
СОДЕРЖАНИЕ

Номер 5, 2023

Атомные электростанции

Концепция ядерной энергетической установки на базе многоцелевого тестового исследовательского реактора малой мощности с легководным теплоносителем сверхкритических параметров

*А. А. Седов, В. Ю. Бландинский, Я. А. Котов, Д. С. Кузенкова, А. С. Лапин,
В. А. Невиница, С. Б. Пустовалов, А. С. Степанов, С. А. Субботин,
П. А. Фомиченко, Б. И. Фонарев, А. А. Фролов*

5

Анализ чувствительности и неопределенности расчета по коду КОРСАР/ГП для аварий с отказом системы охлаждения бассейнов выдержки

В. Е. Карнаухов, М. М. Бедретдинов, П. С. Гагулин, Р. М. Следков, О. Е. Степанов

23

Паровые котлы, энергетическое топливо, горелочные устройства и вспомогательное оборудование котлов

Тепловые эффекты при торрефикации растительной биомассы. Эксперимент и математическое моделирование

В. М. Зайченко, Г. А. Сычев, А. Л. Шевченко

31

Исследование методом LIF поля температуры за фронтом пламени дежурного факела модельного фронтального устройства газотурбинного типа

А. Г. Савицкий, Д. К. Шарборин, В. М. Дулин, Д. М. Маркович

40

Водоподготовка и водно-химический режим

Методы диагностики и прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблока в системах химико-технологического мониторинга на тепловых электростанциях (обзор)

О. В. Егошина, С. К. Звонарева, Н. А. Большакова

49

Охрана окружающей среды

Эффективность поглощения CO₂ микроводорослями *Arthrospira platensis* из смеси, моделирующей дымовые газы

*М. С. Власкин, С. В. Киселёва, Н. И. Чернова, А. В. Григоренко, К. Г. Рындин,
О. С. Попель, С. Я. Маланий, О. В. Славкина, Ф. де Фариас Навес, В. Кумар*

57

Возобновляемые источники энергии, гидроэнергетика

Материалы для топливных элементов на базе кобальтитов бария и стронция, синтезированных на солнечной печи

*М. С. Пайзуллаханов, О. Р. Парпиев, У. Р. Саломов,
Ж. З. Шерматов, Г. Ш. Каримова, С. С. Сабиров*

73

Паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование

Повышение точности измерений газодинамических параметров в последних ступенях ЦНД с помощью современной системы траверсирования потока при исследованиях на натурном стенде

*А. В. Москаленко, А. М. Тюхтяев, Д. М. Ковалёв, А. Г. Долганов,
А. А. Ивановский, В. А. Черников, В. А. Рассохин*

Contents

Vol. 70, No. 5, 2023

Nuclear Power Plants

The Concept of a Nuclear Power Unit on the Basis of a Low-Power Multipurpose Test Research Reactor with Supercritical Light-Water Coolant

A. A. Sedov, V. Yu. Blandinskii, Ya. A. Kotov, D. S. Kuzenkova, A. S. Lapin, V. A. Nevinita, S. B. Pustovalov, A. S. Stepanov, S. A. Subbotin, P. A. Fomichenko, B. I. Fonarev, and A. A. Frolov

5

Analysis of the Sensitivity and Uncertainty of Calculation Using the KORSAR/GP Code for Accidents with a Failure of Storage Pools' Cooling System

V. E. Karnaukhov, M. M. Bedretdinov, P. S. Gagulin, R. M. Sledkov, and O. E. Stepanov

23

Steam Boilers, Power-Plant Fuels, Burner Units and Boiler Auxiliary Equipment

Thermal Effects of Torrefaction of Vegetable Biomass: Experiment and Mathematical Modeling

V. M. Zaichenko, G. A. Sychev, and A. L. Shevchenko

31

A LIF Study of the Temperature Field behind the Pilot Flame Front of a Gas Turbine Type Model Combustor

A. G. Savitskii, D. K. Sharaborin, V. M. Dulin, and D. M. Markovich

40

Water Treatment and Water Chemistry

Methods for Diagnosing and Predicting the Behavior of Impurities over the Power Unit Path in the Cycle Chemistry-Monitoring Systems at Thermal Power Plants (Review)

O. V. Egoshina, S. K. Zvonareva, and N. A. Bol'shakova

49

Environmental Protection

Effectiveness of CO₂ Capture by *Arthrospira platensis* Microalgae from a Mixture Simulating Flue Gases

M. S. Vlaskin, S. V. Kiseleva, N. I. Chernova, A. V. Grigorenko, K. G. Ryndin, O. S. Popel', S. Ya. Malanii, O. V. Slavkin, F. de Farias Naves, and V. Kumar

57

Renewable Energy Sources and Hydropower

Renewable Energy Sources, Hydropower Materials for Fuel Cells Based on Barium and Strontium Cobaltites Synthesized on a Solar Furnace

M. S. Paizullahanov, O. R. Parpiev, U. R. Salomov, Zh. Z. Shermatov, G. Sh. Karimova, and S. S. Sabirov

73

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

Use of a Modern Flow Traversing System for More Accurately Measuring
the Gas Dynamic Parameters in the Turbine LPC Last Stages in Studies
on a Full-Scale Test Bench

*A. V. Moskalenko, A. M. Tyukhtyaev, D. M. Kovalev, A. G. Dolganov,
A. A. Ivanovskii, V. A. Chernikov, and V. A. Rassokhin*

КОНЦЕПЦИЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ МНОГОЦЕЛЕВОГО ТЕСТОВОГО ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОГО РЕАКТОРА МАЛОЙ МОЩНОСТИ С ЛЕГКОВОДНЫМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ СВЕРХКРИТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ¹

© 2023 г. А. А. Седов^а, В. Ю. Бландинский^а, Я. А. Котов^а, Д. С. Кузенкова^а, А. С. Лапин^а, В. А. Невиница^а, С. Б. Пустовалов^{а, *}, А. С. Степанов^а, С. А. Субботин^а, П. А. Фомиченко^а, Б. И. Фонарев^а, А. А. Фролов^а

^аНИИЦ “Курчатовский институт”, пл. Академика Курчатова, д. 1, Москва, 123184 Россия

*e-mail: Pustovalov_SB@nrcki.ru

Поступила в редакцию 27.10.2022 г.

После доработки 12.11.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

Представлена предварительная концепция ядерной энергетической установки на базе многоцелевого тестового исследовательского реактора малой мощности с легководным теплоносителем сверхкритических параметров (ЯЭУ МТИР-СКД), способной работать в режимах тестового и исследовательского реакторов и обладающей следующими возможностями: проведение обоснования режимов эксплуатации энергетического реактора, использующего в качестве теплоносителя воду сверхкритических параметров в быстром спектре нейтронов; отладка проектных режимов работы реактора со сверхкритическими параметрами теплоносителя (пуск реактора, выход на энергетический уровень мощности, переход с одного уровня мощности на другой, работа на номинальном уровне мощности, останов и др.); реакторные облучения перспективных видов ядерного топлива, поглощающих и конструкционных материалов для ядерных установок с быстрым, промежуточным и тепловым спектрами нейтронов; проведение комплексных расчетно-экспериментальных исследований в целях получения необходимой информации для разработки и верификации расчетных кодов; апробация новых типов оборудования различных технологических систем (элементы систем аварийного расхолаживания, парогенераторы и пр.), приборов и систем управления, контроля и диагностики энергетических реакторов различного типа; проведение исследований по проблеме замкнутого ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ), утилизации актинидов и обращения с долгоживущими продуктами деления, включая опытно-демонстрационное замыкание топливного цикла; освоение технологий производства радионуклидной продукции различного назначения; наработка модифицированных материалов; использование тепловой энергии реактора для теплофикации и электрогенерации. Также существует возможность развития международного сотрудничества в рамках реализации совместных научно-исследовательских программ на базе МТИР-СКД.

Ключевые слова: ВВЭР-СКД, МТИР-СКД, легководный СКД-теплоноситель, тестовый реактор, исследовательский реактор, реактор малой мощности, реакторная установка, ядерная энергетическая установка

DOI: 10.56304/S0040363623050065

The Concept of a Nuclear Power Unit on the Basis of a Low-Power Multipurpose Test Research Reactor with Supercritical Light-Water Coolant

A. A. Sedov^a, V. Yu. Blandinskii^a, Ya. A. Kotov^a, D. S. Kuzenkova^a, A. S. Lapin^a,
V. A. Nevinitsa^a, S. B. Pustovalov^{a,*}, A. S. Stepanov^a, S. A. Subbotin^a, P. A. Fomichenko^a,
B. I. Fonarev^a, and A. A. Frolov^a

^a National Research Center (NRC) Kurchatov Institute, Moscow, 123184 Russia

*e-mail: Pustovalov_SB@nrcki.ru

Abstract—Herein is presented a preliminary concept of a nuclear power installation (NPI) based on a low-power multipurpose test research reactor with a supercritical pressure light water coolant (LMTRR-SCP), which can operate as a test or research reactor, and has the following capabilities: substantiation of operating conditions for a supercritical water-cooled power reactor in the fast neutron spectrum; adjustment of the design operating regimes of the reactor with supercritical coolant conditions (including reactor startup, attainment of the energy power level, switch-over between power levels, rated power operation, shutdown, etc.); reactor irradiation of promising types of nuclear fuel, absorbing and structural materials for nuclear installations with fast, intermediate, or thermal neutron spectrum; comprehensive experimental and numerical investigations to obtain information required for development and verification of numerical codes; evaluation of new types of equipment for various process systems (including elements of emergency cooling systems, steam generators, etc.), instruments, and control, monitoring, and diagnostics systems for power reactors of various types. Investigations into the closed nuclear fuel cycle (CNFC) problem; utilization of actinides and handling of long-lived fission products, including pilot demonstration closure of the fuel cycle; mastering of processes for the manufacture of radionuclide products for various applications; production of modified materials; and use of the reactor's thermal energy for heat and power generation. A potential also exists for the development of international cooperation within the scope of joint research programs on the basis of LMTRR-SCP.

Keywords: VVER-SCP, LMTRR-SCP, supercritical pressure (SCP) light-water coolant, test reactor, research reactor, low-power reactor, reactor unit, nuclear power installation

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ РАСЧЕТА ПО КОДУ КОРСАР/ГП ДЛЯ АВАРИЙ С ОТКАЗОМ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ БАССЕЙНОВ ВЫДЕРЖКИ

© 2023 г. В. Е. Карнаухов^а, М. М. Бедретдинов^а, П. С. Гагулин^а*,
Р. М. Следков^а, О. Е. Степанов^а

^а ОКБ “Гидропресс”, ул. Орджоникидзе, д. 21, г. Подольск, Московская обл., 142103 Россия

*e-mail: gagulins@yandex.ru

Поступила в редакцию 17.06.2022 г.

После доработки 23.11.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Проведен анализ чувствительности и неопределенности результатов, получаемых на основе расчетной модели работы экспериментального стенда ALADIN, выполненной на базе расчетного программного средства КОРСАР/ГП. Установка ALADIN предназначена для экспериментального наблюдения за процессами, происходящими в приреакторных бассейнах выдержки отработавшего ядерного топлива на АЭС при нарушении его охлаждения (выкипание воды и осушение хранящихся отработавших тепловыделяющих сборок), что имеет большое значение для обоснования безопасности АЭС, особенно в условиях существующего ограниченного банка данных по аналогичным процессам в условиях бассейна выдержки. Результаты, полученные с помощью расчетной модели, и данные экспериментов были опубликованы ранее и показали хорошее совпадение. Анализ чувствительности и неопределенности проведен на основе программного средства ПАНДА, в котором реализуются специальные статистические методы. По результатам проведенного анализа определены параметры, неопределенность которых оказывает наибольшее влияние на температуру имитатора тепловыделяющей сборки и уровень воды в испытательном стенде. Показано, что для рассматриваемой модели допустимо использовать упрощенный подход к проведению анализа неопределенности, основанный на рассмотрении только предельных вариантов отклонения неопределенных параметров модели. В таком случае можно заведомо покрыть всю трубку неопределенности результатов. Количество расчетных вариантов при этом существенно сокращается, а трубка неопределенности расширяется до максимально возможных границ, определяемых наложением самых неблагоприятных отклонений. Стенд ALADIN моделирует одну тепловыделяющую сборку в условиях аварии в бассейне выдержки. Если полученный результат верен для рассмотренной модели, то при схожести протекающих в бассейне процессов и теплофизических характеристик, имеется потенциальная вероятность, что упрощенный подход к анализу чувствительности и неопределенности может быть применим и при анализе безопасности бассейнов выдержки с отработавшим ядерным топливом.

Ключевые слова: анализ чувствительности и неопределенности, обоснование безопасности, анализ аварий, водо-водяной энергетический реактор, бассейн выдержки отработавшего ядерного топлива, программа для теплогидравлических расчетов КОРСАР/ГП, программный комплекс ПАНДА/КОРСАР

DOI: 10.56304/S0040363623050028

Analysis of the Sensitivity and Uncertainty of Calculation Using the KORSAR/GP Code for Accidents with a Failure of Storage Pools' Cooling System

V. E. Karnaukhov^a, M. M. Bedretdinov^a, P. S. Gagulin^{a, *}, R. M. Sledkov^a, and O. E. Stepanov^a

^a OKB Gidropress, Podolsk, Moscow oblast, 142103 Russia

*e-mail: gagulinps@yandex.ru

Abstract—An analysis into the sensitivity and uncertainty of the results obtained on the basis of the computational model of the experimental stand ALADIN, performed on the basis of the computational software tool KORSAR/GP, was carried out. The ALADIN facility is designed for experimental monitoring of the processes occurring in the near-reactor pools of spent nuclear fuel at NPPs in case of violation of its cooling (boiling of water and drying of stored spent fuel assemblies), which is of great importance for justifying the safety of NPPs, especially in the conditions of the existing limited data bank for similar processes in the spent fuel pool. The results obtained using the calculation model and the experimental data were published earlier and showed good agreement. Sensitivity and uncertainty analysis was carried out on the basis of the PANDA software tool, which implements special statistical methods. Based on the results of the analysis, the parameters whose uncertainty has the greatest impact on the temperature of the fuel assembly simulator and the water level in the test bench were determined. It is shown that it is permissible for the considered model to use a simplified approach to the analysis of uncertainty based on the consideration of only the limiting options for the deviation of the uncertain parameters of the model. In this case, one can certainly cover the entire tube of uncertainty of the results. In this case, the number of calculation options is significantly reduced, and the uncertainty tube expands to the maximum possible limits determined by the superposition of the most unfavorable deviations. The ALADIN stand simulates one fuel assembly under accident conditions in the spent fuel pool. If the obtained result is correct for the considered model then, with the similarity of the processes occurring in the pool and thermophysical characteristics, there is a potential possibility that a simplified approach to sensitivity and uncertainty analysis can also be applied in the analysis of the safety of spent fuel pools.

Keywords: sensitivity and uncertainty analysis, safety justification, accident analysis, pressurized water power reactor, spent nuclear fuel pool, KORSAR/GP program for thermal-hydraulic calculations, PANDA/KORSAR software package

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

**ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ТОРРЕФИКАЦИИ
РАСТИТЕЛЬНОЙ БИОМАССЫ.
ЭКСПЕРИМЕНТ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ¹**

© 2023 г. В. М. Зайченко^а, Г. А. Сычев^а, А. Л. Шевченко^а, *

^а *Объединенный институт высоких температур РАН (ОИВТ РАН),
Ижорская ул., д. 13, корп. 2, Москва, 125412 Россия*

**e-mail: shev@jiht.ru*

Поступила в редакцию 29.09.2022 г.

После доработки 09.11.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Приводятся результаты экспериментальных и расчетных исследований торрефикации (низкотемпературного пиролиза) гранулированной растительной биомассы. В результате этого процесса из биомассы различных видов (в том числе отходов) получается качественное твердое гидрофобное биотопливо с повышенной теплотой сгорания. В отличие от ископаемого угля, торрефицированное топливо практически не содержит серу и тяжелые металлы, обладает меньшей зольностью и является углеродно-нейтральным продуктом. Выделяющийся при сгорании растительного биотоплива углекислый газ полностью поглощается в период роста растений. Биотопливо – возобновляемый ресурс. Годовой прирост биомассы составляет 400 млрд т, а скорость накопления энергии наземной биомассой – 3×10^{21} Дж/год. В статье рассмотрены вертикальный реактор с плотным слоем пеллет, движущихся навстречу потоку греющего газа под действием собственного веса, и особенности его функционирования с учетом возможной реализации концепции управляемой экзотермической реакции. Для обеспечения заданного режима на установке предусмотрены два управляющих блока: по контролю и поддержанию заданной температуры теплоносителя на входе в реактор и по управлению открытием заслонок для выгрузки готовой продукции в зону охлаждения. Представлены экспериментальные и расчетные данные трех характерных режимов работы установки: с ограничением экзотермической реакции путем контроля входной температуры, с управляемой экзотермической реакцией и получения биоугля. Второй режим оказался наиболее энергоэффективным. Отклонение расчетных данных от экспериментальных составило не более 4%. Показано, что использование энергии экзотермической реакции позволяет существенно повысить энергетическую эффективность процесса получения углеродно-нейтрального твердого биотоплива.

Ключевые слова: биотопливо, утилизация отходов, торрефикация, энергоэффективность, экзотермическая реакция, реактор с подвижным слоем, теплоноситель, биоуголь, пиролиз, охлаждение

DOI: 10.56304/S0040363623050089

Thermal Effects of Torrefaction of Vegetable Biomass: Experiment and Mathematical Modeling

V. M. Zaichenko^{a, *}, G. A. Sychev^a, and A. L. Shevchenko^a

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

*e-mail: shev@jiht.ru

Abstract—The results of experimental and computational studies of torrefaction (low-temperature pyrolysis) of granular plant biomass are presented. As a result of this process, high-quality solid hydrophobic biofuel with increased calorific value is obtained from biomass of various types (including waste). Unlike fossil coal, torrefied fuel contains virtually no sulfur and heavy metals, has a lower ash content, and is a carbon-neutral product. The carbon dioxide released during the combustion of plant biofuels is completely absorbed during the period of plant growth. Biofuels are a renewable resource. The annual increase in biomass is 400 billion t, and the rate of energy accumulation by terrestrial biomass is 3×10^{21} J/year. The article considers a vertical reactor with a dense layer of pellets moving towards the heating gas flow under the action of its own weight and features of its operation, taking into account the possible implementation of the concept of a controlled exothermic reaction. To ensure the set mode, the plant has two control units: for controlling and maintaining the set temperature of the coolant at the reactor inlet and for controlling the opening of dampers for unloading finished products into the cooling zone. Experimental and calculated data are presented for three characteristic operating modes of the installation: with limitation of the exothermic reaction due to the control of the inlet temperature, with a controlled exothermic reaction, and with the production of biochar. The second mode turned out to be the most energy efficient. The deviation of the calculated data from the experimental data was no more than 4%. It is shown that the use of an exothermic reaction can significantly increase the energy efficiency of the process of obtaining carbon-neutral solid biofuel.

Keywords: biofuel, waste disposal, torrefaction, energy efficiency, exothermic reaction, moving bed reactor, coolant, biochar, pyrolysis, cooling

**ПАРОВЫЕ КОТЛЫ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ТОПЛИВО,
ГОРЕЛОЧНЫЕ УСТРОЙСТВА
И ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ КОТЛОВ**

**ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОМ LIF ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ
ЗА ФРОНТОМ ПЛАМЕНИ ДЕЖУРНОГО ФАКЕЛА МОДЕЛЬНОГО
ФРОНТОВОГО УСТРОЙСТВА ГАЗОТУРБИННОГО ТИПА¹**

© 2023 г. А. Г. Савицкий^{a, b, *}, Д. К. Шараборин^{a, b}, В. М. Дулин^{a, b}, Д. М. Маркович^{a, b}

^a *Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН,
просп. Академика Лаврентьева, д. 1, Новосибирск, 630090 Россия*

^b *Новосибирский государственный университет, ул. Пирогова, д. 2, Новосибирск, 630090 Россия*

**e-mail: a.savitskii@g.nsu.ru*

Поступила в редакцию 12.07.2022 г.

После доработки 29.10.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

В последние годы особенно актуальной стала задача снижения уровня выбросов вредных веществ при работе газотурбинных установок (ГТУ). При этом детальное исследование скорости потока и процесса горения в камерах сгорания ГТУ необходимо для оптимизации происходящих в них термогазодинамических процессов. Такая оптимизация позволяет не только обеспечить высокую полноту сжигания топлива и устойчивую работу горелок в широком диапазоне соотношений топливо/окислитель, но и снизить выбросы вредных веществ. Статья посвящена изучению структуры поля температуры дежурного факела модельного газотурбинного двухзонного горелочного устройства. Для регистрации мгновенного распределения температуры в факеле был использован метод, основанный на термически активированной планарной лазерно-индуцированной флуоресценции [thermally-assisted Planar Laser Induced Fluorescence (PLIF)] при возбуждении линии $Q_1(8)$ перехода $(1-0)$ электронной системы $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ гидроксильного радикала OH. Исследование проведено при горении частично перемешанной смеси метана с воздухом со значительным избытком последнего (с коэффициентом $\alpha = 1.54$) при нормальных условиях в закрученном потоке при числе Рейнольдса $Re = 1.5 \times 10^4$. В работе детально описана процедура калибровки thermally-assisted PLIF-системы с использованием термопары. Кроме того, представлены мгновенные распределения температуры за фронтом пламени в диапазоне 1500–2000 К. Полученные данные указывают на значительную неоднородность поля температуры вследствие стабилизации пламени на периферии центрального факела топлива смешивающимся закрученным потоком воздуха. При этом условное осреднение поля температуры с учетом перемежаемости, вызванной движением фронта пламени, свидетельствует о том, что температура в основании фронта близка к минимальным значениям адиабатической температуры предварительно перемешанной смеси вблизи “бедного” [$\alpha > 1$, т.е. когда окислителя (воздуха) больше, чем необходимо для полного сгорания топлива] предела воспламеняемости.

Ключевые слова: вихревая камера сгорания, турбулентное закрученное пламя, лазерно-индуцированная флуоресценция, панорамная термометрия, метановоздушная смесь, коэффициент перемежаемости

DOI: 10.56304/S0040363623050053

A LIF Study of the Temperature Field behind the Pilot Flame Front of a Gas Turbine Type Model Combustor

A. G. Savitskii^{a, b, *}, D. K. Sharaborin^{a, b}, V. M. Dulin^{a, b}, and D. M. Markovich^{a, b}

^a *Kutateladze Institute of Thermal Physics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, 630090 Russia*

^b *Novosibirsk State University, Novosibirsk, 630090 Russia*

**e-mail: a.savitskii@g.nsu.ru*

Abstract—The problem of reducing the amount of harmful emissions during the operation of gas turbine units (GTUs) has become especially important in recent years. In this regard, for optimizing the flow thermal and gas dynamic processes, the flow velocity and the combustion process in the GTU combustion chambers have to be studied in detail. Such optimization makes it possible not only to secure highly complete fuel combustion and stable operation of the burners in a wide range of the fuel to oxidizer ratios but also to decrease the amount of harmful emissions. The article deals with studying the temperature field structure of the pilot flame produced by a model gas turbine two-zone burner. The instantaneous temperature distribution in the flame was recorded using the method based on thermally-assisted two-line planar laser-induced fluorescence (PLIF) in exciting the $Q_1(8)$ transition band (1–0) of the $A^2\Sigma^+ - X^2\Pi$ OH hydroxyl radical electron system. The study was carried out for the case of combusting a partially agitated methane and air mixture with a significant air excess factor $\alpha = 1.54$ under standard conditions in swirl flow at the Reynolds number $Re = 1.5 \times 10^4$. The procedure of calibrating a thermally assisted PLIF system with using a thermocouple is described in detail. The article also presents instantaneous temperature distribution patterns downstream of the flame front in the range 1500–2000 K. The obtained data show that the temperature field features a significant heterogeneity due to the flame being stabilized at the central fuel flame periphery by a swirl mixing air flow. The conditional averaging of the temperature field with taking into account the alternation caused by the flame’s front motion testifies that the temperature at the front base is close to the minimal adiabatic temperature values of the preagitated mixture near the “lean” ($\alpha > 1$, i.e., when the amount of oxidizer (air) is larger than that necessary for complete fuel combustion) flammability limit.

Keywords: vortex combustion chamber, turbulent swirl flame, laser-induced fluorescence, panoramic thermometry, methane–air mixture, alternation ratio

**ВОДОПОДГОТОВКА
И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ**

**МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ
ПРИМЕСЕЙ ПО ТРАКТУ ЭНЕРГОБЛОКА В СИСТЕМАХ
ХИМИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА НА ТЕПЛОВЫХ
ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ (ОБЗОР)¹**

© 2023 г. **О. В. Егошина^а, *, С. К. Звонарева^а, Н. А. Большакова^а**

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

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

Поступила в редакцию 05.09.2022 г.

После доработки 17.11.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Обеспечение надежной и безаварийной работы энергетического оборудования на тепловых электростанциях тесно связано с совершенствованием методов диагностики и прогнозирования поведения примесей по тракту энергоблоков. Рассматриваются современное состояние и тенденции развития диагностики и прогнозирования поведения примесей с помощью систем химико-технологического мониторинга. Исследовано применение математических моделей в таких системах, с одной стороны, как способа отображения текущей информации о поведении примесей в тракте энергоблока, с другой – как способа прогнозирования их поведения. Рассмотрена возможность использовать математические модели при ухудшении качества воды, повышении концентрации гидротрикарбонатов в тракте, а также при проведении анализа качества сверхчистых вод. Представлены модели на основе измерений удельной электрической проводимости пробы воды до Н-катионитного фильтра и после него, значений рН. Выполнен анализ возможности расчетным способом определять скорость коррозионных процессов по тракту энергоблока атомных электрических станций с помощью водородного числа, уравнений закона действующих масс, материального баланса и условий нормировки. Проанализированы модели прогнозирования поведения примесей с использованием нейронных сетей. Приведены основные типы математических моделей, базирующихся на ионном составе воды, материальном балансе и нейронных сетях, применяемых в системах химико-технологического мониторинга, отмечены их преимущества и недостатки, сформулированы текущие тенденции развития данных моделей.

Ключевые слова: тепловая электростанция, водно-химический режим, система химико-технологического мониторинга, прогнозирование, диагностика, качество воды и пара, водородный показатель, удельная электрическая проводимость, материальный баланс

DOI: 10.56304/S0040363623050016

Methods for Diagnosing and Predicting the Behavior of Impurities over the Power Unit Path in the Cycle Chemistry-Monitoring Systems at Thermal Power Plants (Review)

O. V. Egoshina^{a, *}, S. K. Zvonareva^a, and N. A. Bol'shakova^a

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

*e-mail: yegoshinaov@mpei.ru

Abstract—Assurance of reliable and failure-free operation of power-generating equipment at thermal power plants is closely linked with improvement of methods for diagnosing and predicting the behavior of impurities over the process path of power units. The article discusses the current state and development prospects of techniques for diagnosing and predicting the behavior of impurities using cycle chemistry-monitoring systems. The application of mathematical models in such systems is studied, on the one hand, as a method for displaying the current information on the behavior of impurities over the power unit process path and, on the other hand, as a method for predicting their behavior. The possibility to use mathematical models when the water quality degrades, when the concentration of hydrocarbonates in the path increases, and also in analyzing the quality of ultrapure waters is examined. The article presents models based on the measurements of water sample conductivity upstream and downstream of the H-cation exchange filter, and pH values. The possibility to determine, by calculation, the rate of corrosion processes over the process path of a nuclear power plant unit using the hydrogen number, mass action law equations, material balance equations, and normalization conditions is analyzed. Impurity behavior prediction models based on neural networks are analyzed. The main types of mathematical models based on the water ionic composition, material balance, and neural networks that are used in cycle chemistry-monitoring systems are given; their advantages and drawbacks are pointed out, and current trends in the development of these models are formulated.

Keywords: thermal power plant, water chemistry, cycle chemistry-monitoring system, prediction, diagnostics, water and steam quality, hydrogen ion exponent, electrical conductivity, material balance

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПОГЛОЩЕНИЯ CO₂ МИКРОВОДОРОСЛЯМИ *Arthrospira platensis* ИЗ СМЕСИ, МОДЕЛИРУЮЩЕЙ ДЫМОВЫЕ ГАЗЫ¹

© 2023 г. М. С. Власкин^{a, b, c, *}, С. В. Киселёва^{a, d}, Н. И. Чернова^{a, d},
А. В. Григоренко^a, К. Г. Рындин^a, О. С. Попель^a, С. Я. Маланий^e,
О. В. Славкина^e, Ф. де Фариас Навес^f, В. Кумар^{b, c}

^a Объединенный институт высоких температур РАН, Ленинский просп., д. 14, Москва, 125412 Россия

^b Graphic Era Hill University, Clement Town, 566/6, Society Area, Bell Road, Dehradun, Uttarakhand state, 248002 India

^c Российский университет дружбы народов, ул. Миклухо-Маклая, д. 6, Москва, 117198 Россия

^d Научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии МГУ им. М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, д. 1, Москва, 119991 Россия

^e “Лукойл-Инжиниринг”, Покровский бульвар, д. 3 стр. 1, Москва, 109028 Россия

^f University of the State of Santa Catarina, Brazil, Florianópolis, Av. Me. Benvenuta, 2007

*e-mail: vlaskin@inbox.ru

Поступила в редакцию 17.10.2022 г.

После доработки 19.11.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Для достижения декарбонизации энергетики требуется поиск способов сокращения выбросов парниковых газов в окружающую среду, в том числе утилизации углекислого газа, образующегося при сжигании углеводородных топлив на энергетических объектах. Один из перспективных способов — это поглощение диоксида углерода биотой, причем не только наземными растениями, но и водными организмами, в том числе специально выращиваемыми микроводорослями. В данной работе проведено исследование эффективности абсорбции углекислого газа концентрацией около 6% из газовой смеси микроводорослями *Arthrospira platensis* (Nordst.) Geitl. Такая концентрация была выбрана на основе экспериментального определения содержания CO₂ в дымовых газах, образующихся на промышленных газопоршневых электростанциях. Эксперименты проводились с использованием закрытого фотобиореактора вместимостью 100 дм³, размещенного в газовой камере, позволяющей создавать повышенные концентрации CO₂ в газовой смеси. Максимальная скорость роста биомассы микроводорослей — 0.140 г/(дм³ · сут). Эффективность поглощения CO₂ микроводорослями составила 0.220 г/(дм³ · сут) по результатам определения продуктивности микроводорослей по биомассе и 0.235 г/(дм³ · сут) по результатам прямого измерения концентрации CO₂ в камере. Концентрация основных питательных веществ (гидрокарбонатов, фосфатов и нитратов) в среде за период эксперимента снизилась на 25–50%. Проведен сравнительный анализ потребления микроводорослями углерод-содержащих компонентов среды (НСО₃⁻, СО₃²⁻) при барботировании культуральных жидкостей газовой смеси с различным содержанием углекислого газа. В целом, продемонстрирована хорошая жизнеспособность микроводорослей *A. platensis* (высокое качество биомассы и высокая скорость роста) при культивировании ее в атмосфере с повышенной концентрацией (6%) CO₂.

Ключевые слова: микроводоросли, *Arthrospira platensis*, дымовые газы, фотобиореактор, газопоршневые мотор-генераторы, поглощение углекислого газа

DOI: 10.56304/S0040363623050077

Effectiveness of CO₂ Capture by *Arthrospira platensis* Microalgae from a Mixture Simulating Flue Gases

M. S. Vlaskin^{a, b, c, *}, S. V. Kiseleva^{a, d}, N. I. Chernova^{a, d}, A. V. Grigorenko^a, K. G. Ryndin^a, O. S. Popel'^a, S. Ya. Malanii^e, O. V. Slavkin^e, F. de Farias Naves^f, and V. Kumar^{b, c}

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

^b Graphic Era Hill University, Dehradun, 248002 India

^c Peoples Friendship University of Russia, Moscow, 117198 Russia

^d Research Laboratory for Renewable Energy Sources, Moscow State University, Moscow, 119991 Russia

^e Lukoil-Engineering, Moscow, 109028 Russia

^f University of the State of Santa Catarina, Florianópolis, Brazil

*e-mail: vlaskin@inbox.ru

Abstract—Decarbonization of the power industry requires the search of methods for cutting down the greenhouse gas emissions into the environment, including utilization of carbon dioxide generated during combustion of hydrocarbon fuels at power facilities. One of the promising methods is the capture of carbon dioxide by biota, not only by terrestrial plants but also by aquatic organisms, including specially cultivated microalgae. In this work, the efficiency of the capture of carbon dioxide with a concentration of approximately 6% from a gas–air mixture by *Arthrospira platensis* (Nordst.) Geitl microalgae was studied. This concentration has been selected on the basis of experimentally determining the CO₂ content in flue gases formed at industrial gas-piston power plants. The experiments were performed using a closed photobioreactor with a capacity of 100 dm³ installed in a gas chamber enabling elevated CO₂ concentrations in an air–gas environment to be created. The maximum growth rate of the microalgae biomass is 0.140 g/(dm³ · day). The effectiveness of CO₂ capture by microalgae was 0.220 g/(dm³ · day) based on the results of determination of the microalgae productivity by biomass and 0.235 g/(dm³ · day) based on the results of direct measurement of CO₂ concentration in the chamber. The concentration of the main nutrients (such as bicarbonates, phosphates, and nitrates) in the medium decreased by 25–50% during the experiment period. A comparative analysis of the consumption of carbon-containing components of the medium (HCO₃⁻, CO₃²⁻) by microalgae during the bubbling of cultural liquids with a gas–air mixture with different carbon dioxide content was performed. In general, good viability of *A. platensis* microalgae (high quality of biomass and high rate of its growth) was demonstrated when it was cultivated in an atmosphere with a high concentration (6%) of CO₂.

Keywords: microalgae, *Arthrospira platensis*, flue gases, photobioreactor, gas-piston engine-generators, carbon dioxide capture

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ НА БАЗЕ КОБАЛЬТИТОВ
БАРИЯ И СТРОНЦИЯ, СИНТЕЗИРОВАННЫХ
НА СОЛНЕЧНОЙ ПЕЧИ

© 2023 г. М. С. Пайзуллаханов^a*, О. Р. Парпиев^a, У. Р. Саломов^b, Ж. З. Шерматов^a,
Г. Ш. Каримова^c, С. С. Сабиров^d

^a Институт материаловедения Академии наук Республики Узбекистан,
ул. Чингиза Айтматова, д. 26, г. Ташкент, 100085 Республика Узбекистан

^b Ферганский политехнический институт, Ферганская ул., д. 86, г. Фергана, 150107 Республика Узбекистан

^c Национальный научно-исследовательский институт возобновляемых источников энергии,
ул. Чингиза Айтматова, д. 26, г. Ташкент, 100085 Республика Узбекистан

^d Ферганский филиал Ташкентского университета информационных технологий,
Ферганская ул., д. 100, г. Фергана, 150107 Республика Узбекистан

*e-mail: fayz@bk.ru

Поступила в редакцию 12.10.2022 г.

После доработки 16.11.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Изучены материалы на основе перовскитовых структур кобальтитовых составов стронция $\text{SrCoO}_{3-\delta}$ и бария $\text{BaCoO}_{3-\delta}$, полученные синтезом из расплава стехиометрической смеси оксида кобальта с карбонатами стронция $\text{Co}_2\text{O}_3 + \text{SrCO}_3$ или бария $\text{Co}_2\text{O}_3 + \text{BaCO}_3$ в потоке концентрированного солнечного излучения высокой (150 Вт/см^2) плотности на солнечной печи с последующей закалкой в воде и спеканием при температуре 1300 К. Гексагональные кобальтиты бария и стронция имели развитую тонкую микроструктуру (зерна в виде плотно упакованных многогранников разной формы размером 2–5 мкм), полупроводниковый характер электрической проводимости и низкий коэффициент термического расширения (в среднем $12.6 \times 10^{-6} \text{ К}^{-1}$) в интервале температур 300–1100 К. Изменение электрического сопротивления материалов обусловлено высоким сродством ионов кобальта к кислороду, вызывающим сорбцию кислорода и, как следствие, приводящим к изменениям электронной структуры ионов кобальта в результате зарядовых переходов $2\text{Co}^{3+} = \text{Co}^{2+} + \text{Co}^{4+}$. Это обстоятельство указывает на возможность использования материалов на основе кобальтитов бария и стронция в качестве селективных абсорберов, кислородных мембран или катодных материалов для изготовления твердооксидных топливных элементов при производстве электрической энергии, а также материалов для хранения водорода.

Ключевые слова: кобальтиты бария и стронция, солнечная печь, плавление, расплав, закалка, спекание, керамика, твердооксидные топливные элементы, абсорберы кислорода, зарядовые переходы

DOI: 10.56304/S0040363623050041

Renewable Energy Sources, Hydropower Materials for Fuel Cells Based on Barium and Strontium Cobaltites Synthetized on a Solar Furnace

M. S. Paizullahanov^{a,*}, O. R. Parpiev^a, U. R. Salomov^b, Zh. Z. Shermatov^a,
G. Sh. Karimov^c, and S. S. Sabirov^d

^a *Institute of Materials Science, Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan,
Tashkent, 100085 Republic of Uzbekistan*

^b *Fergana Polytechnic Institute, Fergana, 150107 Republic of Uzbekistan*

^c *National Research Institute of Renewable Energy Sources, Tashkent, 100085 Republic of Uzbekistan*

^d *Fergana Branch of the Tashkent University of Information Technologies, Fergana, 150107 Republic of Uzbekistan*
**e-mail: fayz@bk.ru*

Abstract—Study was carried out on materials based on perovskite structures of cobaltite compositions of strontium $\text{SrCoO}_{3-\delta}$ and barium $\text{BaCoO}_{3-\delta}$, obtained by synthesis from a melt of a stoichiometric mixture of cobalt oxide with strontium carbonates $\text{Co}_2\text{O}_3 + \text{SrCO}_3$ or barium $\text{Co}_2\text{O}_3 + \text{BaCO}_3$ in a stream of high (150 W/cm^2) density concentrated solar radiation in a solar furnace, followed by quenching in water and sintering at a temperature of 1300 K. Hexagonal barium and strontium cobaltites had a developed fine microstructure (grains in the form of densely packed polyhedrons of various shapes 2–5 μm in size), a semiconductor character of electrical conductivity, and a low thermal expansion coefficient (average $12.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) in the temperature range 300–1100 K. The change in the electrical resistance of materials is due to the high affinity of cobalt ions for oxygen, which causes oxygen sorption and, as a result, leads to changes in the electronic structure of cobalt ions, as a result of charge transitions $2\text{Co}^{3+} = \text{Co}^{2+} + \text{Co}^{4+}$. This circumstance indicates the possibility of using materials based on barium and strontium cobaltites as selective absorbers, oxygen membranes, or cathode materials for the manufacture of solid-oxide fuel cells in the production of electrical energy as well as materials for hydrogen storage.

Keywords: barium and strontium cobaltites, solar furnace, melting, hardening, sintering, ceramics, solid-oxide fuel cells, oxygen absorbers, charge transitions

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

**ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ ГАЗОДИНАМИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ В ПОСЛЕДНИХ СТУПЕНЯХ ЦНД
С ПОМОЩЬЮ СОВРЕМЕННОЙ СИСТЕМЫ ТРАВЕРСИРОВАНИЯ
ПОТОКА ПРИ ИССЛЕДОВАНИЯХ НА НАТУРНОМ СТЕНДЕ**

© 2023 г. А. В. Москаленко^а, *, А. М. Тюхтяев^а, Д. М. Ковалёв^а, А. Г. Долганов^а,
А. А. Ивановский^а, В. А. Черников^б, В. А. Рассохин^б

^а АО «Силовые машины – Ленинградский металлургический завод»,
ул. Ватутина, д. 3, лит. А, Санкт-Петербург, 195009 Россия

^б Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Политехническая ул., д. 29, Санкт-Петербург, 195251 Россия

*e-mail: moskalenko_av@power-m.ru

Поступила в редакцию 06.10.2022 г.

После доработки 11.12.2022 г.

Принята к публикации 23.12.2022 г.

Показана необходимость траверсирования газодинамических параметров потока при отработке новых последних ступеней цилиндров низкого давления (ЦНД) паровых турбин. Изложены особенности измерения давлений с помощью зондов пневмометрическим методом в последних ступенях, работающих на влажно-паровой (двухфазной) среде, при забивании конденсатом приемных отверстий зондов и пневмолиний. Обоснован переход на малогабаритные насадки зондов, обладающие, по сравнению с крупногабаритными, большей точностью измерений. Предложен универсальный алгоритм периодической продувки пневмолиний атмосферным воздухом для различных зондов с приемными отверстиями определенных диаметров. Универсальный алгоритм заключается в добавлении в систему подпрограммы, отвечающей за автоматический контроль выдержки времени после закрытия продувочных клапанов перед измерениями в точке траверсирования. При этом исключаются неполнота удаления остаточного продувочного воздуха с конденсатом из пневмолиний и избыточная выдержка времени перед измерениями. Алгоритм реализован при усовершенствовании ранее разработанной системы траверсирования. Повышена точность измерения давлений и меридиональных углов потока благодаря применению высокоточных преобразователей на каждом измерительном канале зонда при диапазоне абсолютного давления 0–30 кПа с точностью 0.05% верхнего предела измерений. Сокращено время на отработку результатов траверсирования за счет добавления в систему трех измерительных каналов, функционирующих синхронно с зондом и характеризующих режим работы турбины. Создана современная система для траверсирования в межвенцовом зазоре последних ступеней. Результаты данной работы применяются при исследованиях отсека ЦНД перспективной паровой турбины на натурном стенде АО «Силовые машины».

Ключевые слова: паровая турбина, цилиндр низкого давления, влажно-паровой поток, последняя ступень, зонд, пневмометрический метод измерений, система траверсирования, периодическая продувка, автоматизированный контроль выдержки времени после продувки, выборка

DOI: 10.56304/S004036362305003X

Improving the Accuracy of Measurements of Gas-Dynamic Parameters in LPC Last Stages in Studies Using Modern Flow Traversing System on a Full-Scale Test Bench

A. V. Moskalenko^{a, *}, A. M. Tyukhtyaev^a, D. M. Kovalev^a, A. G. Dolganov^a, A. A. Ivanovskii^a,
V. A. Chernikov^b, and V. A. Rassokhin^b

^a JSC Power Machines—Leningradsky Metallichesky Zavod, St. Petersburg, 195009 Russia

^b Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, 195251 Russia

*e-mail: moskalenko_av@power-m.ru

Abstract—The need of traversing the flow gas-dynamic parameters, when trying out new last stages of a steam turbine’s low-pressure cylinders (LPC), is shown. The specific features of pressure measurements according to the pneumometric method by means of probes in the last stages operating in a wet steam (two-phase) medium, with the probe’s receiving holes and pneumatic lines becoming blocked with condensate, are shown. The changeover for using small-size probe heads featuring better measurement accuracy in comparison with large-size heads is substantiated. A universal algorithm for purging the pneumatic lines periodically with atmospheric air for various probes with receiving holes of certain diameters is proposed. The universal algorithm is obtained by supplementing the system with a subroutine that automatically monitors the time delay after closing the purging valves prior to carrying out measurements at the traversing point. At that, excluded are incomplete removal of residual purging air with condensate from the pneumatic lines and excessive time delay before measurements. The algorithm is implemented in improving the previously developed traversing system. Better accuracy of measuring the pressures and flow meridian angles is achieved owing to the use of high-precision transducers in each of the probe measurement channels with the absolute pressure range 0–30 kPa with the accuracy equal to 0.05% of the upper measurement limit. The time taken to process the traversing results is decreased by adding three measurement channels to the system, which operate synchronously with the probe and characterize the turbine operation mode. A modern system for traversing the flow in the gap between blade rings of the last stages has been developed. The results of this development are used in studying the advanced steam turbine LPC compartment on the full-scale test bench at JSC Power Machines.

Keywords: steam turbine, low-pressure cylinder, wet steam flow, last stage, probe, pneumometric measurement method, traversing system, periodic purging, automatic monitoring of time delay after purging, sampling