

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ATOMIC ENERGY

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ATOMIC HYDROGEN ENERGY

Статья поступила в редакцию 25.04.18. Ред. пер. № 1316-2657-5

The article has entered in publishing office 25.04.18. Ed. reg. No. 1316-2657-5

УДК 621.039:62-622

**ВОДОРОДНО-КИСЛОРОДНЫЙ ПАРОГЕНЕРАТОР
ДЛЯ ЗАМКНУТОГО ВОДОРОДНОГО ЦИКЛА ГОРЕНИЯ******Р.З. Аминов, А.Н. Егоров***ФГБУН «Саратовский научный центр» Российской академии наук
д. 24, ул. Рабочая, Саратов, 410028, Россия

тел.: +7(8452)27-14-36, факс: (8452)27-14-36; e-mail: snransar@san.ru, www.ean@gmail.com

doi: 10.15518/isjaee.2018.13-15.068-079

Заключение совета рецензентов: 07.05.18 Заключение совета экспертов: 15.05.18 Принято к публикации: 25.05.18

Рассмотрены вопросы сжигания водорода в кислородной среде для получения высокотемпературного пара, который можно задействовать в производстве электроэнергии на различных энергоустановках, в том числе на атомных электростанциях (АЭС). Так, использование водородно-кислородного парогенератора в составе водородного энергетического комплекса позволяет повысить мощность и эффективность АЭС в эксплуатационном режиме за счет пароводородного перегрева основного рабочего тела паротурбинной установки. Кроме того, в условиях роста доли АЭС водородный энергетический комплекс помогает адаптировать эти станции к переменным графикам электрических нагрузок и развивать экологически чистые технологии производства электроэнергии. Предложено решение проблемы эффективного и безопасного использования энергии водородного топлива на АЭС с водородным энергокомплексом.

Технические решения по сжиганию водорода в кислородной среде, применяющие непосредственный впрыск охлаждающей воды или водяного пара в продукты сгорания, имеют существенный недостаток – эффект «закалки» при впрыске воды или водяного пара, который приводит к снижению эффективности рекомбинации в процессе охлаждения продуктов сгорания, что выражается в увеличении доли неконденсирующихся газов. В этом случае подача такой смеси в паросиловой цикл небезопасна, так как может привести к опасному росту концентрации несгоревшего водорода в проточной части паротурбинной установки. В статье для решения данной проблемы предложен замкнутый водородный цикл и система водородного перегрева пара на его основе. Проведено исследование замкнутой системы сжигания водорода, которая позволяет полностью исключить попадание водорода в рабочее тело парового цикла и обеспечить полное его окисление за счет некоторого избытка циркулирующего кислорода.

Рассмотрены два типа водородно-кислородных камер сгорания для системы безопасного водородного перегрева пара в цикле АЭС посредством замкнутой системы сжигания водорода в кислородной среде. В результате математического моделирования процессов горения и тепломассообмена определены требуемые параметрические показатели водородно-кислородного парогенератора с учетом температурного режима работы. Определен мощностной ряд водородно-кислородных парогенераторов с предлагаемой конструкцией камеры сгорания.

Ключевые слова: водород; перегрев пара; атомная электростанция; водородно-кислородная камера сгорания; замкнутый водородный цикл; метод конечных элементов; ANSYS.

* Аминов Р.З., Егоров А.Н. Водород-кислородный парогенератор для замкнутого водородного цикла горения // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(13-15):68-79.

HYDROGEN-OXYGEN STEAM GENERATOR FOR A CLOSED HYDROGEN COMBUSTION CYCLE

R.Z. Aminov, A.N. Egorov

Saratov Scientific Center of Russian Academy of Sciences
24 Rabochaya St., Saratov, 410028, Russia
tel.: +7(8452)27 14 36, fax: (8452)27 14 36, e-mail: snransar@san.ru, www.ansar@gmail.com

doi: 10.15518/isj.2018.13-15.068-079

Referred 7 May 2018 Received in revised form 15 May 2018 Accepted 25 May 2018

The paper analyzes the problems of combustion hydrogen in an oxygen medium for produce high-temperature steam that can be used to produce electricity at various power plants. For example, at the nuclear power plants, the use of a H₂-O₂ steam generator as part of a hydrogen energy complex makes it possible to increase its power and efficiency in the operational mode due to steam-hydrogen overheating of the main working fluid of a steam-turbine plant. In addition, the use of the hydrogen energy complex makes it possible to adapt the nuclear power plants to variable electric load schedules in conditions of increasing the share of nuclear power plants and to develop environmentally friendly technologies for the production of electricity. The paper considers a new solution of the problem of effective and safe use of hydrogen energy at NPPs with a hydrogen energy complex.

Technical solutions for the combustion of hydrogen in the oxygen medium using direct injection of cooling water or steam in the combustion products have a significant drawback – the effect of “quenching” when injecting water or water vapor which leads to a decrease in the efficiency of recombination during cooling of combustion products that is expressed in an increase fraction of non-condensable gases. In this case, the supply of such a mixture to the steam cycle is unsafe, because this can lead to a dangerous increase in the concentration of unburned hydrogen in the flowing part of the steam turbine plant. In order to solve this problem, the authors have proposed a closed hydrogen cycle and a hydrogen vapor overheating system based on it, and carried out a study of a closed hydrogen combustion system which completely eliminates hydrogen from entering the working fluid of the steam cycle and ensures its complete oxidation due to some excess of circulating oxygen.

The paper considers two types of hydrogen-oxygen combustion chambers for the system of safe generating of superheated steam using hydrogen in nuclear power plant cycle by using a closed system for burning hydrogen in an oxygen medium. As a result of mathematical modeling of combustion processes and heat and mass transfer, we have determined the required parameters of a hydrogen-oxygen steam generator taking into account the temperature regime of its operation, and a power range of hydrogen-oxygen steam generators with the proposed combustion chamber design.

Keywords: hydrogen; steam superheating; nuclear power plant; hydrogen-oxygen combustion chamber; closed hydrogen cycle; finite element method; ANSYS.



*Рашид Зарифович
Аминов
Rashid Aminov*

Сведения об авторе: д-р техн. наук, профессор, главный научный сотрудник Саратовского научного центра Российской академии наук, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина.

Образование: Саратовский политехнический институт (1961 г.).

Область научных интересов: энергетические системы на органическом топливе; водородная энергетика; ядерная и радиационная безопасность; радиоэкология.

Публикации: 315.

h-index: 7; ORCID: 0000-0003-1549-5133

Scopus Author ID: 7006689108

Research ID: O-3305-2014

Information about the author: D.Sc. in Engineering, Professor, Chief Researcher at Saratov Scientific Center of RAS, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Education: Saratov Polytechnic Institute, 1961.

Research interests: energy systems on organic fuel; hydrogen energy; nuclear and radiation safety; radiation ecology.

Publications: 315.



Александр Николаевич
Егоров
Aleksandr Egorov

Сведения об авторе: канд. техн. наук, научный сотрудник Саратовского научного центра Российской академии наук, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина.

Образование: Саратовский государственный технический университет (2010 г.).

Область научных интересов: водородная энергетика; атомная энергетика; проблемы создания энергетического оборудования; энерго- и ресурсосберегающие, экологически чистые химико-технологические процессы; моделирование технических систем; термодинамические процессы в технических системах; процессы тепло- и массообмена; возобновляемые источники и системы прямого преобразования энергии.

Публикации: 31.

h-index: 5; ORCID: 0000-0002-0943-859X

Scopus Author ID: 56343107200

Research ID: B-7899-2015

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Researcher at Saratov Scientific Center of RAS, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov.

Education: Saratov State Technical University, 2010.

Research interests: hydrogen energy; nuclear energy; problems building of energy equipments; energy resources savings, ecological clean and chemical-technological processes; modeling of technical systems; thermodynamical processes in technical systems; processes thermal and mass exchange; renewable and systems of direct transform energy.

Publications: 31.

1. Введение

Сжигание водорода в кислородной среде позволяет получать высокотемпературный пар, который можно использовать для производства электроэнергии на различных энергоустановках. Например, на атомных электростанциях (АЭС) применение этой технологии имеет ряд преимуществ. Парогенератор в составе водородного энергетического комплекса за счет пароводородного перегрева основного рабочего тела паротурбинных установок повышает мощность и эффективность АЭС в эксплуатационном режиме [1–3]. В аварийных ситуациях с обесточиванием водородно-кислородный парогенератор может служить источником пара для генерации электроэнергии, необходимой для поддержания в рабочем состоянии активных аварийных систем расхолаживания реакторных установок [4–6]. Водород также обеспечивает аккумуляцию неостребованной ночной электроэнергии. Кроме того, поскольку при сжигании водорода в кислородной среде образуется только водяной пар, этот вид топлива является экологически чистым энергоносителем, что делает дальнейшее увеличение доли АЭС в энергосистемах страны более безопасным [7–11].

В водородно-кислородном парогенераторе в процессе окисления кислородом происходит преобразо-

вание энергии водородного топлива в тепловую энергию в виде водяного пара высоких параметров. В зависимости от требуемых условий применения водородного энергетического комплекса и условий сжигания топлива температура неохлажденного пара может достигать 3 500 ÷ 3 600 К при давлении 6 МПа [12], поэтому существенное влияние на эффективность работы парогенератора будет оказывать способ охлаждения продуктов сгорания. Все технические решения для снижения температуры подразумевают непосредственный впрыск охлаждающей воды или водяного пара в продукты сгорания и подачу образующейся смеси в паросиловой цикл [13–14]. Возникающий при этом эффект «закалки» [15–16] приводит к снижению эффективности рекомбинации в процессе охлаждения продуктов сгорания, что выражается в увеличении доли неконденсирующихся газов. В связи с этим подача такой смеси в паросиловой цикл небезопасна, так как может привести к опасному росту концентрации несгоревшего водорода в проточной части паротурбинной установки. Таким образом, разработка новых эффективных и безопасных способов и систем сжигания водорода в кислородной среде для водородного перегрева пара в цикле АЭС становится актуальной задачей, в рамках которой необходимо провести исследование процесса горения и тепломассобмена в таких системах.

Список обозначений

Буквы греческого алфавита

$k-\varepsilon$	Модель турбулентности
$\sigma_{0,2}$	Предел текучести, МПа

Аббревиатуры

FVM	Метод конечных объемов (Finite Volumes Method)
FEM	Метод конечных элементов (Finite Elements Method)
FDM	Метод конечных разностей (Finite Difference Method)
CFD	Вычислительная гидродинамика (Computational fluid dynamics)
АЭС	Атомная электростанция
ПТУ	Паротурбинная установка
ПГ	Парогенератор

Продолжение списка обозначений	
ПВД	Подогреватель высокого давления
КС	Камера сгорания
МКЭ	Метод конечных элементов
БрХ1	Хромистая бронза

2. Теоретический анализ

Процессы тепло- и массообмена с точки зрения механики сплошных сред могут быть описаны системой нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, которую принято называть уравнениями Навье – Стокса [17]. Эта система включает в себя уравнения неразрывности, движения, энергии и диффузии [18]. Если в потоке происходят химические реакции, задача усложняется введением уравнений модели протекания данных реакций. Уравнения Навье – Стокса могут быть решены в общем виде лишь в некоторых случаях и при ряде допущений. Развитие получили три основных подхода к численному решению данных уравнений: метод конечных разностей (FDM), метод конечных объемов, или метод контрольного объема, (FVM) и метод конечных элементов (МКЭ) (FEM) [19–21]. В настоящей статье применялся метод МКЭ, суть которого заключается в приближенном решении вариационной задачи.

Для оценки термодинамических параметров продуктов сгорания и охлаждающей среды, температуры стенок камеры сгорания и моделирования процесса горения применялся конечно-элементный метод расчета с CFD-кодом [22–23] на базе пакета ANSYS [24]. В рамках такого моделирования с учетом геометрии камеры сгорания проводился расчет скорости, состава

и термодинамических параметров продуктов сгорания, охлаждающей среды, а также температуры стенок камеры сгорания со стороны продуктов сгорания и охлаждающей среды. Для расчета процесса горения и параметров продуктов сгорания (смеси водяного пара с продуктами диссоциации) использовалась модель диффузионного горения предварительно не перемешанных горючего и окислителя [25–26]. При этом процесс горения в водородно-кислородном парогенераторе, как и в классических камерах сгорания газовых турбин, является турбулентным. Для описания модели турбулентной жидкости применялась стандартная двухпараметрическая $k-\varepsilon$ модель [27–28], доступная в пакете ANSYS Fluent.

3. Экспериментальная часть. Водородно-кислородная камера сгорания

Решить проблему эффективного и безопасного сжигания водорода в кислородной среде может использование замкнутого водородного цикла и системы водородного перегрева пара (рис. 1), так как замкнутый цикл позволяет полностью исключить попадание водорода в рабочее тело парового цикла и обеспечить полное его окисление за счет некоторого избытка циркулирующего кислорода.

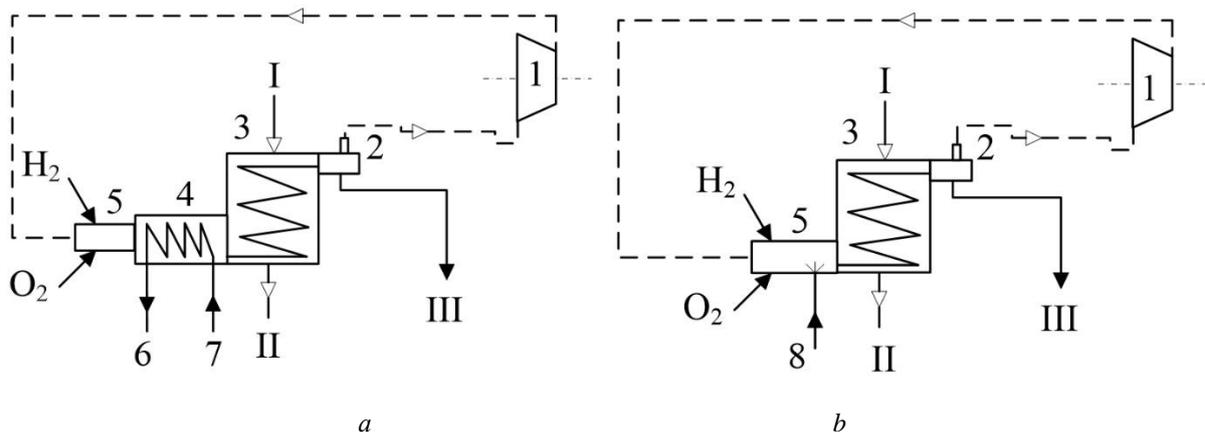


Рис. 1 – Принципиальная схема водородного перегрева пара на АЭС на основе замкнутого водородного цикла с системой охлаждения продуктов сгорания (а) и с впрыском воды в продукты сгорания (б): 1 – компрессор; 2 – конденсатор с отводом неконденсирующихся газов из продуктов сгорания; 3 – водородный перегреватель; 4 – охладитель продуктов сгорания; 5 – камера сгорания; 6 – возврат воды в цикл; 7 – подача питательной воды (конденсата) из паросилового цикла АЭС; 8 – подача воды на впрыск в камеру сгорания; I – пар из ПГ; II – в ПТУ; III – в бак-аккумулятор

Fig. 1 – Schematic diagram of hydrogen steam overheating at a nuclear power plant based on a closed hydrogen cycle with the cooling system of the combustion products (a), with the injection of water into combustion products (b): 1 – compressor; 2 – condensate collector with discharge of non-condensing gases from combustion products; 3 – hydrogen superheater; 4 – coolant of combustion products; 5 – combustion chamber; 6 – return of water to the cycle; 7 – supply of feed water (condensate) from the steam-power cycle of the nuclear power plant; 8 – water supply for injection into the combustion chamber; I – steam from SG; II – to the STU; III – to the accumulator tank

Сухой насыщенный пар из парогенератора (ПГ) поступает в котел-пароперегреватель 3, где за счет сжигания водородного топлива в кислороде, подаваемых в смесительное устройство 5, осуществляется перегрев пара. После котла-пароперегревателя 3 перегретый пар поступает в основную паротурбинную установку (ПТУ) для выработки мощности. Для снижения температуры продуктов сгорания и предотвращения прожога теплообменных поверхностей котла-пароперегревателя 3 и исключения недожога в смесительное устройство 5 подается избыточное количество кислорода. Продукты сгорания на выходе из котла-пароперегревателя 3 направляются в конденсаторосборник 2, где за счет конденсации водяного пара происходит отделение непрореагировавшего кислорода от водяного пара, образующегося при сжигании водорода. Сконденсировавшийся водяной пар в виде горячей воды направляется в бак-аккумулятор или в систему регенеративного подогрева основной ПТУ, а отделенный кислород посредством компрессора 1 рециркулирует в смесительное устройство 5 для реализации процесса горения. Для охлаждения продуктов сгорания перед котлом-пароперегревателем 3 установлен охладитель 4, тепло от которого отводится питательной воде паротурбинного цикла АЭС, тем самым обеспечивается дополнительное повышение вырабатываемой мощности за счет вытеснения отборов пара на ПВД. Для сжигания водорода по данной схеме предполагается использовать водородно-кислородную камеру сгорания (КС), изображенную на рис. 2.

В данной камере сгорания происходит сжигание водорода в кислородной среде, при этом расход окислителя 1 подается с некоторым избытком для снижения недожога и повышения эффективности камеры сгорания. Для защиты стенок камеры сгорания от перегрева применяется водяное охлаждение через каналы 4 внутри стенок. Каналы 4 для движения охлаждающей воды образованы внутренней стенкой камеры сгорания и внешним кожухом, который изготавливается из более прочного и менее термостойкого материала для придания жесткости камере сгорания. Образовавшиеся в результате сгорания водорода продукты сгорания направляются в систему охлаждения, которая представляет собой трубный пучок 7 (на рис. 2 показан не полностью), набранный из нескольких труб, сваренных в днище камеры сгорания в шахматном порядке. Отвод тепла от продуктов сгорания на этом этапе осуществляется охлаждающей водой, подаваемой в межтрубное пространство. Одновременно

тепло отводится и с внешней стороны днища камеры сгорания. В качестве охлаждающей воды наиболее подходящим вариантом является питательная вода или основной конденсат из парового цикла АЭС, так как в этом случае отводимое через стенки тепло от продуктов сгорания можно использовать.

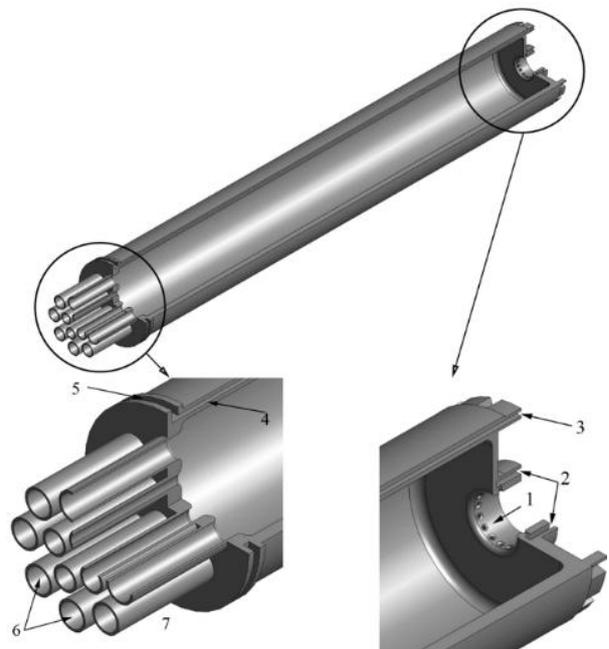


Рис. 2 – Трехмерный вид-разрез водородно-кислородной камеры сгорания (I тип): 1 – подача кислорода; 2 – подача водорода; 3, 4 – подача охлаждающей воды; 5 – выход охлаждающей воды; 6 – выход продуктов сгорания; 7 – система охлаждения продуктов сгорания

Fig. 2 – Three-dimensional view-section of the hydrogen-oxygen combustion chamber (type I): 1 – oxygen supply; 2 – hydrogen supply; 3, 4 – supply of cooling water; 5 – outlet of cooling water; 6 – outlet of combustion products; 7 – cooling system of combustion products

Одним из факторов, влияющих на температурный режим камеры сгорания, являются теплофизические свойства металла стенок. В предложенной конструкции корпус камеры сгорания выполняется из хромистой бронзы (сплав БрХ1), обладающей высоким коэффициентом теплопроводности, что обеспечивает эффективный отвод тепла для недопущения прогара стенки камеры сгорания. При этом для компенсации избыточного давления снаружи камеры сгорания установлен стальной кожух (на рис. 2 не показан). В табл. 1 представлены теплофизические свойства сплава БрХ1.

Таблица 1

Теплофизические свойства металла [29]

Table 1

Thermophysical properties of metal [29]

Марка металла	Плотность, кг/м ³	Теплоемкость, Дж/кг·К	Теплопроводность, Вт/м·К	Температура плавления, К
БрХ1	8 825	367	173	1 354

Средние значения в диапазоне температур 22 ÷ 800 °С

В качестве охлаждающей среды в данном водородно-кислородном парогенераторе может использоваться вода из основного паросилового цикла АЭС со следующими параметрами (табл. 2):

Таблица 2
Теплофизические параметры охлаждающей среды
Table 2
Thermophysical parameters of coolant

Расход, кг/с	Давление, МПа	Температура, К
5	6	300

Для конструкции камеры сгорания I типа (см. рис. 2) расход охлаждающей воды принят с учетом рекомендуемой скорости течения охлаждающей среды $4 \div 9$ м/с [30].

Итак, при тепловой мощности 6 МВт камера сгорания будет иметь следующие параметры: длина – 1 200 мм; внутренний диаметр – 205 мм; толщина внутренней стенки – 3 мм; толщина корпуса – 5 мм; толщина днища – 15 мм; диаметр форсунок:

топливо – 7 мм; окислитель – 30 мм; тепловая мощность брутто – 6 МВт.

Данная конструкция камеры сгорания и ее геометрические размеры были выбраны с учетом достижения минимального недожога, а также приемлемой температуры стенок камеры сгорания и трубопроводов охлаждения продуктов сгорания. При этом расход окислителя превышает необходимый стехиометрический расход кислорода на 10 %. Поскольку непрореагировавший кислород в составе смеси неконденсирующихся газов (см. рис. 2) направляется через компрессор обратно в камеру сгорания, выработка избыточного количества кислорода не требуется.

Альтернативным вариантом конструкции камеры сгорания водородно-кислородного парогенератора может быть использование впрыска охлаждающей воды в продукты сгорания, что позволит снизить температуру продуктов сгорания на выходе из парогенератора без системы водяного охлаждения продуктов сгорания. Схема такого парогенератора представлена на рис. 3.

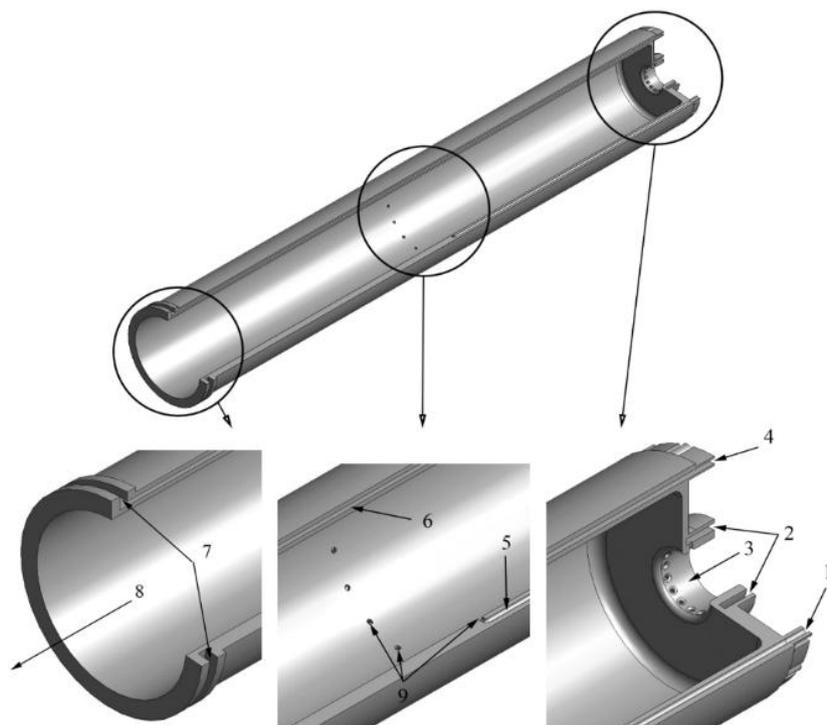


Рис. 3 – Трехмерный вид (в разрезе) водородно-кислородной камеры сгорания с системой впрыска воды (II тип): 1 – подача воды на впрыск; 2 – подача водорода; 3 – подача кислорода; 4 – подача охлаждающей воды; 5 – канал подачи воды на впрыск; 6 – канал подачи охлаждающей воды; 7 – выход охлаждающей воды; 8 – выход продуктов сгорания; 9 – форсунки впрыска воды

Fig. 3 – Three-dimensional sectional view of the hydrogen-oxygen combustion chamber with water injection (type II): 1 – water supply for injection; 2 – hydrogen supply; 3 – oxygen supply; 4 – supply of cooling water; 5 – water supply channel for injection; 6 – cooling water supply channel; 7 – outlet of cooling water; 8 – outlet of combustion products; 9 – injectors of water injection

В отличие от камеры сгорания, изображенной на рис. 2, здесь дополнительно используется канал подачи воды 5 для впрыска, который идет параллельно каналам охлаждения 6 стенок камеры сгорания. Подаваемая по этому каналу вода через форсунки 9 впрыскивается в реакционный объем камеры сгорания, что позволяет снизить температуру продуктов

сгорания. Кроме того, такое расположение каналов 5 даёт возможность дополнительно увеличить площадь охлаждения стенок камеры сгорания, а вся конструкция – отказаться от системы водяного охлаждения продуктов сгорания. В остальном принцип работы данной камеры повторяет принцип работы камеры, изображенной на рис. 2.

На данном этапе необходимо провести исследование водородно-кислородной камеры сгорания и системы охлаждения продуктов сгорания с точки зрения температурного режима металла и требуемых параметров охлаждающей среды, а также конструктивных особенностей. Для этого проведем компьютерное математическое моделирование процессов горения водородно-кислородной смеси, теплообмена и нагрева стенок камеры сгорания, а также охлаждения продуктов сгорания.

4. Результаты и их обсуждение

4.1. Расчет процессов в горелочном устройстве I типа (рис. 2)

С помощью численного моделирования на базе CFD-кода были получены результаты расчета температурного режима работы водородно-кислородной камеры сгорания с водой в качестве охлаждающей среды (табл. 3–5). Для сравнительной оценки проведен расчет для давлений в камере сгорания 6 МПа, 8 МПа и 10 МПа.

Параметры охлаждающей воды

Таблица 3

Cooling water parameters

Table 3

	Температура, К	Давление, МПа	Изобарная теплоемкость, кДж/кг·К
На входе	300	6,023	4,182
На выходе	329,1	6	4,182

На основании данных табл. 3 можно сделать вывод о том, что нагрев охлаждающей воды составляет 29,1 К, или 608,5 кВт отведенной тепловой мощно-

сти – этого достаточно для удержания максимальной температуры стенки камеры сгорания в приемлемых пределах.

Параметры продуктов сгорания на входе в систему водяного охлаждения

Таблица 4

Parameters of combustion products at the inlet to the water cooling system

Table 4

Давление в камере сгорания, МПа	Температура, К	Относительное остаточное содержание водорода	Относительное остаточное содержание кислорода	Скорость, м/с	Изобарная теплоемкость, кДж/кг·К
6	3 470	0,0161	0,0812	5,04	3,190
8	3 486	0,0153	0,0745	5,26	3,184
10	3 514	0,0132	0,0707	5,46	3,165

Как видно из табл. 4, температура продуктов сгорания на входе в систему охлаждения составляет в среднем 3 490 К. Для того чтобы продукты сгорания можно было использовать в высокотемпературном паро-паровом перегревателе для перегрева рабочего тела паросиловой установки АЭС, необходимо произвести их дальнейшее охлажде-

ние до температуры 1 200 ÷ 1 400 К. При этом с повышением давления незначительно растёт и температура пара за счет снижения недожога в камере сгорания, что объясняется увеличением выхода конечных продуктов при повышении давления реагирующей смеси по закону химического равновесия.

Параметры продуктов сгорания на выходе из системы водяного охлаждения

Таблица 5

Parameters of combustion products at the outlet of the water cooling system

Table 5

Давление в камере сгорания, МПа	Температура, К	Остаточное содержание водорода	Остаточное содержание кислорода	Скорость, м/с	Изобарная теплоемкость, кДж/кг·К
6	1 408	$3,40 \cdot 10^{-8}$	0,086	5,13	2,431
8	1 419	$3,43 \cdot 10^{-8}$	0,085	4,74	2,447
10	1 439	$3,52 \cdot 10^{-8}$	0,082	3,78	2,458

Остаточное содержание водорода в продуктах сгорания на выходе из системы охлаждения оказывается пренебрежимо мало, что позволяет безопасно осуществлять конденсацию водяного пара из продуктов сгорания (см. табл. 5). Это достигается за счет выбранного способа отвода тепла от продуктов сгорания при их движении в небольших каналах, при этом процессы рекомбинации несгоревшего топлива и продуктов диссоциации не нарушаются. Таким образом, в процессе движения продуктов сгорания по системе охлаждения осуществляется отвод тепловой мощности в количестве 2 825 кВт (в среднем).

Такие результаты можно получить благодаря значительной теплообменной поверхности для отвода тепла от продуктов сгорания. В рассматриваемом случае для заданного коэффициента теплоотдачи $30\,000\text{ Вт/м}^2\cdot\text{К}$ от поверхности системы охлаждения к охлаждающей воде потребуется $8,25\text{ м}^2$ теплообменной поверхности данной конфигурации. Результаты оценки температурного режима работы камеры сгорания и системы охлаждения продуктов сгорания представлены в табл. 6, а механические свойства хромовых бронз – в табл. 7.

Таблица 6
Максимальная температура стенок камеры сгорания и системы охлаждения продуктов сгорания
Table 6
Maximum temperature of combustion chamber walls and combustion products cooling system

	Камера сгорания	Охлаждение продуктов сгорания
При охлаждении основным конденсатом	708 К	758 К
При охлаждении питательной водой	708 К	864 К

Таблица 7
Механические свойства хромовых бронз при высоких температурах
Table 7
Mechanical properties of chrome bronzes at high temperatures

	Температура, К					
	293	573	673	773	873	973
Временное сопротивление σ_b , МПа	500	390	350	300	250	100
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	450	370	340	290	240	90

Как видно из табл. 6 и 7, максимальные температуры стенок камеры сгорания и системы охлаждения продуктов сгорания при использовании основного конденсата оказываются значительно ниже температуры, при которой происходит существенное снижение значения временного сопротивления разрушению и начинается пластическая деформация сплава БрХ1, что доказывает возможность применения этого материала для данной конструкции. Использование питательной воды из цикла АЭС также возможно, но при этом температура стенки будет значительно выше, хотя и не достигнет температуры плавления. Значение расчетного напряжения в системе охлаждения продуктов сгорания составило 175 МПа (в аварийной ситуации при отсутствии уравновешивающего давления в камере сгорания), что меньше допустимых значений с коэффициентом запаса 1,45 (см. табл. 7). В этом случае для охлаждения наиболее подверженной термическим напряжениям камеры сгорания целесообразно применять основной конденсат для интенсивного теплоотвода за счет обеспечения значительно температурного напора.

4.2. Расчет процессов в горелочном устройстве II типа (рис. 3)

Для охлаждения продуктов сгорания в парогенераторе с КС II типа используется впрыск воды, поступающей по каналам в стенке КС (см. рис. 3). Для парогенератора тепловой мощностью 6 МВт расчетным путем был определен необходимый дополнительный расход воды на впрыск в продукты сгорания для их охлаждения до температуры 1 400 К, который составил 1,003 кг/с. Скорость воды в каналах составила 8,6 м/с при диаметре кольцевого канала 6 мм. Следует отметить, что впрыск воды в реакционный объем камеры сгорания неизбежно приводит к росту недожога водородного топлива за счет смещения химического равновесия в сторону исходных продуктов реакции, а также за счет физического разбавления реагирующей смеси. Увеличение доли неконденсирующихся газов в продуктах сгорания приводит также к снижению эффективности теплообменных процессов в водородном пароперегревателе. При этом увеличение расхода высокотемпературных продуктов сгорания (за счет впрыска воды) позволяет увеличить количество тепла, используемого для перегрева острого пара в паросиловом цикле АЭС.

Наличие камеры сгорания с впрыском воды позволяет отказаться от системы водяного охлаждения продуктов, подверженной значительным термическим нагрузкам, и тем самым повысить надёжность работы системы водородного перегрева пара.

С помощью рассмотренной методики расчета процессов теплообмена и горения был создан расчетный мощностной ряд водородно-кислородных камер сгорания I и II типа (рис. 4).

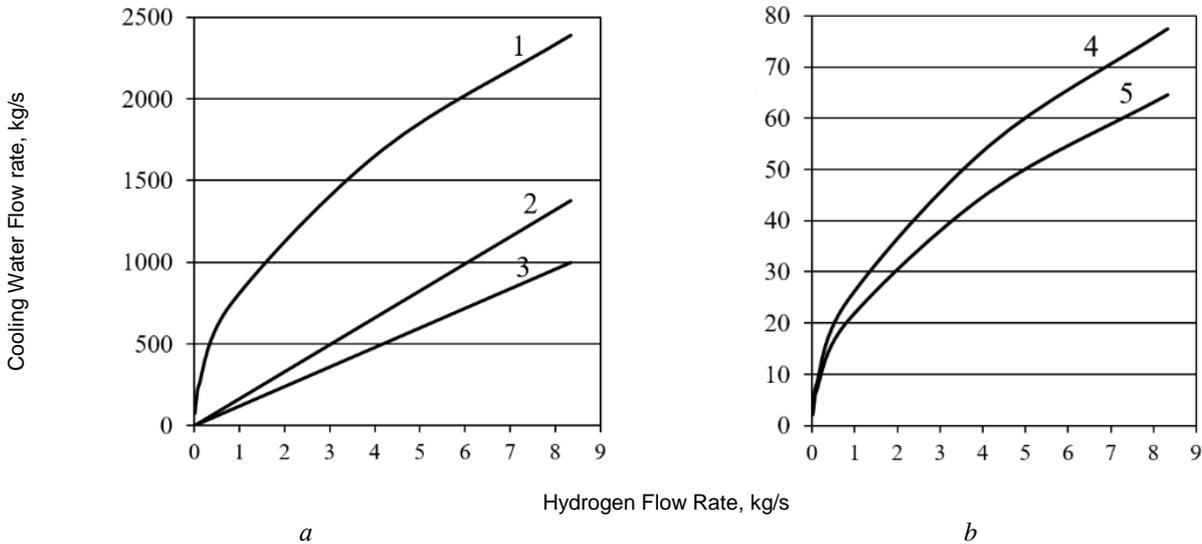


Рис. 4 – Расчетный мощностной ряд водородно-кислородных камер сгорания I и II типа.

Параметры водородно-кислородной камеры сгорания (а) и расход охлаждающей воды (b): 1 – внутренний диаметр камеры сгорания, мм; 2 – площадь теплообмена системы охлаждения продуктов сгорания, м²; 3 – мощность камеры сгорания, МВт;

4 – суммарный расход воды для впрыска и охлаждения КС II типа, кг/с; 5 – расход воды для охлаждения КС I типа, кг/с

Fig. 4 – Estimated power series of hydrogen-oxygen combustion chambers I and II type. Parameters of the hydrogen-oxygen combustion chamber (a), cooling water flow rate (b): 1 – internal diameter of the combustion chamber, mm; 2 – heat exchange area of the combustion products cooling system, m²; 3 – power of the combustion chamber, MW; 4 – total consumption of water for injection and cooling of CC type II, kg/s; 5 – water consumption for cooling of CC type I, kg/s

При единичной тепловой мощности 1 000 МВт внутренний диаметр камеры сгорания водородно-кислородного парогенератора достигнет 2 388 мм (см. рис. 4а). Это делает установку громоздкой и потребует увеличения толщины стенок камеры сгорания, что приведет к росту металлоёмкости. Кроме того, большая единичная мощность снижает маневренные возможности системы, поэтому целесообразнее набирать требуемую мощность за счет установки нескольких камер сгорания. При использовании камеры сгорания II типа потребуется больший расход охлаждающей воды из-за необходимости впрыска воды в продукты сгорания.

Заключение

Авторами данной статьи были предложены два типа водородно-кислородных камер сгорания для системы безопасного водородного перегрева пара в цикле АЭС за счет использования замкнутой системы сжигания водорода в кислородной среде. Данная система позволяет исключить попадание водорода в основной паросиловой цикл АЭС, при этом непрореагировавший кислород повторно используется для сжигания.

В результате математического моделирования процессов горения и тепломассообмена определены

параметры продуктов сгорания и параметрические показатели поверхностей теплообмена для давления высокотемпературного пара от 6 МПа до 10 МПа. Как показали расчеты, повышение давления приводит к снижению остаточного содержания водорода на 18 % (с 0,0161 до 0,0132). При этом для водородно-кислородного парогенератора мощностью в диапазоне 1 ÷ 100 МВт потребуется 1,37 ÷ 137,5 м² теплообменной поверхности для охлаждения продуктов сгорания.

Сплав БрХ1 позволяет удерживать максимальную температуру стенок системы водяного охлаждения продуктов сгорания водородно-кислородного парогенератора на уровне 758 К и 864 К при охлаждении основным конденсатом и питательной водой из цикла АЭС соответственно.

Определен мощностной ряд водородно-кислородных парогенераторов с предлагаемой конструкцией камеры сгорания. Показано, что при тепловой мощности 1 000 МВт внутренний диаметр камеры сгорания составит 2 388 мм, поэтому целесообразно использовать несколько установок с меньшей единичной мощностью для повышения маневренности и снижения металлоемкости (расход охлаждающей воды составил до 64,6 кг/с и 77,5 кг/с для камеры сгорания первого и второго типа соответственно).

Использование камеры сгорания с впрыском воды позволяет отказаться от системы водяного охлаждения продуктов сгорания, но при этом неизбежно возрастет недожог водородного топлива и снизится эффективность процессов теплообмена за счет увеличения доли неконденсирующихся газов в продуктах сгорания.

Таким образом, в ходе данного исследования были обоснованы и получены показатели эффективности предлагаемой замкнутой системы сжигания водорода в кислороде для использования в составе водородного энергетического комплекса в комбинации с АЭС. Полученные результаты могут быть полезны для дальнейшего развития технологий экологически чистого производства электроэнергии на базе водородного энергетического комплекса и АЭС.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 15-19-10027).

Acknowledgments

The given research was funded by Russian Science Foundation (agreement No. 15-19-10027).

Список литературы

- [1] Аминов, Р.З. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями / Р. З. Аминов, А. Н. Байрамов. – М.: Наука, 2016. – 254 с.
- [2] Aminov, R.Z. Performance evaluation of hydrogen production based on off-peak electric energy of the nuclear power plant / R. Z. Aminov, A. N. Bairamov // International journal of hydrogen energy. – 2017. – Vol. 42. – P. 21617–21625.
- [3] Aminov, R.Z. On the issue of investigating the kinetics of processes in dissociated water steam / R.Z. Aminov, A.I. Schastlivtsev, A. N. Bairamov // International journal of hydrogen energy. – 2017. – Vol. 42. – P. 20843–20848.
- [4] Aminov, R. Emergency cooling system for water-cooled reactors / R. Aminov, A. Egorov, V. Yurin // Conf. Proc. 17 International Multidisciplinary Scientific GeoConference “Energy and Clean Technology”. – Albena. – 2017. – P. 3–10.
- [5] Aminov, R.Z. Hydrogen cycle based backup for NPP internal needs during a blackout / R.Z. Aminov, A.N. Egorov, V.E. Yurin // Atomic Energy. – 2013. – Vol. 114. – Iss. 4. – P. 289–292.
- [6] Aminov, R.Z. Multifunctional Backup for NPP Internal Needs / R.Z. Aminov [et al.] // Atomic Energy. – 2017. – Vol. 121. – Iss. 5. – P. 327–333.
- [7] Шпильрайн, Э.Э. Применение водорода в энергетике и в энерготехнологических комплексах / Э.Э. Шпильрайн, Ю.А. Сарумов, О.С. Попель // Атомно-водородная энергетика и технология. – 1982. – Вып. 4. – С. 5–22.
- [8] Малышенко, С.П. Некоторые термодинамические и технико-экономические аспекты применения

водорода как энергоносителя в энергетике / С.П. Малышенко, О.В. Назарова, Ю.А. Сарумов // Атомно-водородная энергетика и технология. – 1986. – Вып. 7. – С. 105–126.

[9] Forsberg, C.W. Nuclear Wind hydrogen systems for variable electricity and hydrogen production [Электронный ресурс] / C.W. Forsberg, G. Haratyk // International Congress on Energy. – 2011. – New York. – Режим доступа: <https://www.aiche.org/academy/videos/conference-presentations/nuclear-wind-hydrogen-systems-variable-electricity-and-hydrogen-production> – (Дата обращения 18.04.2018).

[10] Forsberg, C.W. Is hydrogen the future of nuclear energy / C.W. Forsberg // International topical meeting on the safety and technology of nuclear hydrogen production, control and management. – 2007. – Boston. – Режим доступа: <http://www.350.me.uk/TR/Hansen/Forsberg01.pdf> – (Дата обращения: 18.04.2018).

[11] Forsberg, C.W. Hydrogen futures and technologies / C.W. Forsberg // Rohsenow Symposium on Future Trends in Heat Transfer. – 2003. – Massachusetts. – Режим доступа: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/7303/FO_RSBERG.pdf?sequence=1 – (Дата обращения: 18.04.2018).

[12] Варгафтик, Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик. – М., 1972. – 720 с.

[13] Schastlivtsev, A.I. Hydrogen-oxygen steam generator applications for increasing the efficiency, maneuverability and reliability of power production / A.I. Schastlivtsev, V.I. Borzenko // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891. – P. 012213.

[14] Malysenko, S.P. High-pressure H₂/O₂ – steam generators and they possible applications / S.P. Malysenko, A.N. Gryaznov, N.I. Filatov // International Journal of Hydrogen Energy. – 2004. – Vol. 29. – P. 589–596.

[15] Malysenko, S.P. Effectiveness of steam generation in oxyhydrogen steam generators of the megawatt power class / S.P. Malysenko [et al.] // High Temperature. – 2012. – Vol. 50. – Iss. 6. – P. 765/773.

[16] Pribaturin, N.A. Experimental investigation on combustion of hydrogen-oxygen and methane-oxygen mixtures in the medium of low-superheated steam / Pribaturin N.A. [et al.] // Thermal Engineering. – 2016. – Vol. 63. – Iss. 5. – P. 336–341.

[17] Темам, Р. Уравнения Навье – Стокса. Теория и численный анализ / Р. Темам. – М.: Мир, 1981. – 408 с.

[18] Ландау, Л. Д. Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – 736 с.

[19] Дульнев, Г.Н. Применение ЭВМ для решения задач теплообмена / Г.Н. Дульнев, В.Г. Парфенов, А.В. Сигалов. – М.: Высшая Школа, 1990. – 207 с.

[20] Соловейчик, Ю.Г. Метод конечных элементов для скалярных и векторных задач / Ю.Г. Соло-



вейчик, М.Э. Рояк, М.Г. Персова. – Новосибирск: НГТУ, 2007. – 896 с.

[21] Патанкар, С. В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течении в каналах / С. В. Патанкар. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 312 с.

[22] D. Anderson, Jr. Computational Fluid Dynamics. The basics with applications. / D. Anderson, Jr. – McGraw-Hill Inc, 1995. – 383 p.

[23] Романова, Е.В. Применение пакета ANSYS при исследовании гидравлического сопротивления оребренного рекуператора / Е.В. Романова, А.Н. Колюх, Е.А. Лебедев // Вестник ТГТУ. – 2017. – № 3. – С. 420–427.

[24] Федорова, Н.Н. Основы работы в ANSYS 17 / Н.Н. Федорова [и др.]. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 210 с.

[25] Франк-Каменецкий, Д.А. Диффузия и теплопередача в химической кинетике / Д.А. Франк-Каменецкий – М.: Наука, 1987. – 502 с.

[26] Poinso, T. Theoretical and Numerical Combustion / T. Poinso, D. Veynante. – R.T. Edwards Inc., 2012. – 588 p.

[27] Коркодинов, Я.А. Обзор семейства k-ε моделей для моделирования турбулентности / Я.А. Коркодинов // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. – М.: Машиностроение, материаловедение. – 2013. – Т. 15. – №. 2. – С. 5–16.

[28] Солнцева, Е.Д. Компьютерное моделирование процесса горения газообразного топлива в горелке ГРС-150 / Е.Д. Солнцева, А.Н. Лошкарев // Теплотехника и информатика в образовании, науке и производстве: сборник докладов VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных (ТИМ'2017) с международным участием (Екатеринбург, 11–12 мая 2017 г.). – Екатеринбург: УрФУ. –2017. – С. 124–128.

[29] Масленников С.Б. Жаропрочные стали и сплавы: Справочник / С.Б. Масленников. – М.: Металлургия, 1983. – 192 с.

[30] Александренков, В.П. Расчет наружного проточного охлаждения камеры ЖРД. Электронное учебное издание / В.П. Александренков. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2012.

References

[1] Aminov R.Z., Bairamov A.N. Combination of hydrogen energy cycles with nuclear power plants (Kombinirovaniye vodorodnykh energeticheskikh tsiklov s atomnymi elektrostantsiyami). Moscow: Nauka Publ., 2016, 254 p. (in Russ.)

[2] Aminov R.Z., Bairamov A.N. Performance evaluation of hydrogen production based on off-peak electric energy of the nuclear power plant. *International journal of hydrogen energy*, 2017;42:21617–21625.

[3] Aminov R.Z., Schastlivtsev A.I., Bairamov A.N. On the issue of investigating the kinetics of processes in

dissociated water steam. *International journal of hydrogen energy*, 2017;42:20843–20848.

[4] Aminov R., Egorov A., Yurin V. Emergency cooling system for water-cooled reactors. *Conf. Proc. 17 International Multidisciplinary Scientific GeoConference “Energy and Clean Technology”*, Albena, 2017, pp. 3–10.

[5] Aminov R.Z., Egorov A.N., Yurin V.E. Hydrogen cycle based backup for NPP internal needs during a blackout. *Atomic Energy*, 2013;114(4):289–292.

[6] Aminov R.Z., Egorov A.N., Yurin V.E., V.N. Bessonov Multifunctional Backup for NPP Internal Needs. *Atomic Energy*, 2017;121(5):327–333.

[7] Shpilrain E.E., Sarumov Yu.A., Popel O.S. Application of hydrogen in power engineering and in energy technology complexes (Primeneniye vodoroda v energetike i v energotekhnologicheskikh kompleksakh). *Atomic-hydrogen power engineering and technology*, 1982;4:5–22 (in Russ.).

[8] Malyshenko S.P., Nazarova O.V., Sarumov Yu.A. Some thermodynamic, technical and economic aspects of the use of hydrogen as an energy carrier in the energy sector (Nekotorye termodinamicheskie i tekhniko-ekonomicheskie aspekty primeneniya vodoroda kak energonositelya v energetike). *Atomic-hydrogen power engineering and technology*, 1986;7:105–126 (in Russ.).

[9] Forsberg C.W., Haratyk G. Nuclear Wind hydrogen systems for variable electricity and hydrogen production, International Congress on Energy, 2011, New York. Available on:

<https://www.iche.org/academy/videos/conference-presentations/nuclear-wind-hydrogen-systems-variable-electricity-and-hydrogen-production> (04.18.2018).

[10] Forsberg C.W. Is hydrogen the future of nuclear energy, International topical meeting on the safety and technology of nuclear hydrogen production, control and management, 2007, Boston. Available on: <http://www.350.me.uk/TR/Hansen/Forsberg01.pdf> (04.18.2018).

[11] Forsberg C.W. Hydrogen futures and technologies, Rohsenow Symposium on Future Trends in Heat Transfer, 2003, Massachusetts. Available on: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/7303/FO_RSBURG.pdf?sequence=1 (04.18.2018).

[12] Vargaftik N.B. Handbook of thermophysical properties of gases and liquids (Spravochnik po teplofizicheskim svoistvam gazov i zhidkostei). Moscow, 1972 (in Russ.).

[13] Schastlivtsev A.I., Borzenko V.I. Hydrogen-oxygen steam generator applications for increasing the efficiency, maneuverability and reliability of power production. *Journal of Physics: Conference Series*, 2017;891:012213.



- [14] Malyshenko S.P., Gryaznov A.N., Filatov N.I. High-pressure H_2/O_2 – steam generators and they possible applications. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2004;29:589–596.
- [15] Malyshenko S.P., Prigozhin V.I., Savich A.R., Schastlivtsev A.I., Il'ichev V.A., Nazarova O.V. Effectiveness of steam generation in oxyhydrogen steam generators of the megawatt power class. *High Temperature*, 2012;50(6):765–773.
- [16] Pribaturin N.A., Alekseev M.V., Bogomolov A.R., Sorokin A.L., Fedorov V.A., Azikhanov S.S., Shevyrev S.A. Experimental investigation on combustion of hydrogen-oxygen and methane-oxygen mixtures in the medium of low-superheated steam. *Thermal Engineering*, 2016;63(5):336–341.
- [17] Temam R. The Navier-Stokes equations. Theory and numerical analysis (Uravneniya Nav'e-Stoksa. Teoriya i chislennyi analiz). Moscow: Mir Publ., 1981 (in Russ.).
- [18] Landau L.D., Lifshitz E.M. Hydrodynamics (Gidrodinamika). Moscow: Nauka Publ., 1988 (in Russ.).
- [19] Dul'nev. G.N. Parfenov V.G., Sigalov A.V. Application of a computer for solving heat exchange problems (Primenenie EVM dlya resheniya zadach teploobmena). Moscow: Vysshaya Shkola Publ., 1990 (in Russ.).
- [20] Soloveichik Yu.G., Royak M.E., Persova M.G. Finite Element Method for Scalar and Vector Problems (Metod konechnykh elementov dlya skalyarnykh i vektornykh zadach). Novosibirsk: NGTU, 2007 (in Russ.).
- [21] Patankar S.V. Numerical solution of the problems of heat conduction and convective heat transfer during flow in canals (Chislennoe reshenie zadach teploprovodnosti i konvektivnogo teploobmena pri techenii v kanalakh). Moscow: Publishing house MPEI, 2003 (in Russ.).
- [22] Anderson D. Jr. Computational Fluid Dynamics. The basics with applications, McGraw-Hill Inc, 1995, 383 p.
- [23] Romanova E.V., Koliukh A.N., Lebedev E.A. Application of the ANSYS package in the investigation of the hydraulic resistance of the finned recuperator (Primenenie paketa ANSYS pri issledovanii gidravlicheskogo soprotivleniya orebrenogo rekuperatora). *Vestnik TGTU*, 2017;3:420–427 (in Russ.).
- [24] Fedorova N.N., Val'ger S.A., Danilov M.N., Zakharova Yu.V. Fundamentals of work in ANSYS 17 (Osnovy raboty v ANSYS 17). Moscow: DMK Press Publ., 2017 (in Russ.).
- [25] Frank-Kamenetskii D.A. Diffusion and heat transfer in chemical kinetics (Diffuziya i teploperedacha v khimicheskoi kinetike). M.: Nauka Publ., 1987 (in Russ.).
- [26] Poinot T. Theoretical and Numerical Combustion, R.T. Edwards Inc., 2012:588.
- [27] Korkodinov Ya.A. An overview of the k- ϵ turbulence models for simulation (Obzor semeistva k- ϵ modelei dlya modelirovaniya turbulentsnosti). M.: Mashinostroenie, materialovedenie Publ., 2013;15(2):5–16 (in Russ.).
- [28] Solntseva, E.D. Computer simulation of the combustion process of gaseous fuel in the GRS-150 burner (Komp'yuternoe modelirovanie protsessa goreniya gazoobraznogo topliva v gorelke GRS-150), *Teplotekhnika i informatika v obrazovanii, nauke i proizvodstve: sbornik dokladov VI Vserossiiskoi nauchno prakticheskoi konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh (TIM'2017) s mezhdunarodnym uchastiem*. Ekaterinburg, 11–12 May, 2017), 2017:124–128 (in Russ.).
- [29] Maslennikov S.B. Heat-resistant steels and alloys: Reference book (Zharoprochnye stali i splavy: Spravochnik). M.: Metallurgiya Publ., 1983 (in Russ.).
- [30] Aleksandrenkov V.P. Calculation of the external flow-through cooling of the liquid rocket engine. Electronic educational edition (Raschet naruzhnogo protochnogo okhlazhdeniya kamery ZhRD. Elektronnoe uchebnoe izdanie), Moscow: MGTU im. N. E. Baumana, 2012 (in Russ.).

Транслитерация по BSI

