

СОДЕРЖАНИЕ

Номер 10, 2023

Институту энергоэффективности и водородных технологий НИУ МЭИ – 70 лет

Институт энергоэффективности и водородных технологий НИУ МЭИ: из прошлого через настоящее в будущее	5
Исследование теплогидравлических процессов в охлаждающих каналах лопатки высокотемпературной углекислотной турбины <i>А. Н. Рогалев, С. К. Осипов, И. В. Шевченко, П. А. Брызгунов, А. Н. Вегера</i>	7
Разработка конструкций оборудования для перспективных кислородно-топливных энергетических установок <i>В. О. Киндра, И. И. Комаров, Д. М. Харламова, В. Ю. Наумов, И. А. Максимов</i>	17
Результаты натуральных исследований коррозионной и абразивной стойкости ионно-плазменного покрытия, сформированного на образцах трубных поверхностей нагрева биотопливного котла <i>А. В. Рыженков, А. Ф. Медников, С. В. Григорьев, А. Б. Тхабисимов, Г. В. Качалин, Н. А. Логинова, О. Ю. Милованов</i>	34
Оценка влияния ветровых и солнечных электростанций, когенерации и доли угля в топливном балансе на снижение выбросов парниковых газов <i>С. С. Белобородов, Е. Г. Гашо</i>	45
Эффективность применения сбросного тепла центров обработки данных <i>И. В. Яковлев, Н. В. Авдокунин</i>	55
Влияние граничных условий на торцах стенки на температурный режим и эффективность теплообменных аппаратов с параллельным движением теплоносителей <i>Е. П. Валужева</i>	65

Паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование

Исследование влажно-парового потока в модельных паровых турбинах <i>В. Е. Михайлов, Л. А. Хоменок, Н. Ю. Бокучава, А. А. Ивановский</i>	76
--	----

Тепло- и массообмен, свойства рабочих тел и материалов

Анализ эффективности статических смесителей из фрагментов закрученной ленты и с лепестковыми элементами для смешения компонентов топливного газа <i>Ф. В. Тупоносков, В. И. Артемов, Г. Г. Яньков, А. В. Дедов</i>	84
Теплообмен в комбинированной системе “труба в канале” при подъемном течении жидкого металла в поперечном магнитном поле <i>Н. А. Лучинкин, Н. Г. Разуванов, О. Н. Полянская</i>	100

Охрана окружающей среды

Проблемы адаптации действующего оборудования ТЭС к технологическим показателям выбросов ИТС 38-2022 “сжигание топлива на крупных установках в целях производства энергии”

П. В. Росляков, О. Е. Кондратьева, Т. В. Гусева

115

Возобновляемые источники энергии, гидроэнергетика

Модернизация действующих ТЭС в солнечно-топливные гибридные станции

Э. К. Матжанов, Э. М. Ахрорхужаева

124

Contents

Vol. 70, No. 10, 2023

The Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies of NRU MPEI Is 70 Years Old

Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies of MPEI National Research University: from the Past, through the Present, to the Future	5
Investigation of Thermohydraulic Processes in Cooling Channels of a Blade for a High-Temperature Carbon Dioxide Turbine <i>A. N. Rogalev, S. K. Osipov, I. V. Shevchenko, P. A. Bryzgunov, and A. N. Vejera</i>	7
Development and Investigation of the Advanced Oxy-Fuel Power Plants Equipment Preliminary Design <i>V. O. Kindra, I. I. Komarov, D. M. Kharlamova, V. Yu. Naumov, and I. A. Maksimov</i>	17
Results of Full-Scale Studies of Corrosion and Abrasive Resistance of Ion-Plasma Coating Formed on Samples of Pipe Heating Surfaces of a Biofuel Boiler <i>A. V. Ryzhenkov, A. F. Mednikov, C. V. Grigoriev, A. B. Tkhabisimov, G. V. Kachalin, N. A. Loginova, and O. Yu. Milovanov</i>	34
Evaluating the Influence of Wind and Solar Power Plants, Cogeneration, and Coal Share in the Fuel Balance on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions <i>S. S. Beloborodov and E. G. Gasho</i>	45
Efficient Use of Waste Heat from Data Centers <i>I. V. Yakovlev and N. V. Avdokunin</i>	55
The Effect of Boundary Conditions on the Wall Ends on Temperature Conditions and Effectiveness of Heat Exchangers with Parallel Flow of Heat Carriers <i>E. P. Valueva</i>	65

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

Study of Wet Steam Flow in Model Steam Turbines <i>V. E. Mikhailov, L. A. Khomenok, N. Yu. Bokuchava, and A. A. Ivanovsky</i>	76
--	----

Heat and Mass, Properties of Working Bodies and Materials

Analysis of the Efficiency of Static Mixers from Fragments of Twisted Tape and with Leaf Elements for Mixing Fuel Gas Components <i>F. V. Tuponosov, V. I. Artemov, G. G. Yankov, and A. V. Dedov</i>	84
Heat Transfer in a “Tube-in-Channel” Combined System with an Upward Flow of Liquid Metal in a Transverse Magnetic Field <i>N. A. Luchinkin, N. G. Razuvanov, and O. N. Polyanskaya</i>	100

Environment Protection

Problems of Adapting the Operating Thermal Power Plant Equipment to the Technological Emission Indicators Stipulated by the Information-Technical Reference Book 38-2022
“Fuel Combustion at Large Facilities for Energy Production Purposes”

P. V. Roslyakov, O. E. Kondrat'eva, and T. V. Guseva

115

Renewable Energy Sources and Hydropower

Modernization of Existing Thermal Power Plants into Hybrid Solar and Fuel-Fired Plants

E. K. Matjanov and Z. M. Akhrorkhujeva

124

**ИНСТИТУТУ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
И ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НИУ МЭИ – 70 ЛЕТ**

**ИНСТИТУТ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
И ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НИУ МЭИ:
ИЗ ПРОШЛОГО ЧЕРЕЗ НАСТОЯЩЕЕ В БУДУЩЕЕ**

DOI: 10.56304/S0040363623100119

В 2023 г. Институту энергоэффективности и водородных технологий Национального исследовательского университета МЭИ исполняется 70 лет!

Факультет промышленной теплоэнергетики (впоследствии Институт проблем энергетической эффективности и, наконец, Институт энергоэффективности и водородных технологий) был образован в 1953 г. по инициативе группы выдающихся ученых-теплоэнергетиков под руководством П.Д. Лебедева, который стал его первым деканом. Это был первый в СССР факультет промышленной теплоэнергетики, его сотрудники и студенты внесли большой вклад в становление и развитие энергетики и науки нашей страны.

Историю Института писали выдающиеся ученые с мировым именем, исследования которых легли в основу создания наукоемкого теплоэнергетического оборудования, решения проблем энергосбережения, ресурсосбережения и охраны окружающей среды. Сложно в рамках одного короткого материала перечислить всех талантливых ученых, ведь в разные годы в стенах Института работали:

- создатель научной школы по теплофикации и централизованному теплоснабжению Е.Я. Соколов;
- создатель научной школы по проблемам пристенной турбулентности и возобновляемых источников энергии В.П. Мотулевич;
- ученый-теплофизик, ставший при жизни классиком теории теплообмена, основоположник нового научного направления в области изучения неравновесных эффектов на границе раздела при фазовых переходах Д.А. Лабунцов;
- специалист по проблемам термодинамики и криогенной техники, классик теории эксергетического анализа В.М. Бродянский;
- ученый-химик, одним из первых открывший перспективы использования топливных элементов, крупнейший специалист в области электрохимической энергетики Н.В. Коровин;
- ученый-теплотехник, основатель научно-педагогической школы в области интенсивного энергосбережения в теплотехнологии А.Д. Ключ-

ников, возглавлявший факультет на протяжении 24 лет (с 1966 по 1989 г.).

Ученые Института энергоэффективности и водородных технологий включены в мировую исследовательскую повестку. Они являются постоянными участниками наиболее значимых профильных научно-технических конференций, их работы публикуются в ведущих отечественных и мировых рецензируемых журналах.

Развитие науки и техники, внешние и внутренние вызовы, сменяющиеся технологические уклады приводили к возникновению и развитию новых направлений актуальных исследований в области промышленной теплоэнергетики. Вслед за этими изменениями менялась и структура Института, сейчас в его состав входят старейшие кафедры, которые развивались вместе с развитием ключевых направлений науки и техники (промышленных теплоэнергетических систем, тепло-массообменных процессов и установок, химии и электрохимической энергетики), и новая кафедра, создание которой продиктовано современными вызовами, стоящими перед энергетикой (инновационных технологий наукоемких отраслей), а также Научный центр “Износостойкость”. Среди перспективных направлений исследований можно выделить следующие:

электрохимическая энергетика (электролиз воды, топливные элементы, литий-ионные химические источники тока);

цифровизация теплоснабжения (информационно-аналитические системы для энерготехнологических комплексов и городского хозяйства);

системы энергообеспечения зданий с нулевым углеродным следом и профицитным энергобалансом (активные потребители);

разработка и исследование технологий получения водорода из углеводородных топлив и использования его в производственных процессах промышленных предприятий и энергетике;

разработка высокоэффективных экологически безопасных энергоустановок со сниженными выбросами парниковых газов в окружающую среду;

изменение климата и глобальные проблемы энергетики;

разработка и внедрение инновационных технологий наноуровневой модификации функциональных поверхностей.

На протяжении своей истории Институт тесно сотрудничает с ключевыми предприятиями энергетики, энергомашиностроительными компаниями, научно-исследовательскими институтами, отраслевыми объединениями и ведущими зарубежными и отечественными университетами. Сегодня в Институте работают академик РАН, лауреаты премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники для молодых ученых, доктора и кандидаты наук, непрерывно осуществляется подготовка молодых исследователей по перспективным научным направлениям.

Результаты исследований регулярно публикуются на страницах журнала «Теплоэнергетика». В этот номер также вошли статьи, написанные сотрудниками ИЭВТ, что подтверждает значимость и актуальность проводимых ими исследований.

Многие сотрудники ИЭВТ удостоены государственных и ведомственных наград за достижения в области образования и науки. Четверо штатных сотрудников Института в разное время были избраны членами РАН: звание членов-корреспондентов Академии получили В.А. Григорьев, Е.В. Аметистов, действительными членами РАН стали А.В. Клименко и В.В. Клименко. Тесная взаимосвязь образования и науки, бережное отношение к традициям и использование современных технологий – основа успешного развития ИЭВТ.

Искренне поздравляю коллектив Института энергоэффективности и водородных технологий с 70-летним юбилеем! Славные традиции, новые идеи и самоотверженный труд позволяют внести существенный вклад в развитие энергетики нашей страны, науки, инноваций и образования. Желаю процветания, новых идей и свершений!

*Директор Института энергоэффективности
и водородных технологий,
кандидат техн. наук, доцент И.А. Щербатов*

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОГИДРАВЛИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ОХЛАЖДАЮЩИХ КАНАЛАХ ЛОПАТКИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ УГЛЕКИСЛОТНОЙ ТУРБИНЫ¹

© 2023 г. А. Н. Рогалев^а, С. К. Осипов^а, И. В. Шевченко^а, П. А. Брызгунов^а, *, А. Н. Вегера^а

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

*e-mail: pavel.bryzgunov@gmail.com

Поступила в редакцию 31.01.2023 г.

После доработки 17.04.2023 г.

Принята к публикации 27.04.2023 г.

Приводятся результаты численных и экспериментальных исследований теплогидравлических процессов в охлаждающих каналах лопатки углекислотной газовой турбины. По результатам обзора конструктивных решений и топологий охлаждаемых лопаток газовых турбин предложены конструкция охлаждающих каналов, которая включает в себя радиальные каналы круглого сечения для входной кромки лопатки и щелевые каналы с интенсификаторами теплообмена для выходной кромки пера лопатки, а также геометрические параметры самих каналов. С использованием программного комплекса ANSYS CFX были проведены исследования теплогидравлических характеристик в щелевом канале со штырьками веерообразного сечения в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 9000–27000$, в данном диапазоне были также проведены экспериментальные исследования гидравлических характеристик и теплообмена. Отличие результатов численного исследования от экспериментальных данных составило менее 5% по расходной характеристике и менее 10% по числу Нуссельта, что позволило сделать вывод о приемлемой точности выбранных настроек расчетной сетки и моделей турбулентности. С использованием этих настроек были проведены исследования теплогидравлических процессов в охлаждающих каналах лопаток высокотемпературной углекислотной газовой турбины в диапазоне чисел Рейнольдса $Re = 20000–100000$. В частности, помимо щелевых каналов со штырьками веерообразного сечения для охлаждения выходной кромки пера лопатки были рассмотрены более технологичные каналы с круглыми штырьками. Для охлаждения входной кромки лопатки применены как гладкие радиальные каналы, так и каналы с кольцевым оребрением. Результаты численного исследования показали, что использование штырьков веерообразного сечения не обеспечивает прирост теплоотдачи по сравнению с круглыми, а оребренные каналы эффективны более чем на 100% по сравнению с гладкими.

Ключевые слова: теплогидравлическая эффективность, охлаждаемая лопатка, круглые штырьки, штырьки веерообразного сечения, кольцевое оребрение, интенсификация теплообмена

DOI: 10.56304/S0040363623100065

Investigation of Thermohydraulic Processes in Cooling Channels of a Blade for a High-Temperature Carbon Dioxide Turbine

A. N. Rogalev^a, S. K. Osipov^a, I. V. Shevchenko^a, P. A. Bryzgunov^{a, *}, and A. N. Vejera^a

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI), Moscow, 111250 Russia

*e-mail: pavel.bryzgunov@gmail.com

Abstract—Results of numerical and experimental investigations into the thermohydraulic processes in cooling channels of a blade in a carbon dioxide gas turbine are presented. Based on the results of a review of design solutions and geometry of cooled blades of gas turbines, a design of cooling channels, which includes radial round channels for the leading edge of the blade and slotted channels with heat-transfer intensifiers for the trailing edge of the airfoil, and the geometric parameters of the channels proper are proposed. The ANSYS CFX software package was used to study thermal and hydraulic characteristics of a slotted channel with fan-shaped pins in the Reynolds number range of $Re = 9000\text{--}27\,000$; experimental studies of hydraulic characteristics and heat transfer were also carried out in this range. The difference between the predictions and the experiment was less than 5% for the flow characteristic and less than 10% for the Nusselt number, thereby demonstrating adequate accuracy of the selected settings of the computational grid and the turbulence models. These settings were used to study the thermohydraulic processes in the cooling channels of the blades of a high-temperature carbon dioxide gas turbine in the Reynolds number range of $Re = 20\,000\text{--}100\,000$. In particular, in addition to slotted channels with fan-shaped pins for cooling the trailing edge of the airfoil, advanced channels with round pins, which are easier to manufacture, were examined. The leading edge of the blade is cooled using smooth radial channels or channels with ring fins. The predictions have demonstrated that the use of fan-shaped pins does not enhance heat transfer compared to round ones, and finned channels are more than 100% efficient compared to smooth channels.

Keywords: thermohydraulic effectiveness, cooled blade, round pins, fan-shaped pins, ring finning, heat-transfer enhancement

ИНСТИТУТУ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
И ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НИУ МЭИ – 70 ЛЕТ

РАЗРАБОТКА КОНСТРУКЦИЙ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНЫХ КИСЛОРОДНО-ТОПЛИВНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК¹

© 2023 г. В. О. Киндра^а, *, И. И. Комаров^а, Д. М. Харламова^а, В. Ю. Наумов^а, И. А. Максимов^а

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

*e-mail: kindra.vladimir@yandex.ru

Поступила в редакцию 30.01.2023 г.

После доработки 18.04.2023 г.

Принята к публикации 27.04.2023 г.

Снижение выбросов вредных веществ при производстве электроэнергии на тепловых электрических станциях является актуальной задачей, решить которую возможно путем перехода на полузакрываемые циклы с кислородным сжиганием топлива и углекислотным рабочим телом. Основное преимущество перспективной технологии, заключающееся в отсутствии опасности образования токсичных веществ и простоте сепарации избыточного диоксида углерода, обеспечивается благодаря сжиганию углеводородов в кислороде высокой чистоты. В настоящей работе представлены разработанные конструкции нового оборудования энергетического комплекса: кислородно-топливной камеры сгорания, углекислотной охлаждаемой турбины и высокотемпературного регенератора. Приведены результаты математического моделирования физических процессов, протекающих в проточной части турбины. Особое внимание уделено расчетам кинетики горения метанокислородной смеси в среде избыточного диоксида углерода и численному анализу процессов в кислородно-топливной камере сгорания с учетом необходимости охлаждения жаровой трубы. Определено оптимальное массовое соотношение диоксида углерода в смеси разбавителя с окислителем равное 0,872, которое позволяет добиться наименьшего недожога топлива. Проведено математическое моделирование температурного состояния сопловой лопатки первой ступени углекислотной турбины, подтвердившее возможность обеспечить достаточную степень равномерности температурного поля благодаря выполнению множества охлаждаемых каналов малого радиуса вблизи наружной поверхности профиля. Предложено несколько конфигураций поверхностей теплообмена для пластинчатого регенератора кислородно-топливной энергоустановки. Использовались турбулизаторы потока цилиндрические и с аэродинамическим профилем плавникового вида, а также оба варианта их исполнения с ребрами. Согласно результатам математического моделирования, наибольшей теплогидравлической эффективностью из всех рассмотренных каналов при числах Рейнольдса до 78 000 обладают каналы, снабженные турбулизаторами с ребрами, а при больших значениях Re – каналы с турбулизаторами без ребер.

Ключевые слова: энергоэффективность, диоксид углерода, термодинамический цикл, высокотемпературное оборудование, углекислотная турбина, камера сгорания

DOI: 10.56304/S0040363623100028

Development and Investigation of the Advanced Oxy-Fuel Power Plants Equipment Preliminary Design

V. O. Kindra^{a, *}, I. I. Komarov^a, D. M. Kharlamova^a, V. Yu. Naumov^a, and I. A. Maksimov^a

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

*e-mail: kindra.vladimir@yandex.ru

Abstract—Reducing emissions of harmful substances in the production of electricity at thermal power plants is an intensive task, which can be solved by switching to semiclosed cycles with oxygen combination of fuel and carbon dioxide working fluid. The main advantage of the promising technology, which is the absence of the danger of the formation of toxic substances and the ease of separation of excess carbon dioxide, is provided by burning hydrocarbons in high purity oxygen. This paper presents the results of developing the new power equipment preliminary design: an oxy-fuel combustion chamber, a cooled carbon dioxide turbine, and a high-temperature regenerator. The results of mathematical simulation of physical processes that occurred in the main power equipment are presented.

Keywords: energy efficiency, carbon dioxide, thermodynamic cycle, high-temperature equipment, carbon dioxide turbine, combination chamber

РЕЗУЛЬТАТЫ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ КОРРОЗИОННОЙ И АБРАЗИВНОЙ СТОЙКОСТИ ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ, СФОРМИРОВАННОГО НА ОБРАЗЦАХ ТРУБНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА БИОТОПЛИВНОГО КОТЛА¹

© 2023 г. А. В. Рыженков^а, А. Ф. Медников^а, С. В. Григорьев^а, А. Б. Тхабисимов^а*,
Г. В. Качалин^а, Н. А. Логинова^а, О. Ю. Милованов^а

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

*e-mail: TkhabisimovAB@mpei.ru

Поступила в редакцию 11.04.2023 г.

После доработки 11.05.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Представлены результаты натурных исследований коррозионной и абразивной стойкости поверхностей экспериментальных образцов трубной стали 20 с защитным ионно-плазменным покрытием на основе Cr–CrN и без него за время их экспозиции в течение 1000 ч в топке котла номинальной мощностью 200 кВт, работающего на гранулированном биотопливе. Образцы выдерживались в рабочем режиме 220 ч, в режиме простоя 780 ч. Температура внутри задней дымовой коробки, где были размещены экспериментальные образцы, составляла около 700°С. Химический анализ состава золы, полученной при сжигании лужки подсолнечника, показал наличие калия, фосфора, серы и хлора, т.е. тех элементов, присутствие которых может привести к образованию высокоагрессивных коррозионно-опасных соединений при конденсации влаги в периоды простоя котла. Выявлено, что исследуемое покрытие не подверглось коррозионному разрушению, его адгезионная прочность за время выдержки не изменилась, исходная толщина покрытия снизилась в среднем на 10–15%, шероховатость поверхности осталась прежней. Отмечено небольшое отклонение морфологии из-за окисления поверхностного слоя покрытия при максимальном времени выдержки, окисления материала под покрытием на поперечных шлифах образцов с покрытием не обнаружено. Проведенные при углах атаки воздушно-абразивного потока 30, 60 и 90° испытания образцов стали 20 с защитным ионно-плазменным покрытием на основе Cr–CrN после выдержки в топке биотопливного котла в течение 1000 ч показали, что абразивная стойкость по установившейся скорости повысилась не менее чем в 2.5 раза относительно образцов без покрытия. Согласно результатам металлографических, коррозионных и абразивных исследований, ионно-плазменное покрытие на основе Cr–CrN является перспективным для защиты трубных поверхностей биотопливных котлов, подвергающихся коррозионному и абразивному воздействию солей щелочных металлов и частиц золы при высоких температурах и переменной нагрузке.

Ключевые слова: биотопливный котел, лужка подсолнечника, коррозионное воздействие, абразивный износ, трубная поверхность, ионно-плазменные технологии, натурные исследования

DOI: 10.56304/S0040363623100089

Results of Full-Scale Studies of Corrosion and Abrasive Resistance of Ion-Plasma Coating Formed on Samples of Pipe Heating Surfaces of a Biofuel Boiler

A. V. Ryzhenkov^a, A. F. Mednikov^a, C. V. Grigoriev^a, A. B. Tkhabisimov^{a, *},
G. V. Kachalin^a, N. A. Loginova^a, and O. Yu. Milovanov^a

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

*e-mail: TkhabisimovAB@mpei.ru

Abstract—The results of full-scale studies of the corrosion and abrasive resistance of the surfaces of experimental samples of tubular steel 20 with a protective ion-plasma coating based on Cr-CrN and without it during their exposure for 1000 h in the furnace of a boiler with a nominal capacity of 200 kW operating on granulated biofuels are presented. Samples were held at operating mode for 220 h, and at idle mode for 780 h. The temperature inside the rear smoke box, where the experimental samples were placed, was approximately 700°C. Chemical analysis of the composition of ash obtained during the burning of sunflower husks showed the presence of potassium, phosphorus, sulfur and chlorine, i.e., those elements whose presence can lead to the formation of highly aggressive corrosion-hazardous compounds when moisture is condensed during periods of boiler downtime. It was revealed that the studied coating was not subjected to corrosion destruction, its adhesive strength did not change during the holding time, the initial thickness of the coating decreased by an average of 10–15%, and the surface roughness remained the same. There was a slight deviation in the morphology due to oxidation of the surface layer of the coating at the maximum holding time, no oxidation of the material under the coating on the transverse splines of the coated samples was detected. Tests conducted at the angles of attack of the air-abrasive flow of 30, 60 and 90° tests of steel samples 20 with a protective ion-plasma coating based on Cr-CrN after holding in the furnace of a biofuel boiler for 1000 h showed that the abrasive resistance at a steady speed increased by at least 2.5 times compared to samples without coating. According to the results of metallographic, corrosion, and abrasive studies, Cr-CrN-based ion-plasma coating is promising for the protection of pipe surfaces of biofuel boilers exposed to corrosion and abrasive effects of alkali metal salts and ash particles at high temperatures and variable load.

Keywords: Biofuel boiler, sunflower husk, corrosion, abrasive wear, pipe surface, ion-plasma technologies, full-scale research

ИНСТИТУТУ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
И ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НИУ МЭИ – 70 ЛЕТ

**ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ВЕТРОВЫХ И СОЛНЕЧНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ,
КОГЕНЕРАЦИИ И ДОЛИ УГЛЯ В ТОПЛИВНОМ БАЛАНСЕ
НА СНИЖЕНИЕ ВЫБРОСОВ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ**

© 2023 г. С. С. Белобородов^а, *, Е. Г. Гашо^б, **

^аНП “Энергоэффективный город”, Семеновская наб., д. 2/1, стр. 1, оф. 311, Москва, 195094 Россия

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

*e-mail: enefgorod@gmail.com

**e-mail: gashoyg@mpei.ru

Поступила в редакцию 26.01.2023 г.

После доработки 27.03.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

Энергопереход на “зеленый” водород планируется осуществить путем широкомасштабного использования энергии ветра. Требуемая для этого площадь ветропарков может достигать 38.5% территории Европейского союза. В научной литературе отмечается, что применение ветровых турбин для удовлетворения 10% мирового спроса на энергию к 2100 г. может привести к потеплению поверхности суши более чем на 1°C. Изменение температуры наблюдается сразу после ввода ветропарков в эксплуатацию, в то время как климатическая выгода от снижения выбросов парниковых газов является вопросом будущего. В настоящее время не принимается во внимание влияние ветровых и солнечных электростанций (ВЭС и СЭС) на рост выбросов парниковых газов в результате изменения структуры и режимов загрузки генерирующих мощностей в энергосистеме. Цель настоящей работы – определить возможность снижения количества выбросов парниковых газов в энергосистеме путем изменения структуры топливного баланса, повышения эффективности производства электрической энергии, развития ВЭС и СЭС и рассмотреть способы ее реализации. Приведены оценки снижения парниковых газов электростанциями при изменении структуры генерирующих мощностей, а также при замене одного вида топлива на другой. Показано, что в настоящее время баланс спроса и предложения в энергосистеме, например, Германии обеспечивается благодаря экспорту электроэнергии. За период с 2000 по 2018 г. выработка ВЭС и СЭС возросла на 146 ТВт·ч, а выработка АЭС снизилась на 94 ТВт·ч, при этом экспорт электроэнергии в энергосистемы соседних стран увеличился на 52 ТВт·ч. Снижение производства электроэнергии угольными ТЭС на 69 ТВт·ч было компенсировано повышением выработки на 34 ТВт·ч тепловыми электростанциями, работающими на природном газе, и на 47 ТВт·ч электростанциями, использующими в качестве топлива биогаз, твердое и жидкое биотопливо, твердые коммунальные отходы. Результаты исследований показали, что развитие ветровых и солнечных электростанций в отсутствие накопителей энергии не может считаться эффективным способом снижения выбросов парниковых газов в энергосистеме, тем более что ВЭС и СЭС значительно проигрывают различным вариантам комбинированной выработки электроэнергии и тепла.

Ключевые слова: парниковые газы, углекислый газ, возобновляемые источники энергии, ветровые электростанции, солнечные электростанции, когенерация, парогазовые установки, режимы электрической нагрузки, энергосистема, углеродная нейтральность

DOI: 10.56304/S0040363623100016

Evaluating the Influence of Wind and Solar Power Plants, Cogeneration, and Coal Share in the Fuel Balance on the Reduction of Greenhouse Gas Emissions

S. S. Beloborodov^{a, *} and E. G. Gasho^{b, **}

^a NP Energy Efficient City, Moscow, 195094 Russia

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

*e-mail: enefgorod@gmail.com

**e-mail: gashoyg@mpei.ru

Abstract—The energy transition for “green” hydrogen is supposed to be carried out through a widescale use of wind energy. The area of wind farms required for this purpose may reach 38.5% of the European Union’s territory. In the scientific literature, it is pointed out that the use of wind turbines for meeting 10% of the world demand for energy can result in that the land surface temperature will increase by more than 1°C by 2100. A change in the temperature is observed immediately after commissioning of wind farms, whereas the climatic gain from reduction of greenhouse gas emissions is a matter of the future. Currently, no attention is paid to the influence of wind and solar power plants (WPPs and SPPs) on the growth of greenhouse gas emissions as a consequence of changes in the structure and loading conditions of generating capacities in the power system. The aim of this work is to determine the possibility of reducing the amount of greenhouse gas emissions in the power system by changing the fuel-balance structure, achieving more efficient generation of electricity, developing WPPs and SPPs, and consider methods for implementing it. Assessments of the reduction of greenhouse gas emissions by power plants in changing the structure of generating capacities and also in replacing one fuel kind by another are given. It is shown that nowadays, the balance of demand and offer in the power system, e.g., of Germany, is maintained owing to electric energy export. For the period from 2000 to 2018, the amount of electricity generated by WPPs and SPPs increased by 146 TW h, whereas that by nuclear power plants (NPPs) dropped by 94 TW h, while the export of electric energy to the power systems of neighboring countries increased by 52 TW h. The decrease in the amount of electricity generated by coal-fired thermal power plants (TPPs) by 69 TW h was compensated by increasing the amount of electricity generated by natural gas fired thermal power plants by 34 TW h, and by 47 TW h owing to power plants that use biogas, solid and liquid biofuel, and solid municipal waste as fuel. Study results have shown that, in the absence of energy storage devices, the development of wind and solar power plants cannot be regarded as an efficient way of reducing greenhouse gas emissions in the power system, the more so that WPPs and SPPs are significantly inferior to various combined electricity- and heat-generation versions.

Keywords: greenhouse gases, carbon dioxide, renewable energy sources, wind power plants, solar power plants, cogeneration, combined-cycle power plants, electric load modes, power system, carbon neutrality

ИНСТИТУТУ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ
И ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НИУ МЭИ – 70 ЛЕТ

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СБРОСНОГО ТЕПЛА
ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ¹

© 2023 г. И. В. Яковлев^a, *, Н. В. Авдокунин^a

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

*e-mail: YakovlevIV@mpei.ru

Поступила в редакцию 28.01.2023 г.

После доработки 21.04.2023 г.

Принята к публикации 27.04.2023 г.

Центры обработки данных (ЦОД), являясь одними из главных потребителей энергии, заслуживают внимания и как объекты, на которых происходят существенные потери энергии в виде тепла, отводимого от IT-оборудования и сбрасываемого в окружающую среду. В настоящее время в России потенциал энергосбережения путем полезного использования сбросного тепла ЦОД оценивается в 2.1×10^6 МВт · ч/год, а к 2030 г. он может составить 6.3×10^6 МВт · ч/год. В отношении сбросного тепла ЦОД возникают вопросы: насколько велики эти потери и как их использовать, если рассматривать сбросное тепло как вторичный энергетический ресурс, и насколько энергетически эффективны утилизация и применение этого тепла? В работе рассматриваются возможности оценки количества сбросного тепла ЦОД, которое можно направить на собственные нужды и внешнее применение. Оценки производятся для ЦОД, применяющих для охлаждения оборудования вентиляционный воздух (фрикулинг), с учетом климатических условий места расположения ЦОД, диапазона оптимальных температур работы охлаждаемого оборудования, характеристик утилизационного оборудования, в состав которого входят теплообменник-утилизатор и тепловой насос, повышающий потенциал утилизируемого тепла. Анализируются факторы, влияющие на количественные оценки утилизируемого и используемого тепла ЦОД. Расчетная модель вентиляции помещений ЦОД основана на балансовых уравнениях сохранения энергии и массы, записанных для обслуживаемого помещения и отдельных элементов утилизационной установки. Энергетическая эффективность утилизации и применения сбросного тепла представлена в виде долей количества используемого тепла относительно базового значения экономии условного топлива на источнике тепла с учетом затрат электрической энергии на работу теплового насоса. Анализируются зависимости удельной экономии топлива на источнике тепловой энергии от климатических условий, соотношения удельных расходов топлива на выработку тепловой и электрической энергии b_p/b_Q , степени приближения термодинамического парокompрессионного цикла теплового насоса к идеальному циклу, тепловой эффективности теплообменника-утилизатора и температуры промежуточного теплоносителя.

Ключевые слова: центр обработки данных, охлаждение IT-оборудования, утилизация сбросного тепла, эффективность внешнего применения тепла

DOI: 10.56304/S0040363623100120

Efficient Use of Waste Heat from Data Centers

I. V. Yakovlev^{a, *} and N. V. Avdokunin^a

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

*e-mail: YakovlevIV@mpei.ru

Abstract—Data centers, being one of the main consumers of energy, deserve attention as objects in which there is a significant loss of energy in the form of heat, discharged from its equipment and discharged into the environment. Currently in Russia, the potential for energy saving through the efficient use of waste heat of data centers is estimated at 2×10^6 MW · h/year and it can reach 6.3×10^6 MW · h/year by 2030. With regard to the waste heat of the data center, questions arise: how large are these losses and how to use them, if we consider waste heat as a secondary energy resource, and how energy efficient are the utilization and application of this heat? The paper discusses the possibilities of estimating the amount of waste heat of the data center, which can be directed to its own needs and external applications. Estimates are made for data centers that use ventilation air for cooling equipment, taking into account the climatic conditions of the location of the data center, the range of optimal operating temperatures of the cooled equipment, and the characteristics of the utilization equipment, which includes a heat exchanger and a heat pump that increases the potential of the heat used. The factors affecting the quantitative estimates of the utilized and used heat of the data center are analyzed. The calculated ventilation model of the data center premises is based on the balance equations of energy and mass preservation recorded for the serviced room and individual elements of the utilization plant. The energy efficiency of utilization and application of waste heat is represented as a share of the amount of heat used relative to the basic value of the savings of the conventional fuel at the heat source taking into account the costs of electrical energy for the operation of the heat pump. The dependence of specific fuel economy at the source of thermal energy on climatic conditions, the ratio of specific fuel costs for the production of thermal and electrical energy b_p/b_0 , the degree of approximation of the thermodynamic vapor-compression cycle of the heat pump to the ideal cycle, heat efficiency of heat exchanger-recovery, and temperature of intermediate heat carrier are analyzed.

Keywords: data center, IT equipment cooling, waste heat recovery, external heat efficiency

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ НА ТОРЦАХ СТЕНКИ НА ТЕМПЕРАТУРНЫЙ РЕЖИМ И ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТЕПЛООБМЕННЫХ АППАРАТОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ ДВИЖЕНИЕМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ¹

© 2023 г. Е. П. Валужева*

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

**e-mail: ep.valueva@gmail.com*

Поступила в редакцию 30.01.2023 г.

После доработки 10.03.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

Изучено влияние переноса тепла в стенке по направлению движения теплоносителей на эффективность теплообменных аппаратов (ТА), когда торцы стенки не являются теплоизолированными от окружающей их среды. Проведено аналитическое решение задачи для прямого тока при равенстве отношений тепловых эквивалентов теплоносителей β и коэффициентов теплоотдачи α с обеих сторон стенки, разделяющей горячий и холодный теплоносители, и для противотока при условии $\beta = \alpha = 1$. Решение задачи зависит также от числа тепловых единиц переноса Ntu , параметра, характеризующего аксиальную теплопроводность стенки C_A , числа Био Bi , определяющего относительную теплоотдачу от торцов стенки в окружающую среду, температур контактирующей с торцами стенки среды. Влияние аксиальной теплопроводности стенки возрастает с уменьшением параметра C_A . Рассмотрены два случая, при которых температуры окружающей среды принимаются равными температурам на входе и выходе горячего теплоносителя (случай I) и эти же температуры равняются температурам на входе и выходе холодного теплоносителя (случай II). Получено, что при малых числах Био ($Bi < 10^{-3}$) эффективность теплообменного аппарата ϵ для любых значений C_A в прямоточном ТА практически не отличается от эффективности ТА в отсутствие влияния аксиальной теплопроводности стенки ϵ_0 , а для противотока при малых C_A эффективность ТА заметно меньше ϵ_0 и снижается в 2 раза при $Ntu \gg 1$. При больших числах Био ($Bi > 1$) из-за влияния аксиальной теплопроводности стенки можно повысить эффективность использования одного из теплоносителей, при этом температура другого теплоносителя при его движении в теплообменном аппарате изменится незначительно. Результаты расчетов свидетельствуют о том, что для повышения эффективности ТА наиболее оптимальным является использование одинаковых тепловых эквивалентов двух теплоносителей и коэффициентов теплоотдачи с обеих сторон стенки, разделяющей горячий и холодный потоки ($\beta = \alpha = 1$).

Ключевые слова: теплообменный аппарат, эффективность, аксиальная теплопроводность стенки, число тепловых единиц переноса, теплоотдача, число Био

DOI: 10.56304/S0040363623100107

The Effect of Boundary Conditions on the Wall Ends on Temperature Conditions and Effectiveness of Heat Exchangers with Parallel Flow of Heat Carriers

E. P. Valueva*

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

**e-mail: ep.valueva@gmail.com*

Abstract—The effect of heat conduction through the wall along the flow of heat carriers on the effectiveness of heat exchangers (HEs) when the wall ends are not thermally insulated from the environment has been investigated. An analytical solution of the problem for cocurrent flow of heat carriers was obtained for the same ratios of thermal equivalents of the heat carriers β and heat-transfer coefficients α on both sides of the wall separating hot and cold heat carriers and for a counter flow at $\beta = \alpha = 1$. The solution to the problem depends on the number of heat-transfer units Ntu , parameter C_A describing the axial wall heat conduction, the Biot number Bi , which determines relative heat transfer from the wall ends to the environment, and temperatures of the fluid in contact with the wall ends. The effect of axial wall heat conduction becomes more pronounced with decreasing parameter C_A . Two cases are examined: case I with surrounding fluid temperatures assumed as equal to the inlet and outlet temperatures of the hot heat carrier and case II with surrounding fluid temperatures assumed as equal to the inlet and outlet temperatures of the cold heat carrier. The results obtained demonstrate that, at low Biot numbers ($Bi < 10-3$), the effectiveness of a heat exchanger ϵ for any values of C_A in a cocurrent HE hardly differs at all from the effectiveness of the HE in the absence of the axial wall heat conduction effect, ϵ_0 , and for a counter flow at low C_A the HE effectiveness is noticeably less than ϵ_0 and decreases by two times at $Ntu \gg 1$. At high Biot numbers ($Bi > 1$), the effect of axial wall conduction can increase the effectiveness of either heat carrier, while the temperature of the other heat carrier will change slightly during its flow through the heat exchanger. The predictions indicate that the best way for increasing the HE effectiveness is to employ the same thermal equivalents of two heat carriers and heat-transfer coefficients on both sides of the wall separating the hot and the heat carriers ($\beta = \alpha = 1$).

Keywords: heat exchanger, effectiveness, wall axial heat conduction, number of heat-transfer units, heat transfer, Biot number

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛАЖНО-ПАРОВОГО ПОТОКА
В МОДЕЛЬНЫХ ПАРОВЫХ ТУРБИНАХ**

© 2023 г. В. Е. Михайлов^а, Л. А. Хоменок^а, Н. Ю. Бокучава^{а, *}, А. А. Ивановский^б

^аНаучно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (НПО ЦКТИ), Атаманская ул., д. 3/6, Санкт-Петербург, 191167 Россия

^бАО «Силовые машины», ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009 Россия

*e-mail: VokuchavaNI@ckti.ru

Поступила в редакцию 06.12.2022 г.

После доработки 21.02.2023 г.

Принята к публикации 30.03.2023 г.

Представлен комплекс для исследования структуры влажно-парового потока для стенда с модельной турбиной НПО ЦКТИ. На стенде более 20 лет проводятся испытания проточных частей паровых турбин. Экспериментальная турбина является моделью проточной части цилиндра низкого давления в масштабе 1 : 3. Она оснащена обширной измерительной системой для исследования вибрационной надежности элементов проточной части и структурно-кинематических характеристик потока. Одной из важнейших частей измерительной системы является комплекс для исследования дисперсной структуры влажно-парового потока, позволяющий проводить измерения одновременно в трех контрольных сечениях проточной части и в двух трубах отборов. Он включает в себя оптические зонды, блоки вторичной аппаратуры, систему траверсирования и программное обеспечение. Измерения, выполняемые с помощью оптического метода спектральной прозрачности, дают возможность установить размер и объемную концентрацию капель во влажно-паровом потоке. Описан новый метод определения распределения капель по размерам на основании оптических измерений. Представлены распределения капель по размерам, полученные этим методом в двух контрольных сечениях. Показано, что расчет степени влажности по данным оптических измерений возможен с привлечением результатов независимых измерений как давления пара, так и его температуры, регистрируемой оптическим зондом. Проведено сравнение расчетов степени влажности по данным измерений давления и температуры для модельной и натурной турбин. Результатом работы комплекса являются распределения степени влажности, размеров капель и температуры потока по высоте лопатки. Приведены распределения параметров влаги по высоте лопатки в трех контрольных сечениях.

Ключевые слова: модельная паровая турбина, измерения влажности, процессная влага, структура влажно-парового потока, оптические методы измерений, спектр ослабления излучения

DOI: 10.56304/S0040363623100053

Study of Wet Steam Flow in Model Steam Turbines

V. E. Mikhailov^a, L. A. Khomenok^a, N. Yu. Bokuchava^{a, *}, and A. A. Ivanovsky^b

^a Polzunov Research and Production Association for Study and Design of Energy Equipment (NPO TsKTI),
St. Petersburg, 191167 Russia

^b Power Machines, St. Petersburg, 195009 Russia

*e-mail: BokuchavaNI@ckti.ru

Abstract—A complex for studying the structure of the wet-steam flow for a stand with a model turbine of the NPO TsKTI is presented. On the stand, the flow parts of steam turbines have been tested for more than 20 years. The experimental turbine is a model of the flow part of a low-pressure cylinder at a scale of 1 : 3. It is equipped with an extensive measuring system for the study of the vibration reliability of the elements of the flow part and the structural and kinematic characteristics of the flow. One of the most important parts of the measuring system is a complex for studying the dispersed structure of the wet-steam flow, which allows measurements to be carried out simultaneously in three control sections of the flow part and in two sampling pipes. It includes optical probes, secondary hardware units, a traverson system, and software. Measurements made using the optical spectral transparency method allow one to set the size and volume concentration of droplets in the wet-steam stream. A new method for determining droplet size distribution based on optical measurements is described. The droplet size distributions obtained by this method in two control sections are presented. It is shown that the calculation of the degree of humidity according to optical measurements is possible with the involvement of the results of independent measurements of both the vapor pressure and its temperature recorded by the optical probe. A comparison of the calculations of the degree of humidity based on pressure and temperature measurements for model and full-scale turbines was made. The result of the complex is the distribution of the degree of humidity, the size of the droplets, and the temperature of the flow along the height of the blade. The distribution of moisture parameters by the height of the blade in three control sections is given.

Keywords: model steam turbine, humidity measurements, process moisture, wet-steam flow structure, optical measurement methods, attenuation spectrum

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

**АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТАТИЧЕСКИХ СМЕСИТЕЛЕЙ
ИЗ ФРАГМЕНТОВ ЗАКРУЧЕННОЙ ЛЕНТЫ
И С ЛЕПЕСТКОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ
ДЛЯ СМЕШЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ТОПЛИВНОГО ГАЗА^{1, 2}**

© 2023 г. Ф. В. Тупонос^а, В. И. Артемов^а, Г. Г. Яньков^а, А. В. Дедов^а *

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

*e-mail: dedovav@mpei.ru

Поступила в редакцию 28.04.2023 г.

После доработки 13.05.2023 г.

Принята к публикации 01.06.2023 г.

Проведено численное исследование процессов смешения многокомпонентных газовых потоков с помощью статических смесителей для снижения неоднородностей температуры и состава газовой смеси в топливном трубопроводе. Проанализированы литературные источники, представляющие интерес для данной работы. Выбраны два типа статического смесителя – последовательная цепочка элементов из закрученной ленты и лепестковый смеситель. Для указанных конструкций выполнены численные расчеты при заданных режимных параметрах смешения газовых потоков, содержащих метан, водород и азот. Турбулентные течения смеси моделировались в стационарной постановке с использованием уравнений сохранения массы, импульса и энергии, осредненных по Рейнольдсу. Для определения турбулентной вязкости применялись двухпараметрические модели с пристеночными функциями. В качестве граничных условий на входе в статический смеситель задавались поля искомым переменных, полученные ранее авторами настоящей статьи на выходе из Т-образного смесителя при числах Рейнольдса $(4-6) \times 10^6$ в основной и примыкающей трубах для подачи составляющих топливной смеси. Проведен анализ эффективности процесса смешения с помощью стационарных смесителей различных модификаций. Получены поля компонентов скорости, температуры и массовых долей составляющих смеси на выходах из статических смесителей, определены потери давления в конструкциях. Предложена оптимальная конструкция смесителя, состоящая из четырех элементов, в виде закрученной на 180° пластины, каждый элемент которой имеет длину (полупериод закрутки) равную двум диаметрам трубы. Соседние элементы закручены в противоположных направлениях и примыкают один к другому под углом 90° . Показано, что во фрагменте топливного трубопровода, включающего в себя статический смеситель и прямолинейный участок трубы длиной не более пяти диаметров, удастся достичь требуемых однородности состава и температуры топливной смеси в выходном сечении указанного фрагмента.

Analysis of the Efficiency of Static Mixers from Fragments of Twisted Tape and with Leaf Elements for Mixing Fuel Gas Components

F. V. Tuponosov^a, V. I. Artemov^a, G. G. Yankov^a, and A. V. Dedov^a. *

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

**e-mail: dedovav@mpei.ru*

Abstract—A numerical study of the mixing processes of multicomponent gas flows with the help of static mixers was carried out to reduce the temperature and gas mixture composition inhomogeneities in the fuel pipeline. The literary sources of interest for this work are analyzed. Two types of static mixer are selected: a series of elements from a twisted band and a leaf mixer. For these designs, numerical calculations are made at the specified parameters of mixing gas flows containing methane, hydrogen, and nitrogen. Turbulent flows of the mixture were modeled in a stationary formulation using the equations of conservation of mass, momentum, and energy averaged by Reynolds. Two-parameter models with wall-side functions were used to determine turbulent viscosity. As boundary conditions at the entrance to the static mixer, the fields of the desired variables, obtained earlier by the authors of this article at the exit from the T-shaped mixer with Reynolds numbers $(4-6) \times 10^6$ in the main and adjacent pipes for the supply of fuel mixture components, were set. The analysis of the efficiency of the mixing process using stationary mixers of various modifications was carried out. The fields of the components of speed, temperature, and mass fractions of the mixture at the exits from static mixers were obtained and pressure losses in the structures were determined. The optimal design of the mixer is proposed, which consists of four elements in the form of a 180° plate, each element of which has a length (half-spin period) equal to two diameters of the pipe. Adjacent elements are twisted in opposite directions and adjoin each other at an angle of 90° . It is shown that it is possible in a fragment of the fuel pipeline, including a static mixer and a straight section of the pipe with a length of not more than five diameters, to achieve the required uniformity of the composition and temperature of the fuel mixture in the outlet section of the said fragment.

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

**ТЕПЛООБМЕН В КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ “ТРУБА В КАНАЛЕ”
ПРИ ПОДЪЕМНОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА
В ПОПЕРЕЧНОМ МАГНИТНОМ ПОЛЕ¹**

© 2023 г. Н. А. Лучинкин^{a, b, *}, Н. Г. Разуванов^{a, b}, О. Н. Полянская^{a, b}

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

^bОбъединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН), Ижорская ул., д. 13, Москва, 125412 Россия

*e-mail: LuchinkinNA@yandex.ru

Поступила в редакцию 09.03.2023 г.

После доработки 17.04.2023 г.

Принята к публикации 27.04.2023 г.

Проведены исследования теплообмена при вынужденном подъемном течении ртути в трубе, вставленной в обогреваемый канал квадратного сечения, в поперечном магнитном поле. Внешний канал заполнен ртутью и подключен к петле естественной циркуляции. Моделируется теплообмен жидкого металла в ячейке системы охлаждения канального жидкометаллического blankets термоядерного реактора типа токамак. Опытные данные по температурным полям и характеристикам теплоотдачи во внутренней трубе и межканальном пространстве получены с использованием микротермопарных зондов на ртутном магнитогидродинамическом стенде. Рассматриваются различные режимы работы контура естественной циркуляции: I – контур отключен, конвективное течение возможно только внутри пространства между трубой и каналом; II – контур открыт в адиабатическом режиме; III – контур открыт, включено водяное охлаждение. Данные измерений во внутренней трубе показывают, что теплоотдача в системе “труба в канале” улучшается по сравнению с теплоотдачей в отдельной трубе как в отсутствие магнитного поля, так и при его наличии. В межканальном зазоре в условиях эксперимента возникает естественная конвекция в результате действия сил плавучести и электромагнитных сил. Конфигурация течения и его структура в зазоре существенно меняются в поперечном магнитном поле, а интенсивность теплообмена зависит от режима работы петли естественной циркуляции. Вследствие конвекции температурные неоднородности в зазоре снижаются, а теплоотдача в исследуемой системе “труба в канале” усиливается в большей степени при включенной петле естественной циркуляции и особенно при ее дополнительном охлаждении. В межтрубном пространстве наблюдаются низкочастотные высокоамплитудные пульсации, вызванные неустойчивостью свободно-конвективного и магнитогидродинамического течений.

Ключевые слова: жидкие металлы, магнитная гидродинамика, термогравитационная конвекция, теплообмен, зондовые измерения, пульсации температуры, система “труба в канале”, смешанная конвекция

DOI: 10.56304/S004036362310003X

Heat Transfer in a “Tube-in-Channel” Combined System with an Upward Flow of Liquid Metal in a Transverse Magnetic Field

N. A. Luchinkin^{a, b, *}, N. G. Razuvanov^{a, b}, and O. N. Polyanskaya^{a, b}

^a National Research University Moscow Power Engineering Institute (NRU MPEI), Moscow, 111250 Russia

^b Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Moscow, 125412 Russia

*e-mail: LuchinkinNA@yandex.ru

Abstract—Investigations were performed of heat transfer to a forced upward flow of mercury in a tube inserted into a heated channel with a rectangular cross-section under the effect of a transverse magnetic field. The outer channel is filled with mercury and connected to a natural circulation loop. Liquid metal heat transfer is simulated in a cell of the cooling system of the channel-type liquid metal blanket for a Tokamak fusion reactor. Experimental data on temperature fields and heat-transfer performance in the inner tube and the outer channel were obtained in the mercury magnetohydrodynamic test rig using microthermocouple probes. Three different cases of natural circulation loop operation are examined: (I) the loop is off, convective flow can occur only in the space between the tube and the channel wall; (II) the loop is open and operates under adiabatic conditions; (III) the loop is open, water cooling is on. The results of measurement in the inner tube demonstrate that heat transfer in the tube-in-channel system is enhanced compared to the heat transfer in a separate tube both with and without a magnetic field. Under the experimental conditions, natural convection is induced by the buoyancy and electromagnetic forces in the gap between the tube and the channel wall. The configuration and structure of the flow in the gap change drastically in a transverse magnetic field, and the heat-transfer rate depends on the operating conditions in the natural circulation loop. Convection reduces temperature nonuniformities in the gap, and the heat transfer in the investigated “tube-in-channel” enhances greater when the natural circulation loop is activated and, especially, when it is additionally cooled. Low-frequency high-amplitude fluctuations induced by the instability of the natural convection and magnetohydrodynamic flows are observed in the gap.

Keywords: liquid metal, magnetohydrodynamics, natural convection, heat transfer, probe measurements, temperature fluctuations, “tube-in-channel” system, mixed convection

ПРОБЛЕМЫ АДАПТАЦИИ ДЕЙСТВУЮЩЕГО ОБОРУДОВАНИЯ ТЭС К ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПОКАЗАТЕЛЯМ ВЫБРОСОВ ИТС 38-2022 “СЖИГАНИЕ ТОПЛИВА НА КРУПНЫХ УСТАНОВКАХ В ЦЕЛЯХ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ”

© 2023 г. П. В. Росляков^а, *, О. Е. Кондратьева^а, Т. В. Гусева^б

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

^бНаучно-исследовательский институт “Центр экологической промышленной политики”,
Стремянный пер., д. 38, Москва, 115054 Россия

*e-mail: RoslyakovPV@mpei.ru

Поступила в редакцию 03.04.2023 г.

После доработки 03.04.2023 г.

Принята к публикации 27.04.2023 г.

Рассмотрены проблемы снижения выбросов загрязняющих веществ на российских ТЭС в связи с введением новых технологических показателей, предложенных в новой редакции информационно-технического справочника ИТС 38-2022. Приведены итоги анкетирования более 40% действующих на российских ТЭС котельных установок по техническим и экологическим характеристикам. Показано, что главную проблему при адаптации действующих ТЭС к новым технологическим показателям представляют котлы, введенные в эксплуатацию до 31.12.2000, поскольку при их проектировании не предусматривались воздухоохраные мероприятия и технологии, за исключением золоуловителей. Проведена оценка масштабов замены и модернизации основного и вспомогательного оборудования таких российских крупных топливосжигающих энергетических установок (КТЭУ) для снижения выбросов маркерных загрязняющих веществ до уровня не выше установленных для этой группы технологических показателей. Введение новых технологических показателей по выбросам золы твердого топлива потребует серьезного изменения существующей структуры золоулавливающих установок путем их замены или модернизации. В настоящее время российские ТЭС не оснащены действующими системами сероочистки газов, в результате выбросы диоксида серы на более чем 40 пылеугольных котлах не удовлетворяют установленным технологическим показателям. Выбросы оксидов азота из газомазутных котлов в основном соответствуют экологическим требованиям, в отличие от 25% пылеугольных котлов, на которых эти требования не выполняются. Для самой возрастной и многочисленной группы котлов, введенных в эксплуатацию до 31.12.2000, рассмотрены пути внедрения наилучших доступных технологий, рекомендованных в ИТС 38-2022, и предложены конкретные малозатратные и быстро внедряемые воздухоохраные мероприятия для снижения выбросов маркерных загрязняющих веществ в атмосферный воздух до уровня не выше технологических показателей с учетом имеющихся технических и экономических ограничений.

Ключевые слова: маркерные загрязняющие вещества, технологические показатели выбросов, наилучшие доступные технологии, ТЭС, крупные топливосжигающие энергетические установки, золоуловители, программа повышения экологической эффективности

DOI: 10.56304/S0040363623100077

**Problems of Adapting the Operating Thermal Power Plant Equipment
to the Technological Emission Indicators Stipulated
by the Information-Technical Reference Book 38-2022
“Fuel Combustion at Large Facilities for Energy Production Purposes”**

P. V. Roslyakov^{a, *}, O. E. Kondrat'eva^a, and T. V. Guseva^b

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

^b *Research Institute Environmental Industrial Policy Center, Moscow, 115054 Russia*

**e-mail: RoslyakovPV@mpei.ru*

Abstract—The article considers problems relating to reduction of pollutant emissions at Russian thermal power plants (TPPs) in connection with the introduction of new technological indicators proposed in the new edition of the information technical reference book ITS 38-2022. The results obtained from investigating more than 40% of boiler units that operate at Russian TPPs in regard to technical and environmental characteristics are summarized. It is shown that boilers commissioned before December 31, 2000, pose the main problem in adapting the existing TPPs to the new technological indicators, because they were designed without the use of air-protection measures and technologies except for ash collectors. The article estimates the scales of replacing and modernizing the main and auxiliary equipment of these Russian large fuel combustion power facilities (LFCPFs) for reducing the emissions of marker pollutants to a level not higher than the technological indicators specified for this group. The introduction of new technological indicators for solid fuel ash emissions will require a serious change in the existing structure of ash-collecting plants by replacing or modernizing them. Currently, Russian TPPs are not equipped with operating flue gas desulfurization systems, as a result of which the sulfur dioxide emissions from more than 40 coal-fired boilers do not comply with the established technological indicators. The nitrogen oxide emissions from gas-and-fuel oil fired boilers are in the main in compliance with the environmental requirements in contrast to 25% of coal-fired boilers, at which these requirements are not complied with. For the oldest and numerous group of boilers that were commissioned before December 31, 2000, the article considers ways of introducing the best available technologies recommended in the document ITS 38-2022 and proposes specific low-cost and quickly introduced air-protection measures for reducing the marker pollutant emissions into atmospheric air to a level not higher than the technological indicators with taking into account the existing technical and economic constraints.

Keywords: marker pollutants, technological emission indicators, best available technologies, TPPs, large fuel combustion power facilities, ash collectors, environmental efficiency improvement program

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**МОДЕРНИЗАЦИЯ ДЕЙСТВУЮЩИХ ТЭС
В СОЛНЕЧНО-ТОПЛИВНЫЕ ГИБРИДНЫЕ СТАНЦИИ**

© 2023 г. Э. К. Матжанов^а, *, З. М. Ахрорхужаева^б

^а Научно-технический центр с конструкторским бюро и опытным производством Академии наук Республики Узбекистан, ул. Дурмон йули, д. 33, г. Ташкент, 100125 Республика Узбекистан

^б Ташкентский государственный технический университет,
Университетская ул., д. 2, г. Ташкент, 100095 Республика Узбекистан

*e-mail: e.matjanov@gmail.com

Поступила в редакцию 28.01.2023 г.

После доработки 21.04.2023 г.

Принята к публикации 27.04.2023 г.

В настоящее время основная доля электрической энергии вырабатывается тепловыми электрическими станциями, работающими на органическом топливе по циклу Ренкина. В последние десятилетия все более привлекательными становятся энергетические технологии на базе солнечных концентрирующих установок (СКУ). В статье показана возможность использования тепла, полученного из солнечной энергии (далее – тепло солнечной энергии), на существующих паротурбинных ТЭС. Разработана схема подключения СКУ к паротурбинному энергетическому блоку ПВК-150 Ташкентской ТЭС, благодаря чему тепло солнечной энергии можно использовать вместо тепла, получаемого в регенеративных подогревателях низкого (ПНД) и высокого (ПВД) давления, а также для частичной замены тепла от экономайзера и испарительных поверхностей нагрева существующего парогенератора. Расчеты проведены при различных значениях доли тепла солнечной энергии – в диапазоне от 20 до 80%. В качестве СКУ используются параболоцилиндрические концентраторы (ПЦК). Предложена формула для вычисления КПД преобразования солнечной энергии в электрическую на солнечно-топливных гибридных ТЭС, создаваемых на основе существующих паротурбинных ТЭС. Представлены результаты модернизации энергетического блока ПВК-150 посредством подключения к нему СКУ. В ходе проведения исследований выявлено, что при использовании тепла солнечной энергии на энергоблоке ПВК-150 для замены тепла, получаемого в регенеративных подогревателях питательной воды, КПД преобразования солнечной энергии в электрическую достигает 27.06%, а при частичной замене экономайзера и испарительных поверхностей нагрева существующего парогенератора с солнечным парогенератором – 34.4%.

Ключевые слова: солнечные концентрирующие установки, солнечно-топливная гибридная ТЭС, КПД преобразования солнечной энергии в электрическую, модернизация действующих ТЭС, повышение энергоэффективности, подогреватели низкого и высокого давления, цикл Ренкина

DOI: 10.56304/S0040363623100041

Modernization of Existing Thermal Power Plants into Hybrid Solar and Fuel-Fired Plants

E. K. Matjanov^{a,*} and Z. M. Akhrokhujeva^b

^a *Scientific-Technical Center with Constructional Bureau and Experimental Production, Uzbekistan Academy of Sciences, Tashkent, 100125 Uzbekistan*

^b *Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095 Uzbekistan*

**e-mail: e.matjanov@gmail.com*

Abstract—The major part of electric energy is presently generated by fossil fuel-fired thermal power plants operating according to the Rankine cycle. In the last decades, power technologies on the basis of solar concentrators (SCs) are becoming increasingly more attractive. The article shows the possibility of using heat obtained from solar energy (referred to henceforth as solar energy heat) at existing steam turbine thermal power plants (TPPs). A scheme for connecting an SC to the PVK-150 steam turbine power unit at the Tashkent TPP has been developed, due to which solar energy heat can be used instead of the heat obtained in the low- and high-pressure regenerative heaters (LPH and HPH) and also for partially replacing the heat from the economizer and evaporative heating surfaces of the existing steam generator. Calculations were carried out for different values of the solar energy heat share: in the range from 20 to 80%. Parabolocylindrical concentrators (PCCs) are used as SCs. A relationship is proposed for calculating the solar energy into electricity conversion efficiency at hybrid solar and fossil fuel-fired TPPs constructed on the basis of existing steam turbine TPPs. The results obtained from modernizing the PVK-150 power unit by connecting an SC to it are presented. It has been determined in the course of investigations that, in using solar energy heat in the PVK-150 power unit for replacing the heat obtained in the regenerative feed water heaters, the solar energy into electricity conversion efficiency reaches 27.06 and 34.4% in the case of partial replacement of the economizer and evaporative surfaces of the existing steam generator with a solar steam generator.

Keywords: solar concentrators, hybrid solar and fossil fuel-fired TPP, solar energy into electricity conversion efficiency, modernization of existing TPPs, improvement of energy efficiency, low- and high-pressure heaters, Rankine cycle