

НАДЕЖНОСТЬ И БЕЗОПАСНОСТЬ ЭНЕРГЕТИКИ



Том 15 №1 2022

**Safety & Reliability
of Power Industry**

В номере:

- Прогрев паропроводов при пусках паровых турбин
- Анализ работы электрических сетей Иркутской электросетевой компании
- Режим регулирования частоты и мощности гидроагрегатов ГЭС
- Модернизация систем маслоснабжения паротурбинных агрегатов
- Транспарентность компаний ТЭК

www.sigma08.ru
www.testenergo.ru



Тренажер по оперативным переключениям гидроэлектростанции

Фирма АО «Тренажеры электрических станций и сетей» (АО «ТЭСТ») разработала и внедрила полномасштабный компьютерный тренажерно-аналитический комплекс по оперативным переключениям Иркутской ГЭС (ПАО «Иркутскэнерго»)

Тренажер Иркутской ГЭС

прошел корпоративную научно-техническую экспертизу и государственную регистрацию в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.

Тренажер Иркутской ГЭС

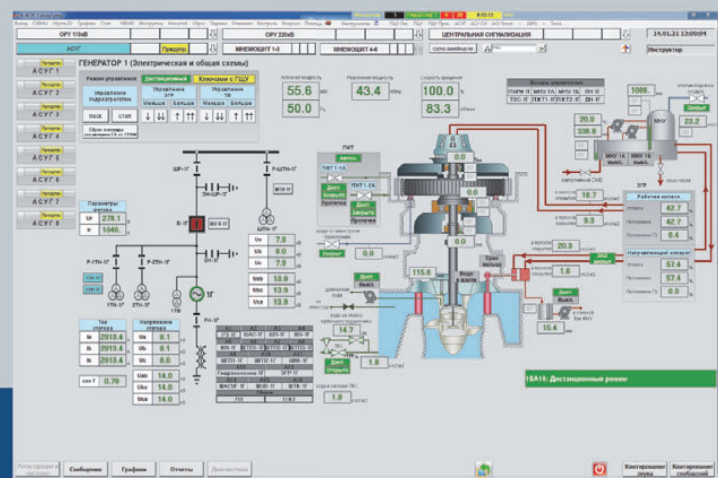
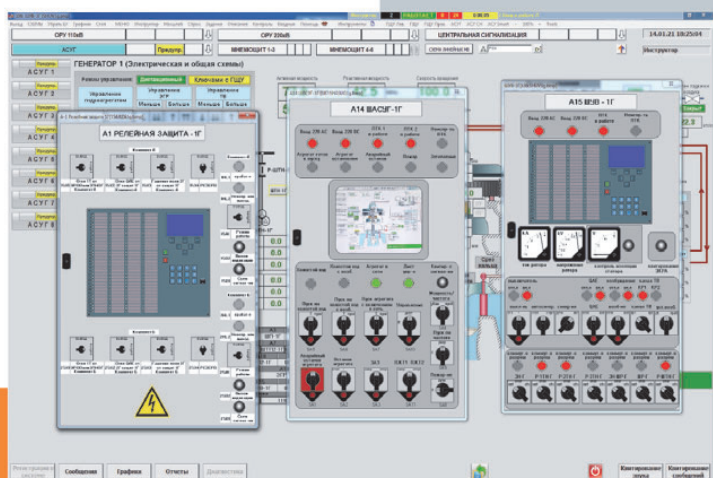
может применяться для подготовки оперативного персонала на гидроэлектростанциях, в учебных центрах, высших и средних учебных заведениях.

Состав оборудования

- 8 гидроагрегатов
- ОРУ-220 кВ
- ОРУ-ПОкВ
- ЗРУ-13,8 кВ
- РУСН-0,4 кВ
- блочные трансформаторы, автотрансформаторы
- система электроснабжения собственных нужд ГЭС

Состав тренажера

- Математические модели гидравлической части гидроагрегатов, работы вспомогательного оборудования ГЭС
- Математические модели генератора, системы возбуждения, электрической цепи, средств РЗА, трансформаторов, коммутационных аппаратов, электродвигателей и упрощенная модель энергосистемы
- Математические модели систем управления ГЦУ, АЦУ, РЦ, системы защит, блокировок, аварийной и предупредительной сигнализации
- Развитая конфигурация сети
- Комплект аварийных ситуаций
- Контролирующая программа
- Комплект штатных ситуаций
- Графопостроение
- Масштабирование времени
- Сохранение режимов
- Система поддержки оператора
- Протоколы действий оператора, ошибок, сигнализации, защит, блокировок
- Режим экзамена



АО «Тренажеры электрических станций и сетей»:

117587, г. Москва, Варшавское шоссе, д. 125 Ж, корп. 6
Тел. (495) 665-76-00, факс (495) 382-79-74
e-mail: magid@testenergo.ru, www.testenergo.ru

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМ. ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

В. В. КУЛИЧИХИН — д. т. н., заместитель директора Департамента «Технические обучающие системы в энергетических технологиях» TEST UNESCO (Москва, Россия)

РЕДАКТОРЫ РАЗДЕЛОВ

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

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

Н. Д. ЧИЧИРОВА — действительный член Российской академии естественных наук, д. х. н., профессор, 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., проректор по научной работе, зав. кафедрой Экономики и организации производства 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»

А. И. ТАДЖИБАЕВ — Заслуженный энергетик Российской Федерации, действительный член Академии электротехнических наук, д. т. н., зав. кафедрой «Диагностика и управление техническим состоянием энергетического оборудования» ФГАОУ ДПО «ПЭИПК» (Санкт-Петербург, Россия) — раздел «Техническая диагностика и неразрушающий контроль в энергетике»

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) — раздел «Социология в энергетике»

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

А. Н. ВИВЧАР — к. г. н., Начальник инженерного управления ПАО «Мосэнерго» (Москва, Россия)

Е. П. ГРАБЧАК — Заместитель министра Министерства энергетики Российской Федерации (Москва, Россия)

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

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

С. А. КРОПАЧЕВ — д. и. н., ректор Энергетического института повышения квалификации АО «Мособлэнерго» (Москва, Россия)

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

Н. Я. О. МАМЕДОВ — к. т. н., профессор, заведующий кафедрой «Строительство инженерных систем и сооружений», Азербайджанский Архитектурно-строительный Университет (Баку, Азербайджан)

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 ФГАОУ 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. Е. ОРЛОВ — к. т. н., доцент, доцент кафедры «Теплогазоснабжение и вентиляция им. В. И. Шарапова» Ульяновского государственного технического университета (г. Ульяновск, Россия)

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

Ю. А. РАДИН д.т.н., главный специалист в службе вибродиагностики и наладки инженерного управления ПАО «Мосэнерго» (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)

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, ВИНТИ, Google Scholar, Ulrich's Periodicals Directory.

Журнал ассоциирован при Международном центре обучающих систем ЮНЕСКО и Международной кафедре-сети ЮНЕСКО «TVET».

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

Художественный редактор: — Маланин Д. Б., **Технический редактор** — Кутыко Н. Е. Подписано в печать 30.03.2022 г. Отпечатано в ООО «Код-Полиграф», 125009, Россия, Москва, пр. Девячьего Поля, д. 4.

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

© ООО «НПО «Энергобезопасность», «Надежность и безопасность энергетики»

Scientific and Engineering Journal Safety and Reliability of Power Industry

Volume 15

Nº1

2022

EDITOR-IN-CHIEF

Elena N. ARKHIPOVA — Dr. of Tech. Sc., General Director, JSC «Simulators of power plants and networks» (Moscow, Russia)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Vladimir V. KULICHKIN — Dr. of Tech. Sc., Deputy Director of the Department «Technical educational systems in energy technologies» TEST UNESCO (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»

Aleksandr Y. SHELGINSKY — Dr. of Tech. Sc., Professor of Heat Power Industry Department, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (Moscow, Russia) — section «Electric power and heat generation»

Nataliya D. CHICHIROVA — full member of the Russian Academy of Natural Sciences, Dr. of Chem. Sc., Professor, 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., Vice-rector for research, head of the Department of Economics and Information Technologies, of the «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

Aleksey I. TADZHIBAYEV — Honoured Power Engineer of the Russian Federation, full member of the Academy of Electrical Engineering Sciences, Doctor of Engineering, Head of FSAEI of Advanced Professional Training «PEIPK» (St. Petersburg, Russia) — section «Technical Diagnostics and Non-Destructive Testing in Power Engineering»

Aleksandr Ye. 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) — «Sociology in Energy Industry»

EDITORIAL BOARD

Anton N. VIVCHAR — Cand. of Geogr., Head of Engineering Directorate, PJSC Mosenergo (Moscow, Russia)

Hristo S. DRAGANICHEV — Professor of the Varna Technical University (Varna, Bulgaria)

Evgeny P. GRABCHAK — Deputy Minister 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 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., Rector of the Energy Institute for Advanced Studies of JSC Mosoblenergo (Moscow, Russia)

Mikhail Yu. LVOV — Dr. of Tech. Sc., Adviser to the General Director of United Energy Company JSC (Moscow, Russia)

Nurmammad Y. MAMMADOV — professor, head of Department «Construction of engineering systems and facilities», Azerbaijan University of Architecture and Construction (Baku, Azerbaijan)

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 Ye. ORLOV — Cand. of Eng. Sc., Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation named after V.I. Sharapov of the Ulyanovsk State Technical University (Ulyanovsk, 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)

Yuri A. Radin — Dr. Eng., Chief Specialist, Vibration Diagnostics and Adjustment Service, Engineering Department, Mosenergo PJSC (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)

Founder and publisher: Scientific and Production Association «Energobezопасnost». Frequency of the edition four times a year. Published 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 IIII № ФC77-31974 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 30, 2022.

Printed in LLC «Code-Poligraf», Proyezd Devich'yego Poly, 4, Moscow, 119121, Russia.

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

Радин Ю. А. Предварительный прогрев паропроводов вторично перегретого пара при пусках паровых турбин энергоблоков СКД	4
Наумов И. В., Лещинская Т. Б. Анализ функционирования электрических сетей Иркутской электросетевой компании	12

ПРОЕКТИРОВАНИЕ, ИССЛЕДОВАНИЯ, РАСЧЕТЫ

Байков В. Н., Волков А. В. Влияние режимов регулирования частоты и мощности на техническое состояние гидроагрегатов ГЭС	23
Голошумова В. Н., Кварталов Д. Д., Бродов Ю. М. Модернизация и способы повышения надёжности маслоснабжения паротурбинных агрегатов для ДПМ-2	31
Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю., Шелгинский А. Я. Исследование наноразмерных и микромасштабных структурированных поверхностей охлаждения теплоэнергоустановок	38
Самарин О. Д. Анализ схемы надежного и безопасного теплоснабжения жилых зданий при независимом присоединении системы отопления	45

СОЦИОЛОГИЯ В ЭНЕРГЕТИКЕ

Скворцова Е. В., Ужанов А. Е. Транспарентность компании ТЭК в отношениях со СМИ в эпоху информационного общества	52
---	----

ЮБИЛЕИ, НАГРАЖДЕНИЯ	58
----------------------------------	----

ИНФОРМАЦИЯ	59
-------------------------	----

ХРОНИКА, ПУБЛИКАЦИИ	64
----------------------------------	----

CONTENTS

GENERAL ISSUES OF RELIABILITY AND SAFETY OF ENERGY

Radin Yu. A. Preheating of secondary superheated steam pipelines when starting steam turbines of SCP power units	4
Naumov I. V., Leshchinskaya T. B. Analysis of functioning of electric networks of the Irkutsk Electric Grid Company	12

DESIGN, RESEARCH, CALCULATIONS

Baikov V. N., Volkov A. V. Influence of frequency and power control modes on the technical condition of hydraulic units of hydroelectric power plants	23
Goloshumova V. N., Kvartalov D. D., Brodov Yu. M. Modernization and Ways to Improve Reliability of Oil Supply to Steam Turbine Units for DPM-2	31
Genbach A. A., Bondartsev D. Yu., Shelginsky A. Y. Investigation of nanoscale and microscale structured cooling surfaces of thermal power plants	38
O. D. Samarin Analysis of a scheme of reliable and safe heat supply of residential buildings with independent connection of the heating system	45

SOCIOLOGY IN ENERGY INDUSTRY

Skvortsova E. V., Uzhanov A. E. Transparency of fuel and energy companies in media relations in the era of information society	52
---	----

<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2022-15-1-38-44>
УДК 536.421.1 622.245.5 (088.8)

Исследование наноразмерных и микромасштабных структурированных поверхностей охлаждения теплоэнергоустановок

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

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

² ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Российская Федерация, 11250, Москва, ул. Красноказарменная, 14

Поступила / Received 05.02. 2022

Принята к печати / Accepted for publication 27.11.2021

Проведены исследования кризиса теплообмена в зависимости от избытка охладителя, который определил недогрев и скорость потока, теплофизических свойств поверхности нагрева и выброса капель жидкости из пористой структуры. Разработана модель динамики паровых пузырей, рождающихся на твердой поверхности в пористых структурах и парогенерирующей стенке (подложке). Модель основана на кинофотосъемке скоростной камерой КСК-1М. Отвод высоких тепловых потоков (до $2 \cdot 10^6$ Вт/м²), обеспечивается совместными действиями капиллярных и массовых сил с применением интенсификаторов. Получены уравнения критических тепловых потоков через термогидравлические характеристики процесса кипения в плетеных пористых структурах. Исследования имеют практическое значение в области предельного состояния парогенерирующей поверхности, защищаемой охлаждением от перегрева. Рассмотрены три минеральные среды (туф, гранит, мрамор) гор Заилийского и Джунгарского Алатау вблизи города Алматы (Казахстан). Для исследования пористых термодинамических экранов использовался метод голографической интерферометрии. Изучалось напряженное и деформированное состояние образцов. Моделирование акустического поля взрывной волны с помощью термодинамического поля, созданного тремя тепловыми источниками, показало его высокую эффективность. Созданный мощный тепловой экран за счет генерации полей деформаций и термических напряжений является препятствием для распространения отраженной взрывной волны, вызывающей возникновение и развитие разрушительных трещин. Разработаны наноразмерные и микромасштабные структурированные поверхности в виде покрытий и сетчатых структур, которые дают интегрированный эффект промышленных сеток с покрытиями из природных (естественных) минеральных сред и имеют синергетические преимущества объединения этих двух разработок в интегрированную технологию их изготовления, расширением критических тепловых нагрузок и управлением предельным состоянием пористых покрытий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: капиллярно-пористые покрытия и структуры, термодинамический экран, камера сгорания, сопло, кризис кипения, голография, интерферограммы

Адрес для переписки:

Бондарцев Д. Ю.
АУЭС им. Г. Даукеева
Республика Казахстан, 050013, Алматы, ул. Байтурсынова, 126
e-mail: d.bondartsev@inbox.ru, d.bondartsev@au.es.kz

Address for correspondence:

Bondartsev D. Yu.
AUPET named after G. Daukeev
Republic of Kazakhstan, 050013, Almaty, Baitursynov Street, 126
e-mail: d.bondartsev@inbox.ru, d.bondartsev@au.es.kz

Для цитирования:

Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю., Шелгинский А. Я. Исследование наноразмерных и микромасштабных структурированных поверхностей охлаждения теплоэнергоустановок. Надежность и безопасность энергетики. 2022. – Т. 15, №1. – С. 38–44.
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2022-15-1-38-44>

For citation:

Genbach A.A., Bondartsev D. Yu., Shelginsky A. Y. [Investigation of nanoscale and microscale structured cooling surfaces of thermal power plants]. Nadezhnost' i bezopasnost' energetiki = Safety and Reliability of Power Industry. 2022, vol. 15, no. 1, pp. 38–44 (in Russian).
<https://doi.org/10.24223/1999-5555-2022-15-1-38-44>

Investigation of nanoscale and microscale structured cooling surfaces of thermal power plants

Genbach A. A.¹, Bondartsev D. Yu.^{1*}, Shelginsky A. Y.²

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

² National Research University «Moscow Power Engineering Institute»
Krasnokazarmennaya str. 14, 111250, Moscow, Russia

Studies were conducted of the heat exchange crisis depending on the coolant excess (which determined the underheating and flow rate), the thermal-physical properties of the heating surface, and the ejection of liquid droplets from the porous structure. A model of dynamics of vapor bubbles born on the solid surface in porous structures and the vapor-generating wall (substrate) has been developed. The model is based on cinematography with an SKS-1M speed camera. The removal of high heat flows (up to $2 \cdot 10^6$ W/m²) is provided through the joint action of capillary and mass forces with the use of intensifiers. Equations are obtained of critical heat flows through the thermohydraulic characteristics of the boiling process in woven porous structures. The research is of practical importance in the limiting state region of the steam-generating surface protected by cooling from overburning. Three mineral media (tuff, granite, marble) of Zaili and Dzungarian Alatau mountains near the city of Almaty (Kazakhstan) were considered. The method of holographic interferometry was used to study porous thermodynamic screens. The stress and deformed state of the samples was studied. Simulation of the acoustic field of the blast wave with the thermodynamic field created by three thermal sources has shown its high efficiency. The created powerful thermal screen, due to the generation of strain and thermal stress fields, is an obstacle to the propagation of the reflected blast wave, causing the emergence and development of destructive cracks. Nanoscale and microscale structured surfaces in the form of coatings and mesh structures have been developed, which give an integrated effect of industrial meshes with natural mineral media coatings and have synergistic advantages of combining these two developments in an integrated technology of their production, expansion of critical thermal loads and management of the limiting state of porous coatings

KEYWORDS: capillary-porous coatings and structures, thermodynamic screen, combustion chamber, nozzle, boiling crisis, holography, interferograms

Введение

Современными исследованиями по-прежнему являются пути повышения эффективности охлаждения камер сгорания и сопел газовых турбин различными охладителями для повышения КПД самих машин и их циклов. Рассматриваются водяные, воздушные и паровые охладители [1–2]. Поэтому предлагаются новые интегрированные природные капиллярно-пористые покрытия, которые в отличие от существующих значительно увеличивают КПД цикла теплоэнергетических установок [3–25]. Представляет интерес конструирование и изготовление гибридных пористых поверхностей с гибридной микро-наношكالой [6]. Такие поверхности являются будущими технологическими продуктами, они становятся более компактными, интегрированными и многофункциональными, работающими с более высокими тепловыми нагрузками. Поэтому авторами разрабатываются наноразмерные и микромасштабные пористые структурированные поверхности в виде интегрированных сетчатых структур с покрытиями из природных минеральных сред. Они имеют синергетические преимущества объединения этих двух структур в интегрированную технологию их изготовления (структур и покрытий) с дальнейшим увеличением предела отвода тепловых нагрузок и управлением предельным состоянием пористых покрытий.

В современной литературе [7–14] по-прежнему пред-

ставляет интерес исследования теплообмена различных однородных и неоднородных пористых поверхностей покрытий (многослойных), а также специально сконструированных фитилей с целью увеличения их теплопередающих способностей. Стали проводиться исследования термогидравлических характеристик кипения в пористых средах с помощью измерения термopарами и наблюдения с помощью высокоскоростной камеры (размеры пузырьков, частота вылета и плотность зародышей) [9, 10]. В [11] построена сложная двумерная модель и дано численное моделирование актуальной проблемы кризиса кипения (образование «парового кармана») капиллярной петли в фитиле с учетом массовых сил. Однако не проводятся экспериментальные исследования для подтверждения модели.

Поэтому для столь сложных условий теплопередачи необходимо провести экспериментальные исследования по выявлению критических нагрузок и выявить факторы для их управления.

Экспериментальный метод исследования капиллярно-пористых образцов

Для исследования пористых термодинамических экранов использовался метод голографической интерферометрии. Изучалось напряженное и деформированное состояние образцов.

Деформации образцов регистрировались

в реальном масштабе времени (рисунок 1).

Исследования проводились на пяти природных образцах, выполненных из различных горных пород (рисунок 2). Обозначения исследованных материалов капиллярно-пористых образцов, выполненных из естественных минеральных сред (горных пород) следующие: 1 — гранит; 2 — мрамор; 3 — туф; 4 — гранит, 5 — туф.

Просверливались три шпура с диаметром $6 \cdot 10^{-3}$ м на глубину $12 \cdot 10^{-3}$ м перпендикулярно поверхности большой грани (образцы №2 и №5), либо перпендикулярно поверхности малой грани (образец №1). Таким образом, создавался термодинамический экран при включении трех тепловых источников (электроэнергии). Также исследовался один тепловой источник (образцы №3 и №4). Подводимая мощность N_3 составляла $7 \div 30$ Вт. При диаметре сверления шпура $d_{ш} = (3 \div 6) \cdot 10^{-3}$ м удельные тепловые потоки достигали величин:

$$q = \frac{N_3}{F_{ш}} = \frac{7 \div 30}{\frac{\pi}{4} (3 \div 6)^2 \cdot 10^{-6}} = (0.25 \div 4.2) \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2.$$

Для исследования пористых термодинамических экранов использовался метод голографической интерферометрии. Изучалось напряженное и деформированное состояние образцов. Деформации образцов регистрировались в реальном масштабе времени.

Частота фотографирования интерферограмм – 0.5 кадров в секунду; было сделано по 30 снимков с каждого образца. Помещены фотоотпечатки через два кадра, отображающие состояние поверхности образцов через каждые 6 секунд. Определялось направление вектора смещения $\vec{d}$. Величина $|\vec{d}|$ находилась по фото-

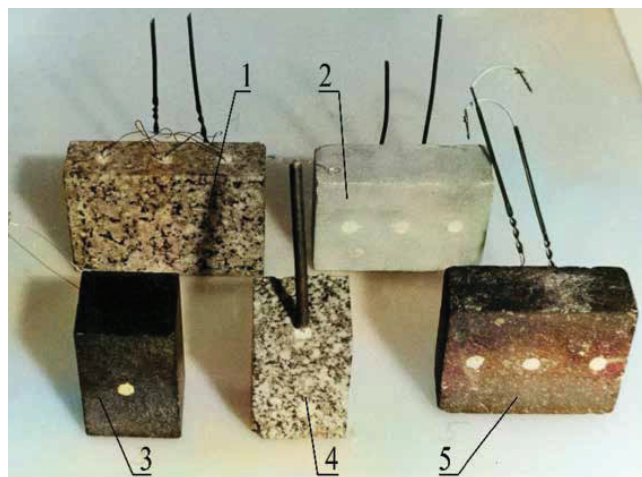


Рисунок 2. Исследованные образцы капиллярно-пористых минеральных сред

Figure 2. The studied samples of capillary-porous mineral media

графии интерференционной картины:

$$|\vec{d}| = \frac{N\lambda}{1 + \cos\varphi},$$

где N — измеренное число полос между исследуемой точкой и полосой нулевого порядка; λ — длина волны; φ — угол между направлением освещения ($\vec{\tau}_0$) исследуемой точки и наблюдения ($\vec{\tau}_n$) этой точки на голограмме, т. е. $(\vec{\tau}_n) \wedge (\vec{\tau}_0)$.

Градиент перемещений, определяющий величину деформаций для одного теплового источника, имел наибольшее значение в области нагревателя радиусом до $10 \cdot 10^{-3}$ м и возрастал с увеличением времени теплового воздействия.

В случае трех одновременно действующих источников тепла каждый из них создавал независимое поле перемещений, которое с ростом времени нагрева приводило к простой суперпозиции на поверхности образца. Это явление имело место как для полей перемещений вдоль плоскости, проходящей через центры источников, так и для плоскостей, отстоящих от них на расстоянии $6 \cdot 10^{-3}$ м.

Голографическая установка с образцами из сетчатых структур и пористых покрытий из горных пород позволяла получать интерферограммы в реальном масштабе времени и проводить их расшифровку по внутренним (термогидравлическим) характеристикам кипения, термическим напряжениям и деформациям, возникающим в термодинамических экранах.

Модель кризиса теплопередачи

Модель (рисунок 3) разрабатывалась

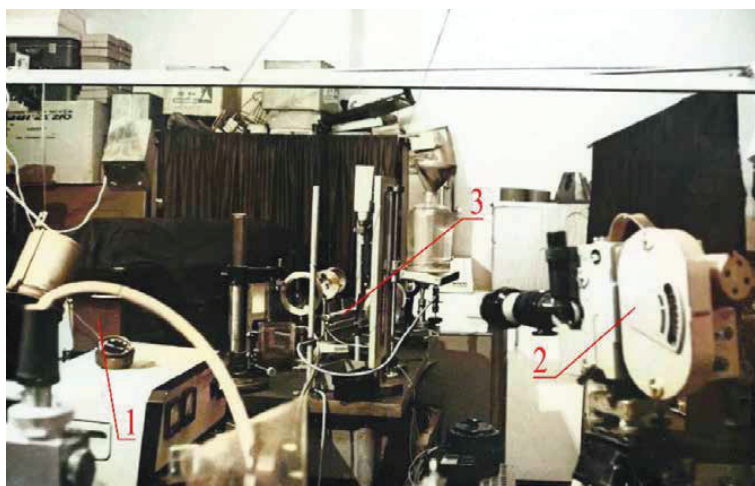


Рисунок 1. Стенд для исследования оптическими методами системы охлаждения теплоэнергоустановки (камера сгорания, сверхзвуковое сопло):

1 — лазер; 2 — кино-фотокамера СКС-1М; 3 — пористый охлаждающий элемент с покрытием

Figure 1. Bench for studying the cooling system of a thermal power plant (combustion chamber, supersonic nozzle) by optical methods: 1 — laser; 2 — film-photo camera SKS-1M; 3 — porous coated cooling element

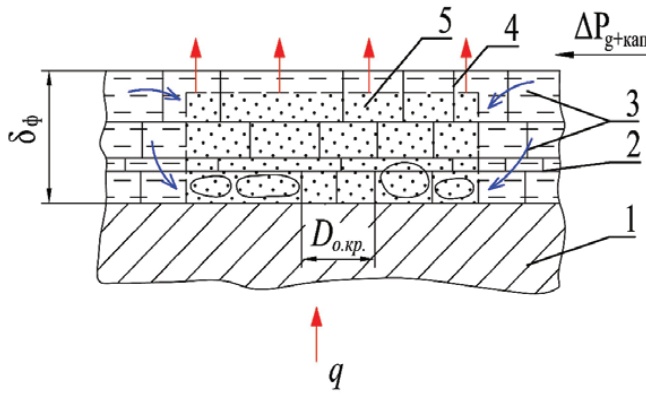


Рисунок 3. Наступление кризиса кипения в пористых структурах при образовании большой паровой массы (конгломерата), отделённой от поверхности нагрева тонким слоем жидкости с появляющимися «сухими» пятнами: 1 — стенка, 2 — пористая структура, 3 — охлаждающая жидкость, 4 — движение парового фронта с возможной его конденсацией в относительно холодных слоях жидкости, 5 — паровой конгломерат

Figure 3. The onset of boiling crisis in porous structures during the formation of a large steam mass (conglomerate) separated from the heating surface by a thin liquid layer with emerging «dry» spots: 1 — wall; 2 — porous structure; 3 — cooling liquid; 4 — movement of steam front with its possible condensation in relatively cold liquid layers; 5 — steam conglomerate

для новой высокофорсированной и высокоинтенсивной капиллярно-пористой системы нового класса теплоотводящих систем. Новизна заключалась в том, что паровая фаза развивалась в капиллярно-пористой среде, в которой действуют совместно капиллярный и массовый потенциал. Избыток охладителя, находящийся в сечении структуры и частично, на ее поверхности, создает дополнительную (вынужденную) скорость жидкости, так же, как и недогрев относительно температуры насыщенного пара.

На рисунке 3: δ_ϕ — размер для гидравлического расчета, м; $\Delta P_{g+кап}$ — суммарный действующий напор (массовый и капиллярный), Па; $D_{о.кр}$ — размер парового конгломерата, отвечающий условию $\Delta T = \Delta T_{кр}$, м; $\Delta T_{кр}$ — критический температурный напор, К (°C); q — плотность теплового потока, Вт/м².

Для создания модели использовались голография и скоростная киносъемка. В разработанной модели учтено управление процессами теплопередачи и интенсификации теплообмена за счет скорости и недогрева потока жидкости. Расчетное уравнение $q_{кр}$ для случая, когда $P \geq 0.1$ МПа, а $b_r > 0.28 \cdot 10^{-3}$ м, имеет следующий вид:

$$q_{кр} = 0.0347r[g(\rho_{ж} - \rho_{п})\rho_{п}D_{о.кр}]^{0.5} \cdot \left(\frac{b_r}{b_o}\right)^{0.3} \left(\frac{\delta_\phi}{\delta_o}\right)^{0.5} (1 + \cos\beta)^{0.6}. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что:

$$q_{кр} \sim D_{о.кр}^{0.5} (P \geq 0.1 \text{ МПа}).$$

Величина $D_{о.кр}$ зависит от теплофизических свойств теплоотдающей поверхности: $D_{о.кр} \sim K_{ст}^{-1}$, а $\bar{f}_{кр}^{-1} \sim K_{ст}^2$, где $K_{ст} = 1 + [(\rho c \lambda)_{ж}/(\rho c \lambda)_{ст}]^{0.5}$. Тогда для поверхностей, выполненных из меди и нержавеющей стали и покрытых сетчатыми структурами, имеем:

$$\tilde{q}_{кр} = 1.07 (P \geq 0.1 \text{ МПа})$$

При получении формулы (1) рассмотрена кризисная ситуация, когда образующиеся паровые конгломераты, в основании которых перемещаются области жидкостных пленок и «сухих» пятен, не позволяют отводить пар через пористую структуру. Это приводит к затрудненному подводу жидкости капиллярными и гравитационными силами к греющей поверхности вплоть до ее прекращения.

Поскольку для сетчатой структуры ширина ячейки определяет в кризисной ситуации отрывной (разрушаемый) диаметр пузыря, т.е. $b_r \sim D_{о.кр}$, то можно записать критерий устойчивости двухфазного пристенного пограничного слоя, преобразование которого (критерия) даст формулу (1), где постоянная определена при обобщении опытных данных. Величина $D_{о.кр}$ учитывает вид структуры, теплопроводность жидкости, теплоусвояемость поверхности, влияние направленного движения жидкости и ее недогрев. Вне модельные геометрические симплексы обобщают опытные данные для b_r :

$$0.08 \cdot 10^{-3} \text{ м} \leq b_r \leq 0.55 \cdot 10^{-3} \text{ м};$$

$$\left(\frac{b_r}{b_o}\right)^{0.3}; \left(\frac{\delta_\phi}{\delta_o}\right)^{0.5}; (1 + \cos\beta)^{0.6}.$$

Для давления ниже атмосферного размер пузыря будет превышать толщину структуры. Величина $q_{кр}$ определяется из условия утолщения пленки жидкости, когда $\delta_o \rightarrow 0$ и имеет вид:

$$q_{кр} = 0.655 \cdot \lambda_{ж} \cdot [\bar{f}_{кр} \cdot v_{ж}^{-1}]^{0.5} \cdot \left(\frac{b_r}{b_o}\right)^{0.3} \cdot \left(\frac{\delta_\phi}{\delta_o}\right)^{0.5} \cdot \left(\frac{\delta_\phi}{\delta_o}\right)^{0.5} \cdot (1 + \cos\beta)^{0.6}, \quad q_{кр} \sim \bar{f}_{кр}^{0.5}. \quad (2)$$

Средний отрывной (разрушаемый) диаметр пузыря в момент кризиса теплопередачи равен:

$$D_{о.кр} = \left[\frac{\rho_{ж}}{g(\rho_{ж} - \rho_{п})}\right]^{\frac{1}{3}} \cdot [8.94 \cdot 10^{-2} \cdot [\sigma^2 \cdot \frac{T_H}{r(\rho_{ж} \cdot \rho_{п})}]^{\frac{1}{3}} + 15.3 \cdot \left[\frac{\lambda_{ж}}{r \rho_{п}}\right]^{\frac{2}{3}}]. \quad (3)$$

Средняя частота генерации пузырей в момент кризиса теплопередачи:

$$\bar{f}_{кр} = \left\{ \left[\frac{\rho_{ж}}{g(\rho_{ж} - \rho_{п})}\right]^{\frac{1}{3}} \cdot [1.16 \cdot 10^{-2} \cdot \left[\frac{\sigma^2 \cdot T_H \cdot \sqrt{r \rho_{п}}}{\lambda_{ж}^2 \cdot \rho_{ж}}\right]^{\frac{1}{3}} + 2 \cdot \left[\frac{\lambda_{ж}}{r \cdot \rho_{п}}\right]^{\frac{1}{6}}]^{-2} \right\}. \quad (4)$$

На рисунке 4 приводятся результаты расчетов по

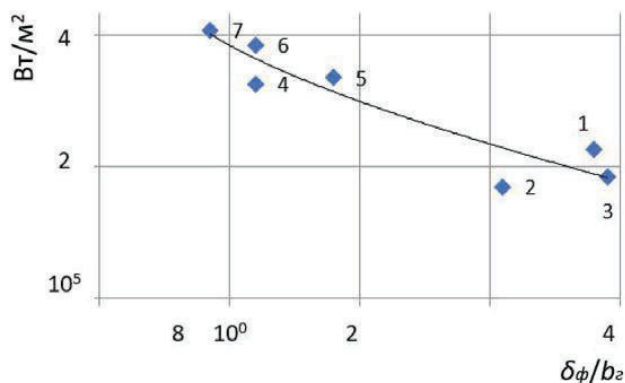


Рисунок 4. Влияние относительной толщины сетчатой структуры на критический тепловой поток при кипении воды. Расчет выполнен по уравнению (1). Сетка и стенка изготовлены из нержавеющей стали. Опыты проведены для следующих условий:

$h = 0.27$ м; $\tilde{m}$ = оптимальный; $P = 0.1$ МПа; $\beta = 0$ град. Исследованы структуры вида: 1 — $0.08 \times 0.14 \times 0.14$; 2 — $0.08 \times 0.14 \times 0.28$; 3 — 3×0.14 ; 4 — 0.14 ; 5 — 2×0.28 ; 6 — 0.4 ; 7 — 0.55

Figure 4. Effect of the relative thickness of the mesh structure on the critical heat flow during water boiling. The calculation was performed using equation (1). The mesh and wall are made of stainless steel.

Experiments were performed for the following conditions: $h = 0.27$ m; $\tilde{m}$ = optimal; $P = 0.1$ MPa; $\beta = 0$ deg. Structures studied:

1 — $0.08 \times 0.14 \times 0.14$; 2 — $0.08 \times 0.14 \times 0.28$; 3 — 3×0.14 ; 4 — 0.14 ; 5 — 2×0.28 ; 6 — 0.4 ; 7 — 0.55

уравнению (1) и условия, при которых проводились опыты.

Результаты, анализ и обсуждение голографических интерферограмм

Для сравнения представлены интерференционные

картины капиллярно-пористых покрытий, выполненных из крепчайшей горной породы (гранита) с пористостью $\varepsilon = 5\%$ и вязкой породы с $\varepsilon = 30\%$ — туфа. Оба покрытия будут полезны в зависимости от свойств материала стенки, чтобы создать две среды с существенно различными величинами акустической жесткости, и тем самым, обеспечить управление тепловой волной, проникающей в поверхность охлаждения камеры сгорания и сопла.

Анализ интерферограмм деформаций и термических напряжений показал следующее: расширение образца покрытия наблюдается вначале вокруг источника тепла, а затем во всем объеме. Деформация объема образца зависит от распределения температурного поля, создаваемого источниками тепла, и возникающих термических напряжений на поверхности и в объеме тела.

Процесс разрушения покрытий тепловыми акустическими волнами факела горелки, усиленными от фронтов отраженных волн от различных поверхностей камеры и сопла, в результате возникающих термических напряжений от участков сопла, от интерференции и дифракции волн (волны напряжений сжатия, растяжения и сдвига), будут нейтрализованы экранами, использующими принцип акустического и термодинамического воздействия (рисунок 5).

На рисунке 5 В представлены фотоснимки покрытия гранита через каждые 6 с после начала нагрева одновременно тремя источниками суммарной мощностью 7 Вт ($q = 1 \cdot 10^6$ Вт/м²). На рисунке 5 С представлены фотоснимки покрытия из мрамора при тех же условиях нагрева, что и на рисунке 5 В. Интерферограммы позволили обнаружить дефекты и трещины, не просматриваемые визуально, а также крупные включения, в области которых линии равных деформаций имели изломы (рисунок 5 С).

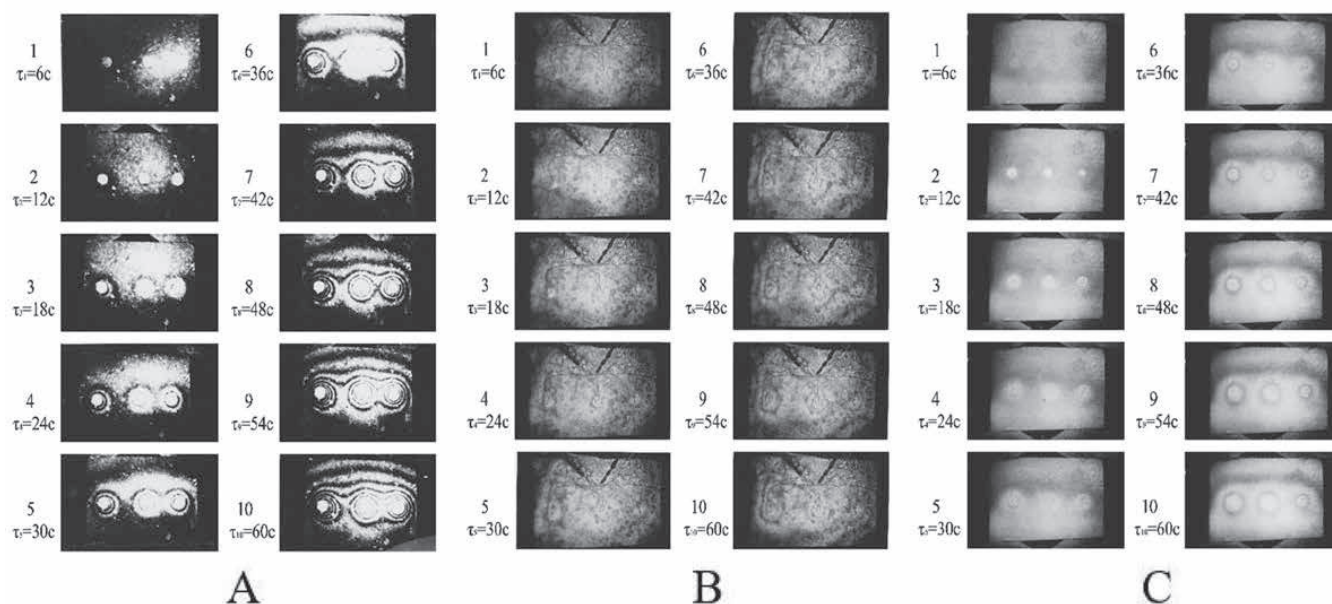


Рисунок 5. Голографические интерферограммы покрытия из туфа — А, из гранита — В, из мрамора — С
Figure 5. Holographic interferograms of tuff coating — А, of granite — В, of marble — С

Знание закона распределения напряжений в объёмном пористом материале позволяет уменьшить вероятность возникновения разрушительных трещин при проектировании теплообменных устройств путем управления направлением распространения трещин. Каждое покрытие, нагреваемое тремя тепловыми источниками одновременно, является мощным термодинамическим экраном, способным поглощать и рассеивать отраженные детонационные волны факела горелки.

Вид термодинамического экрана подбирается в зависимости от материала поверхности охлаждения с учетом коэффициента акустической жесткости контактирующих сред. Термодинамический экран может устанавливаться самостоятельно, так и совместно с экранами, содержащими охлаждающую емкость с обогревом. Эти исследования важны для модернизации и продления срока эксплуатации тепломеханического оборудования [15].

Выводы

1. Разработана модель для новой высокофорсированной и высокоинтенсивной капиллярно-пористой системы нового класса теплоотводящих систем, в которой паровая фаза развивается в капиллярно-пористой среде, в которой действуют совместно капиллярный и массовый потенциал.

2. Голографические интерферограммы зафиксировали весь путь ударной волны: трансформацию ее во взрывную волну (волну напряжения сжатия), отражение волны от стенок концентратора, трансформацию волны в волну растяжения, фокусировку энергии, отражение энергии акустическим экраном (рисунок 5 А, В, С). Интерферограммы иллюстрируют концентрацию деформаций и термических напряжений в массиве при тепловых нагрузках до $2.1 \cdot 10^6$ Вт/м².

3. Разработанные наноразмерные и микромасштабные структурированные поверхности в виде покрытий и сетчатых структур дают интегрированный эффект промышленных сеток с покрытиями из природных (естественных) минеральных сред и имеют синергетические преимущества объединения этих двух разработок в интегрированную технологию их изготовления, расширением критических тепловых нагрузок и управлением предельным состоянием пористых покрытий.

Список использованных источников

1. Xie Jian, et al. A comprehensive understanding of enhanced condensation heat transfer using phase separation concept. *Energy*. Volume 172, 1 April 2019, Pages 661–674. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.134> (in Eng.).
2. Seong Won Moon, et al. A novel coolant cooling method for enhancing the performance of the gas turbine combined cycle. *Energy*. Volume 160, 1 October 2018, Pages 625–634. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.035> (in Eng.).
3. Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю. Исследование предельного термического состояния капиллярно-пористых элементов теплоэнер-

гоустановок. *Вестник Машиностроения*, Москва 2020; 2: 52–57

4. Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю., Шелгинский А. Я. Обобщение процессов теплопередачи и их сравнительная оценка для капиллярно-пористых покрытий в энергоустановках. *Надежность и безопасность энергетики* 2019; 12(1): 29–35. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-29-35>

5. Генбач А. А., Бондарцев Д. Ю. Научная методика создания капиллярно-пористых систем охлаждения для элементов теплоэнергооборудования электростанций. *Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Машиностроение* 2019; 3: 89–106. DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-89-106.

6. Shoukat alim Khan, Nurettin Sezer, Muammer Koç. Design, fabrication and nucleate pool-boiling heat transfer performance of hybrid micro-nano scale 2-D modulated porous surfaces. *Applied Thermal Engineering*. Volume 153, 5 May 2019, Pages 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.133> (in Eng.).

7. Kimihide Odagiri, Hosei Nagano. Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe. *International Journal of Thermal Sciences*. Volume 140, June 2019, Pages 530–538. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.008> (in Eng.).

8. Xing Yang, et al. Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Volume 140, September 2019, Pages 25–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109> (in Eng.).

9. Y. H. Chang, Y. M. Ferng. Experimental investigation on bubble dynamics and boiling heat transfer for saturated pool boiling and comparison data with previous works. *Applied Thermal Engineering*. Volume 154, 25 May 2019, Pages 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.092> (in Eng.).

10. T. J. Chuang, Y. H. Chang, Y. M. Ferng. Investigating effects of heating orientations on nucleate boiling heat transfer, bubble dynamics, and wall heat flux partition boiling model for pool boiling. *Applied Thermal Engineering*. Volume 163, 25 December 2019, 114358. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114358> (in Eng.).

11. Riadh Boubaker, Vincent Platel. Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application. *Energy*. Volume 111, 15 September 2016, Pages 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.102> (in Eng.).

12. Третьяков А. Ф. Исследование влияния конструктивных и технологических параметров на удельную прочность пористых сетчатых материалов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение* 2017; 12(693): 30–36. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-12-30-36.

13. Бабин С. В., Егоров Е. Н., Фурсов А. А. Влияние технологических параметров процесса плазменного напыления на макроструктуру титановых покрытий // *Известия высших учебных заведений. Машиностроение* 2020; 4(721): 44–53. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-4-44-53.

14. Пелевин Ф. В. Гидравлическое сопротивление пористых металлов. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение* 2016; 2(671): 42–52. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-2-42-52

15. Имангазин М. К., Ермуханбетова Ж. Г. Оценка риска опасности аварий на электростанции ТОО «ЖАНАЖОЛСКАЯ ГТЭС» Актобинская область // *Успехи современной науки* 2017; 6(6): 19–123.

References

1. Xie Jian, et al. A comprehensive understanding of enhanced condensation heat transfer using phase separation concept. *Energy*.

Volume 172, 1 April 2019, Pages 661–674. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.134>

2. Seong Won Moon, et al. A novel coolant cooling method for enhancing the performance of the gas turbine combined cycle. *Energy*. Volume 160, 1 October 2018, Pages 625–634. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.07.035>

3. Genbach A. A., Bondartsev D. Y. Modeling of thermal stresses destroying the porous coating of heat-exchange surfaces of power plants. *Power engineering: research, equipment, technology* 2019; 21(3): 117–125. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2019-21-3-117-125> (In Russ.).

4. Genbach A. A., Bondartsev D. Y., Shelginsky A. Y. Summary of heat transfer processes and their comparative evaluation for capillary porous coatings in power plants. *Safety and Reliability of Power Industry* 2019; 12(1): 29–35. <https://doi.org/10.24223/1999-5555-2019-12-1-29-35> (In Russ.).

5. Genbach A. A., Bondartsev D. Yu. Science-based procedure for designing tubular porous cooling systems for thermal power plant equipment components. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering* 2019; 3: 89–106 (In Russ.). DOI: 10.18698/0236-3941-2019-3-89-106.

6. Shoukat alim Khan, Nurettin Sezer, Muammer Koç. Design, fabrication and nucleate pool-boiling heat transfer performance of hybrid micro-nano scale 2-D modulated porous surfaces. *Applied Thermal Engineering*. Volume 153, 5 May 2019, Pages 168–180. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.02.133>

7. Kimihide Odagiri, Hosei Nagano. Investigation on liquid-vapor interface behavior in capillary evaporator for high heat flux loop heat pipe. *International Journal of Thermal Sciences*. Volume 140, June 2019, Pages 530–538. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2019.03.008>

8. Xianbing Xing Yang, et al. Turbine platform phantom cooling from airfoil film coolant, with purge flow. *International Journal of Heat*

and Mass Transfer. Volume 140, September 2019, Pages 25–40. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.05.109> (in Eng.).

9. Y. H. Chang, Y. M. Ferng. Experimental investigation on bubble dynamics and boiling heat transfer for saturated pool boiling and comparison data with previous works. *Applied Thermal Engineering*. Volume 154, 25 May 2019, Pages 284–293. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.092>

10. T. J. Chuang, Y. H. Chang, Y. M. Ferng. Investigating effects of heating orientations on nucleate boiling heat transfer, bubble dynamics, and wall heat flux partition boiling model for pool boiling. *Applied Thermal Engineering*. Volume 163, 25 December 2019, 114358. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114358>

11. Riadh Boubaker, Vincent Platel. Dynamic model of capillary pumped loop with unsaturated porous wick for terrestrial application. *Energy*. Volume 111, 15 September 2016, Pages 402–413. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.05.102>

12. Tretiakov A. F. Study of the influence of design and technological parameters on the specific strength of porous mesh materials. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering* 2017; 12(693): 30–36. DOI: 10.18698/0536-1044-2017-12-30-36 (In Russ.).

13. S. V. Babin, E. N. Egorov, A. A. Fursov. Influence of technological parameters of plasma spraying process on the macrostructure of titanium coatings // *Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering* 2020; 4(721): 44–53. DOI: 10.18698/0536-1044-2020-4-44-53 (In Russ.).

14. Pelevin F. V. Hydraulic resistance of porous metals. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Mechanical Engineering* 2016; 2(671): 42–52. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-2-42-52 (In Russ.).

15. Imangazin M. K., Yermukhanbetova J. G. Assessment of the risk of accidents at the power plant of "ZHANAZHOLSKAYA GTPP" LLP, Aktobe region // *Advances in Modern Science* 2017; 6(6): 119–123. (In Russ.).

