

# **СОДЕРЖАНИЕ**

---

---

**Номер 4, 2023**

---

---

## **Паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование**

Особенности разработки и функционирования многоступенчатых  
пароструйных эжекторов

*К. Э. Аронсон, А. Ю. Рябчиков, Н. В. Желонкин, Д. В. Брезгин,  
А. Л. Демидов, Д. Ю. Балакин*

5

Сравнительный анализ энергетических характеристик воздухоудаляющих  
устройств конденсаторов турбоустановок

*Ю. Г. Сухоруков, Г. И. Казаров, В. Д. Гаев, Ю. В. Смолкин, Е. Н. Кулаков*

16

## **Возобновляемые источники энергии, гидроэнергетика**

Российская геотермальная электроэнергетика: состояние и перспективы развития

*В. А. Бутузов, Г. В. Томаров*

23

## **Водоподготовка и водно-химический режим**

Очистка водных сред от примесей оксидов железа методом высокоградиентной  
магнитной фильтрации (обзор)

*Б. А. Гусев, А. А. Ефимов, Л. Н. Москвин, В. В. Панчук*

33

## **Атомные электростанции**

Валидация тяжелоаварийного модуля интегрального кода ЕВКЛИД/V2  
на базе экспериментов по разрушению имитаторов одиночных твэлов и ТВС

*Т. А. Сайкина, Э. В. Усов, В. И. Чухно, П. Д. Лобанов,  
С. И. Лежнин, Н. А. Прибатурин*

45

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

Исследование свойств золы лузги подсолнечника после ее обработки  
различными методами торрефикации

*А. В. Небываев, О. Ю. Милованов, Д. В. Климов, С. Н. Кузьмин,  
А. В. Рыженков, В. А. Дубина, Р. В. Завиженец*

55

## **Тепло- и массообмен, свойства рабочих тел и материалов**

Моделирование процесса объемной конденсации при истечении парогазовой смеси  
через сопло методами CFD с применением специального расчетного модуля

*А. А. Сидоров, А. К. Ястребов*

65

## **Охрана окружающей среды**

Проблемы гидродинамики и теплообмена в связанных между собой реакторах  
с кипящим слоем для улавливания  $\text{CO}_2$  и получения водорода

*Г. А. Рябов, О. М. Фоломеев*

78

---

---

# **Contents**

---

---

**Vol. 70, No. 4, 2023**

---

---

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

Features of the Development and Operation of Multistage Steam Jet Ejectors

*K. E. Aronson, A. Yu. Ryabchikov, N. V. Zhelonkin, D. V. Brezgin,  
A. L. Demidov, and D. Yu. Balakin*

5

A Comparative Analysis of the Energy Performance Characteristics  
of Turbine Condenser Evacuation Devices

*Yu. G. Sukhorukov, G. I. Kazarov, V. D. Gaev, Yu. V. Smolkin, and E. N. Kulakov*

16

---

## **Renewable Energy Sources and Hydropower**

Russian Geothermal Electric Power Industry: State and Development Prospects

*V. A. Butuzov and G. V. Tomarov*

23

---

## **Water Treatment and Water Chemistry**

Cleaning Aqueous Media from Iron Oxides by High-Gradient Magnetic Filtration (Review)

*B. A. Gusev, A. A. Efimov, L. N. Moskvin, and V. V. Panchuk*

33

---

## **Nuclear Power Plants**

Validation of the Severe Accident Module of the EUCLIDE/V2 Integral Code on the Basis  
of Experiments on a Failure of Simulators of Single Fuel Rods and Fuel Assemblies

*T. A. Saikina, E. V. Usov, V. I. Chukhno, P. D. Lobanov,  
S. I. Lezhnin, and N. A. Pribaturin*

45

---

## **Steam Boilers, Power Plant Fuel, Burner Units, and Boiler Auxiliary Equipment**

Studying the Sunflower Husk Ash Properties after Husk Treatment Using Various  
Torrefaction Methods

*A. V. Nebyvaev, O. Yu. Milovanov, D. V. Klimov, S. N. Kuz'min,  
A. V. Ryzhenkov, V. A. Dubina, and R. V. Zavizhenets*

55

---

## **Heat and Mass Transfer and Properties of Working Fluids and Materials**

Simulation of Bulk Condensation in a Flow of a Vapor–Gas Mixture through a Nozzle  
by CFD-Methods Using a Special Computational Module

*A. A. Sidorov and A. K. Yastrebov*

65

---

## **Environmental Protection**

Problems of Hydrodynamics and Heat Transfer in Interconnected Bed Reactors for CO<sub>2</sub> Capture  
and Obtaining Hydrogen

*G. A. Ryabov and O. M. Folomeev*

78

---

---

ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,  
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ  
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ  
МНОГОСТУПЕНЧАТЫХ ПАРОСТРУЙНЫХ ЭЖЕКТОРОВ

© 2023 г. К. Э. Аронсон<sup>a</sup>, \*, А. Ю. Рябчиков<sup>a</sup>, Н. В. Желонкин<sup>a</sup>, Д. В. Брезгин<sup>a</sup>,  
А. Л. Демидов<sup>a</sup>, Д. Ю. Балакин<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Уральский федеральный университет, Уральский энергетический институт,  
ул. Мира, д. 19, г. Екатеринбург, 620002 Россия

\*e-mail: k.e.aronson@urfu.ru

Поступила в редакцию 08.09.2022 г.

После доработки 12.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Представлены результаты исследований геометрических характеристик многоступенчатых пароструйных эжекторов. Проанализированы различные подходы специалистов заводов-изготовителей к оптимизации конструкций многоступенчатых эжекторов с учетом степеней повышения давления и критических диаметров сопл по ступеням эжектора. Выявлено, что подход к распределению геометрических и технологических параметров, таких как диаметры сопл и камер смешения, а также квадраты их отношений по ступеням эжектора для теплофикационных и конденсационных турбин может быть различным. Для эжекторов теплофикационных турбин диаметры критических сечений сопл уменьшаются при возрастании номера ступени, для конденсационных – увеличиваются. Показано, что в многоступенчатых эжекторах имеется связь между распределением расходов пара по ступеням и основным геометрическим параметром, характеризующим отношение площади сечения цилиндрической части камеры смешения и критического сечения сопла. Представлены результаты испытаний разработанных авторами трех- и двухступенчатого эжекторов с выносными охладителями. Основной трехступенчатый эжектор установлен в схеме отсоса паровоздушной смеси из конденсатора турбины, двухступенчатый эжектор с предвключенным охладителем предназначен для отсоса воздуха из теплофикационной установки турбины. Эжектор теплофикационной установки включен в линию основного конденсата после эжекторов. Отвод конденсата пара из эжектора производится в конденсатосборник первого подогревателя сетевой воды. Многоступенчатые эжекторы оснащены расширенной системой измерения давления по тракту паровоздушной смеси: в приемной камере, после диффузора и в промежуточном охладителе. Показано, что в охладителях (между диффузором ступени и приемной камерой следующей ступени) эжекторов наблюдается повышение давления паровоздушной смеси, которое нельзя объяснить очевидным диффузорным эффектом – возрастанием давления при торможении потока. При анализе режимов работы многоступенчатых эжекторов выявлена особенность их саморегулирования с возможностью уменьшения степени сжатия паровоздушной смеси в одной из ступеней.

**Ключевые слова:** многоступенчатые эжекторы, геометрические характеристики, перепад давления, конденсатор, камера смешения, охладитель, паровоздушная смесь

DOI: 10.56304/S004036362304001X

# **Features of the Development and Operation of Multistage Steam Jet Ejectors**

**K. E. Aronson<sup>a</sup>, \*, A. Yu. Ryabchikov<sup>a</sup>, N. V. Zhelonkin<sup>a</sup>, D. V. Brezgin<sup>a</sup>,  
A. L. Demidov<sup>a</sup>, and D. Yu. Balakin<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup> Yeltsin Ural Federal University, Ural Energy Institute, Yekaterinburg, 620002 Russia*

*\*e-mail: kearonson@urfu.en*

**Abstract**—The results of studies into geometric characteristics for multistage steam jet ejectors are presented. Various manufacturers' approaches during multistage ejector design optimization are analyzed accounting for the pressure increase levels' distribution and the nozzles' critical diameters of the ejector stages. It was found that, for cogeneration and condensing turbines, an approach to the distribution of geometric and technological parameters over the ejector stages can vary. For cogeneration turbines, the diameters of the nozzles' critical sections decrease with an increase of stage number, while they increase for condensing turbines. It is shown that there is a correlation in multistage ejectors between the distribution of steam flow rates between stages and the main geometric parameter of the ejector's first stage. The test results of three- and two-stage ejectors with outward coolers designed by the authors are presented. The main three-stage ejector is employed in the scheme of steam-air mixture evacuation from the turbine condenser, and the two-stage ejector with a precooler is designed to evacuate air from the scheme of the turbine water-heating plant. The ejector of the water-heating plant is connected to the main condensate line behind the main ejectors. Steam condensate is removed from the ejector to the condensate pot of the first network water heater. Multistage ejectors are equipped with an extended scheme for pressure measuring along the ejector' steam-air path: in the intake chamber, after the diffuser, and in the intercooler. It is shown that an increase in the pressure of the steam-air mixture, which cannot be explained by the obvious diffuser effect, that is, by the pressure increase as flow decelerates, is observed in the ejectors' coolers (between the stage diffuser and the intake chamber of the next stage). When analyzing the operating modes of multistage ejectors, the possibility of their self-regulation is revealed when the steam-air mixture is not compressed in one of the stages.

**Keywords:** multistage ejector, geometric characteristics, pressure difference, condenser, chamber, cooler, steam-air mixture

ПАРОТУРБИННЫЕ, ГАЗОТУРБИННЫЕ,  
ПАРОГАЗОВЫЕ УСТАНОВКИ  
И ИХ ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

---

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ВОЗДУХОУДАЛЯЮЩИХ УСТРОЙСТВ  
КОНДЕНСАТОРОВ ТУРБОУСТАНОВОК

© 2023 г. Ю. Г. Сухоруков<sup>a</sup>, Г. И. Казаров<sup>b</sup>, В. Д. Гаев<sup>c</sup>, Ю. В. Смолкин<sup>a</sup>, Е. Н. Кулаков<sup>a</sup>, \*

<sup>a</sup>ОАО “Научно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова” (НПО ЦКТИ), Атаманская ул., д. 3/6, Санкт-Петербург, 191167 Россия

<sup>b</sup>АО “Концерн Росэнергоатом”, Ферганская ул., д. 25, Москва, 109507 Россия

<sup>c</sup>АО “Силовые машины”, ул. Ватутина, д. 3, литера А, Санкт-Петербург, 195009 Россия

\*e-mail: KulakovEN@ckti.ru

Поступила в редакцию 09.08.2022 г.

После доработки 07.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Эффективная работа конденсаторов турбин является важным условием экономичной и надежной эксплуатации турбоустановок тепловых и атомных электрических станций. Присутствие неконденсирующихся газов в межтрубном пространстве конденсаторов в значительной степени влияет на интенсивность теплообмена и, следовательно, на давление в конце процесса расширения пара в турбине. Поэтому важно обеспечить их постоянное удаление с наименьшими затратами энергии. Рассмотрены принципы работы, эксплуатационные и расчетные характеристики воздухоудаляющих устройств конденсаторов турбоустановок ТЭС и АЭС: водоструйных и пароструйных эжекторов, водокольцевых насосов. Проведено их сопоставление по критериям энергетической эффективности. Показаны условия обеспечения энергетической эффективности водоструйных эжекторов. На основании результатов испытаний водоструйных эжекторов и водокольцевых насосов показано отсутствие существенных преимуществ водокольцевых насосов при их применении в качестве устройств для удаления неконденсирующихся газов из конденсаторов паровых турбин. Приведены характеристики пароструйных эжекторов, используемых на ТЭС и АЭС России. Введено понятие энергетического КПД пароструйного эжектора. Показаны резервы повышения энергетической эффективности пароструйных эжекторов. По результатам расчетов видно, что для энергоблоков АЭС-2006, ВВЭР-ТОИ применение пароструйных эжекторов энергетически более эффективно, чем водокольцевых насосов. Кроме того, водокольцевые насосы существенно дороже и значительно сложнее в эксплуатации. Учитывая многолетний положительный опыт применения водоструйных и пароструйных эжекторов на ТЭС и АЭС и их эффективность, рекомендуется рассматривать их в качестве устройств воздухоудаления для перспективных турбоустановок АЭС.

**Ключевые слова:** пароструйный эжектор, водоструйный эжектор, водокольцевой насос, неконденсирующиеся газы, эффективность, коэффициент эжекции

**DOI:** 10.56304/S0040363623040082

# A Comparative Analysis of the Energy Performance Characteristics of Turbine Condenser Evacuation Devices

Yu. G. Sukhorukov<sup>a</sup>, G. I. Kazarov<sup>b</sup>, V. D. Gaev<sup>c</sup>,  
Yu. V. Smolkin<sup>a</sup>, and E. N. Kulakov<sup>a</sup>, \*

<sup>a</sup> OAO Polzunov Research and Production Association for Investigation and Design of Power-Generating Equipment (OAO NPO TsKTI), St. Petersburg, 191167 Russia

<sup>b</sup> AO Concern Rosenergoatom, Moscow, 109507 Russia

<sup>c</sup> AO Power Machines, St. Petersburg, 195009 Russia

\*e-mail: KulakovEN@ckti.ru

**Abstract**—Efficient operation of turbine condensers is an important prerequisite for economically efficient and reliable operation of the turbine units at thermal- and nuclear power plants. Noncondensable gases entering the condenser shell space significantly affect the heat transfer intensity and, hence, the pressure at the end of the steam expansion process in the turbine. Therefore, it is important to take measures for constantly removing these gases with the minimal energy expenditures. The article considers the operation principles and operational and design characteristics of air evacuation devices used in the condensers of thermal- and nuclear power plant turbine condensers, such as water jet and steam jet ejectors, and liquid-packed ring pumps. Comparison of these devices in terms of their energy performance criteria is carried out. Conditions for ensuring adequate energy performance of water jet ejectors are shown. Based on the results obtained from the tests of water jet ejectors and liquid-packed ring pumps, it is shown that liquid-packed ring pumps do not have any essential advantages in using them as devices for evacuating noncondensable gases from steam turbine condensers. The characteristics of steam jet ejectors used at Russian thermal and nuclear power plants are given. The notion of a steam jet ejector energy efficiency is introduced. The reserves for improving the energy performance of steam jet ejectors are shown. It can be seen from the numerical analysis results that the use of steam jet ejectors is more energy efficient for the power units of nuclear power plants constructed on the basis of the AES-2006 and VVER-TOI conceptual designs than the use of liquid-packed ring pumps. In addition, liquid-packed ring pumps are essentially more costly and complex in operation. In view of a long-standing positive experience of using water jet and steam jet ejectors at thermal and nuclear power plants and their good performance, it is recommended to consider them as air evacuation devices for advanced nuclear power plant turbine units.

**Keywords:** steam jet ejector, water jet ejector, liquid-packed ring pump, noncondensable gases, efficiency, air entrainment ratio

---

ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,  
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА

---

РОССИЙСКАЯ ГЕОТЕРМАЛЬНАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА:  
СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

© 2023 г. В. А. Бутузов<sup>a</sup>, \*, Г. В. Томаров<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Кубанский государственный аграрный университет им. И. Т. Трубилина,  
ул. Калинина, д. 13, г. Краснодар, 350044 Россия

<sup>b</sup>ООО “Геотерм-М”, ул. Лефортовский Вал, д. 24, Москва, 111250 Россия

\*e-mail: ets@nextmail.ru

Поступила в редакцию 15.09.2022 г.

После доработки 09.11.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Представлены данные ресурсной базы геотермальных пароводяных месторождений России с их локализацией на полуострове Камчатка и Курильских островах утвержденными запасами 285,5 кг/с и добычей в 2020 г. 13 млн т. Перспективные запасы пароводяной смеси оценены до 1100 МВт по объемному методу и при естественной разгрузке парогидротерм. Приведены результаты исследований Института вулканологии и сейсмологии РАН и Института проблем геотермии и возобновляемой энергии Объединенного института высоких температур РАН. Оценены перспективы исследований по бурению скважин у подножия вулканов полуострова Камчатка для получения флюидов со сверхкритическими параметрами (более 450°C, 25 МПа). Описана деятельность АО “Тепло Земли” по добыче пароводяной смеси на полуострове Камчатка. Приведены хронология и описание технических решений по ГеоЕС в России. Представлены основные технические характеристики, тепловые схемы и результаты эксплуатации Паужетской, Верхне-Мутновской и Мутновской ГеоЕС установленной мощностью 74 МВт и выработкой электрической энергии в 2020 г. 428 ГВт · ч. Анализируются результаты современных российских исследований по бинарным геотермальным энергоблокам с теплоносителем температурой от 120 до 180°C, комбинированию бинарных энергоблоков с водородным перегревом геотермального пара, расширению Мутновской ГеоЕС энергоблоками прямого и комбинированного циклов с повышением мощности на 50–63 МВт. Предложены увеличение целевого финансирования, сооружение опытных установок, демонстрационных объектов, создание Центра компетенций геотермальной энергетики.

**Ключевые слова:** геотермальные месторождения, пароводяная смесь, геотермальные ресурсы, геотермальная электростанция, паровые турбины, бинарные энергоблоки, скважины, сепараторы, реинжекция, водородно-кислородные парогенераторы

# Russian Geothermal Electric Power Industry: State and Development Prospects

V. A. Butuzov<sup>a</sup>, \* and G. V. Tomarov<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Trubilin Kuban State Agrarian University, Krasnodar, 350044 Russia*

<sup>b</sup> *OOO Geoterm-M, Moscow, 111250 Russia*

\*e-mail: ets@nextmail.ru

**Abstract**—The article presents data on the resource base of Russia's geothermal steam–water fields located in the Kamchatka Peninsula and Kuril Islands with the approved reserves of 285.5 kg/s and production in 2020 amounting to 13 million t. The prospective steam–water mixture reserves are estimated at up to 1100 MW according to the volume method and with the natural discharge of steam-hydrotherms. The results of studies accomplished by the Institute of Volcanology and Seismology, Russian Academy of Sciences and the Institute of Geothermy and Renewable Energy Problems of the Joint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences, are given. The prospects of explorations on drilling wells at the foot of volcanoes in the Kamchatka Peninsula for obtaining fluids with supercritical parameters (above 450°C and 25 MPa) are estimated. The activity conducted by AO Teplo Zemli (Heat of the Earth) on producing a steam–water mixture in the Kamchatka Peninsula is described. The chronology and description of technical solutions on geothermal power plants in Russia are given. The key technical characteristics, thermal process cycle diagrams, and operation results of the Pauzhetka, Verkhne-Mutnovsky, and Mutnovsky geothermal power plants (GeoPPs) with the total installed capacity equal to 74 MW and amount of electricity production in 2020 equal to 428 GW h are presented. The article analyzes the results of modern studies carried out in Russia on binary geothermal power units with a geothermal fluid having a temperature from 120 to 180°C, on combining binary power units with hydrogen-assisted geothermal steam superheating and expanding the Mutnovsky GeoPP with direct-cycle and combined cycle power units with increasing the plant capacity by 50–63 MW. Proposals on increasing the target financial support, constructing experimental installations and demonstration facilities, and establishing a center for geothermal power engineering competences are suggested.

**Keywords:** geothermal fields, steam–water mixture, geothermal resources, geothermal power plant, steam turbines, binary power units, wells, separators, reinjection, hydrogen-oxygen steam generators

---

ВОДОПОДГОТОВКА  
И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ

---

ОЧИСТКА ВОДНЫХ СРЕД ОТ ПРИМЕСЕЙ  
ОКСИДОВ ЖЕЛЕЗА МЕТОДОМ ВЫСОКОГРАДИЕНТНОЙ  
МАГНИТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ (ОБЗОР)

© 2023 г. Б. А. Гусев<sup>a</sup>, А. А. Ефимов<sup>a</sup>, Л. Н. Москвин<sup>b</sup>, В. В. Панчук<sup>b, \*</sup>

<sup>a</sup>Научно-исследовательский технологический институт им. А.П. Александрова,  
Копорское шоссе, д. 72, г. Сосновый Бор, Ленинградская обл., 188540 Россия

<sup>b</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Институт химии,  
Университетский просп., д. 26, Петергоф, Санкт-Петербург, 198504 Россия

\*e-mail: vitpan@mail.ru

Поступила в редакцию 08.09.2022 г.

После доработки 27.09.2022 г.

Принята к публикации 28.09.2022 г.

Изучен опыт разработки методов магнитной фильтрации (МФ) для очистки различных водных сред от примесей оксидов железа. Проведен анализ причин успехов и неудач предыдущих исследователей в создании методов и средств магнитной фильтрации. Рассмотрены теоретические предпосылки новых технических решений для высокоградиентных магнитных фильтров (ВГМФ). Выполнены лабораторные эксперименты на высокоградиентном фильтре со сверхпроводящей магнитной системой с использованием модельных растворов для определения базовых характеристик метода. Установлено, что для расчета необходимого градиента напряженности магнитного поля достаточно применить в качестве источника магнитного поля постоянные магниты на основе редкоземельных элементов (NdFeB, SmCo). Разработаны конструкции высокоградиентных фильтров с системами на базе постоянных магнитов, а также программа численного моделирования процесса обработки частиц продуктов коррозии различного фазового и дисперсного состава в высокоградиентном магнитном поле для этих фильтров. Представлены результаты испытаний ВГМФ разной конструкции по очистке воды бассейнов выдержки отработавших тепловыделяющих сборок (ОТВС) на полномасштабном стенде – прототипе транспортной ядерной энергетической установки (ЯЭУ) и реакторной установки ВВЭР-440. Проведено сравнение эффективности очистки теплоносителя I контура от активированных продуктов коррозии ионообменным и высокоградиентным магнитным фильтрами при выполнении безреагентной дезактивации оборудования. Осуществлена сертификация инновационной конструкции ВГМФ с системой на постоянных магнитах, который можно использовать для очистки воды систем теплоснабжения городского коммунального хозяйства от продуктов коррозии.

**Ключевые слова:** водный теплоноситель, магнитная фильтрация, продукты коррозии железа, фазовый состав, высокоградиентный магнитный фильтр, постоянные магниты, фильтрующая матрица

**DOI:** 10.56304/S0040363623040033

# Cleaning Aqueous Media from Iron Oxides by High-Gradient Magnetic Filtration (Review)

B. A. Gusev<sup>a</sup>, A. A. Efimov<sup>a</sup>, L. N. Moskvin<sup>b</sup>, and V. V. Panchuk<sup>b, \*</sup>

<sup>a</sup> Aleksandrov Research Technological Institute, Sosnovyi Bor, Leningrad oblast, 188540 Russia

<sup>b</sup> St. Petersburg State University, Institute of Chemistry, Peterhof, St. Petersburg, 198504 Russia

\*e-mail: vitpan@mail.ru

**Abstract**—The experience of developing methods of magnetic filtration (MF) for the purification of various aqueous media from impurities of iron oxides has been studied. An analysis of the reasons for the successes and failures of previous researchers in the development of methods and means of magnetic filtration has been carried out. Theoretical prerequisites for new technical solutions for high-gradient magnetic filters (HGMF) are considered. Laboratory experiments were performed on a high-gradient filter with a superconducting magnetic system using model solutions to determine the basic characteristics of the method. It has been established that it is sufficient to use permanent magnets based on rare earth elements (NdFeB, SmCo) as a magnetic field source to calculate the required magnetic field strength gradient. Designs of high-gradient filters with systems based on permanent magnets, as well as a program for numerical simulation of the process of processing particles of corrosion products of various phase and dispersed composition in a high-gradient magnetic field for these filters, have been developed. The tests results of VGMF of various designs for water treatment of spent fuel assemblies' (SFA) storage pools on a full-scale test bench—a prototype of a transport nuclear power plant (NPP) and a VVER-440 reactor plant—are presented. The efficiency of purification of the coolant of the first circuit from activated corrosion products by ion-exchange and high-gradient magnetic filters was compared when performing reagent-free decontamination of equipment. Certification of the innovative design of the VGMF with a system based on permanent magnets, which can be used to purify the water of heat supply systems of urban utilities from corrosion products, was carried out.

**Keywords:** water coolant, magnetic filtration, iron-corrosion products, phase composition, high-gradient magnetic filter, permanent magnets, filter matrix

## ВАЛИДАЦИЯ ТЯЖЕЛОАВАРИЙНОГО МОДУЛЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО КОДА ЕВКЛИД/V2 НА БАЗЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РАЗРУШЕНИЮ ИМИТАТОРОВ ОДИНОЧНЫХ ТВЭЛОВ И ТВС<sup>1</sup>

© 2023 г. Т. А. Сайкина<sup>a</sup>, Э. В. Усов<sup>a</sup> \*, В. И. Чухно<sup>a</sup>, П. Д. Лобанов<sup>a</sup>,  
С. И. Лежнин<sup>a</sup>, Н. А. Прибатурина<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук,  
просп. Академика Лаврентьева, д. 1, г. Новосибирск, 630090 Россия

\*e-mail: usovev@gmail.com

Поступила в редакцию 24.08.2022 г.

После доработки 21.09.2022 г.

Принята к публикации 28.09.2022 г.

При разработке расчетных кодов для моделирования аварийных процессов в реакторной установке необходимо выполнять валидацию заложенных в них моделей. В настоящей работе для валидации созданного в ИБРАЭ РАН интегрального кода ЕВКЛИД/V2 в части моделирования тяжелых аварий с разрушением активной зоны реакторов на быстрых нейтронах (РУ БН) с жидкокометаллическим охлаждением использованы эксперименты по плавлению оболочки имитаторов тепловыделяющих элементов (твэлов), проведенные в Институте теплофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН), и SCARABEE BE + 3, выполненные в Комиссариате по атомной энергии (CEA) во Франции. В процессе исследований в ИТ СО РАН были измерены температуры поверхности оболочки при отсутствии охлаждения имитатора твэла жидкокометаллическим теплоносителем, что характерно для аварий с мгновенной блокировкой проходного сечения тепловыделяющей сборки (ТВС) и аварий с потерей расхода для РУ типа БН-1200М. Для создания таких условий эксперименты с твэлами проводили в атмосфере аргона при комнатной температуре ( $25^{\circ}\text{C}$ ) и давлении около  $10^5$  Па, а температуру поверхности имитатора твэла регистрировали пирометром. Во Франции серию экспериментов SCARABEE BE + 3 выполняли на реакторе SCARABEE в целях изучения последствий гипотетической аварии с полной мгновенной блокировкой проходного сечения в РУ БН с натриевым теплоносителем. Для определения влияния неопределенности исходных данных проводились многовариантные расчеты. При валидации сравнивались расчетные и экспериментальные значения температур в диапазоне от 500 до 1800 К (эксперименты ИТ СО РАН). Погрешность расчетов при этом не превышала 200 К. Для экспериментов на реакторе SCARABEE это значение не превышало 88 К для оболочек твэлов и 100 К для теплоносителя. Полученные данные будут использованы для оценки неопределенности расчетов при моделировании тяжелых аварий на РУ БН с термическим разрушением твэлов.

**Ключевые слова:** валидация, реакторы на быстрых нейтронах, тепловыделяющие элементы, тепловыделяющая сборка, ядерное топливо, натриевый теплоноситель, ЕВКЛИД/V2, SAFR, HYDRA-IBRAE/LM

DOI: 10.56304/S0040363623040069

# **Validation of the Severe Accident Module of the EUCLIDE/V2 Integral Code on the Basis of Experiments on a Failure of Simulators of Single Fuel Rods and Fuel Assemblies**

**T. A. Saikina<sup>a</sup>, E. V. Usov<sup>a</sup>, \*, V. I. Chukhno<sup>a</sup>, P. D. Lobanov<sup>a</sup>, S. I. Lezhnin<sup>a</sup>, and N. A. Pribaturin<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup>Nuclear Safety Institute, Novosibirsk Branch, Russian Academy of Sciences, (IBRAE RAS),  
Novosibirsk, 630090 Russia*

*\*e-mail: usovev@gmail.com*

**Abstract**—The development of computer codes for modeling accidents in a reactor unit requires validation of the models built into these codes. In this work, the EUCLID/V2 integrated code developed at IBRAE RAS was validated as applied to the simulation of severe accidents with a failure of the core of liquid-metal cooled fast breeder reactors (LMFBR), against experiments on melting of the cladding of fuel-rod simulators carried out at the Institute of Thermophysics, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences (IT SB RAS), and SCARABEE BE + 3 experiments performed at the Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) in France. The investigations performed at IT SB RAS included measurements of the cladding surface temperatures without liquid-metal cooling of the fuel-rod simulator, which is typical for accidents involving an instantaneous blockage of the flow section in the fuel assembly (FA) or with loss-of-coolant for type BN-1200M reactor units (RUs). To create such conditions, experiments with fuel rods were carried out in an argon atmosphere at room temperature (25°C) and a pressure of approximately 10<sup>5</sup> Pa, and the surface temperature of the fuel-rod simulator was recorded with a pyrometer. In France, the SCARABEE BE + 3 series experiments were carried out in the SCARABEE reactor to study the consequences of a hypothetical accident with a complete instantaneous blockage of the flow cross-section in a sodium-cooled fast reactor. To determine the effect of uncertainty in the initial data, diversified calculations were made. The validation was done by comparing the predictions with the experimental values of temperatures in the range between 500 to 1800 K (experiments of IT SB RAS). The maximum calculation error did not exceed 200 K. For the experiments in the SCARABEE reactor, it was not greater than 88 K for the fuel-rod claddings and 100 K the coolant. The obtained data will be used to estimate uncertainty in the predictions by the models of severe accidents with thermal destruction of fuel rods in fast reactors.

**Keywords:** validation, fast reactors, fuel rods, fuel assembly, nuclear fuel, sodium coolant, EUCLID/V2, SAFR, HYDRA-IBRAE/LM

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

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЗОЛЫ ЛУЗГИ ПОДСОЛНЕЧНИКА  
ПОСЛЕ ЕЕ ОБРАБОТКИ РАЗЛИЧНЫМИ МЕТОДАМИ ТОРРЕФИКАЦИИ<sup>1</sup>

© 2023 г. А. В. Небываев<sup>a</sup>, \*, О. Ю. Милованов<sup>a</sup>, Д. В. Климов<sup>a</sup>, С. Н. Кузьмин<sup>a</sup>, А. В. Рыженков<sup>a</sup>,  
В. А. Дубина<sup>b</sup>, Р. В. Завиженец<sup>b</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

<sup>b</sup>ОАО “Головное специализированное конструкторское бюро по комплексу оборудования для микроклимата”,  
ул. Писателя Смирнова, д. 66, г. Брест, 224014 Республика Беларусь

\*e-mail: ar.nebivaev2017@yandex.ru

Поступила в редакцию 28.07.2022 г.

После доработки 12.10.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Отходы растениеводства (солома, лузга подсолнечника, риса, проса и других зерновых культур) обладают низкой влажностью, малой зольностью, а их теплота сгорания близка к теплоте сгорания многих энергетических углей или превосходит ее. Энергетическая утилизация таких отходов могла бы решить экологические проблемы, связанные с сокращением выбросов парниковых газов. В то же время химический состав золы этих отходов обуславливает низкую температуру ее плавления, что приводит к шлакованию топки и быстрому росту отложений золы на конвективных поверхностях нагрева котла. Известные методы предварительной обработки отходов перед сжиганием (водная промывка, гидротермальная карбонизация) энергозатратны и малопродуктивны. Поэтому предложено оценить влияние такого метода переработки, как торрефикация, на плавкостные свойства золы. Использованы два метода торрефикации биомассы: в среде газообразных продуктов торрефикации в тарельчатом реакторе с механически перемешиваемым слоем биомассы и в кипящем слое в среде перегретого водяного пара. Исследован химический состав золы биоуглей, полученных обоими методами. На основании известных данных рассчитаны прогностические критерии, позволяющие оценить возможность расплавления золы биоуглей, образования шлаковых агломератов, отложения золы на конвективных поверхностях нагрева котлов, а также формирования агломератов при сжигании лузги подсолнечника в кипящем слое. Поскольку использование прогностических критериев во многих случаях приводит к противоречивым результатам, для оценки плавкостных свойств золы биоуглей и сходной с ними биомассы применена трехмерная диаграмма, на оси которой нанесены концентрации различных оксидов, содержащихся в золе. Диаграмма позволяет сопоставлять плавкостные свойства полученных биоуглей с плавкостными свойствами других видов биомассы. Это дает возможность сделать вывод, что биоуголь, произведенный в результате торрефикации в среде перегретого водяного пара, близок по своим топливным характеристикам к древесным отходам, т.е. может сжигаться отдельно без добавок или смесей с другими видами топлива, обладающими тугоплавкой золой.

**Ключевые слова:** лузга подсолнечника, зола, торрефикация, газификация, кипящий слой, прогностические критерии, биотопливо, температура плавления, оксиды металлов

**DOI:** 10.56304/S0040363623040045

# **Studying the Sunflower Husk Ash Properties after Husk Treatment Using Various Torrefaction Methods**

**A. V. Nebyvaev<sup>a</sup>, \*, O. Yu. Milovanov<sup>a</sup>, D. V. Klimov<sup>a</sup>, S. N. Kuz'min<sup>a</sup>, A. V. Ryzhenkov<sup>a</sup>,  
V. A. Dubina<sup>b</sup>, and R. V. Zavizhenets<sup>b</sup>**

*<sup>a</sup> National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia*

*<sup>b</sup> OAO Head Special Design Office on Equipment Packages for Microclimate, Brest, 224014 Republic of Belarus*

*\*e-mail: ar.nebivaev2017@yandex.ru*

**Abstract**—Plant cultivation waste (straw and husk of sunflower, rice, miller, and other cereal crops) feature low moisture and ash content, and their heating value is close to or even higher than that of many power plant coals. The utilization of such waste for energy-generation purposes could help solve environmental problems connected with decreasing greenhouse gas emissions. At the same time, the chemical composition of the ash from this waste results in its having a low melting temperature, which causes the furnace slagging to occur and a rapid growth of ash deposits on the boiler convective heating surfaces. The well-known methods for waste pretreatment before combustion (water flushing and hydrothermal carbonization) feature excessive energy consumption and low yield. Therefore, it is proposed to estimate the effect on ash-melting properties of such a treatment method as torrefaction. Two biomass torrefaction methods were used: in the medium of gaseous torrefaction products in a plate reactor with a mechanically stirred biomass bed and fluidized bed torrefaction in a superheated steam medium. The chemical composition of the ash from biochars obtained using both methods is studied. Based on the known data, prediction criteria were calculated using which it is possible to estimate the possibility of biochar ash to melt, slag agglomerates to emerge, ash deposits to form on the boiler convective heating surfaces, and agglomerates to form during sunflower husk fluidized bed combustion. As is known, the use of prediction criteria often yields contradictory results. In view of this circumstance, for estimating the melting properties of ash from biochars and similar biomass, a 3D diagram was used, with the concentrations of various oxides contained in the ash marked on its axis. By using this diagram, the melting properties of the obtained biochars can be compared with those of other biomass kinds. This allows the following conclusion to be drawn: biochar produced as a result of torrefaction performed in a superheated steam medium is close in its fuel characteristics to wood waste; i.e., it can be combusted alone without additions or mixtures with other kinds of fuel having a refractory ash.

**Keywords:** sunflower husk, ash, torrefaction, gasification, fluidized bed, prediction criteria, biofuel, melting temperature, metal oxides

---

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,  
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

---

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБЪЕМНОЙ КОНДЕНСАЦИИ  
ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ПАРОГАЗОВОЙ СМЕСИ ЧЕРЕЗ СОПЛО МЕТОДАМИ  
CFD С ПРИМЕНЕНИЕМ СПЕЦИАЛЬНОГО РАСЧЕТНОГО МОДУЛЯ<sup>1</sup>

© 2023 г. А. А. Сидоров<sup>a</sup>, \*, А. К. Ястребов<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Национальный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,  
Красноказарменная ул., д. 14, Москва, 111250 Россия

\*e-mail: AlexSid-MPEI@yandex.ru

Поступила в редакцию 26.08.2022 г.

После доработки 04.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Объемная конденсация – один из наиболее распространенных термодинамических процессов. Однако ввиду сложности его моделирования расчетные исследования зачастую ограничены одномерной постановкой задачи и простыми формами каналов. В настоящей работе представлен расчетный модуль “Объемная конденсация”, основанный на решении кинетического уравнения методом моментов для функции распределения капель по размерам. Модуль усовершенствован с учетом пользовательских скаляров (UDS – user-defined scalar) и источниковых членов и интегрирован в расчетный CFD-пакет. Благодаря модификации модуля существенно повышены устойчивость и точность решения, а также уменьшено расчетное время. Разработанная модель конденсации и ее реализация с помощью модуля верифицированы для одно-, двух- и трехмерной постановок в стационарном и нестационарном приближениях путем сравнения с двумя наборами экспериментальных данных сторонних авторов на примере задачи об объемной конденсации при сверхзвуковом расширении парогазовой смеси в сопле. В ходе решения получены распределения давления, температур, плотности, степени пересыщения, массовой доли конденсата, числовой плотности и среднего размера капель как по сечениям, так и вдоль центральной линии рассматриваемых сопл. Подтвержден важный вывод о необходимости учета не только образования капель, но и их роста, так как именно этот процесс оказывает основное влияние на термогазодинамику процесса. Показано, что реализации в двумерном и трехмерном вариантах постановки задачи практически совпадают, что позволяет сделать вывод о возможности применения двумерных постановок для решения подобных задач с простым профилем каналов.

**Ключевые слова:** объемная конденсация, нуклеация, парогазовая смесь, термогазодинамика, конечно-объемное моделирование, CFD-методы, численные методы, кинетическое уравнение

**DOI:** 10.56304/S0040363623040070

# **Simulation of Bulk Condensation in a Flow of a Vapor–Gas Mixture through a Nozzle by CFD-Methods Using a Special Computational Module**

**A. A. Sidorov<sup>a</sup>, \* and A. K. Yastrebov<sup>a</sup>**

*<sup>a</sup> National Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia*

*\*e-mail: AlexSid-MPEI@yandex.ru*

**Abstract**—Bulk condensation belongs to the most widely used thermodynamic processes. However, the complexity of its simulation often reduces numerical studies to a one-dimensional formulation of the problem and simple channel shapes. This work presents a bulk condensation computational module based on the solution to the kinetic equation by the method of moments for the droplet size distribution function. The module has been upgraded considering the user-defined scalars (UDS) and integrated into the CFD-package. This module upgrading has considerably improved the stability and accuracy of the solution and also has cut down the computational time. The developed condensation model and its implementation using the module have been verified for one-, two-, and three-dimensional formulations in steady state and unsteady approximations against two sets of third-party experimental data by an example of a solution to the problem of bulk condensation during supersonic expansion of a vapor–gas mixture in a nozzle. This yielded the distributions of pressure, temperature, density, degree of supersaturation, mass fraction of condensate, number density, and average droplet size both in cross sections and along the centerline of the examined nozzles. An important conclusion has been confirmed that we should consider not only the formation of droplets but also their growth since it is this process that has the main effect on the thermogasdynamics of the process. The solutions of the 2D and 3D problems are almost identical, which allows us to conclude that 2D formulations may be employed for solving similar problems with a simple channel geometry.

**Keywords:** bulk condensation, nucleation, vapor–gas mixture, thermogasdynamics, finite volume simulation, CFD-methods, numerical methods, kinetic equation

ПРОБЛЕМЫ ГИДРОДИНАМИКИ И ТЕПЛООБМЕНА  
В СВЯЗАННЫХ МЕЖДУ СОБОЙ РЕАКТОРАХ С КИПЯЩИМ СЛОЕМ  
ДЛЯ УЛАВЛИВАНИЯ  $\text{CO}_2$  И ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА

© 2023 г. Г. А. Рябов<sup>а</sup>, \* , О. М. Фоломеев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Всероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

\*e-mail: Georgy.ryabov@gmail.com

Поступила в редакцию 13.09.2022 г.

После доработки 12.10.2022 г.

Принята к публикации 26.10.2022 г.

Технология сжигания и газификации в химических циклах со связанными между собой реакторами с кипящим (КС) и циркулирующим кипящим слоем (ЦКС) интенсивно развивается в связи с декарбонизацией энергетики и возможностью получения полезных продуктов из органических топлив. Эта технология пока еще находится в стадии фундаментальных и прикладных исследований на лабораторных и пилотных установках мощностью до 3 МВт. Однако некоторые последние исследования убедительно доказывают, что она может обеспечить относительно низкие затраты на улавливание  $\text{CO}_2$  (на уровне 30 евро/т). Новые направления в исследованиях связаны с использованием трех реакторов с оксидами металлов (главным образом природных оксидов и оксидов железа) для получения водорода и метанола. Рассмотрены основные проблемы гидродинамики и теплообмена в системах с химическими циклами. Для выравнивания температур между связанными между собой реакторами, в одном из которых происходят реакции с поглощением тепла, а в другом — с его выделением, требуется очень большой расход циркулирующего материала. Показано, что решение задачи выноса достаточного количества частиц, влияния на него их размеров, скорости, массы слоя является крайне важным. Другая проблема — обеспечение очень высокой степени улавливания в циклонах (на уровне 99.9%), которая определяется скоростным режимом и размерами частиц. Наконец, необходимо надежно транспортировать уловленные частицы между реакторами. Показано, что при больших концентрациях частиц возрастает доля кондуктивно-конвективной составляющей теплообмена. Эта задача, как и задача теплообмена в среде пара и кислорода или кислорода и  $\text{CO}_2$ , также является актуальной. Представлены некоторые результаты экспериментальных исследований, проведенных в ОАО ВТИ на крупной аэродинамической установке.

**Ключевые слова:** технологии улавливания, захоронения и использования  $\text{CO}_2$ , химические циклы, связанные между собой реакторы с кипящим слоем, получение водорода, гидродинамика, теплообмен

**DOI:** 10.56304/S0040363623040057

# **Problems of Hydrodynamics and Heat Transfer in Interconnected Bed Reactors for CO<sub>2</sub> Capture and Obtaining Hydrogen**

**G. A. Ryabov<sup>a</sup>, \* and O. M. Folomeev<sup>a</sup>**

<sup>a</sup> All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia

\*e-mail: Georgy.ryabov@gmail.com

**Abstract**—The technology of combustion and gasification in chemical cycles with interconnected fluidized bed (CF) and circulating fluidized bed (CFB) reactors is being intensively developed due to the decarbonization of energy and the possibility of obtaining useful products from organic fuels. This technology is still at the stage of fundamental and applied research at laboratory and pilot plants with a capacity of up to 3 MW. However, some recent studies strongly suggest that it can achieve relatively low CO<sub>2</sub> capture costs (at the level of 30 euro/t). New directions in research are associated with the use of three reactors with metal oxides (mainly natural oxides and iron oxides) to produce hydrogen and methanol. The main problems of hydrodynamics and heat transfer in systems with chemical cycles are considered. To equalize temperatures between interconnected reactors—wherein reactions occur with the absorption of heat in one, while they occur in the other with its release—a very large consumption of circulating material is required. It is shown that the solution to the problem of the removal of a sufficient number of particles and the influence of their size, velocity, and mass of the layer on it is extremely important. Another problem is to provide a very high degree of capture in cyclones (at the level of 99.9%), which is determined by the speed regime and particle size. Finally, the trapped particles must be reliably transported between reactors. It is shown that the proportion of the conductive-convective component of heat transfer increases at high concentrations of particles. This problem, as well as the problem of heat transfer, in the environment of steam and oxygen or oxygen and CO<sub>2</sub> is also relevant. Some results of experimental studies carried out at the All-Russia Thermal Engineering Institute on a large aerodynamic installation are presented.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> capture, disposal, and use technologies, chemical cycles, interconnected fluidized bed reactors, hydrogen production, hydrodynamics, heat transfer