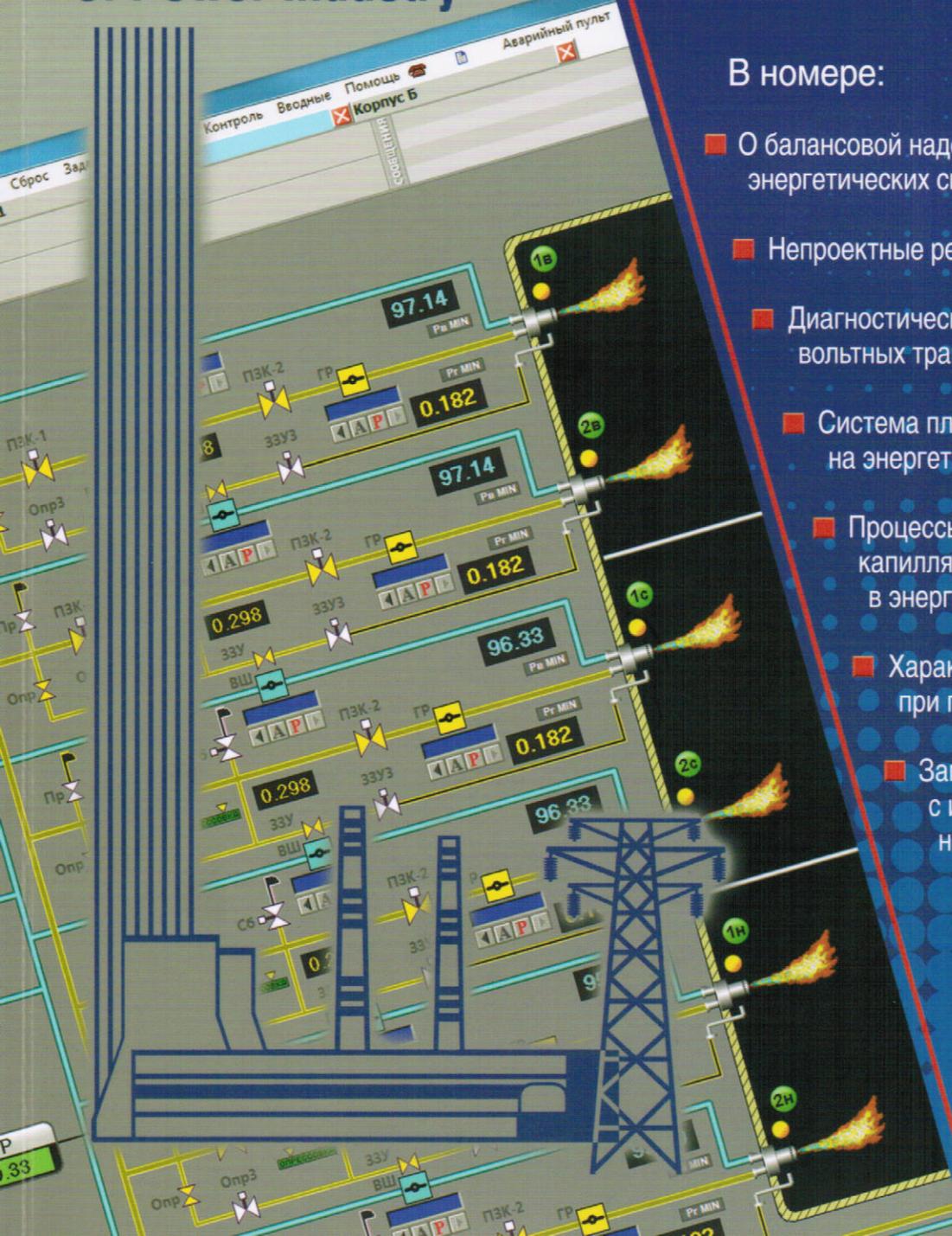


НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИКИ



Том 12 №1 2019

Safety & Reliability of Power Industry



В номере:

- О балансовой надежности электро-энергетических систем
- Непроектные режимы систем пароснабжения
- Диагностические измерения на высоко-вольтовых трансформаторах
- Система плазменного розжига на энергетических котлах
- Процессы теплопередачи на капиллярно-пористых покрытиях в энергоустановках
- Характеристики релейной защиты при периодических проверках
- Замена водяного отопления с использованием тепловых насосов

www.sigma08.ru
www.testenergo.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

С. И. МАГИД — д. т. н., профессор, генеральный директор АО «Тренажеры электрических станций и сетей», директор Департамента «Технические обучающие системы в энергетических технологиях» TEST UNESCO (Москва, Россия)

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Е. Н. АРХИПОВА — д. т. н., технический директор АО «Тренажеры электрических станций и сетей» (Москва, Россия)

В. В. КУЛИЧИХИН — д. т. н., профессор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (Москва, Россия)

РЕДАКТОРЫ РАЗДЕЛОВ

Н. И. ВОРОПАЙ — чл.-корр. РАН, д. т. н., профессор, научный руководитель ФГБУН «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» Сибирского отделения Российской академии наук (ИСЭМ СО РАН) (Иркутск, Россия) — раздел «Общие вопросы надежности и безопасности энергетики»

В. И. ШАРАПОВ (д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Теплогасоснабжение и вентиляция» ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный технический университет» (Ульяновск, Россия) — раздел «Генерация электроэнергии и тепла»

Л. А. ХОМЕНОК (д. т. н., профессор, заведующий аналитическим отделом Научно-производственного объединения по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И. И. Ползунова (ЦКТИ) (Санкт-Петербург, Россия) — раздел «Проектирование, исследования, расчеты»

Н. Д. ЧИЧИРОВА (действительный член Российской академии естественных наук, д. х. н., профессор, директор института теплоэнергетики, зав. кафедрой «Тепловые электрические станции» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (Казань, Россия) — раздел «Эксплуатация электрических станций»

В. СТРИЕЛКОВСКИ (доктор философии, профессор, научный сотрудник Кембриджской бизнес-школы Кембриджского университета (Англия) — раздел «Электрогенерация зарубежных стран»

И. Г. АХМЕТОВА (д. т. н., доцент, директор института цифровых технологий и экономики ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет» (Казань, Россия) — раздел «Цифровые технологии и экономика»

Н. Н. ШВЕЦ (д. э. н., профессор, зав. кафедрой «Мировая электроэнергетика» МГИМО МИД России) — раздел «Энергетические аспекты международных отношений»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. Н. ВИВЧАР — к. г. н., советник Директора ФГАУ «НИИ «Центр экологической промышленной политики» (Москва, Россия)

Е. П. ГРАБЧАК — Директор Департамента оперативного контроля и управления в электроэнергетике Министерства энергетики Российской Федерации (Москва, Россия)

Х. С. ДРАГАНЧЕВ — профессор Технического университета (Варна, Болгария)

И. Ш. ЗАТРЕТДИНОВ — к. т. н., генеральный директор АО «Институт Теплоэлектропроект», (Москва, Россия)

З. ЗИМОН — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой Бранденбургского Технического Университета (Котбус-Зенфтенберг, Германия)

Н. А. ЗРОИЧИКОВ — д. т. н., профессор, заместитель директора по научной работе ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского» (ОАО «ЭНИН») (Москва, Россия)

М. Х. Г. ИБРАГИМОВ — д. т. н., профессор, Первый заместитель председателя НП «Техноэкспо» (Москва, Россия)

Н. Б. КАРНИЦКИЙ — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

С. А. КРОПАЧЕВ — д. и. н., начальник Учебно-тренировочного центра АО «Мособлэнерго» (Москва, Россия)

Б. М. ЛАРИН — д. т. н., профессор кафедры химии и химических технологий в энергетике ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В. И. Ленина» (Иваново, Россия)

М. Ю. ЛЬВОВ — д. т. н., советник генерального директора АО «Объединенная энергетическая компания» (Москва, Россия)

М. Е. МАРЧЕНКО — к. т. н., генеральный директор ООО «Энив» (Москва, Россия)

В. Е. МЕССЕРЛЕ — д. т. н., профессор, главный научный сотрудник НИИ экспериментальной и теоретической физики Казахского Национального Университета им. аль-Фараби (Алматы, Казахстан)

С. В. МИЩЕРЯКОВ — д. э. н., к. т. н., Генеральный директор Некоммерческого Партнерства «Корпоративный образовательный и

научный центр Единой энергетической системы» (Москва, Россия)
Д. МОРВА — доктор, профессор Будапештского политехнического университета (Будапешт, Венгрия)

Л. П. МУЗЫКА — к. т. н., доцент, директор ООО «Ресурс-персонал» (Омск, Россия)

А. Н. НАЗАРЫЧЕВ — д. т. н., профессор, ректор ФГАУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» (Санкт-Петербург, Россия)

В. А. НЕПОМНЯЩИЙ — академик Российской академии естественных наук, д. э. н., профессор, к. т. н. (Санкт-Петербург, Россия)

М. М. ПЧЕЛИН — Государственный советник РФ 1-го класса в отставке, лауреат премии Совета Министров СССР (Москва, Россия)

Н. Д. РОГАЛЕВ — д. т. н., профессор, ректор ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», председатель Ученого совета (Москва, Россия)

А. И. ТАДЖИБАЕВ — д. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Диагностика энергетического оборудования» ФГАУ ДПО «Петербургский энергетический институт повышения квалификации» (Санкт-Петербург, Россия)

А. Е. УЖАНОВ — к. с. н., доцент кафедры «Мировая электроэнергетика» Международного института энергетической политики и дипломатии МГИМО МИД России, член-корреспондент Академии военных наук (Москва, Россия)

К. ФРАНА — д. т. н., профессор, заместитель декана факультета «Машиностроение» Технического университета (г. Либерец, Чехия)

М. И. ЧИЧИНСКИЙ — к. т. н., Генеральный инспектор — начальник Департамента технического надзора и аудита ПАО «Федеральная сетевая компания Единой энергетической системы» (ПАО «ФСК ЕЭС») (Москва, Россия)

А. Я. ШЕЛГИНСКИЙ — д. т. н., профессор кафедры «Промышленные теплоэнергетические системы», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (Москва, Россия)

Учредитель и издатель: Научно-производственное объединение «Энергобезопасность».
Периодичность издания четыре раза в год. Выходит с 2008 года.

Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере массовых коммуникаций, связи и охраны культурного наследия.
Свидетельство ПИ № ФС77-31974 от 14 мая 2008 г.

Журнал включен в новый перечень ВАК Министерства образования и науки РФ рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней, а также в базы данных: РИНЦ, ВИНИТИ, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory.

Журнал ассоциирован при Международном центре обучающих систем ЮНЕСКО и Международной кафедре-сети ЮНЕСКО «TVET».
Полнотекстовые версии статей размещены в научной электронной библиотеке elibrary.ru.

Подписные индексы:

45024 — Объединенный каталог и интернет-каталог «Пресса России», E45024 — Интернет-каталог «Книга-сервис».

Художественный редактор: — Маланьин Д. Б.

Технический редактор — Кутько Н. Е.

Подписано в печать 29.03.2019 г. Отпечатано в ООО «Паритет».

Почтовый адрес редакции: 117587, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 125 Ж, корп. 6, ООО «НПО «Энергобезопасность»
Телефон: +7 495 665-76-00, телефон/факс: +7 495 382-79-74; e-mail: sigma08@sigma08.ru; www.sigma08.ru

EDITOR-IN-CHIEF

Sergey I. MAGID — Dr. of Tech. Sc., Professor, Director General, JSC «Simulators of power plants and networks», Director of the Department «Technical educational systems in energy technologies» TEST UNESCO (Moscow, Russia).

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Elena N. ARKHIPOVA — Dr. of Tech. Sc., Technical Director, JSC «Simulators of power plants and networks» (Moscow, Russia)
Vladimir V. KULICHIKHIN — Dr. of Tech. Sc., Professor, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)

SECTION EDITORS:

Nikolay I. VOROPAI — Corr. Member of the RAS, Dr. of Tech. Sc., Professor, Scientific Director of the Melentiev Energy Systems Institute of Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Irkutsk, Russia) — section «General issues of safety and reliability of power industry»
Vladimir I. SHARAPOV — Dr. of Tech. Sc., Professor, head of the Department of heat and gas supply and ventilation of the «Ulyanovsk State Technical University» (Ulyanovsk, Russia) — section «Electric power and heat generation»
Leonid A. KHOMENOK — Dr. of Tech. Sc., Professor, The head of analytical Department I. I. Polzunov Scientific and Development Association on Research and Design of Power Equipment (St. Petersburg, Russia) — section «Design, research, calculations»
Nataliya D. CHICHIROVA — full member of the Russian Academy of Natural Sciences, Dr. of Chem. Sc., Professor, Director of the Thermal Engineering Institute, head of the Department of thermal power plants of the «Kazan State Power Engineering University» (Kazan, Russia) — section «Operation of power plants»
Wadim STRIELKOWSKI — Ph.D., University of Cambridge, Judge Business School (Cambridge, England) — section «Power generation in foreign countries»
Irina G. AKHMETOVA — Dr. Eng., Associate Professor, Director of the Institute of Economics and Information Technologies, FSBEI of Higher Education Kazan State Power Engineering University (Kazan, Russia) — section «Digital technologies and economy»
Nikolay N. SHVETS (PhD (Ec.)), Professor, Head of the World Electric Power Industry Department, MGIMO University of the Russian Federation Ministry of Foreign Affairs) — section Energy Related Aspects of International Relations

EDITORIAL BOARD

Anton N. VIVCHAR — Cand. of Geogr. Sc., Advisor of Director of Federal State Autonomous Institution Research Institute «Environmental Industrial Policy Centre»
Hristo S. DRAGANCHEV — Professor of the Varna Technical University (Varna, Bulgaria)
Evgeny P. GRABCHAK — Director of the Department for Operational Control and Management in the Electric Power Industry of the Ministry of Energy of the Russian Federation (Moscow, Russia)
Ilyas Sh. ZAGRETDINOV — Cand. Sc. (Eng), Director of JSC «Institute Teploelectroproject» (Moscow, Russia)
Sylvio SIMON — Prof. Dr.-Ing., Brandenburg University of Technology (Cottbus-Senftenberg, Germany)
Nikolay A. ZROICHIKOV — Dr. of Tech. Sc., Professor, «G. M. Krzhizhanovsky Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)
Marat H. G. IBRAGIMOV — Dr. of Tech. Sc., Professor, First Deputy Chairman, NP «Tekhnoekspo» (Moscow, Russia)
Nikolay B. KARNITSKIY — Dr. of Tech. Sc., Professor, head of the department of thermal power plants, the Belarus National Technical University (Minsk, Belarus)
Sergey A. KROPACHEV — Dr. of Hist. Sc., Head of Training Centre of JSC Mosoblenergo (Moscow, Russia)
Boris M. LARIN — Dr. of Tech. Sc., Professor, Department of chemistry and chemical technology in the power industry, of the «Ivanovo State Power University named after V.I. Lenin» (Ivanovo, Russia)
Mikhail Yu. LVOV — Dr. of Tech. Sc., Adviser to the General Director of United Energy Company JSC (Moscow, Russia)
Mikhail E. MARCHENKO — Cand. of Tech. Sc., Director, «Eniv», LLC (Moscow, Russia)
Vladimir E. MESSERLE — Dr. of Tech. Sc., Professor, Head Research Fellow of the Research institute of experimental and theoretical physics, the al-Farabi Kazakh National University (Almaty, Kazakhstan)
Sergey V. MISHCHERYAKOV — Dr. of Econ. Sc., Cand. of Tech. Sc., Director General of the Non-profit Partnership «Corporate Training and Scientific Center of the Unified Energy System» (Moscow, Russia)
George MORVA — Sc. Dr., Professor, the Budapest Polytechnic University (Budapest, Hungary)
Leonid P. MUZYKA — Cand. of Tech. Sc., Director, «Resurs-Personal», LLC (Omsk, Russia)
Aleksandr N. NAZARYCHEV — Dr. of Tech. Sc., Professor, Rector of the «Peterburg power engineering institute of professional development» (St. Petersburg, Russia)
Vladimir A. NEPOMNYASHCHIY — Academician of the RANS, Dr. of Econ. Sc., Professor, Cand. of Tech. Sc. (St. Petersburg, Russia)
Mikhail M. PCHELIN — Class I State Councilor of the RF (retired), awardee of the Prize of the Council of Ministers of the USSR (Moscow, Russia)
Nikolay D. ROGALEV — Dr. of Tech. Sc., Professor, Rector of the National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Chairman of the Academic Council (Moscow, Russia)
Aleksey I. TADZHIBAYEV — Dr. of Tech. Sc., Professor, head of the Department of diagnostics of energy systems, «Peterburg power engineering institute of professional development» (St. Petersburg, Russia)
Aleksandr E. UZHANOV — Cand. of Sociol. Sc., Associate Professor of World Power Industry Department, International Institute of Energy Policy and Diplomacy, MGIMO of the Russian Federation Foreign Ministry, associate member of the Academy of Military Sciences (Moscow, Russia)
Karel FRANA — Prof. Dr. — Ing. habil, Technical University of Liberec (Liberec, Czech Republic)
Mikhail I. CHICHINSKIY — Cand. of Tech. Sc., Inspector General/Head of the Department of technical supervision and audit, PJSC «Federal Grid Company of the Unified Energy System» (Moscow, Russia)
Aleksandr Y. SHELGINSKY — Dr. of Tech. Sc., Professor of Heat Power Industry Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (Moscow, Russia)

Founder and publisher: Scientific and Production Association «Energobezопасnost».
Frequency of the edition four times a year. Leaves since 2008.

The journal is registered in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Mass Communication, Communications and the Protection of Cultural Heritage. Certificate ПИИ № ФС77-31974 dated May 14, 2008.

The journal is included into the SCADT's List of major reviewed scientific journals and publications, which shall publish the key scientific findings of theses for academic degrees of Doctor and Candidate of Sciences. The Journal is included in the following databases: RINC, VINITI, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory.

The journal is associated with the UNESCO International Center of Training Systems and the UNESCO International Chair Network «TVET».

Artistic editor: Malanin D. B. Technical Editor: Kutko N. E. Signed in the press on March 29, 2019. Printed in LLC Paritet.

Mailing address of the editorial office: NPO «Energobezопасnost» Build. 6, 125 «Zh» Varshavskoye Shosse, Moscow, 117587.
Tel: +7 495 665-76-00, tel./fax: +7 495 382-79-74; e-mail: sigma08@sigma08.ru; www.sigma08.ru

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ НАДЕЖНОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ ЭНЕРГЕТИКИ

Беляев Н. А., Егоров А. Е., Коровкин Н. В., Чудный В. С. Экономические аспекты обеспечения балансовой надежности электроэнергетических систем.....	4
Киселева А. И., Фокин А. М. Комплексный подход к оценке влияния непроектных режимов на работу систем пароснабжения.....	10
Тихонов В. А. О влиянии периодичности диагностических измерений на повышение надёжности высоковольтных трансформаторов	18

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТЫ

Михайлов В. Е., Колпаков С. П., Хоменок Л. А., Шестаков Н. С. О перспективе внедрения систем плазменного розжига на энергетических котлах.....	22
Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю., Шелгинский А. Я. Обобщение процессов теплопередачи и их сравнительная оценка для капиллярно-пористых покрытий в энергоустановках	29
Зеленцов Б. П., Трофимов А. С. Исследование эксплуатационных характеристик системы релейной защиты в условиях регулярных периодических проверок.....	36
Мартынов А. В., Кутько Н. Е. Целесообразность замены водяного отопления на воздушное с использованием тепловых насосов	45
Лаптев А. Г., Фарахов Т. М., Башаров М. М. Определение эффективности очистки газов от дисперсной фазы и модернизация скрубберов высокоэффективными насадками	50
Недосекин А. О., Смирнов А. В., Макаренко Д. П., Абдулаева З. И. Функционально-эксплуатационный риск как критерий для оценки долговечности автономной энергетической системы	56

ДИСКУССИИ

Музыка Р. Р. Об одной ошибке в «Методике осуществления коммерческого учета тепловой энергии, теплоносителя».....	63
---	----

ИНФОРМАЦИЯ

ХРОНИКА, ПУБЛИКАЦИИ.....	65
ПЕСТРЫЙ МИР: ФАКТЫ, МНЕНИЯ, МЕТАФОРИЗМЫ	79

CONTENTS

GENERAL ISSUES OF RELIABILITY AND SAFETY OF ENERGY

Belyaev N. A., Egorov A. E., Korovkin N. V., Chudny V. S. Economic aspects of ensuring the capacity adequacy of electric power systems.....	4
Kiseleva A. I., Fokin A. M. Integrated approach to assessment of impact of beyond-design modes on operation of steam supply systems	10
Tikhonov V. A. On the effect of the periodicity of diagnostic measurements on improving the reliability of high-voltage transformers	18

DESIGN, RESEARCH, CALCULATIONS

Mikhailov V. Ye., Kolpakov S. P., Khomenok L. A., Shestakov N. S. On the prospect of introduction of plasma ignition in power boilers	22
Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Shelginsky A. Y. Summary of heat transfer processes and their comparative evaluation for capillary porous coatings in power plants	29
Zelentsov B. P., Trofimov A. S. Study of functioning of relay protection system under regular check conditions	36
Martynov A. V., Kutko N. E. Expediency of substitution of water heating with air heating involving use of heat pumps	45
Laptev A. G., Farakhov T. M., Basharov M. M. Determining efficiency of removal of dispersed phase from gases and modernization of scrubbers using high-performance packings	50
Nedosekin A. O., Smirnov A. V., Makarenko D. P., Abdoulaeva Z. I. Functional and operational risk as a criterion for assessing the durability of an autonomous energy system.....	56

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-29-35>

УДК 621.311

Обобщение процессов теплопередачи и их сравнительная оценка для капиллярно-пористых покрытий в энергоустановках

Генбач А. А.¹, Бондарцев Д. Ю.^{*2}, Шелгинский А. Я.³

¹ Алматинский Университет Энергетики и Связи
Республика Казахстан, 050013, Алматы, ул. Байтурсынова, 126

² АО «Трест Средазэнергомонтаж»
Республика Казахстан, 050004, Алматы, пр. Абылай хана, 56

³ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Российская Федерация, 11250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Поступила / Received 06.02.2019

Принята к печати / Accepted for publication 05.03.2019

Исследован кризис теплообмена при кипении воды в пористых структурах, используемых при охлаждении теплонапряженных поверхностей различных агрегатов применительно к энергетическим установкам электростанций. Эксперименты проводились на стенде с подводом теплоты от электронагревателя. Охлаждение теплообменных поверхностей осуществлялось подачей воды в пористые структуры с различными размерами ячеек. Показано, что в пористых системах охлаждения элементов теплоэнергоустановок протекают процессы кипения жидкости и при высоких тепловых потоках возможно наступление кризисной ситуации с перегревом теплообменной поверхности. Описаны процессы теплообмена, показано влияние теплофизических свойств поверхности теплообмена и определены оптимальные размеры ячеек пористых структур. Получено расчетное уравнение для определения критического теплового потока при высоких давлениях. Расчет величины критической нагрузки применительно к исследованным пористым структурам проводился с учетом недогрева и скорости потока, из которого следует, что недогрев жидкости позволяет несколько расширить теплопередающие возможности в пористой системе охлаждения. Представлено обобщение опытных данных исследованной капиллярно-пористой системы охлаждения, работающей при совместном действии капиллярных и массовых сил, и дано сравнение ее характеристик $q=f(\Delta T)$ с кипением в большом объеме, тепловыми трубами и тонкоплочными испарителями. Приведены исследованные предельные возможности различных капиллярно-пористых покрытий. Высокая форсировка теплопередачи обеспечивается комбинированным действием капиллярных и массовых сил и имеет преимущества по сравнению с кипением в большом объеме, тонкоплочными испарителями и тепловыми трубами. Показано, что результаты теоретических расчетов и экспериментальных данных хорошо согласуются.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: кризис кипения, капиллярно-пористые структуры, размер ячеек, теплофизические свойства, поверхность теплообмена, системы охлаждения

Адрес для переписки:

Бондарцев Д. Ю.
АО «Трест Средазэнергомонтаж».
Республика Казахстан, 050004, Алматы, пр. Абылай хана, 56.
e-mail: d.bondartsev@saem.kz

Address for correspondence:

Bondartsev D. Yu.
JS «Trest Sredazenergomontazh».
Republic of Kazakhstan, 050004, Almaty, Abylai Khan Ave., 56.
e-mail: d.bondartsev@saem.kz

Для цитирования:

Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю., Шелгинский А. Я. «Обобщение процессов теплопередачи и их сравнительная оценка для капиллярно-пористых покрытий в энергоустановках» 2019. – Т. 12, №1. – С. 29–35.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-29-35>

For citation:

Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Shelginsky A. Y.
[Summary of heat transfer processes and their comparative evaluation for capillary porous coatings in power plants].
Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2019, vol. 12, no 1, pp. 29–35. (in Russian)
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-29-35>

Summary of heat transfer processes and their comparative evaluation for capillary porous coatings in power plants

Genbach A. A.¹, Bondartsev D. Yu.*², Shelginsky A. Y.³

¹ Almaty University of Power Engineering and Telecommunications
Republic of Kazakhstan, 050013, Almaty, Baitursynov Street, 126

² JS «Trest Sredazenergomontazh»
Republic of Kazakhstan, 050004, Almaty, Abylai Khan Ave., 56

³ National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Krasnokazarmennaya str. 14, 111250, Moscow, Russia

The crisis of heat exchange at boiling of water in porous structures used for cooling of heat-stressed surfaces of various aggregates is investigated. The study refers to thermal power installations of power plants. The experiments were carried out on a stand with heat supply from an electric heater. Cooling of heat-exchange surfaces was performed by water supply to porous structures with different cell sizes. It is shown that in porous cooling systems of elements of heat and power plants processes of fluid boiling take place, and at high heat flows it is possible to approach a crisis situation with overheating of the heat-exchange surface. The heat exchange processes are described, the influence of thermophysical properties of heat exchange surface is shown, and optimal sizes of porous structure cells are determined. A calculated equation is obtained for determining the critical heat flux at high pressures. The calculation of the critical load with respect to the examined porous structures was carried out with taking into account the underheating and flow rate, from which it follows that the underheating of the liquid enables to expand slightly the heat transfer capabilities in a porous cooling system. The experimental data of the investigated capillary porous cooling system operating under the joint action of capillary and mass forces are generalized, and its characteristics $q=f(\Delta T)$ are compared with boiling in large volume, heat pipes and thin-film evaporators. The limits of different capillary-porous coatings are given. High heat transfer boosting is provided by combined action of capillary and mass forces and has advantages in comparison with boiling in large volume, thin-film evaporators and heat pipes. It is shown that the results of theoretical calculations conform well with experimental data.

KEYWORDS: boiling crisis, capillary porous structures, cell size, thermal properties, heat exchange surface, cooling systems

Введение

Исследование различных факторов, влияющих на теплообмен в пористых структурах, показывает, что особый интерес вызывают предельные тепловые потоки, при которых наступает кризис кипения, приводящий к пережогу поверхности теплообмена и пористой структуры. В этом случае требуются знания величин тепловых потоков и термических напряжений с целью обеспечения надежной и долговечной работы установки.

Для поверхностей с пористым покрытием этот вопрос особенно актуален. Время роста пузыря в десятки раз меньше, чем в большом объеме. Значительно изменяются гидродинамические условия подпитки жидкостью. Паровая пленка при определенных условиях препятствует контакту жидкости с поверхностью теплообмена даже при большом избытке жидкости.

Постановка задачи исследования

Сложной задачей в различных энергетических установках является создание системы охлаждения высокотемпературных деталей и узлов. К ним можно отнести топочные экраны высокофорсированных котельных агрегатов, камеры сгорания, сопла и лопатки газотурбинных агрегатов [1–3].

В системах охлаждения протекают процессы пузырь-

чатого кипения жидкости (воды). При высоких тепловых нагрузках не исключается наступление кризисной ситуации с возможным перегревом теплообменной поверхности [4–8]. Для исследования кризиса кипения разработана экспериментальная установка, схема которой представлена на рисунке 1.

Следует ожидать, что применительно к изучаемой пористой системе охлаждения величина удельного теплового потока, при котором наступает кризис кипения, $q_{кр}$, будет зависеть от недогрева и скорости потока. Недогрев жидкости позволит расширить теплопередающие возможности системы охлаждения. Поскольку процессы теплопередачи протекают в тонких пористых структурах, то даже незначительный избыток свободно стекающей пленки по внешней стороне структуры, определяемый параметром \tilde{m} при данном гидростатическом давлении ΔP_d и условном коэффициенте проницаемости K_y , создает ядро жидкости, из которого непрерывно будет подсасываться недогретый охладитель за счет разности температур и капиллярных сил [9–11].

Экспериментальная установка и условия проведения опытов

Установка (рисунок 1) имела искривленную поверхность и работала под высоким давлением. Установка позволяла изучить интегральные (средние) теплооб-

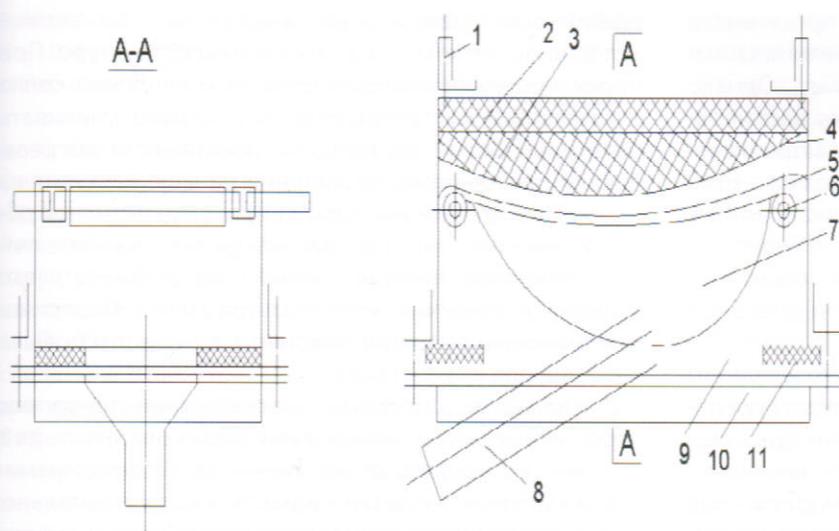


Рисунок 1. Схема экспериментальной установки с искривлённой поверхностью, работающая под высоким давлением: 1 — электрод, 2 — асбестовая плита, 3 — асбестовая пушонка, 4 — нихром, 5 — сетчатая структура, 6 — труба подвода жидкости, 7 — паровой канал, 8 — патрубок отвода пара, 9 — корпус, 10 — крышка, 11 — прокладка

Figure 1. The scheme of the experimental unit with curved surface, operating under high pressure: 1 — electrode, 2 — asbestos board, 3 — flaked asbestos, 4 — nichrome, 5 — grid structure, 6 — liquid supply pipe, 7 — steam channel, 8 — steam branch pipe, 9 — body, 10 — cover, 11 — gasket

менные характеристики капиллярно-пористой системы охлаждения и содержала устройство охлаждающего элемента с трубчатыми артериями, перфорированную прижимную пластину и микроартерии. Исследовались влияния факторов на $q_{кр}$: высоты теплообменной поверхности, давления в системе охлаждения, вида пористой структуры, ориентации и материала поверхности вплоть до пережога стенки и фитилей.

Подвод электрической энергии к основному нагревателю осуществляется от сварочного трансформатора типа ТСД-1000, выходное напряжение которого составляет следующие фиксированные значения: 2,5; 5; 7,5 и 10 В. Электрический ток, питающий нагреватель, измеряется по схеме с универсальным трансформатором типа УТТ-6М2 кл. 0,2. Вторичный ток составляет до 5 А, первичный — 100...2000 А. Падение напряжения на нагревателе измеряется вольтметром типа Д523 кл. 0,5. Наибольшая возможная погрешность при измерении тока — $\pm 0,6\%$, падение напряжения — $\pm 1\%$, мощности — $\pm 1,6\%$. Электрическая энергия на охранный нагреватель подается от регулятора напряжения типа РНО.

При изучении начала закипания жидкости и критических нагрузок для подвода теплоты используется трансформатор тока типа ТСД-1000, с выходным напряжением холостого хода 71 В. Сила тока регулируется в пределах 200...1200 А. Измерения температур жидкости и окружающей среды производятся ртутными термометрами ТЛ – 4 со шкалой 0...50°C и 50...100°C и ценой деления 0,1°C.

Температуры пара и сливающейся жидкости измеряются хромель-копелевыми термопарами, изготовленными из проволоки диаметром $0,1 \times 10^{-3}$ м. Диаметр

головки спая термопар составляет $0,4 \times 10^{-3}$ м. Электроды термопар изолируются двухканальными сололками диаметром 1×10^{-3} м, которые крепятся клеем БФ-2 внутри инъекционных игл, имеющих диаметр $1,2 \times 10^{-3}$ м.

Для измерения температуры стенки электроды термопар диаметром $0,2 \times 10^{-3}$ м привариваются к ней электрической дугой, образующейся во время разрядки конденсаторов. Для этого нормально к поверхности стенки толщиной 2×10^{-3} м производится сверление на глубину $1,9 \times 10^{-3}$ м диаметром $1,2 \times 10^{-3}$ с точностью $\pm 0,05 \times 10^{-3}$ м. Электроды термопар изолируются фарфоровой сололкой диаметром $1,2 \times 10^{-3}$ м и выводятся по поверхности стенки между двумя слоями слюды с толщиной $0,05 \times 10^{-3}$ м, приклеенной к поверхности нагревателя. Холодные концы термопар термостатируются в тающем льде. Электроды термопар соединяются с

двумя двенадцатиточечными переключателями ПП-63 кл. 0,05. Для исключения влияния наведенных блуждающих токов на показания термопар установка и приборы заземляются. Расходы охлаждающей и циркуляционной жидкости определяются электрическими ротаметрами типа РЭД с вторичным электронным прибором типа КСД3 43 кл.1, тарированным объемным методом. Расходы сливающейся жидкости и конденсата фиксируются с помощью мерной емкости со шкалой давления $0,5 \times 10^{-3}$ л, а время наполнения — секундомером типа С-П-16 с ценой деления 0,1 секунда.

Наибольшая возможная погрешность при определении расхода жидкости ротаметрами не превышает $\pm 3\%$, а объемным методом — $\pm 2\%$. Условный коэффициент проницаемости исследован в [1]. Разброс значений величины K_y при обобщении опытных данных не превышает $\pm 16\%$.

Невязка баланса по подведенной током теплоты и теплоты, отведенной циркуляционной и избыточной водой с учетом $Q_{из}$ не превышает $\pm 12\%$, а по подведенному паром теплу в конденсаторе и теплу, отведенному циркуляционной водой, $\pm 11\%$. Расхождение материального баланса между расходом охлаждающей жидкости, расходом слива и конденсата оставляет не больше $\pm 10\%$.

Анализ результатов исследования

Избыток жидкости в пористой системе создает направленное движение потока, что приводит к деформации паровых пузырей в структуре, уменьшению их диаметра, росту частоты образования пузырей. При увеличении скорости потока возрастает энергия, за-

трачиваемая на вытеснение жидкости из пристенного пограничного слоя, а следовательно, увеличивается скорость генерации пара $V_{кр}$ и величина $q_{кр}$. Однако при некотором значении скорости потока жидкости, определяемой параметром $\tilde{m}_{кр}$, энергии, затрачиваемой на выдавливание жидкости из двухфазного пристенного слоя, будет недостаточно, и возникает кризис теплопередачи. Конечно, увеличение $q_{кр,v}$ будет достигнуто при больших расходах жидкости, что приведет к росту затрат энергии на привод нагнетательных машин [2, 3].

По достижению определенной величины расходного влагосодержания $\Phi_{кр}^1$ скорость потока не будет способствовать увеличению величины $q_{кр}$, а в некоторых случаях может привести даже к снижению ее величины, поскольку затрудняется эвакуация пара из пристенной зоны. Увеличение скорости жидкостной пленки, прилегающей к стенке, за счет параметра \tilde{m} , начнет уступать доминирующему влиянию падения влагосодержания Φ^{-1} в той же зоне, которое в большей степени скажется на величину $q_{кр}$, даже уменьшая ее. Поэтому требуется в каждом отдельном случае устанавливать оптимальное соотношение избытка жидкости \tilde{m} в зависимости от вида пористой структуры.

Гидродинамическая модель кризиса кипения жидкости в большом объеме на технической поверхности не отражает влияния теплофизических свойств стенки, хотя оно имеет место, что может быть объяснено колебательным движением границы раздела "пар-жидкость". Это приводит к волнообразному движению у поверхности нагрева. Поэтому, в отдельных местах такой поверхности следует ожидать резонансные явления, когда температура стенки будет снижаться за счет большого отбора пара, а это означает, что чем выше теплофизические свойства стенки, тем интенсивнее будет происходить отвод величины q [4–8].

Для пористых систем охлаждения практически для всех режимных и геометрических параметров при пузырьковом кипении воды глубина проникновения температурной волны $h_{кр} < \delta_{ст}$, поэтому в расчетные соотношения для $q_{кр}$ толщина стенки $\delta_{ст}$ не вводится.

Обработка опытных данных позволила получить расчетное уравнение для $q_{кр}$ в случае, когда $P \geq 0,1$ МПа, а $b_r > 0,28 \times 10^{-3}$ м:

$$q_{кр} = 0,0347 r \left[g(p_{ж} - p_{п}) p_n \bar{D}_{o.кр} \right]^{-0,5} \left(\frac{b_r}{b_o} \right)^{0,3} \left(\frac{b_{\Phi}}{b_o} \right)^{0,5} (1 + \cos \beta)^{0,6}$$

Из уравнения следует, что $q_{кр} \sim \bar{D}_{o.кр}^{0,5}$ ($p \geq 0,1$ МПа).

Величина зависит от теплофизических свойств теплоотдающей поверхности: $\bar{D}_{o.кр} \sim K_{ст}^{-1}$, а $f_{кр}^{-1} \sim K_{ст}^2$, где $K_{ст} = 1 + [(p\lambda)_{ж}/(p\lambda)_{ст}]^{0,5}$. Тогда для поверхностей, выполненных из меди и нержавеющей стали и покрытых сетчатыми структурами, имеем: $\bar{q}_{кр} = 1,07$ ($p \geq 0,1$ МПа), $\bar{q}_{кр} = 1,15$ ($p < 0,1$ МПа).

Материал стенки оказывает влияние на величину $q_{кр}$ посредством комплекса $(\rho, c, \lambda)_{ст}$, где ρ, c, λ — плотность, теплоемкость и теплопроводность стенки, но однозначно утверждать это вряд ли правомерно, т. к.

практически невозможно выдержать одинаковые условия по чистоте обработки и микроструктуре. При проектировании камеры сгорания и особенно сопла в газотурбинных установках необходимо учитывать некоторый запас на толщину поверхности нагрева. Возникновение кризиса кипения раньше наступит на «тонких» нагревателях, поскольку в предкризисной области кипения начнет возрастать размер «сухого» пятна в основании пузырей, процесс теплообмена резко ухудшится, увеличится температура стенки. Поверхности, имеющие большую толщину, потребуют и больше времени для их разогрева.

Для поверхностей с пористым покрытием этот вопрос особенно актуален, так как в них время роста пузыря в десятки раз меньше, резко изменяются гидродинамические условия подпитки жидкостью и, следовательно, может увеличиться время пребывания пара у стенки, что исключит контакт жидкости с поверхностью теплообмена, несмотря на большой избыток жидкости \tilde{m} .

Описанный процесс является предысторией развития кризиса кипения. Дальнейшая «судьба» процесса при прочих равных условиях определяется теплоаккумулирующей способностью нагрева $(\rho, c, \lambda)_{ст}$. Когда величина комплекса будет подобрана большой, возрастет вероятность затягивания кризиса кипения, растечки теплоты вдоль поверхности нагрева возрастут, и вновь создадутся благоприятные условия контакта жидкой фазы со стенкой. Увеличение только толщины стенки в десять раз всего на несколько процентов повышает величину $q_{кр}$, причем это явление заметнее для высоко-теплопроводных материалов и при давлении, больше атмосферного.

На рисунке 2 представлено влияние ширины ячейки сетчатой структуры на $q_{кр}$. Отклонение расчетной линии (см. формулу $q_{кр}$) от экспериментальных точек не превышало $\pm 10\%$. Расчет выполнен по уравнению $q_{кр}$.

Сетка и стенка изготовлены из нержавеющей стали. Опыты проведены для условий: $h = 0,27$ м; $\tilde{m} = \text{опт.}$; $P = 0,1$ МПа; $\beta = 0$ град. Исследованы структуры вида: 1 —

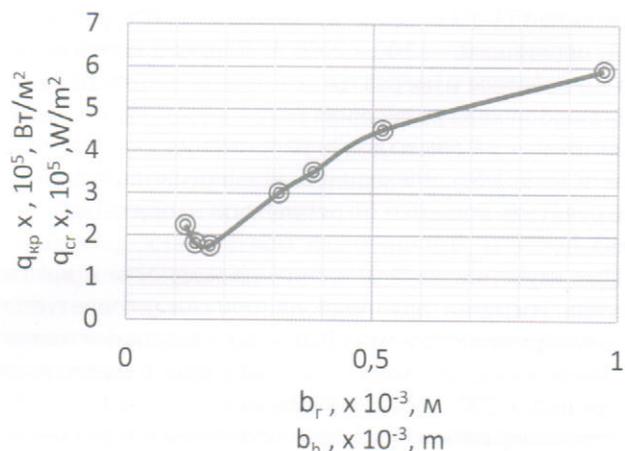


Рисунок 2. Влияние ширины ячейки сетчатой структуры на критический тепловой поток при кипении воды

Figure 2. Effect of the cell width of the grid structure on critical heat flow during water boiling

0,08x0,14; 2 — 0,08x0,14x0,28; 3 — 3x0,14; 4 — 2x0,28; 5 — 0,4; 6 — 0,55; 7 — 1x1.

Изучалось влияние различных материалов и толщин стенки на время начала разрушения поверхности в момент кризиса кипения. С помощью методов голографии и фотоупругости определено наиболее опасное место в момент разрушения пористой поверхности. Явления выброса капель жидкости из ячеек пористой структуры ухудшают интенсивность теплообмена при достижении некоторого граничного теплового потока. Подбором вида структуры это явление может быть сведено к минимуму. Наименьший выброс получен для однослойных сеток с ячейками более $0,28 \times 10^{-3}$ м. Возникающие ухудшенные режимы по своему механизму аналогичны процессам, протекающим при движении пароводяной смеси в трубах, не имеющих пористого покрытия. Этим режимам свойственен кризис сопротивления, когда на обогреваемом участке начинает уменьшаться сопротивление трения. Это связано с тем, что вследствие сильного выброса капель сокращается расход жидкости. В начальной стадии процесса выброса жидкости капли турбулизируют процесс, то при критическом выбросе количество жидкости становится недостаточным для орошения теплообменной стенки [9–11].

Интенсивный капельный унос нарушает плавное течение жидкости по внешней поверхности сетки, наблюдается разрыв пленки, что также ухудшает притоки свежих порций относительно холодной жидкости к пристенному двухфазному пограничному слою. Подбор опытным путем пористых структур практически исключил выброс капель при данном тепловом потоке, что связано с балансированием сил трения жидкости в сетках и на поверхности сеток с каплями и паровым потоком в сетках и околосеточном пространстве [1]. В результате нарушения баланса действующих сил количество поступающей жидкости становится недостаточным, на поверхности нагрева появляются «сухие» пятна, температура стенки плавно повышается до некоторого значения и процесс протекает при температурных напорах (60...80) К. Пульсирующий режим снабжения стенки жидкостью не приводит к пережогу поверхности, хотя интенсивность теплопередачи снижается. Однако возникают пульсации температуры стенки и связанные с ними термические разрушающие напряжения, сокращающие срок службы поверхности. Поэтому важно правильно оптимизировать вид пористой структуры и не допускать высоких перегревов стенки относительно температуры жидкости.

Кризисное кипение характеризуется потерей устойчивости пульсирующей жидкостной пленки и запариванием паровыми образованиями ячеек структуры. Несмотря на достаточное количество жидкости, наблюдается резкий рост термического сопротивления пограничного слоя, ухудшение эффекта турбулизации за счет затрудненного отвода пара из ячеек пористой структуры. При кризисе кипения, как показали голографическая интерферометрия и скоростная киносъемка [2, 3], переносимый тепловой поток приобретает пре-

дельные значения $q_{кр}$, пузыри пара до их отрыва начинают проникать в соседние ячейки структуры, сливаются в конгломераты и образуют очаговые зоны паровых пленок. Содержащиеся пленки жидкости под паровыми конгломератами высыхают и, несмотря на имеющееся большое количество жидкости в пористой структуре и на ее поверхности, охладитель не может проникнуть к стенке. Наступает предельное значение температурного напора по отношению к температуре насыщения T_n , $\Delta T_{кр} = T_{кр} - T_n$, где величина $T_{кр}$ соответствует значению $q_{кр}$. При $\Delta T \geq \Delta T_{кр}$, что более вероятно для пористых структур при $p < 0,1$ МПа, когда имеют место наименьшие значения критического перегрева стенки, либо для сеток с ячейками менее $0,14 \times 10^{-3}$ м. Микрослой жидкости испаряется под паровым пузырем, или его конгломератом, резко возрастает температура стенки в окрестности «сухого» пятна, исключая контакт имеющийся порции жидкости со стенкой.

Изучение кипения жидкости без пористой структуры [4–9] показывает, что в случае приближения теплового потока к величине $\sim 1 \times 10^5$ Вт/м² резко увеличивается число центров парообразования, пленка жидкости «набухает». Паровые пузыри начинают взаимодействовать друг с другом, разрушаясь при меньших размерах. Основная доля теплоты расходуется на испарение жидкости в пузыри. При наступлении критического режима пленка жидкости распадается на сфероидальные капли и не смачивает поверхность нагрева. Температура стенки начинает резко возрастать, вплоть до его прогара. Увеличение расхода жидкости не приводит к положительным результатам. Кризис наступает в тот момент, когда скорость испарения жидкости превышает скорость ее растекания по поверхности. Происходит высыхание пленки на периферии поверхности нагрева и стягивание ее к центру.

Поскольку размеры пор исследованных сеточных структур можно считать одинаковыми, выход пара из них будет равновероятным. Паровые столбики могут генерироваться в значительно больших ячейках, чем, например, в порошковых материалах, и отстоящих друг от друга на меньшем расстоянии, и даже в ячейках, вплотную прилегающих друг к другу. Если для воды при кипении в большом объеме под атмосферным давлением критическая длина волны $\lambda_{кр}$ между паровыми столбиками составляет $(15...25) \times 10^{-3}$ м, то для порошкового пористого покрытия она в (5...15) раз меньше. Если величина $q_{кр} \sim U_{кр} \sim \lambda_{кр}^{-0,5}$, (где $U_{кр}$ — критическая скорость пара), то значение $q_{кр}$ для порошковых материалов оказывалось в два раза выше, однако при большем температурном напоре $\Delta T = (600...800)$ К. Для сеточных структур, работающих в поле гравитационных сил, несмотря на еще меньшее значение величины $\lambda_{кр}$, величина $q_{кр}$ была близка к значениям, достигнутому при кипении в большом объеме на технической поверхности, однако при величине $\Delta T_{кр} = 60$ К.

Следовательно, определяющим фактором кризиса кипения следует считать гидродинамические условия в объеме и на поверхности сеток, которые, в свою оче-

редь, зависят от вида структуры и организации подвода жидкости. За счет незначительного избытка жидкости (слабого недогрева и скорости потока), как показали визуальные наблюдения, стало возможным управлять паровым фронтом в объеме структуры и, прежде всего, разрушать скапливающиеся паровые образования. Исследования проводились с увеличением теплового потока вплоть до выхода из строя из-за пережога нагревателя и капиллярно-пористой структуры (рисунок 3).

Оценка для кризисного состояния доли поверхности, занятой паром, для $p = 0,1$ МПа, $\Delta T_{кр} = 60$ К, $\bar{D}_{о.кр} = 0,5 \times 10^{-3}$ м, $\tilde{m} = 1,1$, $\tilde{n} = 5 \times 10^6$ м⁻², дает:

$$\frac{F_{п}}{F} \geq \frac{\pi \bar{D}_{о.кр}^2 \bar{n} K_{мин}}{4} \geq \frac{2,5\pi}{16},$$

где $K_{мин}$ — коэффициент, учитывающий наличие «сухого» пятна под паровым пузырем. В момент кризиса величина $K_{мин} \geq 0,5$; F , $F_{п}$ — общая теплообменная поверхность, и поверхность, занятая паром.

Число ячеек для структуры $0,4 \times 10^{-3}$ м, приходящихся на 1 м², составляет $2,78 \times 10^6$ шт., т. е. в момент кризиса в каждой ячейке может находиться по два паровых пузыря. При кипении жидкости в большом объеме для горизонтального нагревателя с технической поверхностью в теории гидродинамического кризиса соотношение $F_{п}/F = \pi/16$, т. е. в 2,5 раза меньше. При стремлении величины $K_{мин} \rightarrow 1$ отношение $F_{п}/F \rightarrow 1$.

Геометрические размеры, существенно влияющие на перераспределение капиллярного и гравитационного потенциалов, оказывают воздействие на величину $q_{кр}$ и требует оптимизации. Наибольшее значение $q_{кр}$ получены для вертикальных поверхностей с крупными размерами ячеек ($\beta = 0$ град.), где β — угол

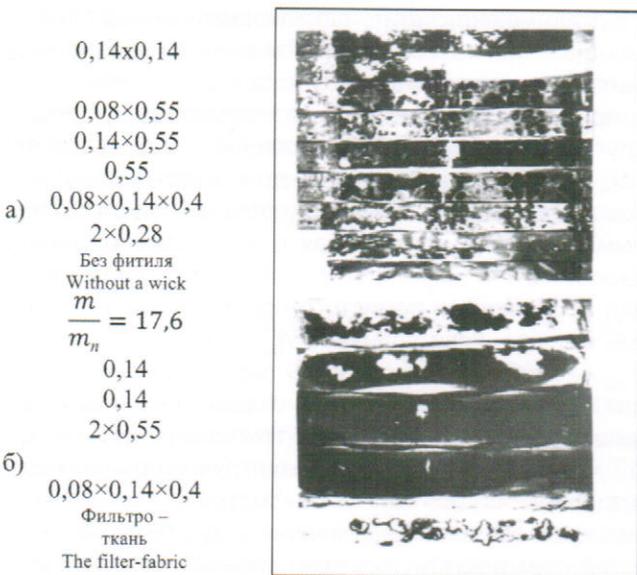


Рисунок 3. Перегоревшие нагреватели (а) и капиллярно-пористые структуры (б). Избыток жидкости изменялся от $m_{ж}/m_{п} =$ от 1 до 17,6

Figure 3. Burned heaters (A) and capillary-porous structures (B) wicks. Surplus of liquid changed $m_l/m_s =$ from 1 to 17,6

наклона поверхности к вертикали (см. формулу $q_{кр}$).

В сетчатых пористых структурах явление кризиса теплоотдачи протекает более плавно, чем на гладкой поверхности [10, 11], что аналогично вапотронному эффекту, когда на поверхности нагрева преднамеренно создается определенный рельеф с помощью выступов и углублений. В кризисной ситуации зона пленочного кипения начинает смещаться от основания ребер к их вершинам, увеличивая интенсивность теплоотдачи и величину $q_{кр}$. Это позволяет растянуть кризис кипения на неизотермической поверхности. В пористой системе охлаждения наличие пор и капилляров на поверхности теплообмена создает искусственную шероховатость, которая в данном случае будет играть роль ребер [1, 2]. К тому же необходимо учесть стабилизирующее действие капиллярных сил, выравнивающих распределение жидкости по теплообменной поверхности [3]. Сравнительная оценка различных систем охлаждения представлена на рисунке 4.

Таким образом, существенной зависимости теплопередающей способности исследованной системы от ши-

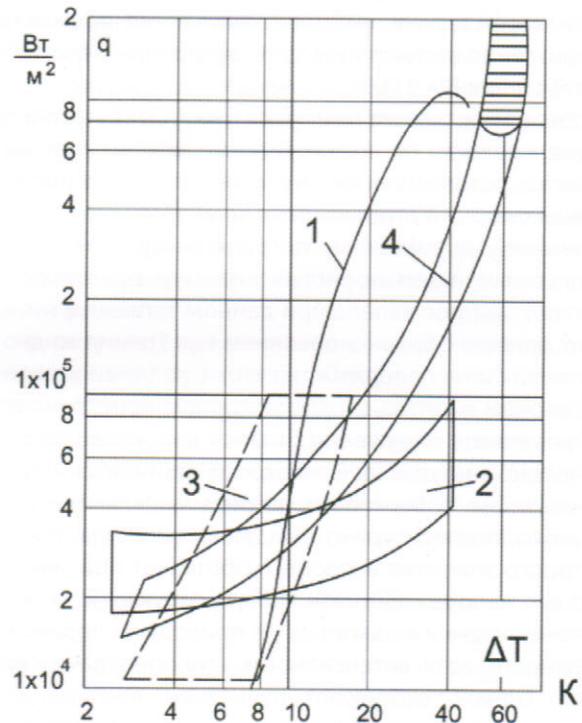


Рисунок 4. Влияние плотности теплового потока на перегрев стенки относительно температуры водяного пара [1–4] ($P = 0,1$ МПа): 1 — кипение в большом объеме на поверхности без покрытия [4–7]; 2 — область работы тепловых труб с сетчатыми фитилями [8, 9]; 3 — область работы тонкопленочных испарителей; 4 — исследованная пористая система охлаждения. Заштрихованная область — применение интенсификаторов в пористой системе [1–3]

Figure 4. Influence of heat flux density on wall overheating with respect to water vapor temperature [1–4] ($P = 0,1$ МПа): 1 — boiling in a large volume on uncoated surface [4–7]; 2 — area of heat pipes operation [8, 9]; 3 — area of operation of thin-film evaporators; 4 — studied porous cooling system. Shaded area means application of intensifiers in a porous system [1–3]

рины ячейки сетки (в десятки раз), как это имеет место в тепловых трубах, не замечено. Это можно объяснить тем, что при малых размерах ячеек при наличии гравитационных сил, высокое гидравлическое сопротивление не столь ограничивает расход жидкости, которая может частично стекать по сетчатой поверхности. В то же время повышенный размер ячеек не приводит к значительному уменьшению транспортной способности. Однако ширина ячейки сетки в рассматриваемой системе оказывает влияние на динамику развития паровых пузырей и, следовательно, на интенсивность теплообмена и величину $q_{кр}$. Протекание процесса пузыреобразования в отдельных (изолированных) ячейках, как это имело место в исследуемой системе, предотвращает преждевременное слияние паровых пузырей и образование сплошной паровой пленки.

Наличие крупных ячеек позволяет улучшить отвод легкой фазы от парогенерирующей поверхности. Однако увеличивать ячейки, начиная с ширины $0,4 \times 10^{-3}$ м, нецелесообразно, поскольку в таких ячейках, подобно кипению на технической поверхности без пористого покрытия, возникают паровые конгломераты.

Выводы

1. Проведены исследования кризиса теплообмена в зависимости от недогрева и скорости потока жидкости, теплофизических свойств поверхности нагрева и выброса капель жидкости из пористой структуры;
2. Получено расчетное уравнение для определения критического теплового потока;
3. Разработана экспериментальная установка и метод проведения экспериментальных исследований с использованием различных пористых структур;
4. Показано, что результаты теоретических расчетов и экспериментальных данных хорошо согласуются.
5. Определены принципы конструирования системы охлаждения поверхности с пористым покрытием;
6. Исследования имеют практическое значение для защиты от перегрева теплонапряженных поверхностей различных теплотехнических агрегатов.

Список использованных источников

1. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Iliev I. K. Investigation of a high-forced cooling system for the elements of heat power installations, *Journal of machine Engineering* 2018; (2): 106–117.
2. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Iliev I. K. Modelling of capillary coatings and heat exchange surfaces of elements of thermal power plants. *Bulgarian Chemical Communications, Volume 50, Special Issue G* 2018;: 133–139.
3. Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю. Разрушение капиллярно-пористых покрытий при интенсивном тепломассопереносе. «Деформация и разрушение материалов», РФ, Москва 2018; (10): 40–46.
4. Jamialahmadi M. et al., *Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures*, *Intern. J Heat Mass Transfer*, 51, 2482–2493. doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.07.052. 2008.
5. Ose Y., Kunugi T. Numerical Study on Subcooled Pool Boiling,

Programme in Nuclear Science and Technology 2011; (2): 125–129.

6. Krepper E. et al., *CFD Modelling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design*, *Nuclear Engineering and Design* 2007; (7): 716–731.

7. Овсянник А. В. Моделирование процессов теплообмена при кипении жидкостей / А. В. Овсянник. – Гомель: ГГТУ им. П. О. Сухого, Белоруссия 2012;: 284.

8. Alekseik O. S., Kravets V. Yu. Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2013; 4/8 (64): 26–31.

9. Jian Li, Fangjum Hong, Rongjian Xie, Ping Cheng. Pore scale simulation of evaporation in a porous wick of a loop heat pipe flat evaporator using Lattice Boltzmann method. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2019; (102): 22–33.

10. Kupetz M. Модернизация и продление срока эксплуатации паротурбинных электростанций в Восточной Европе и в России/ M. Kupetz, E. Jenikejew, F. Hiss. *Теплоэнергетика* 2014; (6): 35–43.

11. Гринь Е. А. Возможности механики разрушения применительно к задачам прочности, ресурса и обоснования безопасной эксплуатации тепломеханического энергооборудования. *Теплоэнергетика* 2013; (1): 25–32.

References

1. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Iliev I. K. Investigation of a high-forced cooling system for the elements of heat power installations, *Journal of machine Engineering* 2018; (2): 106–117.
2. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Iliev I. K. Modelling of capillary coatings and heat exchange surfaces of elements of thermal power plants. *Bulgarian Chemical Communications, Volume 50, Special Issue G* 2018;: 133–139.
3. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu. Destruction of capillary porous coatings at intensive heat and mass transfer. *Deformation and destruction of materials*, Moscow 2018; (10): 40–46. (In Russ.)
4. Jamialahmadi M. et al. *Experimental and Theoretical Studies on Subcooled Flow Boiling of Pure Liquids and Multicomponent Mixtures*, *Intern. J Heat Mass Transfer* 2007.07.052. 2008.
5. Ose Y., Kunugi T. Numerical Study on Subcooled Pool Boiling, *Programme in Nuclear Science and Technology* 2011; (2): 125–129.
6. Krepper E. et al. *CFD Modelling Subcooled Boiling-Concept, Validation and Application to Fuel Assembly Design*, *Nuclear Engineering and Design* 2007; (7): 716–731.
7. Ovsyanik A. V. *Modelling of Processes of Heat Exchange at Boiling Liquids* (In Russ.), Gomel State Technical University named after P. O. Sukhoy. Belarus 2012;: 284.
8. Alekseik O. S., Kravets V. Yu. Physical Model of Boiling on Porous Structure in the Limited Space, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* 2013; 4/8 (64): 26–31.
9. Jian Li, Fangjum Hong, Rongjian Xie, Ping Cheng. Pore scale simulation of evaporation in a porous wick of a loop heat pipe flat evaporator using Lattice Boltzmann method. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2019; (102): 22–33.
10. Kupetz M., Jeni Heiew E., Hiss F. Modernization and extension of the life of steam turbine power plants in Eastern Europe and Russia, *Heat power engineering* 2014; (6): 35–43. (In Russ.)
11. Grin E. A. 2013, The possibilities of fracture mechanics in relation to the problems of strength, resource and justification for the safe operation of thermal mechanical equipment, *Heat power engineering* 2013; (1): 25–32. (In Russ.)