
СОДЕРЖАНИЕ

Номер 8, 2023

Тепло- и массообмен, свойства рабочих тел и материалов

Перспективы использования двумерных наноматериалов
в энергетических технологиях (обзор)

А. С. Дмитриев, А. В. Клименко

3

Охлаждение металлических поверхностей распылением:
прогресс в механизмах его реализации (обзор)

M. Jena, P. C. Mishra, S. S. Sahoo

27

Исследование процессов кипения хладагента R113 в горизонтальном трубном пучке
при высоких тепловых нагрузках

*О. О. Мильман, В. Б. Перов, Г. Г. Яньков, А. В. Кондратьев,
А. В. Птахин, В. С. Крылов, А. П. Железнов, А. А. Жинов*

52

Многоцелевая оптимизация кожухотрубных теплообменников в соответствии
с различными выражениями второго закона термодинамики

*M. B. R. Rodríguez, J. L. M. Rodríguez, M. Martins, O. P. de Lima, S. B. Santiago,
M. R. Maduro, M. C. de Oliveira Junior, N. J. de Oliveira Júnior*

61

Возобновляемые источники энергии, гидроэнергетика

Риформинг углеводородного топлива в электрохимических системах (обзор)

А. А. Филимонова, А. А. Чичиров, Н. Д. Чичирова, А. В. Печенкин

75

Электрическая часть тепловых и атомных электростанций

Влияние высокотемпературных сверхпроводниковых токоограничивающих устройств
на отключение коротких замыканий

Д. А. Григорьев, О. Ю. Гусев, Ю. П. Гусев, Н. О. Посохов

86

Металлы и вопросы прочности

Мониторинг выработки ресурса необогреваемыми высокотемпературными
элементами котлов

Е. А. Гринь, Д. Н. Панфилов

92

Contents

Vol. 70, No. 8, 2023

Heat and Mass Transfer, Properties of Working Bodies and Materials

- Prospects for the Use of Two-Dimensional Nanomaterials in Energy Technologies (Review)
A. S. Dmitriev and A. V. Klimenko 3
- Spray Impingement Cooling of Metal Surfaces: a Review on Progressing Mechanisms (Review)
M. Jena, P. C. Mishra, and S. S. Sahoo 27
- A Study of R113 Refrigerant Boiling Processes in a Horizontal Tube Bundle under High Heat Flux Conditions
O. O. Mil'man, V. B. Perov, G. G. Yan'kov, A. V. Kondrat'ev, A. V. Ptakhin, V. S. Krylov, A. P. Zheleznov, and A. A. Zhinov 52
- Multi-Objective Optimization of Shell-and-Tube Heat Exchangers According to Different Expressions of the Second Law of Thermodynamics
M. B. R. Rodríguez, J. L. M. Rodríguez, M. Martins, O. P. de Lima, S. B. Santiago, M. R. Maduro, M. C. de Oliveira Junior, and N. J. de Oliveira Júnior 61
-

Renewable Energy Sources and Hydropower

- Reforming of Hydrocarbon Fuel in Electrochemical Systems (Review)
A. A. Filimonova, A. A. Chichirov, N. D. Chichirova, and A. V. Pechenkin 75
-

Electrical Systems of Thermal and Nuclear Power Plants

- The Effect of High-Temperature Superconducting Current Limiters on Short-Circuit Fault Clearing
D. A. Grigor'ev, O. Yu. Gusev, Yu. P. Gusev, and N. O. Posokhov 86
-

Metals and Strength Problems

- Monitoring the Percentage of Service Life Usage for Unheated High-Temperature Elements of Boilers
E. A. Grin and D. N. Panfilov 92
-
-

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ДВУМЕРНЫХ НАНОМАТЕРИАЛОВ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЯХ (ОБЗОР)¹

© 2023 г. А. С. Дмитриев^{a, b, *}, А. В. Клименко^{c, **}

^aНациональный исследовательский университет “Московский энергетический институт”,
Красноказарменная ул., д. 14, стр. 1, Москва, 111250 Россия

^bИнститут графена, Никитский бульв., д. 12, Москва, 119019 Россия

^cНациональный исследовательский технологический университет
“Московский институт стали и сплавов” (МИСиС), Ленинский просп., д. 4, Москва, 119049 Россия

*e-mail: asdmitriev@mail.ru

**e-mail: klimenkoav@bk.ru

Поступила в редакцию 23.01.2023 г.

После доработки 15.02.2023 г.

Принята к публикации 01.03.2023 г.

Рассмотрены перспективы применения новых двумерных наноматериалов (2D-материалов) для интенсификации процессов тепломассообмена в энергетическом оборудовании. Представлены основные типы 2D-материалов, описаны их физико-технологические свойства и уникальные характеристики. Изучены отдельные технологические приемы изготовления двумерных материалов и создаваемых пленок, композитов, наножидкостей для различных энергетических приложений. Отдельное внимание уделено материалам на основе однослойного и многослойного графена, характеристикам материалов на базе графеновых компонентов, их физико-химическим и другим параметрам. Описаны эффекты, которые наблюдаются при использовании наножидкостей в качестве теплоносителей и при нанесении покрытий на основе 2D-материалов на теплопередающие поверхности при различных процессах теплообмена: однофазной конвекции, испарении, кипении, конденсации. Показано, что во всех случаях существенно повышается эффективность теплопереноса. Приведены конкретные примеры применения 2D-материалов в тепловых трубах и термосифонах, описаны способы улучшения характеристик этих устройств. Рассмотрены некоторые математические и физические модели функционирования двумерных материалов в энергетике. Особое внимание уделено особенностям механизмов теплопереноса, испарения, кипения и конденсации в энергетических системах. Однако указано, что имеются определенные трудности при выборе двумерных материалов для использования их в энергетике. Сделан вывод, что благодаря дополнительным исследованиям и активному применению 2D-материалов открываются беспрецедентные возможности для развития перспективных энергетических, строительных, электронных и других технологий, а также создания материалов следующего поколения с уникальными механическими, оптическими, электромагнитными и тепловыми свойствами.

Ключевые слова: тепломассообмен, теплоносители, наножидкости, двумерные наноматериалы, графен, пленочные покрытия тепловая труба, капельная и пленочная конденсация, коэффициент теплоотдачи

DOI: 10.56304/S0040363623080015

Prospects for the Use of Two-Dimensional Nanomaterials in Energy Technologies (Review)

A. S. Dmitriev^{a, b, *} and A. V. Klimenko^{c, **}

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

^b Graphene Institute, Moscow, 119019 Russia

^c National Research Technological University, Moscow Institute of Steel and Alloys (MISiS), Moscow, 119049 Russia

*e-mail: asdmitriev@mail.ru

**e-mail: klimenkoav@bk.ru

Abstract—The prospects for the use of new, two-dimensional nanomaterials (2D materials) for the intensification of heat and mass transfer processes in power equipment are considered. The main types of 2D materials are presented, and their physical and technological properties and unique characteristics are described. Separate technological methods for the manufacture of 2D materials and films, composites, and nanofluids for various energy applications have been studied. Special attention is paid to materials based on single-layer and multilayer graphene, characteristics of materials based on graphene components, and their physico-chemical and other parameters. The effects that are observed when using nanofluids as heat carriers and when applying coatings based on 2D materials on heat-transfer surfaces during various heat-transfer processes are described: single-phase convection, evaporation, boiling, condensation. It is shown that, in all cases, the heat-transfer efficiency increases significantly. Specific examples of the use of 2D materials in heat pipes and thermosiphons are given, and ways to improve the characteristics of these devices are described. Some mathematical and physical models of functioning of two-dimensional materials in power engineering are considered. Particular attention is paid to the peculiarities of the mechanisms of heat transfer, evaporation, boiling, and condensation in energy systems. However, it is indicated that there are certain difficulties in choosing 2D materials for use in the energy sector. It is concluded that, due to additional research and the active use of 2D materials, unprecedented opportunities are opening up for the development of promising energy, construction, electronic, and other technologies as well as the creation of next-generation materials with unique mechanical, optical, electromagnetic and thermal properties.

Keywords: heat and mass transfer, heat carriers, nanofluids, two-dimensional nanomaterials, graphene, film coatings heat pipe, drooping and film condensation, heat-transfer coefficient

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

**ОХЛАЖДЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ РАСПЫЛЕНИЕМ:
ПРОГРЕСС В МЕХАНИЗМАХ ЕГО РЕАЛИЗАЦИИ (ОБЗОР)**

© 2023 г. М. Jena^a, P. C. Mishra^{a, *}, S. S. Sahoo^b

^a*Лаборатория тепловых исследований, Институт промышленных технологий Калинга,
Бхубанешвар, 751024 Индия*

^b*Технологический и исследовательский университет Одиша,
Бхубанешвар, 751003 Индия*

**e-mail: pcmishrafme@kiit.ac.in*

Поступила в редакцию 04.06.2022 г.

После доработки 25.08.2022 г.

Принята к публикации 30.08.2022 г.

Представлены последние достижения в области теплоотдачи струйным способом (распылением). Рассмотрено влияние различных параметров на эффективность распылительного охлаждения. Исследование посвящено разработкам в области такого охлаждения, влиянию изменений параметров процесса на его эффективность. Обзор доступной литературы показывает, что изучение охлаждения распылением ведется с позиций его практического применения, но оно не способствует пониманию того, каким образом его можно усовершенствовать. Существует множество способов улучшить характеристики распылительного охлаждения, например чередованием видов применяемой жидкости, изменением схемы потока и управлением такими параметрами, как давление воздуха и воды, расстояние между соплом и поверхностью. В некоторых более ранних работах для повышения эффективности теплоотдачи при охлаждении поверхности металла был использован также струйно-инжекционный метод. Однако такая технология все еще нуждается в дальнейшем изучении, что и обсуждается в рамках настоящей статьи.

Ключевые слова: охлаждение распылением (струйное), давление, оборудование, импульсный метод, технические приложения, экономические факторы, теплоотдача, рабочая жидкость, хладагент

DOI: 10.56304/S0040363623080052

Spray Impingement Cooling of Metal Surfaces: a Review on Progressing Mechanisms (Review)

M. Jena^a, P. C. Mishra^{a, *}, and S. S. Sahoo^b

*^a Thermal Research Laboratory (TRL), School of Mechanical Engineering, KIIT University,
Bhubaneswar, Odisha, 751024 India*

^b Department of Mechanical Engineering, Odisha University of Technology and Research (OUTR), Bhubaneswar, India

**e-mail: pcmishrafme@kiit.ac.in*

Abstract—In this paper, we present a review of the recent progresses in spray impingement heat transfer mechanisms and influences of various controlling parameters on spray impingement cooling performance. This paper focuses on the developments in spray cooling effectiveness achieved by modifying the flow processes and parameters. The open literature reveals that spray impingement cooling processes studies explore practical applications but not full understanding that can help to further improvement. There are many possibilities of improving the performance of spray cooling by alternating the fluid types, flow pattern and controlling parameters such as air/water pressure and to distance from nozzle to heated plate. Some of the earlier researchers have also tried pulsed spray impingement technique to enhance the heat transfer effectiveness during metal surface cooling. However, there remains a need for further examination and the present review discusses several such possibilities.

Keywords: Spray impingement cooling, pressure, mechanisms, pulsed spray method, economic factors, technical applications, working liquid, coolant

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ КИПЕНИЯ ХЛАДАГЕНТА R113
В ГОРИЗОНТАЛЬНОМ ТРУБНОМ ПУЧКЕ ПРИ ВЫСОКИХ
ТЕПЛОВЫХ НАГРУЗКАХ¹**

© 2023 г. **О. О. Мильман^{a, b, *}, В. Б. Перов^a, Г. Г. Яньков^{b, d}, А. В. Кондратьев^{a, b, c},
А. В. Птахин^{a, b, c}, В. С. Крылов^{a, b}, А. П. Железнов^{a, c}, А. А. Жинов^c**

^aНППВП “Турбокон”, ул. Комсомольская Роща, д. 43, г. Калуга, 248010 Россия

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

^cКалужский филиал “МГТУ им. Н.Э. Баумана”, ул. Баженова, д. 2, г. Калуга, 248000 Россия

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

*e-mail: turbocon@kaluga.ru

Поступила в редакцию 27.10.2022 г.

После доработки 23.11.2022 г.

Принята к публикации 25.11.2022 г.

Энергосберегающие технологии являются одним из приоритетных направлений развития энергетики России. При утилизации бросового тепла от геотермальных источников, особенно тех, что расположены в холодных климатических зонах, где отсутствует доступ к ресурсам технической воды, в качестве рабочего тела для сухих градирен выгодно использовать органические теплоносители, например фреоны. Свойства таких теплоносителей, как правило, подробно изучены в области низких температур, поскольку они применяются в основном в качестве рабочих тел для холодильной техники при небольшой плотности теплового потока. В целях получения данных о процессе кипения органических теплоносителей на трубном пучке для учета влияния нижних труб пучка на теплообмен в верхних трубах был разработан макет парогенератора с горизонтальным пучком труб. В качестве греющей среды выступала вода высокого давления, предусмотрен дополнительный электроподогрев фреона до температуры, близкой к температуре насыщения. Трубный пучок включает в себя двенадцать трубок, размещенных в три ряда по вертикали: центральный ряд состоит из четырех мерных трубок, а боковые – из вспомогательных. В пазах теплообменных труб центрального ряда сверху и снизу установлены восемь термомпар для контроля температуры поверхности. Для нижнего и верхнего рядов в пучке были получены коэффициенты теплоотдачи при кипении в широком диапазоне удельных тепловых потоков. Показано, что процесс кипения на верхних рядах происходит значительно интенсивнее (на 30–35%), чем на нижних.

Ключевые слова: теплообмен, фреон, органический цикл Ренкина, коэффициент теплоотдачи, низкотенциальное тепло, пузырьковое кипение, пленочный режим, парогенератор, теплообменные труды, парообразование

DOI: 10.56304/S0040363623080064

A Study of R113 Refrigerant Boiling Processes in a Horizontal Tube Bundle under High Heat Flux Conditions

O. O. Mil'man^{a, b, *}, V. B. Perov^a, G. G. Yan'kov^{b, d}, A. V. Kondrat'ev^{a, b, c}, A. V. Ptakhin^{a, b, c},
V. S. Krylov^{a, b}, A. P. Zheleznov^{a, c}, and A. A. Zhinov^c

^a NPVP Turbocon, Kaluga, 248010 Russia

^b Tsiolkovskii Kaluga State University, Kaluga, 248023 Russia

^c Kaluga Branch, Bauman Moscow State Technical University, Kaluga, 248000 Russia

^d National State Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

*e-mail: turbocon@kaluga.ru

Abstract—Energy-saving technologies are among the priority development lines of Russia's power industry. In recovering the rejected heat from geothermal sources, especially those located in cold climatic zones in which there is no access to service cooling water resources, it is profitable to use organic coolants, e.g., CFC refrigerants, as working fluid for dry cooling towers. The properties of such coolants have, as a rule, been studied to a sufficient detail in the region of low temperatures, because they are mainly used as working fluids for refrigeration systems at moderate heat fluxes. To obtain data on the boiling of organic coolants on a tube bundle for taking into account the influence of bundle lower tubes on the heat transfer in the upper tubes, a vapor generator mockup with a horizontal tube bundle was developed. High-pressure water served as the heating medium; and electric heaters were provided for additionally heating the CFC refrigerant to a level close to the saturation temperature. The tube bundle includes twelve tubes arranged in three rows along the height: the central row consists of four measurement tubes, and two lateral rows consist of auxiliary tubes. Eight thermocouples are installed at the top and bottom in the slots of the central row heat-transfer tubes for measuring the surface temperature. For the lower and upper rows in the bundle, boiling heat-transfer coefficients were obtained in a wide range of specific heat fluxes. It is shown that the boiling on the upper rows is significantly more (by 30–35%) intense than it is on the lower rows.

Keywords: heat transfer, CFC refrigerant, organic Rankine cycle, heat-transfer coefficient, low-grade heat, nucleate boiling, film regime, vapor generator, heat-transfer tubes, vaporization

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

**МНОГОЦЕЛЕВАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ КОЖУХОТРУБНЫХ
ТЕПЛООБМЕННИКОВ В СООТВЕТСТВИИ С РАЗЛИЧНЫМИ
ВЫРАЖЕНИЯМИ ВТОРОГО ЗАКОНА ТЕРМОДИНАМИКИ**

© 2023 г. М. В. R. Rodríguez^{a, *}, J. L. M. Rodríguez^a, M. Martins^a, O. P. de Lima^b, S. B. Santiago^c,
M. R. Maduro^b, M. C. de Oliveira Junior^c, N. J. de Oliveira Júnior^b

^a*Federal University of Bahia, Polytechnic Institute, Ondina, Salvador, 40170-110 Brazil*

^b*Amazonas State University, Manaus, Brazil*

^c*Amazonas Federal University, Belem, Ananindeua, Brazil*

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

Поступила в редакцию 19.01.2022 г.

После доработки 05.05.2022 г.

Принята к публикации 23.05.2022 г.

Кожухотрубные теплообменники (КТ) наиболее часто применяются в промышленных процессах для передачи тепла между двумя автономными потоками. В литературе представлена обширная информация о различных методах оптимизации конструкции КТ, однако, как правило, она проводится только в целях минимизации затрат в качестве целевой функции. В настоящей статье предлагается провести многоцелевую оптимизацию КТ с применением новых термодинамических и экологических выражений в качестве целевых функций. Реализация ее возможна при использовании генетических алгоритмов второго поколения. В работе приводятся процедура и математическая модель для многоцелевой оптимизации, в которой предлагается применить пять целевых функций: коэффициент теплового сопротивления, тепловую эффективность, экологическую функцию, общую стоимость, включающую в себя эксплуатационные расходы, и общее количество рассеиваемой энтранзии. Концепция энтранзии (entransy) впервые предлагается для создания новой экологической функции, используемой в качестве критерия оптимизации КТ. Новизна представленной работы заключается в том, что в ней выполняется оптимизация одновременно с учетом механических и вибрационных ограничений, конструкции аппарата, а также с учетом параметров термогидравлических процессов, происходящих в нем. Апробация методики проводилась на основе конкретного тематического исследования (тестового расчета), который ранее неоднократно применялся различными авторами для верификации полученных результатов. Многоцелевая оптимизация КТ позволила разработать варианты конструкции с минимальными затратами при заданной тепловой нагрузке и с геометрическими вариантами, адаптируемыми к доступному для установки пространству и наличию вспомогательных систем.

Ключевые слова: энтранзия, оптимизация, кожухотрубный теплообменник, второй закон термодинамики, экологическая эффективность, тепловое сопротивление, стоимость, целевая функция, энергосбережение, необратимость процесса теплопередачи

DOI: 10.56304/S0040363623080088

Multi-Objective Optimization of Shell-and-Tube Heat Exchangers According to Different Expressions of the Second Law of Thermodynamics

M. B. R. Rodríguez^{a, *}, J. L. M. Rodríguez^a, M. Martins^a, O. P. de Lima^b, S. B. Santiago^c,
M. R. Maduro^b, M. C. de Oliveira Junior^c, and N. J. de Oliveira Júnior^b

^a Federal University of Bahia, Polytechnic Institute, Ondina, Salvador, 40170-110 Brazil

^b Amazonas State University, Manaus, Brazil

^c Amazonas Federal University, Belem, Ananindeua, Brazil

*e-mail: jorgemoyar@gmail.com

Abstract—Shell-and-tube type heat exchangers (STHE) are the most important part of non-combustion heat transfer equipment in industrial processes. The literature provides extensive information on various methods of optimizing the design of STHE, however, as a rule, it is carried out only with the aim of minimizing costs as an objective function. In this paper, it is proposed to use multi-purpose optimization of STHE using new thermodynamic and environmental expressions as objective functions. Its implementation is possible with the use of genetic algorithms of the second generation. The paper presents a procedure and a mathematical model for multi-purpose optimization, in which five objective functions are proposed to be used: the coefficient of thermal resistance, thermal efficiency, environmental function, total cost, including operating costs, and the total amount of dissipated entransy. The concept of entransy is proposed for the first time to create a new ecological function used as a criterion for optimizing STHE. The novelty of the proposed work lies in the fact that it optimizes simultaneously taking into account mechanical and vibration limitations, the design of the heat exchanger, as well as taking into account the parameters of thermohydraulic processes occurring in it. The approbation of the methodology was carried out on the basis of a specific case study, which had previously been repeatedly used by various authors to verify the results obtained. The multi-purpose optimization of the STHE made it possible to develop design options with minimal costs at a given thermal load and with geometric options that are adaptable to the space available for installation and the availability of auxiliary systems.

Keywords: entransy, optimization, shell-and-tube heat exchanger, the second law of thermodynamics, environmental efficiency, thermal resistance, cost, objective function, energy saving, irreversibility of the heat transfer process

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**РИФОРМИНГ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА
В ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ (ОБЗОР)¹**

© 2023 г. А. А. Филимонова^а, *, А. А. Чичиров^а, Н. Д. Чичирова^а, А. В. Печенкин^а

^аКазанский государственный энергетический университет, Красносельская ул., д. 51, г. Казань, 420066 Россия

*e-mail: aachichirova@mail.ru

Поступила в редакцию 24.11.2022 г.

После доработки 23.01.2023 г.

Принята к публикации 01.03.2023 г.

Представлен обзор конструкций и принципов работы систем преобразования углеводородного топлива в синтез-газ в целях получения из него энергии в твердооксидных топливных элементах (ТОТЭ). В большинстве систем ТОТЭ в качестве топлива используются метан или метансодержащие смеси (биогаз, природный газ, отходы промышленных, нефтехимических производств и др.) в связи с их доступностью и простотой в обращении в отличие от водорода. Подсистема переработки топлива составляет около 50% всей электрохимической энергетической установки. В топливных элементах происходит рециркуляция вырабатываемого тепла, которое требуется для риформинга метана. В анодном отсеке топливного элемента либо во внешнем парогенераторе, в котором используется тепло выходящих из топливного элемента газов, производится пар, необходимый для переработки углеводородного топлива. Применяемыми методами являются паровой риформинг, парциальное окисление метана, углекислотная конверсия метана и автотермический риформинг. Паровой риформинг – наиболее изученный и часто применяемый метод. Внешний риформинг используется для преобразования сложных видов углеводородного топлива. Для метана или природного газа, как правило, достаточно внутреннего риформинга с учетом поддержания коэффициента рециркуляции топлива, мольных соотношений пара к углероду и углерода к кислороду. При сравнении существующих способов получения синтез-газа для ТОТЭ максимальный расход пара и наибольшая эффективность процесса отмечаются при паровом риформинге. Парциальное окисление метана является небезопасным процессом вследствие использования чистого кислорода. Углекислотная конверсия метана, несмотря на низкую эффективность, позволяет утилизировать углекислый газ и способствует дополнительной декарбонизации процесса. Автотермический риформинг сочетает преимущества парового риформинга и парциального окисления метана, но имеет сложное исполнение.

Ключевые слова: твердооксидный топливный элемент, риформинг метана, углеводородное топливо, водородная энергетика, парциальное окисление метана, углекислотная конверсия метана, электрохимическая конверсия

DOI: 10.56304/S0040363623080027

Reforming of Hydrocarbon Fuel in Electrochemical Systems (Review)

A. A. Filimonova^{a, *}, A. A. Chichirov^a, N. D. Chichirova^a, and A. V. Pechenkin^a

^a Kazan State Power Engineering University, Kazan, 420066 Russia

*e-mail: aachichirova@mail.ru

Abstract—A review is presented of the designs and principles of operation of the systems for conversion of hydrocarbon fuel into synthesis gas (or syngas) to be used for energy generation in solid oxide fuel cells (SOFCs). Most SOFC systems employ methane or methane-rich (biogas, natural gas, industrial or petrochemical waste, etc.) as fuel due to their availability and ease of handling in contrast with hydrogen. The fuel-processing subsystem comprises approximately 50% of the overall electrochemical power facility. The generated heat, which is required for methane reforming, is recycled in fuel cells. Steam needed for the conversion of hydrocarbon fuel is generated in the anode compartment of the fuel cell or in an external steam generator recovering the heat of the exhaust gases of the fuel cell. The employed methods include steam reforming, partial oxidation of methane, carbon dioxide reforming of methane, and autothermal reforming. Steam reforming is the most extensively studied and widely used method. External reforming is employed for conversion of complex hydrocarbon fuels. For methane or natural gas, internal reforming is usually sufficient if the fuel recirculation ratio and steam to carbon and carbon to oxygen ratios are properly kept. Comparison of the existing methods for the production of syngas for SOFCs has revealed that steam reforming features the maximum steam consumption and the highest efficiency of the process. The partial oxidation of methane is an unsafe process due to the use of pure oxygen. Despite its low efficiency, the carbon dioxide conversion of methane offers the recovery of carbon dioxide and contributes additionally to decarbonization of the process. The autothermal reforming has merits of the steam reforming and the methane partial oxidation, but its implementation is a great challenge.

Keywords: solid oxide fuel cell, methane reforming, hydrocarbon fuel, hydrogen power engineering, partial oxidation of methane, carbon dioxide conversion of methane, electrochemical conversion

**ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ ТЕПЛОВЫХ
И АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ**

**ВЛИЯНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СВЕРХПРОВОДНИКОВЫХ
ТОКОГРАНИЧИВАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА ОТКЛЮЧЕНИЕ
КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ**

© 2023 г. Д. А. Григорьев^а, О. Ю. Гусев^а, Ю. П. Гусев^а, Н. О. Посохов^а, *

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

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

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 23.02.2023 г.

Принята к публикации 01.03.2023 г.

Исследовано влияние высокотемпературных сверхпроводниковых (ВТСП) токоограничивающих устройств (ТОУ) на требования к электродинамической, термической стойкости и отключающей способности высоковольтных выключателей при отключении однофазных коротких замыканий в кабельных линиях напряжением 110 кВ и дана оценка влияния ВТСП ТОУ на переходные восстанавливающиеся напряжения (ПВН). Сопоставлены расчетные и натурные осциллограммы. Установлено, что при использовании ВТСП ТОУ можно существенно снизить требования к высоковольтным выключателям по электродинамической и термической стойкости, отключающей способности, включая пиковые значения и скорости ПВН. Альтернативным способом уменьшения пиковых значений и скорости ПВН, позволяющим в ряде случаев отказаться от применения дорогостоящих ВТСП ТОУ, является использование высоковольтных выключателей, оснащенных шунтирующими резисторами, что дает возможность не увеличивать бестоковую паузу автоматического повторного включения (АПВ), обусловленную необходимостью охлаждения ВТСП ТОУ после срабатывания. Применение ВТСП ТОУ может быть оправданным на мощных электростанциях и магистральных подстанциях с уровнем токов короткого замыкания более 40 кА.

Ключевые слова: высокотемпературные сверхпроводниковые токоограничивающие устройства, кабельные линии, однофазные короткие замыкания, переходные восстанавливающиеся напряжения, высоковольтные выключатели, электродинамическая и термическая стойкость, отключающая способность

DOI: 10.56304/S0040363623080039

The Effect of High-Temperature Superconducting Current Limiters on Short-Circuit Fault Clearing

D. A. Grigor'ev^a, O. Yu. Gusev^a, Yu. P. Gusev^a, and N. O. Posokhov^{a, *}

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

*e-mail: PosokhovNO@mpei.ru

Abstract—The article considers the influence of high-temperature superconducting (HTS) current limiters (CLs) on the requirements for peak withstand current, short-term withstand current, and breaking capacity of high-voltage circuit breakers in clearing single-phase short-circuit faults in 110-kV cable lines and estimates the influence of HTS CLs on transient recovery voltages (TRVs). Predicted and field oscillograms are compared with each other. In the case of using HTS CLs, it becomes possible to considerably reduce the requirements for high-voltage circuit breakers in terms of peak and short-term withstand current and breaking capacity, including the TRV peak and rate-of-change values. An alternative way for reducing the TRV peak and rate-of-change values, which makes it possible in many cases to do without expensive HTS CLs, is to use high-voltage circuit breakers fitted with shunt resistors. With such a solution, it becomes possible to not increase the automatic reclosing dead time caused by the need to cool the HTS CL after its actuation. The use of HTS CLs may be justified at high-capacity power plants and trunk substations with the level of short-circuit currents higher than 40 kA.

Keywords: high-temperature superconducting current limiters, cable lines, single-phase short-circuit faults, transient recovery voltages, high-voltage circuit breakers, peak withstand current, short-term withstand current, breaking capacity

**МЕТАЛЛЫ
И ВОПРОСЫ ПРОЧНОСТИ**

**МОНИТОРИНГ ВЫРАБОТКИ РЕСУРСА НЕОБОГРЕВАЕМЫМИ
ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ КОТЛОВ**

© 2023 г. **Е. А. Гринь^а, *, Д. Н. Панфилов^а**

^аВсероссийский теплотехнический институт, Автозаводская ул., д. 14, Москва, 115280 Россия

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

Поступила в редакцию 24.01.2023 г.

После доработки 23.02.2023 г.

Принята к публикации 01.03.2023 г.

Показано, что применение систем мониторинга на действующем оборудовании тепловых электростанций продолжает оставаться весьма актуальным. Проанализированы существующий организационный порядок и методические приемы проведения экспертизы ресурсных характеристик высокотемпературных элементов оборудования. Отмечены недостатки таких подходов и обоснованы преимущества технологий мониторинга и предиктивной диагностики для объективной оценки технического состояния ответственных узлов и элементов энергооборудования, работающих в условиях ползучести, и управления их ресурсными характеристиками. Объектом исследования является прямоточный котел на сверхкритические параметры пара, и в качестве наиболее ответственных его элементов, подлежащих мониторингу, приняты выходные коллекторы конвективного пароперегревателя высокого давления, паросборные камеры и пароперепускные трубы между этими коллекторами и камерами. Изучены конструкция и материалы, из которых изготовлены указанные элементы, а также схема организации движения пара на данных участках тракта и контроля рабочих параметров на них. Изложены методические аспекты, составляющие основу разработанной системы мониторинга, включая положения о порядке регистрации и систематизации показаний штатных датчиков температуры и давления, подходах к определению по этим данным расчетных характеристик, необходимых для оценки ресурса элементов. Прописан алгоритм системы в виде пошаговой последовательности выполнения в ходе мониторинга расчетных процедур в контексте предложенной физической модели исчерпания ресурса металла, базирующейся на закономерных связях между параметрами пара и длительностью работы, а также свойствами металла. Для оценки стадии выработки ресурса использован принцип линейного суммирования повреждаемости. Отмечены особенности учета в алгоритме исходно накопленной в металле поврежденности в случае организации системы мониторинга на ранее эксплуатировавшемся оборудовании. Представлены сведения о численной проверке разработанного алгоритма, в том числе по фактическим данным функционирования реализованной системы мониторинга. Сформулированы предложения о порядке оценки состояния металла в рамках предиктивной диагностики, осуществляемой на основе действующей системы.

Ключевые слова: мониторинг, котел, высокотемпературные элементы, ползучесть, датчики контроля, эквивалентные параметры, эквивалентная наработка, ресурс, алгоритм, повреждаемость, состояние металла

DOI: 10.56304/S0040363623080040

Monitoring the Percentage of Service Life Usage for Unheated High-Temperature Elements of Boilers

E. A. Grin^{a, *} and D. N. Panfilov^a

^a *All-Russia Thermal Engineering Institute, Moscow, 115280 Russia*

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

Abstract—The use of monitoring systems for assessment of the condition of operating equipment at thermal power plants (TPPs) is demonstrated to still be urgent. The applicable management procedures and monitoring processes provided for assessment of service life characteristics of high-temperature elements of equipment are analyzed. The shortcomings of these approaches are highlighted, and the advantages of monitoring and predictive diagnostics processes for a meaningful assessment of the technical condition and control of the service life characteristics of critical units and elements of power equipment operating under creep conditions are substantiated. The object of examination is a once-through supercritical boiler. Outlet headers of the high-pressure convective superheater, steam collection chambers, and crossover pipelines between these headers and chambers are adopted as critical elements of this boiler. The design and construction materials of these elements, the scheme of the steam flow in these sections of the flowpath, and the diagram of the monitoring of the operating conditions in them have been studied. The methodological concepts are outlined of the developed monitoring system, including provisions for the procedure for recording and systematization of the readings of standard temperature and pressure transducers, approaches to calculation of characteristics from these data, which are necessary to assess the residual service life of elements. The algorithm of the system is prescribed in the form of a step-by-step execution of calculation procedures during monitoring within the scope of the proposed physical model of the metal service life's expiry, which is based on regular relationships between the steam conditions and the operating time as well as on the properties of the metal. The stage of service life expiry is assessed by the principle of linear summation of accumulated damages. The specific is presented of the description in this algorithm of initially accumulated metal damages when a monitoring system is implemented in already operating equipment. Information is presented on a numerical check of the developed algorithm, including against actual data on the performance of the implemented monitoring system. Proposals are formulated on the procedure for assessing the condition of the metal within the scope of predictive diagnostics, carried out on the basis of the operating system.

Keywords: monitoring, boiler, high-temperature elements, creep, monitoring transducers, equivalent parameters, equivalent operating time, service life, algorithm, damageability, metal condition