять возможных схем разворота энергоблоков ПСУ с “нуля” при потере пара собственных нужд. Разработаны необходимые организационные и технические мероприятия для реализации указанных вариантов. Определены теоретические и подтверждены испытаниями минимальные требования (расход, давление и температура) к источнику стороннего пара. Выполнены расчеты котла-утилизатора (КУ) ПГУ, подтверждающие его возможность выступать в качестве источника стороннего пара. Для двух перспективных вариантов разработаны схемы необходимой реконструкции энергоблоков и проведена укрупненная сравнительная оценка затрат на их реализацию.

Ключевые слова: пуск с “нуля”, энергоблок паросилового оборудования, технические решения, подача стороннего пара, расчеты котла-утилизатора, парогазовая установка, испытания

DOI: 10.56304/S0040363623120111

Selecting the Startup Option for the Surgut GRES-2 800-MW Power Unit in the Absence of Its Own Steam Source

A. V. Skuratov^{a, *}, V. I. Gombolevskii^a, M. V. Lazarev^a, A. S. Shabunin^a, P. A. Berezinets^a,
Yu. S. Vasil'konov^b, A. N. Sinel'nikov^b, and S. G. Filippov^b

^a All-Russia Thermal Engineering Institute (VTI), Moscow, 115280 Russia

^b Surgut GRES-2 Power Plant, Branch of PAO Unipro, Surgut, Khanty-Mansi Autonomous District—Yugra, 628406 Russia

*e-mail: AVSkuratov@vti.ru

Abstract—Matters concerned with the tenacity of thermal power plants still remain of issue for the power industry of Russia. In view of power capacities concentrated within the boundaries of a single power plant, various off-design situations (accidents) occur in it, and the likelihood of such situations to occur increases significantly since the tendency toward aging of the existing equipment is still continuing. The situation in which the Surgut GRES-2 thermal power plant's generating steam power equipment become shut down completely (so-called blackout) considered in the article is one of such contingencies. To cope with system accidents of this sort, relevant possibilities and means must be available. The Surgut GRES-2 power plant consists of two stages: six 800-MW steam power units (SPUs) and two 400-MW combined cycle units (CCUs). The article presents solutions to the problem stated above through interaction of the equipment of the power plant's two stages. Five possible schemes for starting the SPUs from zero when there is loss of auxiliary steam are considered. The organizational and technical measures necessary for implementing these options are developed. The minimal requirements for an external steam source (flowrate, pressure, and temperature) are determined theoretically and confirmed by tests. Calculations of the CCU's heat-recovery steam generator (HRSG) are carried out, which confirmed its ability to behave as the external steam source. For two promising options, schemes for the necessary modification of the power units are developed, and an aggregative comparative assessment of the costs for implementing them is carried out.

Keywords: startup from zero, steam power unit, technical solutions, external steam supply, heat recovery steam generator calculations, combined cycle unit, tests