
СОДЕРЖАНИЕ

Номер 2, 2024

Паротурбинные, газотурбинные, парогазовые установки и их вспомогательное оборудование

Расчет модернизированного цикла Ренкина с бромисто-литиевым раствором
в качестве рабочего тела

*Д. В. Добрыднев, В. В. Папин, Р. В. Безуглов, Н. Н. Ефимов,
Е. М. Дьяконов, А. С. Шмаков*

3

Повышение маневренности ПГУ-450Т с обеспечением надежности и экономичности
в режимах переменных нагрузок

*Э. К. Аракелян, А. В. Андриюшин, Ф. Ф. Пащенко, С. В. Мезин,
К. А. Андриюшин, А. А. Косой*

15

Атомные электростанции

Определение оптимального перепада давления на клапане управления насосом
с гидротурбинным приводом

*А. В. Попов, Е. Н. Кулаков, П. А. Кругликов, Ф. А. Святкин, П. Г. Павлов,
Р. С. Тарасенко, И. Б. Денисова, А. В. Проухин*

25

Оценка эффективности участия АЭС в покрытии пиковых электрических нагрузок
на основе водородных технологий

Р. З. Аминов, А. Н. Егоров, А. Н. Байрамов

33

Тепло- и массообмен, свойства рабочих тел и материалов

Исследование влияния режимных и геометрических параметров на критическое истечение
недогретой и вскипающей воды через каналы различной геометрии

*И. А. Коновалов, М. А. Большухин, А. М. Хизбуллин, А. Н. Соколов,
А. А. Баринов, В. Д. Локтионов, С. М. Дмитриев, Т. К. Зырянова*

52

Разработка и исследование рабочих характеристик контурной тепловой трубы
с увеличенным расстоянием теплопереноса

Ю. Ф. Майданик, В. Г. Пастухов, М. А. Чернышева

70

Численное исследование развитого турбулентного течения и теплоотдачи в канале
прямоугольного сечения с односторонним внутренним оребрением

В. В. Рис, С. А. Галаев, А. М. Левченя, И. Б. Писаревский

80

Возобновляемые источники энергии, гидроэнергетика

Расчетное обоснование системы получения водорода из биомассы
с использованием газификации в химических циклах

Д. С. Литун, Г. А. Рябов

90

Contents

Vol. 71, No. 2, 2024

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

Calculation of an Upgraded Rankine Cycle with Lithium Bromide Solution As a Working Flow

*D. V. Dobrydnev, V. V. Papin, R. V. Bezuglov, N. N. Efimov,
E. M. Dyakonov, and A. S. Shmakov*

3

Improving the PGU-450T Unit's Maneuverability while Retaining Its Reliability
and Economic Efficiency in Variable Load Modes

*E. K. Arakelyan, A. V. Andryushin, F. F. Pashchenko, S. V. Mezin,
K. A. Andryushin, and A. A. Kosoi*

15

Nuclear Power Plants

Determining the Optimum Pressure Differential Across the Control Valve
of a Hydroturbine Driven Pump

*A. V. Popov, E. N. Kulakov, P. A. Kruglikov, F. A. Svyatkin, P. G. Pavlov,
R. S. Tarasenko, I. B. Denisova, and A. V. Proukhin*

25

Assessing the Effectiveness of NPP Participation Covering Peak Electrical Loads
Based on Hydrogen Technology

R. Z. Aminov, A. N. Egorov, and A. N. Bayramov

33

Heat and Mass Transfer, Properties of Working Fluids and Materials

Study of the Influence of Operating and Geometric Parameters on the Critical Outflow
of Subcooled and Boiling Water through Channels of Different Geometry

*I. A. Konovalov, M. A. Bolshukhin, A. M. Khizbullin, A. N. Sokolov,
A. A. Barinov, V. D. Loktionov, S. M. Dmitriev, and T. K. Zyryanova*

52

Development and Study of Operating Characteristics of a Loop Heat Pipe
with Increased Heat Transfer Distance

Yu. F. Maydanik, V. G. Pastukhov, and M. A. Chernysheva

70

Numerical Investigation of a Developed Turbulent Flow and Heat Transfer
in a Rectangular Channel with Single-Sided Internal Ribs

V. V. Ris, S. A. Galaev, A. M. Levchenya, and I. B. Pisarevskii

80

Renewable Energy Sources and Hydropower

Substantiation by Calculation of a System for Hydrogen Production from Biomass
Using Chemical Looping Gasification

D. S. Litun and G. A. Ryabov

90

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

**РАСЧЕТ МОДЕРНИЗИРОВАННОГО ЦИКЛА РЕНКИНА
С БРОМИСТО-ЛИТИЕВЫМ РАСТВОРОМ В КАЧЕСТВЕ РАБОЧЕГО ТЕЛА**

© 2024 г. Д. В. Добрыднев^а, *, В. В. Папин^а, Р. В. Безуглов^а,
Н. Н. Ефимов^а, Е. М. Дьяконов^а, А. С. Шмаков^а

^аЮжно-Российский государственный политехнический университет им. М.И. Платова,
ул. Просвещения, д. 132, г. Новочеркасск, Ростовская обл., 346428 Россия

*e-mail: dobrydney_dv@npi-tu.ru

Поступила в редакцию 06.06.2023 г.

После доработки 22.07.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

Повышение энергетической эффективности теплосиловых установок, работающих по циклу Ренкина, — одна из приоритетных задач российской энергетики. Несмотря на значительное количество научных исследований, эффективность установок такого типа все еще остается низкой. В качестве технологического решения для повышения их эффективности рассматривается модернизированный цикл Ренкина, в котором в качестве рабочего тела используется водный раствор бромида лития, процесс конденсации отработавшего после турбины пара заменен на процесс его абсорбции, а вторым рабочим телом является абсорбент. Изложены особенности функционирования такого цикла, представлена методика его расчета. Исследования показали, что применение бромисто-литиевого раствора позволяет снизить давление пара после турбины и увеличить полезный теплосепад, а также степень заполнения цикла. Кроме того, при регенерации тепла раствора, возвращаемого из котла, повышается средняя температура подвода тепла в цикл, что также увеличивает его термический КПД по сравнению с традиционной схемой. Проведены анализ энергетической эффективности модернизированного цикла и сопоставление его с традиционным циклом Ренкина на водяном паре. Расчеты показали, что применение модернизированного цикла позволяет повысить термический КПД в среднем на 1–2% по сравнению с традиционным решением. Исследованы показатели, свойственные как паросиловым, так и абсорбционным циклам, выведены графические зависимости эффективности от основных параметров. Экономический эффект от применения модернизированной схемы заключается в снижении расхода топлива и выбросов вредных веществ в атмосферу соразмерно снижению расхода топлива.

Ключевые слова: абсорбция, цикл Ренкина, бромид лития, концентрация раствора, энтальпия, кратность циркуляции, тепловая электрическая станция, энергоэффективность, модернизированная схема, эффективность теплосиловых установок

DOI: 10.56304/S0040363624020036

Calculation of an Upgraded Rankine Cycle with Lithium Bromide Solution As a Working Flow

D. V. Dobrydnev^{a, *}, V. V. Papin^a, R. V. Bezuglov^a,
N. N. Efimov^a, E. M. Dyakonov^a, and A. S. Shmakov^a

^a*Platov South Russian State Polytechnic University, Novocherkassk, Rostov oblast, 346428 Russia*

**e-mail: dobrydnev_dv@npi-tu.ru*

Abstract—Increasing the energy efficiency of thermal power plants operating according to the Rankine cycle is one of the priority tasks of the Russian energy sector. Despite a significant amount of scientific research, the efficiency of installations of this type still remains low. As a technological solution to increase their efficiency, the authors consider a modernized Rankine cycle in which an aqueous solution of lithium bromide is used as a working fluid, the condensation process of exhaust steam after the turbine is replaced by the process of its absorption, and the second working fluid is an absorbent. The features of the functioning of such a cycle are outlined, and the methodology for its calculation is presented. Studies have shown that the use of lithium bromide solution can reduce the steam pressure after the turbine and increase the useful heat drop as well as the degree of cycle filling. In addition, when the heat of the solution returned from the boiler is regenerated, the average temperature of the heat supply to the cycle increases, which also increases its thermal efficiency compared to the traditional circuit. The energy efficiency of the modernized cycle was analyzed and compared with the traditional Rankine cycle on water vapor. Calculations have shown that the use of a modernized cycle allows increasing thermal efficiency by an average of 1–2% compared to the traditional solution. The indicators characteristic of both steam power and absorption cycles were studied, and graphical dependences of efficiency on the main parameters were derived. The economic effect of using the modernized scheme is to reduce fuel consumption and emissions of harmful substances into the atmosphere in proportion to the reduction in fuel consumption.

Keywords: absorption, Rankine cycle, lithium bromide, solution concentration, enthalpy, circulation ratio, thermal power plant, energy efficiency, modernized circuit, efficiency of thermal power plants

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

**ПОВЫШЕНИЕ МАНЕВРЕННОСТИ ПГУ-450Т С ОБЕСПЕЧЕНИЕМ
НАДЕЖНОСТИ И ЭКОНОМИЧНОСТИ
В РЕЖИМАХ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК¹**

© 2024 г. Э. К. Аракелян^{а, *}, А. В. Андрушин^а, Ф. Ф. Пашенко^б,
С. В. Мезин^а, К. А. Андрушин^с, А. А. Косой^{а, d}

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

^б *Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, Профсоюзная ул., д. 65, стр. 1, Москва, 117997 Россия*

^с *ООО Интерэлектро “Проект”, Просвирин пер., д. 4, Москва, 107045 Россия*

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

**e-mail: Edik_arakelyan@inbox.ru*

Поступила в редакцию 19.06.2023 г.

После доработки 10.08.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

Статья посвящена проблеме обеспечения надежности и экономичности работы теплофикационных парогазовых установок (ПГУ) на примере ПГУ-450 при пониженных нагрузках и регулировании электрических нагрузок в конденсационном режиме и тепловых и электрических нагрузок в теплофикационном режиме. Приведены главные ограничения, препятствующие широкому привлечению ПГУ к регулированию электрической и тепловой нагрузок. Указана необходимость перевода газовых турбин, обладающих ограниченными возможностями несения переменных нагрузок, на щадящий режим с переносом основной тяжести на паровую турбину. Предложена технология работы ПГУ-450 на пониженных нагрузках: разгрузка ПГУ в соответствии с эксплуатационной инструкцией до допустимой базовой нагрузки газовых турбин, например по экологическому условию при работе ее в конденсационном режиме, и дальнейшее снижение мощности энергоблока по электрической нагрузке при постоянной базовой мощности газовых турбин и котлов-утилизаторов за счет снижения мощности паровой турбины путем применения обводного парораспределения или перевода в моторный режим части цилиндра высокого давления (ЦВД) или всего ЦВД либо паровой турбины в целом. Приведены результаты применения различных схем обводного парораспределения при работе ПГУ в конденсационном режиме, в том числе перевода части ЦВД или ЦВД целиком, а также паровой турбины в моторный режим при останове ПГУ в резерв при прохождении провалов нагрузок. Показано, что применение обводного парораспределения при работе ПГУ в теплофикационном режиме экономичнее, чем в конденсационном режиме. Продемонстрировано преимущество перевода паровой турбины в моторный режим вместо ее останова при работе ПГУ-450 в режиме газотурбинная установка – теплоэлектроцентраль (ГТУ – ТЭЦ) и прохождении провалов графика электропотребления по надежности и экономичности.

Ключевые слова: паровая турбина, парогазовая установка, переменные режимы, надежность, экономичность, щадящий режим, обводное парораспределение, моторный режим, провал нагрузок

DOI: 10.56304/S0040363624020024

Improving the PGU-450T Unit's Maneuverability while Retaining Its Reliability and Economic Efficiency in Variable Load Modes

E. K. Arakelyan^{a, *}, A. V. Andryushin^a, F. F. Pashchenko^b,
S. V. Mezin^a, K. A. Andryushin^c, and A. A. Kosoi^{a, d}

^aNational Research University Moscow Power Engineering Institute, Moscow, 111250 Russia

^bTrapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia

^cOOO Interelectro Project, Moscow, 107045 Russia

^dJoint Institute for High Temperatures, Russian Academy of Sciences (JIHT RAS), Moscow, 125412 Russia

*e-mail: Edik_arakelyan@inbox.ru

Abstract—The article addresses the problem of securing reliable and economically efficient operation of cogeneration combined cycle power plants (CCPPs) taking the PGU-450 unit as an example during its operation at partial loads and performing control of the electrical loads in the condensing mode and heat and electrical loads in the cogeneration mode. The main constraints hindering wide-scale involvement of CCPPs to control of electrical and heat loads are noted. The need to switch the gas turbines, which feature limited capacities of bearing variable loads, into a mild operation mode with shifting the main load on the steam turbine is pointed out. A technology of PGU-450 operation at partial loads is suggested: CCPP unloading in accordance with the operation manual to the gas turbine permissible base load, e.g., according to the environmental constraint during its operation in the condensing mode, and further decrease of the power unit electric output at a constant base power output of the gas turbines and heat recovery steam generators through decreasing the steam turbine output by applying bypass steam admission or shifting a part of the high-pressure cylinder (HPC) or the entire HPS, or the steam turbine as a whole to operate in the generator-driven mode. The article presents the results of applying various bypass steam admission configurations during the CCPP operation in the condensing mode, including when shifting part of the HPC or the entire HPC, and the steam turbine as a whole is shifted to operate in the generator-driven mode when the CCPP is shut down in a stand-by mode in passing off-peak load hours. It has been shown that the use of bypass steam admission during the CCPP operation in the cogeneration mode is more economically efficient than it is in the condensing mode. The article also shows the advantage, in terms of reliability and economic efficiency, of shifting the steam turbine to operate in the generator-driven mode instead of its shutdown during the PGU-450 unit's operation in the gas turbine unit—combined heat and power plant (GTU—CHPP) mode and passing the electric load curve off-peak hours.

Keywords: steam turbine, combined cycle power plant, variable operation modes, reliability, economic efficiency, mild mode, bypass steam admission, operation in the generator-driven mode, off-peak load hours

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО ПЕРЕПАДА ДАВЛЕНИЯ НА КЛАПАНЕ УПРАВЛЕНИЯ НАСОСОМ С ГИДРОТУРБИНЫМ ПРИВОДОМ

© 2024 г. А. В. Попов^{a, *}, Е. Н. Кулаков^a, П. А. Кругликов^a, Ф. А. Святкин^a, П. Г. Павлов^a, Р. С. Тарасенко^b, И. Б. Денисова^b, А. В. Проухин^c

^aНаучно-производственное объединение по исследованию и проектированию энергетического оборудования им. И.И. Ползунова (НПО ЦКТИ), Атаманская ул., д. 3/6, Санкт-Петербург, 191167 Россия

^bАО «Атомэнергопроект», Бакунинская ул., д. 7, стр. 1, Москва, 105082 Россия

^cНаучно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежалы (НИКИЭТ), Малая Красносельская ул., д. 2/8, корп. 3, Москва, 107140 Россия

*e-mail: PopovAV@ckti.ru

Поступила в редакцию 16.05.2023 г.

После доработки 21.07.2023 г.

Принята к публикации 01.08.2023 г.

При использовании свинца в качестве теплоносителя I контура возникают определенные сложности со стороны не только реакторной установки (конструкционные материалы, топливо и т.д.), но и паротурбинного цикла. Отмечена такая особенность II контура АЭС со свинцовым теплоносителем, как необходимость поддержания высокой температуры питательной воды перед парогенератором, вызванная его температурой плавления/замерзания. Для опытно-демонстрационного энергоблока с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300 было принято решение использовать смешивающий подогреватель питательной воды, что повлекло за собой появление второго подъема в схеме питательного насоса. Ввиду отсутствия электроприводных насосов на столь высокие параметры было предложено применять в качестве питательного насоса за смешивающим подогревателем питательной воды насос с гидротурбинным приводом. Такие насосы оказывают значительное влияние на экономичность из-за многоступенчатого преобразования энергии, при этом рекомендации по выбору сопротивления на регулирующем клапане этих насосов отсутствуют. Проведено расчетное исследование по определению оптимального перепада давления на регулирующем клапане гидротурбинного привода питательного насоса энергоблока с реакторной установкой БРЕСТ-ОД-300. Под оптимальным понимается предельный минимальный перепад, при котором клапан способен осуществлять регулирование с заданными критериями качества и обеспечивать наименьшие затраты энергии на собственные нужды. Даны рекомендации по выбору оптимального перепада давления на регулирующем клапане гидротурбинного привода питательного насоса турбоустановки с реактором БРЕСТ-ОД-300. Оработана методика решения задач по оптимизации перепада давления в узлах сложных гидравлических систем.

Ключевые слова: атомная электростанция, БРЕСТ-ОД-300, свинцовый теплоноситель, гидротурбинный насос, динамическая модель, переходной процесс, регулирующий клапан, энергетическая эффективность, SimInTech

DOI: 10.56304/S0040363624020073

Determining the Optimum Pressure Differential Across the Control Valve of a Hydroturbine Driven Pump

A. V. Popov^{a, *}, E. N. Kulakov^a, P. A. Kruglikov^a, F. A. Svyatkin^a, P. G. Pavlov^a,
R. S. Tarasenko^b, I. B. Denisova^b, and A. V. Proukhin^c

^a*Polzunov Scientific and Production Association for the Research and Design of Power Equipment (NPO TsKTI),
St. Petersburg, 191167 Russia*

^b*AO Atomenergoproekt, Moscow, 105082 Russia*

^c*Dollezhal Research and Design Institute of Energy Engineering (NIKIET), Moscow, 107140 Russia*

**e-mail: PopovAV@ckti.ru*

Abstract—When using lead as a primary circuit coolant, certain difficulties arise not only from the side of the reactor plant (structural materials, fuel, etc.) but also from the side of the steam turbine cycle. A feature of the second circuit of a lead-cooled NPP is noted, such as the need to maintain a high temperature of the feedwater in front of the steam generator, caused by its melting/freezing temperature. For the pilot demonstration power unit with the BREST-OD-300 reactor plant, it was decided to use a mixing feedwater heater, which entailed the appearance of a second rise in the feed pump circuit. Due to the lack of electric drive pumps for such high parameters, it was proposed to use a hydraulic turbine driven pump as a feed pump behind the mixing feedwater heater. These pumps have a significant impact on efficiency due to the multistage energy conversion, and there is no recommendation for selecting resistance on the control valve of these pumps. A computational study was carried out to determine the optimal pressure drop on the control valve of the hydraulic turbine drive of the feed pump of the power unit with the BREST-OD-300 reactor plant. Optimal is understood as the ultimate minimum differential at which the valve is able to carry out regulation with specified quality criteria and ensure the lowest energy consumption for its own needs. Recommendations are given for choosing the optimal pressure drop on the control valve of the hydraulic turbine drive of the feed pump of a turbine unit with the BREST-OD-300 reactor. A methodology has been developed for solving problems of optimizing pressure drop in units of complex hydraulic systems.

Keywords: nuclear power plant, BREST-OD-300, lead coolant, hydraulic turbine pump, dynamic model, transient process, control valve, energy efficiency, SimInTech

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ УЧАСТИЯ АЭС В ПОКРЫТИИ ПИКОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НАГРУЗОК НА ОСНОВЕ ВОДОРОДНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ¹

© 2024 г. Р. З. Аминов^{a, *, **}, А. Н. Егоров^a, А. Н. Байрамов^a

^aФедеральный исследовательский центр “Саратовский научный центр Российской академии наук”,
Рабочая ул., д. 24, г. Саратов, 410028 Россия

*e-mail: oepnan@inbox.ru

**e-mail: wwwean@gmail.com

Поступила в редакцию 06.04.2023 г.

После доработки 12.08.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

Одна из целей Энергетической стратегии России до 2035 г. – развитие водородной энергетики, а именно – достижение мирового лидерства по экспорту водорода, полученного при использовании энергии возобновляемых источников и АЭС. Дальнейшее развитие атомной энергетики предполагает его выработку на действующих АЭС. Один из реальных примеров – производство водорода методом электролиза воды на Кольской АЭС. В настоящее время ведутся активные исследования в области водородной энергетики, развиваются эффективные технологии электролиза воды и обратимые топливные элементы (ОТЭ), которые находят применение в том числе в системах децентрализованного энергоснабжения. Достигнутый общий КПД, равный 37.18 и 49.80%, при удельных капиталовложениях в диапазонах 1595–2050 и 1828–2396 дол./кВт в ОТЭ с твердополимерным и твердооксидным электролитом соответственно позволяет рассматривать их в качестве средств аккумулирования электроэнергии в часы ее сниженной выработки (внепиковой) на АЭС. Разработана универсальная (обобщенная) схема использования водородных технологий на АЭС на основе комбинирования систем “горячего” сжигания водорода в кислородной среде с получением водяного пара высоких параметров (температурой до 3600 К при давлении 6 МПа) и “холодного” сжигания водорода в топливных элементах, в том числе обратимых. Проведена сравнительная оценка технико-экономической эффективности производства пиковой электроэнергии на основе предложенных вариантов водородных технологий, применяемых на АЭС. Определены капитальные вложения в ОТЭ, при которых обеспечивается равная технико-экономическая эффективность производства пиковой электроэнергии при реализации рассмотренных вариантов. Разработаны номограммы для определения себестоимости производства электроэнергии в часы пиковой нагрузки в зависимости от тарифов и объемов ее потребления во внепиковый период, а также капитальных вложений в ОТЭ. Как показали расчеты, себестоимость ее производства составляет 1.52–2.93 руб/(кВт·ч). Учет полезного срока службы ОТЭ приводит к существенному увеличению себестоимости – она варьируется от 3.74 до 6.53 руб/(кВт·ч).

Ключевые слова: водородная энергетика, атомная энергетика, электролиз воды, аккумулирование энергии, топливные элементы

DOI: 10.56304/S0040363624020012

Assessing the Effectiveness of NPP Participation Covering Peak Electrical Loads Based on Hydrogen Technology

R. Z. Aminov^{a, *, **}, A. N. Egorov^a, and A. N. Bayramov^a

^a*Federal Research Center Saratov Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Saratov, 410028 Russia*

^{*}*e-mail: oepran@inbox.ru*

^{**}*e-mail: wwwean@gmail.com*

Abstract—One of the goals of the Russian Energy Strategy until 2035 is the development of hydrogen energy, namely, achieving global leadership in the export of hydrogen obtained from the use of energy from renewable sources and nuclear power plants. Further development of nuclear energy involves its production at existing nuclear power plants. One of the real examples is the production of hydrogen by electrolysis of water at the Kola Nuclear Power Plant. Currently, active research is being conducted in the field of hydrogen energy, and effective technologies for water electrolysis and reversible fuel cells (RFC) are being developed, which are used, among other things, in decentralized energy supply systems. The achieved overall efficiency of 37.18 and 49.80% with specific capital investments in the ranges of 1595–2050 and 1828–2396 USD/kW in electrolyzers with solid polymer and solid oxide electrolytes, respectively, allows us to consider them as a means of storage during hours of reduced generation (off-peak) electricity from nuclear power plants. A universal (generalized) scheme for the use of hydrogen technologies at nuclear power plants has been developed based on combining systems of “hot” combustion of hydrogen in an oxygen environment to produce high-parameter water vapor (temperatures up to 3600 K at a pressure of 6 MPa) and “cold” combustion of hydrogen in fuel cells, including reversible ones. A comparative assessment of the technical and economic efficiency of peak electricity production based on the proposed options for hydrogen technologies used at nuclear power plants was carried out. Capital investments in RFC have been determined, which ensure equal technical and economic efficiency of peak electricity production when implementing the considered options. Nomograms have been developed to determine the cost of production during peak hours depending on tariffs and volumes of consumption during the off-peak period as well as capital investments in RFC. As calculations have shown, the cost of its production is 1.52–2.93 rubles/(kW h). Taking into account the useful service life of RFC leads to a significant increase in cost: it varies from 3.74 to 6.53 rubles/(kW h).

Keywords: hydrogen energy, nuclear energy, water electrolysis, energy storage, fuel cells

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

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМНЫХ И ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ НА КРИТИЧЕСКОЕ ИСТЕЧЕНИЕ НЕДОГРЕТОЙ
И ВСКИПАЮЩЕЙ ВОДЫ ЧЕРЕЗ КАНАЛЫ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ**

© 2024 г. И. А. Коновалов^{а, *}, М. А. Большухин^а, А. М. Хизбуллин^а, А. Н. Соколов^а,
А. А. Баринов^а, В. Д. Локтионов^б, С. М. Дмитриев^с, Т. К. Зырянова^с

^а*Опытное конструкторское бюро машиностроения им. И.И. Африкантова,
Бурнаковский проезд, д. 15, г. Нижний Новгород, 603074 Россия*

^б*Электрогорский научно-исследовательский центр по безопасности атомных электростанций (ЭНИЦ),
ул. Святого Константина, д. 6, г. Электрогорск, 142530 Россия*

^с*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, д. 24, г. Нижний Новгород, 603950 Россия*

**e-mail: ats@nntu.ru*

Поступила в редакцию 26.05.2023 г.

После доработки 18.07.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

В научно-технической литературе представлено большое количество работ, посвященных экспериментальному исследованию критического истечения насыщенной и недогретой жидкости через цилиндрические каналы. Несмотря на это, в доступных источниках не дана оценка того, насколько те или иные геометрические параметры и режимные условия экспериментов влияют на критическое истечение. Настоящая статья посвящена анализу экспериментальных данных по критическим истечениям, полученных в ЭНИЦ с применением статистических методов и машинного обучения. Цель работы – выявить статистические связи между режимными и геометрическими параметрами, а также количественно оценить влияние этих параметров на критический массовый расход и давление. Проведенный анализ экспериментальных данных для каналов со скругленной входной кромкой показал сильное влияние формы входной кромки как на значение критической массовой скорости, так и на конечное давление в выходном сечении канала, которое устанавливается при критическом режиме истечения. Сравнение результатов анализа экспериментальных данных для каналов с различной формой входного участка при одних и тех же режимных и геометрических параметрах показало, что для каналов со скругленной входной кромкой критическая массовая скорость приблизительно на 25% выше, чем для каналов с острой входной кромкой. С увеличением длины горловины эта разница асимптотически убывает. Среди режимных параметров основной вклад в дисперсию критической массовой скорости вносит недогрев среды на входе до температуры насыщения – 51% общего влияния режимных и геометрических параметров. Увеличение недогрева среды до температуры насыщения и уменьшение длины горловины канала приводят к тому, что противодавление, необходимое для установления критического режима истечения, снижается. В предельных случаях критическое отношение давлений может составлять 0.1, что существенно ниже общепринятого в инженерной практике значения 0.5. Полученные результаты в дальнейшем могут быть использованы при планировании опытов, направленных как на расширение диапазона режимных параметров, так и на оптимизацию элементов, в основе работы которых лежит явление критического истечения.

Ключевые слова: критическое истечение, адиабатный канал, сужающее устройство, запираание потока, гидравлическое сопротивление, входная кромка, статистические методы, суррогатная модель, машинное обучение

DOI: 10.56304/S0040363624020048

Study of the Influence of Operating and Geometric Parameters on the Critical Outflow of Subcooled and Boiling Water through Channels of Different Geometry

I. A. Kononov^{a, *}, M. A. Bolshukhin^a, A. M. Khizbullin^a, A. N. Sokolov^a, A. A. Barinov^a,
V. D. Loktionov^b, S. M. Dmitriev^c, and T. K. Zyryanova^c

^a*Experimental Mechanical Engineering Design Bureau Named After. I.I. Afrikantova, Nizhny Novgorod, 603074 Russia*

^b*Elektrogorsk Research Center for the Safety of Nuclear Power Plants (EREC), Elektrogorsk, 142530 Russia*

^c*Nizhny Novgorod State Technical University Named After. R.E. Alekseeva, Nizhny Novgorod, 603950 Russia*

**e-mail: ats@nntu.ru*

Abstract—The scientific and technical literature presents a large number of works dedicated to the experimental study of the critical (aka “sonic” or “choked”) flow of saturated and subcooled liquid through cylindrical channels. Despite this, the available sources do not provide an assessment of the extent to which certain geometric parameters and operating conditions of experiments affect the critical outflow. This article is aimed at the analysis of experimental data using statistical methods and machine learning on critical outflow obtained at Elektrogorsk Research and Development Center (EREC, Russia). The purpose of the work is to identify statistical relationships between operating and geometric parameters, as well as to quantify the influence of these parameters on the critical mass flow and pressure. The analysis of experimental data for channels with a filleted inlet edge showed a strong influence of the inlet edge shape both on the value of the critical mass velocity and on the final pressure in the outlet section of the channel, which is established at the critical outflow mode. A comparison of the experimental data for channels with different shapes of the inlet section with the same operating and other geometric parameters showed that for channels with a rounded inlet edge, the critical mass velocity is approximately 25% higher than for channels with a sharp inlet edge. As the nozzle throat length increases, this difference decreases asymptotically. Among the regime parameters, the main contribution to the dispersion of the critical mass velocity is made by the undersaturation (subcooling) of the medium at the inlet which comprised 51% of the total influence of the regime and geometric parameters. An increase in the undersaturation and a decrease in the length of the channel throat lead to decrease in the back pressure necessary to establish the critical outflow mode. In extreme cases, the critical pressure ratio (outlet/inlet) can be 0.1, which is significantly lower than the generally accepted value of 0.5 in engineering practice. The results obtained can be used in the future for design of experiments aimed at expanding the range of operating parameters or optimization elements whose operation is based on the phenomenon of critical outflow.

Keywords: critical outflow, adiabatic channel, orifice, choked flow, hydraulic resistance, inlet edge, statistical methods, surrogate model, machine learning

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК
КОНТУРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ С УВЕЛИЧЕННЫМ
РАССТОЯНИЕМ ТЕПЛОПЕРЕНОСА**

© 2024 г. Ю. Ф. Майданик^а, *, В. Г. Пастухов^а, М. А. Чернышева^а

^аИнститут теплофизики Уральского отделения РАН, ул. Амундсена, д. 107а, г. Екатеринбург, 620016 Россия

*e-mail: lhtd@itpuran.ru

Поступила в редакцию 21.06.2023 г.

После доработки 15.08.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

Задача энергоэффективного подвода и отвода тепла в системах теплового регулирования, нагрева и охлаждения весьма актуальна для многих отраслей техники. В статье представлены результаты разработки и исследования контурной тепловой трубы (КТТ) длиной 21 м, которая является пассивным теплопередающим устройством, работающим по замкнутому испарительно-конденсационному циклу с использованием капиллярного давления для прокачки теплоносителя. Эти устройства могут быть использованы в таких системах, где источник и сток тепла удалены один от другого на расстояние, измеряемое метрами и даже десятками метров, без применения дополнительных источников энергии. В устройстве имеются испаритель диаметром 24 мм с зоной нагрева длиной 188 мм, паропровод и конденсатопровод (внешний/внутренний диаметры 8/6 и 6/4 мм). В качестве конденсатора использован теплообменник типа “труба в трубе” длиной 310 мм, снабженный рубашкой охлаждения. Испытания проводились при горизонтальном положении КТТ. Тепло от конденсатора отводилось путем вынужденной конвекции смеси вода – этиленгликоль с температурой 20 и –20°C и расходом 6 дм³/мин. Тепловая нагрузка, подводимая к испарителю от электрического нагревателя, увеличивалась от 200 до 1700 Вт в первом случае и до 1300 Вт во втором. Температура пара на выходе из испарителя изменялась при этом соответственно от 25 до 62°C и от 24 до 30°C. Максимальный перепад его температуры по длине паропровода не превышал 4°C. Подобные устройства могут быть использованы в энергоэффективных системах утилизации низкопотенциального тепла, обогрева или охлаждения удаленных объектов, а также для равномерного распределения тепла по большой поверхности стоков тепла.

Ключевые слова: пассивные теплопередающие устройства, контурные тепловые трубы, испарение, конденсация, капиллярное давление, утилизация тепла, тепловая нагрузка, теплофизические свойства теплоносителя

DOI: 10.56304/S0040363624020061

Development and Study of Operating Characteristics of a Loop Heat Pipe with Increased Heat Transfer Distance

Yu. F. Maydanik^{a, *}, V. G. Pastukhov^a, and M. A. Chernysheva^a

^a*Institute of Thermal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, 620016 Russia*

**e-mail: lhtd@itpuran.ru*

Abstract—The task of energy-efficient heat supply and removal in thermal control, heating and cooling systems is very relevant for many branches of technology. The paper presents the results of the development and study of a 21 m long loop heat pipe (LHP) that is a passive heat-transfer device operating on a closed evaporation-condensation cycle and using capillary pressure to pump a working fluid. These devices can be used in systems where the heat source and the heat sink are removed from each other by a distance measured in meters and even tens of meters, without the use of additional energy sources. The device has a 24 mm diameter evaporator with a 188 mm long heating zone, a vapor line and a liquid line (external/internal diameters of 8/6 mm and 6/4 mm). A 310 mm long pipe-in-pipe heat exchanger equipped with a cooling jacket was used as a condenser. The tests were conducted with the LHP in a horizontal position. Heat was removed from the condenser by forced convection of a water-ethylene glycol mixture with temperatures of 20 and -20°C and a flow rate of $6\text{ dm}^3/\text{min}$. The heat load supplied to the evaporator from the electric heater increased from 200 to 1700 W in the first case and to 1300 W in the second. The vapor temperature at the outlet of the evaporator varied from 25 to 62°C and from 24 to 30°C , respectively. Its maximum temperature difference along the length of the vapor line did not exceed 4°C . Such devices can be used in energy-efficient systems for utilizing low-potential heat, heating or cooling remote objects, and for uniformly distributing heat over a large surface area of heat sinks.

Keywords: passive heat-transfer devices, loop heat pipes, evaporation, condensation, capillary pressure, heat utilization, heat load, thermophysical properties of a working fluid

ТЕПЛО- И МАССООБМЕН,
СВОЙСТВА РАБОЧИХ ТЕЛ И МАТЕРИАЛОВ

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВИТОГО ТУРБУЛЕНТНОГО
ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООТДАЧИ В КАНАЛЕ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ
С ОДНОСТОРОННИМ ВНУТРЕННИМ ОРЕБРЕНИЕМ^{1, 2}**

© 2024 г. В. В. Рис^{а, *}, С. А. Галаев^а, А. М. Левченя^а, И. Б. Писаревский^а

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

*e-mail: vvris@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.05.2023 г.

После доработки 02.08.2023 г.

Принята к публикации 30.08.2023 г.

Для пространственно-периодической модели односторонне оребренного канала как прототипа проточной части системы конвективного охлаждения лопатки газовой турбины получено численное решение задачи о развитом турбулентном течении и стабилизированном теплообмене при числах Рейнольдса от 5×10^4 до 2×10^5 . Течение и теплообмен рассмотрены при значении числа Прандтля 0.7. Канал имеет прямоугольное сечение с отношением сторон 1.5. Ребра квадратного сечения, расположенные на одной из широких стенок и перегородивающие поперечное сечение на 10%, наклонены относительно продольной оси канала на 45° . Для количественной оценки влияния оребрения на течение и теплообмен интегральные параметры: коэффициент гидравлических потерь и число Нуссельта – сеточно сошедшегося решения соотносятся с интегральными параметрами развитого течения и стабилизированного теплообмена в гладком канале, найденными тем же численным методом. Результаты численного моделирования для оребренного канала сопоставлены также с опубликованными данными эксперимента, полученными в отчасти сходных условиях. Расчетные данные для коэффициента гидравлических потерь хорошо согласуются с результатами эксперимента. Расчетные данные для теплоотдачи отличаются от экспериментальных не более чем на 11%, однако тенденции изменения теплоотдачи с ростом числа Рейнольдса в численном и физическом моделировании получились разными. Это различие, вероятно, связано с тем, что в коротком экспериментальном канале не удалось достигнуть стабилизации теплоотдачи. Получены аналитические степенные зависимости от числа Рейнольдса для коэффициента гидравлических потерь и чисел Нуссельта, относящихся ко всем стенкам канала и только к оребренной стенке. Отмечено, что коэффициент гидравлических потерь слабо зависит от числа Рейнольдса, что характерно для местных сопротивлений, а зависимости для чисел Нуссельта с поправкой на специфику задачи близки к зависимостям для пристенных слоев и течений в гладких каналах.

Ключевые слова: охлаждаемая лопатка, канал, внутреннее оребрение, турбулентное течение, турбулентная вязкость, коэффициент гидравлических потерь, интенсификация теплоотдачи, численное моделирование, квазиструктурированные сетки

DOI: 10.56304/S0040363624020085

Numerical Investigation of a Developed Turbulent Flow and Heat Transfer in a Rectangular Channel with Single-Sided Internal Ribs

V. V. Ris^{a, *}, S. A. Galaev^a, A. M. Levchenya^a, and I. B. Pisarevskii^a

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

**e-mail: vvris@yandex.ru*

Abstract—The problem of a fully developed turbulent flow and developed heat transfer was solved numerically at a Reynolds number ranging from 5×10^4 to 2×10^5 for a spatially periodic model of a one-sided ribbed channel as a prototype of the flow path of an internal convective cooling system for a gas turbine blade. The flow and heat transfer were investigated at the Prandtl number of 0.7. The channel has a rectangular cross-section with an aspect ratio of 1.5. Square ribs with a 10% rib-to-channel height ratio are installed on one of the wide channel walls at an angle of 45° to the longitudinal axis of the channel. To quantify the effect of ribs on the flow and heat transfer, the integral parameters, such as hydraulic resistance factor and Nusselt number determined from the grid-converged solutions, are compared with the integral parameters for a fully developed flow and heat transfer in a smooth channel predicted by the same numerical method. The results of numerical simulation for the ribbed channel are also compared with published experimental data obtained under partly similar conditions. The predicted hydraulic resistance factor agrees well with the experiment. The predicted heat transfer agrees with the experiment within 11%, but the trends in heat transfer with increasing Reynolds number obtained using numerical and physical simulation are different. This difference may be caused by the fact that fully developed heat transfer could not be attained in the short experimental channel. Analytical power-law dependences on the Reynolds number are obtained for the hydraulic resistance factor and the Nusselt number pertaining to all channel walls and only to the ribbed wall. It is pointed out that the hydraulic resistance factor depends weakly on the Reynolds number, which is typical for local resistances, and the dependences for Nusselt numbers corrected for the specifics of the problem are close to the dependences for near-wall layers and flows in smooth channels.

Keywords: cooled blade, channel, internal rib-roughened surface, turbulent flow, hydraulic losses, hydraulic resistance factor, heat-transfer enhancement, numerical simulation, quasistructured grids

**ВОЗОБНОВЛЯЕМЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭНЕРГИИ,
ГИДРОЭНЕРГЕТИКА**

**РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ СИСТЕМЫ ПОЛУЧЕНИЯ ВОДОРОДА
ИЗ БИОМАССЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГАЗИФИКАЦИИ
В ХИМИЧЕСКИХ ЦИКЛАХ**

© 2024 г. Д. С. Литун^а, *, Г. А. Рябов^а

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

*e-mail: litoun@gmail.com

Поступила в редакцию 25.04.2023 г.

После доработки 11.07.2023 г.

Принята к публикации 01.08.2023 г.

Рассмотрены современные требования к производству водорода с минимальным углеродным следом, возможность применения полигенерирующих систем для производства электроэнергии, тепла, полезных продуктов и технологий химических циклов для получения водорода с одновременным улавливанием диоксида углерода. Разработана новая система, объединяющая использование биомассы в качестве топлива, химические циклы и получение синтетического газа в полигенерирующей системе связанных реакторов, которая является весьма перспективной с позиции достижения максимальной эффективности процесса производства водорода без углеродного следа (с отрицательным углеродным следом). Приведены методика и результаты расчетов состава и расхода генераторного газа, материального баланса системы химических циклов, тепловых эффектов химических реакций в системе связанных между собой реакторов, теплового баланса и температур в отдельных реакторах, тепловых и материальных балансов в утилизаторах тепла отходящих газов. Определено влияние основных условий работы системы химических циклов на температуры в реакторах по данным расчетов тепловых и материальных балансов. Приведено расчетное значение эффективности по водороду (75.93%), которое вполне вписывается в общую картину результатов моделирования аналогичных систем для получения водорода в химических циклах с оксидами металлов и может рассматриваться как ориентир при проработках технических решений в рамках предлагаемой принципиальной технологической схемы. Намечены пути дальнейших исследований.

Ключевые слова: получение водорода, углеродный след, биомасса, паровой риформинг, химические циклы, полигенерация, улавливание диоксида углерода, связанные между собой реакторы с кипящим и циркулирующим кипящим слоем

DOI: 10.56304/S004036362402005X

ЛИТУН, РЯБОВ

Substantiation by Calculation of a System for Hydrogen Production from Biomass Using Chemical Looping Gasification

D. S. Litun^a, * and G. A. Ryabov^a

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

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

Abstract—Modern requirements for the production of hydrogen with a minimum carbon footprint, the possibility of using polygenerating systems for production of electricity, heat, or useful products, and chemical-looping technologies for producing hydrogen combined with capture of carbon dioxide are considered. A new system has been developed that integrates the use of biomass as a fuel, chemical looping, and syngas production in a polygenerating system of interconnected reactors, which is very promising in maximizing the effectiveness of hydrogen production without a carbon footprint (or with a negative carbon footprint). A procedure and results of calculations of the composition and consumption of generator gas, material balance of a chemical-looping system, heat values of chemical reactions in a system of interconnected reactors, heat balance and temperatures in individual reactors, and heat and material balances in exhaust gas heat-recovery units are presented. The effect of the main operating conditions of a chemical looping system on temperatures in the reactors was determined on the basis of the calculated and material balances. The calculated efficiency in terms of hydrogen production (75.93%) is given. This value fits well into the broad outline of the results obtained in simulation of similar systems for chemical looping hydrogen production from metal oxides and can be considered as a guideline when developing engineering solutions within the scope of the proposed process-flow diagram. Potential directions of further studies are set.

Keywords: hydrogen production, carbon footprint, biomass, steam reforming, chemical looping, polygeneration, carbon dioxide capture, interconnected reactors with fluidized bed and circulating fluidized bed