

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЖИГАНИЯ ВОДОРОДА С ИЗБЫТКОМ ОКИСЛИТЕЛЯ В ЗАМКНУТОМ ВОДОРОДНОМ ЦИКЛЕ НА АЭС*

Р.З. Аминов, А.Н. Егоров

Саратовский научный центр Российской академии наук
д. 24, ул. Рабочая, Саратов, 410028, Россия
тел.: +7(845-2)27-14-36, факс: (845-2)27-14-36; e-mail: oepnan@inbox.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.22-27.053-063

Заключение совета рецензентов: 16.09.19 Заключение совета экспертов: 20.09.19 Принято к публикации: 24.09.19

Рассматривались вопросы технико-экономической эффективности сжигания водорода с избытком окислителя при комбинировании АЭС с водородным энергокомплексом на базе замкнутого водородного цикла. Сжигание водородного топлива с избытком окислителя позволяет минимизировать недожог водородного топлива и повысить эффективность водородного цикла. Установлено, что данный подход обеспечивает безопасное и эффективное увеличение мощности и КПД АЭС посредством повышения температуры пара в цикле паротурбинной установки (ПТУ) за счет сжигания водородного топлива в кислороде. Повышение эффективности водородных циклов на АЭС обеспечивает дальнейшее развитие экологически чистой энергетики на основе атомно-водородных технологий и возможность эффективной загрузки АЭС в условиях неравномерности графика электропотребления в энергосистемах страны. Изучена технико-экономическая эффективность сжигания водорода с избытком окислителя на базе замкнутого водородного цикла. Проведена оценка эффективности схемы комбинирования АЭС с водородным циклом за счет использования замкнутой системы сжигания водорода с избытком окислителя. Такой подход позволяет безопасно использовать тепло водородного топлива для повышения параметров острого пара перед паротурбинной установкой. Показано, что реализация схемы с избытком окислителя позволяет отказаться от предварительной системы охлаждения продуктов сгорания, что дает возможность более эффективно использовать тепло водородного топлива за счет более значительного повышения температуры острого пара и соответствующего прироста мощности ПТУ.

Получены основные показатели сравнительной технико-экономической эффективности реализации предлагаемой схемы комбинирования АЭС с водородным энергокомплексом на базе замкнутого цикла сжигания водорода с избытком окислителя. Показано, что себестоимость производства дополнительной электроэнергии оказывается конкурентоспособной по сравнению со схемой предварительного охлаждения продуктов сгорания. При этом расчет накопленного чистого дисконтированного дохода показал эффективность предлагаемой схемы водородного перегрева пара на АЭС с учетом возможной экономии природного газа в энергосистеме. Полученные результаты могут быть использованы при разработке систем повышения маневренной эффективности АЭС.

Ключевые слова: замкнутый водородный цикл; избыток окислителя; водородный перегрев пара; атомная электростанция; технико-экономический анализ.

THE EFFICIENCY OF HYDROGEN COMBUSTION WITH EXCESS OXIDIZER IN A CLOSED HYDROGEN CYCLE AT NPP

R.Z. Aminov, A.N. Egorov

Saratov Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
24 Rabochaya Str., Saratov, 410028, Russia
tel.: +7(845-2)27-14-36, fax: (845-2)27-14-36; e-mail: oepnan@inbox.ru

doi: 10.15518/isjaee.2019.22-27.053-063

Referred 16 September 2019 Received in revised form 20 September 2019 Accepted 24 September 2019

* Аминов Р.З., Егоров А.Н. Эффективность сжигания водорода с избытком окислителя в замкнутом водородном цикле на АЭС // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE), 2019;22-27:53-63.



The article discusses the issues of technical and economic efficiency of combustion hydrogen with excess oxidizer when combining NPPs with a hydrogen energy complex based on a closed hydrogen cycle. Combustion hydrogen fuel with an excess of oxidizer allows minimizing the underburning of hydrogen fuel and increasing the efficiency of the hydrogen cycle. Using this approach, a safe and effective increase in the efficiency and power of NPPs is ensured by increasing the temperature of the steam in the cycle of the steam turbine unit by combustion hydrogen fuel in oxygen. Increasing the efficiency of hydrogen cycles at NPPs ensures the further development of environmentally friendly energy based on nuclear-hydrogen technologies and the possibility of efficient loading of NPPs in condition of an uneven schedule of power consumption in the country's energy systems. The authors of the article have conducted a study of the technical and economic efficiency of combustion hydrogen with an excess of oxidizer based on a closed hydrogen cycle.

The effectiveness of the scheme for combining NPPs with a hydrogen cycle using a closed system for combustion hydrogen with an excess of oxidizer has been evaluated. This approach allows the safe use of the heat of hydrogen fuel to increase the parameters of fresh steam of steam turbine unit. It is shown that the implementation of the scheme with an excess of oxidizer makes it possible to exclude the preliminary cooling system of the combustion products, which makes it possible to more efficiently use the heat of hydrogen fuel due to a more significant increase in the temperature of fresh steam and the corresponding increase in the power of steam turbine unit.

We have obtained the main indicators of comparative technical and economic efficiency of the proposed scheme for combining NPPs with a hydrogen energy complex based on a closed cycle of hydrogen combustion with an excess of oxidizer. It is shown that the cost of production of additional electricity is competitive in comparison with the scheme of pre-cooling of combustion products. At the same time, the calculation of the accumulated net present value shows the effectiveness of the proposed scheme for hydrogen overheating of steam at NPPs, taking into account the possible savings of natural gas in the power system. The results can be used in the development of systems for increasing the maneuverability of NPPs.

Keywords: closed hydrogen cycle; excess of oxidizer; hydrogen steam overheating; nuclear power plant; technical and economic analysis.



*Рашид Зарифович
Аминов
Rashid Aminov*

Сведения об авторе: д-р техн. наук, главный научный сотрудник, ФГБУН Саратовский научный центр.

Образование: Саратовский политехнический институт (1961 г.).

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

Публикации: 342.

h-index: 10

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.

Education: Saratov Polytechnical Institute, 1961.

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

Publications: 342.



*Александр Николаевич
Егоров
Aleksandr Egorov*

Сведения об авторе: канд. техн. наук, старший научный сотрудник Саратовского научного центра Российской академии наук.

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

Область научных интересов: водородная энергетика; атомная энергетика; энерго- и ресурсосбережение; 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: 49.

h-index: 7

ORCID: 0000-0002-0943-859X

Information about the author: Ph.D. in Engineering, Senior Researcher at Saratov Scientific Center of RAS.

Education: Saratov State Technical University, 2010.

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

Publications: 49.

Scopus Author ID: 56343107200

Research ID: B-7899-2015

1. Введение

Сжигание водорода в кислородной среде позволяет получать высокотемпературный пар, который можно использовать для производства электроэнергии на различных энергоустановках без вредных выбросов в окружающую среду. Например, на АЭС включение водород-кислородного парогенератора в состав водородного энергетического комплекса позволяет повысить ее мощность и эффективность в эксплуатационном режиме за счет паро-водородного перегрева основного рабочего тела паротурбинных установок [1–3]. Кроме того, в аварийных ситуациях с обесточиванием водород-кислородный парогенератор может служить источником пара для генерации электроэнергии, необходимой для поддержания в рабочем состоянии активных аварийных систем расхолаживания реакторных установок [4–7]. Повышение эффективности и безопасности АЭС за счет электролизного водорода обеспечивает аккумулялирование неостребованной ночной электроэнергии, при этом водородное топливо является

экологически чистым энергоносителем как при производстве на АЭС, так и при его сжигании, поскольку в кислородной среде образуется только водяной пар. При этом гарантируется возможность эффективной загрузки АЭС в условиях неравномерности графика электропотребления в энергосистемах страны [8–12].

Сжигание водородного топлива с избытком окислителя в замкнутом водородном цикле для перегрева основного пара АЭС [13] исключает попадание водорода в основной цикл энергоблока. Это достигается как за счет полного окисления водорода, так и за счет отсутствия перемешивания высокотемпературного пара и основного пара энергоблока АЭС. При этом достигается более эффективное использование теплоты водородного топлива для повышения мощности и эффективности АЭС посредством увеличения температуры основного пара в цикле паротурбинной установки. На данном этапе проведена оценка технико-экономической эффективности сжигания водорода с избытком окислителя на базе замкнутого водородного цикла.

Список обозначений	
Аббревиатуры	
АЭС	Атомная электростанция
ВВЭР	Водо-водяной энергетический реактор
КПД	Коэффициент полезного действия
ПТУ	Паротурбинная установка
ПГ	Парогенератор
НЧДД	Накопленный чистый дисконтированный доход

2. Схема комбинирования АЭС с замкнутым водородным циклом

Принципиальная схема технико-экономической эффективности повышения мощности АЭС на основе сжигания водорода с избытком окислителя в замкнутом водородном цикле представлена на рис. 1 [13].

На рис. 1 показано, что сжигание водорода осуществляется в кислородной среде с подачей избыточного количества кислорода. Такой подход позволяет отказаться от предварительной системы охлаждения продуктов сгорания, а также повысить расход греющей среды в паро-паровом перегревателе 1 за счет подачи вторичного расхода кислорода. При этом за счет избытка окислителя достигается не только полнота сгорания водородного топлива, но и приемлемая температура продуктов сгорания [14–15], что позволяет использовать их в паро-паровом перегревателе 1 для повышения температуры острого пара с последующей конденсацией водяного пара из продуктов сгорания.

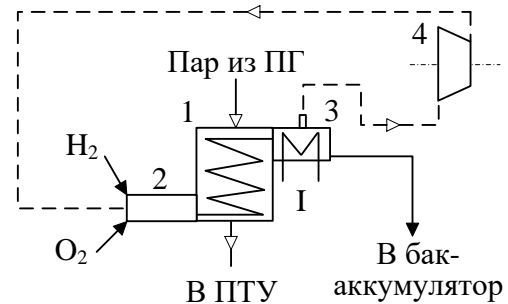


Рис. 1 – Принципиальная схема водородного перегрева пара на АЭС на основе замкнутого водородного цикла: 1 – водородный пароперегреватель; 2 – камера сгорания; 3 – теплообменник-конденсатор с отводом неконденсирующихся газов из продуктов сгорания; 4 – компрессор; I – отвод тепла от охлаждения продуктов сгорания и конденсации водяного пара

Fig. 1 – Schematic diagram of hydrogen overheating of steam at nuclear power plants based on a closed hydrogen cycle: 1 – hydrogen superheater; 2 – combustion chamber; 3 – heat exchanger-condenser with the removal of non-condensable gases from the products of combustion; 4 – compressor; I – heat removal from cooling of combustion products and condensation of water vapor

Увеличение мощности энергоблока АЭС в данном случае происходит за счет повышения темпера-

туры острого пара. Для полезного использования избыточного кислорода осуществляется его рециркуляция в водород-кислородную камеру сгорания в смеси с неконденсирующимися газами из продуктов сгорания после конденсации водяных паров.

На рис. 1 видно, что охлажденные продукты сгорания поступают в высокотемпературный пароперегреватель 1. Конструктивно данный элемент выполняется аналогично пароперегревателям традиционных энергетических паровых котлов, при этом греющий теплоноситель (охлажденные продукты сгорания) проходят внутри трубок теплообменника. Это связано с малым объемным расходом греющего теплоносителя и необходимостью перегрева большого количества рабочего тела в паросиловом цикле АЭС.

Сжигание водорода с избытком кислорода приведет к тому, что в продуктах сгорания значительную долю составит непрореагировавший кислород. Это вызовет снижение парциального давления водяного пара в продуктах сгорания и невозможность его полной конденсации при заданном давлении продуктов сгорания. Для решения этой проблемы в схеме на рис. 1 предусмотрен теплообменник-конденсатор для отвода тепла за счет охлаждения продуктов сгорания и конденсации водяного пара.

3. Расчет основных параметров системы замкнутого сжигания водорода с избытком окислителя

Как было сказано, реализация схемы повышения мощности АЭС по рис. 1 потребует увеличения коэффициента избытка окислителя, в том числе, для снижения температуры продуктов сгорания. На основании результатов расчета процесса горения водорода в кислородной среде [16] определен необходимый избыток окислителя для снижения температуры продуктов сгорания до 1 420 К, который составил 7 единиц. График зависимости температуры продуктов сгорания от избытка окислителя представлен на рис. 2. Необходи-

мо отметить, что в соответствии с теорией теплового затухания [17], разработанной Я.Б. Зельдовичем, Д.А. Франк-Каменским, Л.А. Вулисом, В.И. Блиновым и другими отечественными исследователями, при снижении температуры в зоне протекания процесса горения ниже определенного предела произойдет потухание пламени или продолжится беспламенное горение (гетерогенное горение или тление).

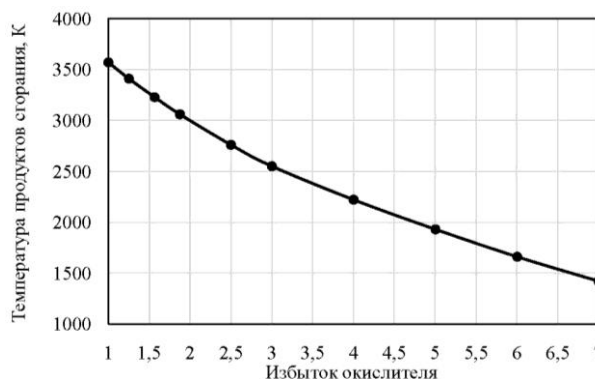


Рис. 2 – Зависимость температуры продуктов сгорания от избытка окислителя

Fig. 2 – The dependence of the combustion products temperature on the excess oxidizer

Для рассматриваемой реакции горения водорода в кислородной среде минимально необходимая температура в зоне горения составляет 1 770 К при давлении в камере сгорания 6 МПа. Как видно на рис. 2, при коэффициенте избытка окислителя, равном 7, температура продуктов сгорания составит 1 420 К, что меньше минимально необходимой для устойчивого горения, поэтому подача вторичного количества кислорода с рециркуляцией осуществляется распределено по длине камеры сгорания для предотвращения потухания пламени. Кроме того, был определен состав продуктов сгорания в зависимости от избытка окислителя (см. табл. 1).

Таблица 1

Основной состав продуктов сгорания (в массовых долях) в зависимости от избытка окислителя

Table 1

The main composition of the combustion products (in mass fractions) depending on the excess of oxidizer

Коэффициент избытка окислителя	H ₂	O ₂	H ₂ O	O	OH
1 (стехиометрическое соотношение)	0,0097	0,1715	0,8772	0,0226	0,1053
3	0,0001	0,6273	0,3561	0,002	0,0143
7	3,39·10 ⁻⁷	0,849	0,1509	1,83·10 ⁻⁵	9,57·10 ⁻⁴

Как видно в табл. 1, при коэффициенте избытка окислителя, равном 7, в продуктах сгорания фактически присутствует только водяной пар и непрореагировавший кислород (избыток), поэтому после охлаждения и конденсации водяного пара возможна рециркуляция неконденсирующихся продуктов сгорания (избытка кислорода) посредством кислородных компрессорных установок.

На основании известной методики расчета процессов теплопередачи [18–19] в табл. 2 представлены результаты расчета требуемой теплообменной поверхности пароперегревателя 1 в зависимости от расхода водородного топлива с учетом увеличения расхода греющего пара за счет подмешивания избыточного количества кислорода.

Таблица 2

Результаты расчета требуемой теплообменной поверхности паро-парового перегревателя для избытка окислителя, равного 7

Table 2

The calculation results of the required heat transfer surface of the steam-steam superheater for an excess of oxidizer equal to 7

Расход водородного топлива, кг/с	Расход греющей среды, кг/с	Площадь теплообмена, м ²
0,5	28,5	118
1	57	230
2	114	450
3	171	654
4	228	846

Результаты расчетов коэффициента избытка окислителя необходимы при оценке требуемой теплообменной поверхности теплообменника-конденсатора 3 (см. рис. 1) для конденсации водяного пара из продуктов сгорания. На основании этих расчетов

и закона Дальтона [20] определено парциальное давление водяного пара в продуктах сгорания и необходимая температура продуктов сгорания для обеспечения максимально полной конденсации водяного пара (рис. 3).

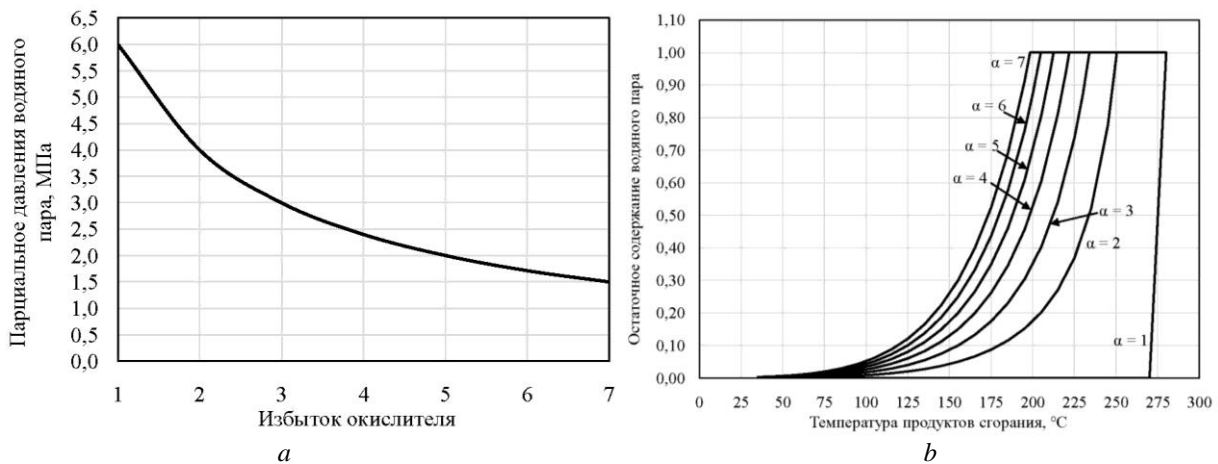


Рис. 3 – Зависимость парциального давления (а) и остаточного содержания (б) водяного пара в продуктах сгорания от температуры и избытка окислителя

Fig. 3 – The dependence of the partial pressure (a) and the residual concentration (b) of water vapor in the combustion products on temperature and excess of oxidizer

Как видно на рис. 3а, увеличение избытка окислителя приводит к снижению парциального давления водяного пара в продуктах сгорания. Снижение парциального давления приводит к снижению температуры начала конденсации водяного пара (см. рис. 3б). При достижении температуры начала конденсации водяного пара также начинается снижение парциального давления водяного пара, которое в этом случае определяется как давление насыщения при температуре продуктов сгорания. Соответственно, чем выше коэффициент избытка окислителя, тем ниже должна быть температура продуктов сгорания при том же остаточном содержании водяного пара после его конденсации.

В условиях работы водородного энергокомплекса на АЭС минимальная температура охлаждающей среды, которую целесообразно использовать для ох-

лаждения продуктов сгорания и конденсации водяного пара, составляет 33,4 °С, что соответствует температуре основного конденсата после конденсатного насоса в системе регенеративного подогрева паротурбинной установки. С учетом необходимого температурного напора и в соответствии с рис. 3б относительное остаточное содержание водяного пара в продуктах сгорания после конденсации будет составлять 0,0028 при коэффициенте избытка окислителя, равном 7. На основе полученных результатов и методики Калужского турбинного завода по тепловому расчету конденсаторов паровых турбин [21–22], учитывающей влияние неконденсирующихся газов на процессы теплообмена при охлаждении и конденсации, проведена оценка необходимой поверхности теплообменника-конденсатора 3 (см. рис. 1). Результаты расчета приведены в табл. 3.

Таблица 3
 Результаты расчета требуемой теплообменной поверхности теплообменника-конденсатора
 Table 3
 The calculation results of the required heat transfer surface of the heat exchanger-condenser

Расход водородного топлива, кг/с	Расход продуктов сгорания, кг/с	Площадь охлаждения, м ²
0,5	28,5	108,9
1	57	224,9
2	114	482,2
3	171	783,0
4	228	1145

На основании приведенных расчетов и паспортных данных известных водородных и кислородных компрессорных установок [23–24] проведена оценка требуемого их количества для подачи водородного топлива и кислорода в зависимости от тепловой мощности водород-кислородной камеры сгорания.

Расчет проведен с учетом необходимой мощности дополнительного компрессора, используемого для рециркуляции неконденсирующихся газов (избытка кислорода) в камеру сгорания. Результаты расчетов представлены в табл. 4.

Таблица 4
 Результаты расчета требуемого количества компрессорных установок
 Table 4
 The results of calculating the required number of compressor units

Расход водородного топлива, кг/с	Количество Н ₂ компрессоров, шт.	Количество О ₂ компрессоров, шт.
1	1	6
2	2	11
3	3	16
4	4	22

Для оценки эффективности комбинирования АЭС с замкнутым водородным циклом определен прирост мощности на основной ПТУ энергоблока за счет повышения параметров острого пара (см. рис. 1) и дополнительного подогрева основного конденсата теплом от охлаждения и конденсации водяного пара из продуктов сгорания. При определении дополнитель-

ной мощности учтено изменение КПД отдельных отсеков ПТУ с учетом ухудшения вакуума в конденсаторе по известным методикам оценки экономичности влажно-паровых турбин большой мощности в переменных режимах [25–27]. Результаты представлены в табл. 5.

Таблица 5
 Результаты расчета эффективности проточной части паровой турбины и прироста мощности
 Table 5
 The calculation results of the efficiency and the increase in power of the steam turbine

Расход водородного топлива, кг/с	КПД	Прирост мощности (нетто), МВт
1	86,81	101,63
2	87,87	183,1
3	88,71	255,7
4	88,96	320,2

4. Результаты оценки эффективности и их обсуждение

На основании методики, описанной в [28–29], проведен расчет основных технико-экономических показателей замкнутой системы сжигания водорода с избытком окислителя на АЭС для различного расхода водородного топлива, определяемого разным ко-

личеством часов использования внепиковой мощности. При этом на основании [30–31] капиталовложения в камеру сгорания приняты на уровне 13,5 % от общих капиталовложений в газотурбинную установку соответствующей тепловой мощности. Результаты расчетов технико-экономических показателей сведены в табл. 6.

Таблица 6

Результаты оценки затрат в комбинирование АЭС с замкнутым водородным циклом на примере энергоблока ВВЭР-1000

Table 6

The results of cost estimates for combining nuclear power plants with closed-cycle using the example of a VVER-1000 power unit

	Расход водорода, кг/с			
	1	2	3	4
Капитальные вложения, млн руб.				
Водород-кислородный парогенератор	647	1 131	1 565	1 970
Система охлаждения камеры сгорания	2,56	5,14	7,71	10,27
Паро-паровой перегреватель	12,28	24,49	36,63	48,18
Теплообменник-конденсатор	1,117	2,396	3,89	5,688
Система компримирования водорода и кислорода	88,01	112	135	159
Паротурбинный цех	1 899	2 785	3 607	4 430
Система хранения водорода и кислорода	367	738	1 107	1 476
Электролизные установки	3 322			
Всего	8 071	11 313	14 116	16 628
Эксплуатационные издержки, млн руб./год				
Общие материальные издержки	1 976	2 778	3 560	4 463
Оплата труда	11,15			
Амортизационные издержки (за первый год)	323	452	565	665
Прочие затраты	639	897	1 138	1 394
Всего	2 949	4 139	5 273	6 533

Для сравнительной оценки построены зависимости себестоимости производства дополнительной электроэнергии для рассматриваемой схемы (см. рис. 1) и схемы комбинирования АЭС с замкнутым водородным циклом и охлаждением продуктов сгорания, представленной в [31] (рис. 4).

Как видно на рис. 4, себестоимость производства дополнительной электроэнергии при реализации рассматриваемой схемы оказывается значительно ниже. Это обусловлено более высокой термодинамической эффективностью использования тепла водородного топлива при повышении параметров острого пара. При этом меньшие капитальные и эксплуатационные издержки на кислородные компрессорные установки в схеме с охлаждением продуктов сгорания [31] не компенсируют меньший прирост дополнительной мощности на ПТУ и затраты в систему охлаждения продуктов сгорания. Кроме того, на рис. 4 видно, что увеличение расхода водородного топлива (тепловой мощности) приводит к снижению себестоимости, но при расходе водорода более 2,5 кг/с снижение незначительно.

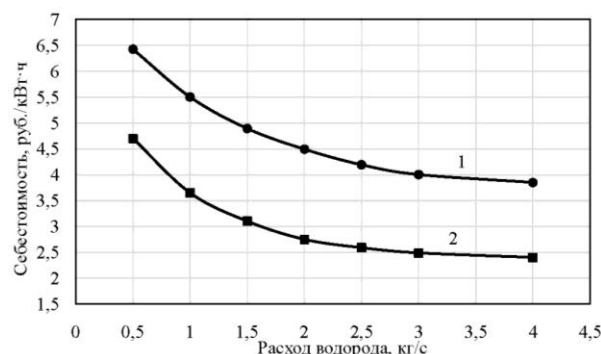


Рис. 4 – Себестоимость производства дополнительной электроэнергии в зависимости от тепловой мощности (расхода водорода): 1 – для схемы в [31]; 2 – для схемы на рис. 1

Fig. 4 – The cost of producing additional electricity depending on the heat output (hydrogen consumption): 1 – for the circuit in [31]; 2 – for the circuit in Fig. 1

В результате оценки затрат на комбинирование АЭС с замкнутым водородным циклом с учетом возможной экономии органического топлива в единой энергосистеме РФ определен накопленный чистый дисконтированный доход (НЧДД) при реализации схемы водородного перегрева пара на АЭС на основе замкнутого водородного цикла. Результаты расчета приведены на рис. 5.

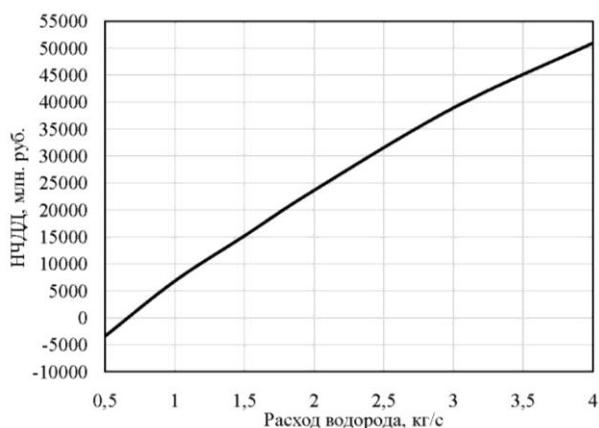


Рис. 5 – Накопленный чистый дисконтированный доход при реализации схемы на рис. 1 в зависимости от тепловой мощности (расхода водорода) системы водородного перегрева

Fig. 5 – The accumulated net present value for the implementation of the scheme in Fig. 1 depending on the thermal power (hydrogen consumption) of the hydrogen overheating system

Как видно на рис. 5, при расходе водородного топлива более 0,67 кг/с достигается положительный НЧДД и, соответственно, обеспечивается экономическая целесообразность реализации схемы водородного перегрева пара на АЭС на основе замкнутого водородного цикла с избытком окислителя. При максимальном расходе водородного топлива 4 кг/с достигается увеличение НЧДД до 50 922 млн руб.

5. Заключение

Оценка эффективности схемы комбинирования АЭС с водородным циклом за счет замкнутой системы сжигания водорода с избытком окислителя показала, что такой подход позволяет безопасно использовать тепло водородного топлива для повышения параметров острого пара перед паротурбинной установкой. Реализация схемы с избытком окислителя позволяет отказаться от предварительной системы охлаждения продуктов сгорания, что дает возможность более эффективно использовать тепло водородного топлива за счет более значительного повышения температуры острого пара и соответствующего прироста мощности ПТУ.

При коэффициенте избытка окислителя, равном 7, достигается снижение температуры продуктов сгорания до приемлемого уровня, что позволяет применять стандартные материалы в водородном пароперегревателе. При этом в продуктах сгорания будет присутствовать только водяной пар и непрореагировавший кислород в количестве 0,1509 и 0,849 (в массовых долях) соответственно. При давлении продуктов сгорания, равном 6 МПа, парциальное давление пара составит 1,5 МПа, при этом относительное остаточное содержание водяного пара в продуктах сгорания после конденсации снизится до

0,0028. Необходимая поверхность теплообмена водородного пароперегревателя и теплообменника-конденсатора водяного пара из продуктов сгорания составила от 118 м² и 108,9 м² до 846 м² и 1145 м² соответственно при расходе водорода от 0,5 до 4 кг/с.

В результате проведенной сравнительной оценки технико-экономических показателей предлагаемой схемы водородного перегрева пара на АЭС определена себестоимость производства дополнительной электроэнергии, которая составила 2,48÷4,7 руб./кВт·ч, что ниже 3,85÷6,42 руб./кВт·ч при реализации схемы с системой предварительного охлаждения продуктов сгорания. При этом расчет накопленного чистого дисконтированного дохода показал эффективность предлагаемой схемы водородного перегрева пара на АЭС с учетом возможной экономии природного газа в энергосистеме.

Список литературы

- [1] Фаворский, О.Н. Научно-технические основы высокоэффективного производства электроэнергии с комплексным использованием органического и водородного топлива / О.Н. Фаворский [и др.] // Энергетик. – 2008. – № 1. – С. 3–6.
- [2] Тарасов, Б.П. Водород для производства энергии: проблемы и перспективы / Б.П. Тарасов, М.В. Лотоцкий // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2006. – № 8. – С. 72–90.
- [3] Malyshenko, S.P. Effectiveness of steam generation in oxyhydrogen steam generators of the megawatt power class / S.P. Malyshenko [et al.] // High Temperature. – 2012. – Vol. 50. – Is. 6. – P. 765–773.
- [4] Aminov, R.Z. Emergency cooling system for water-cooled reactors / R.Z. Aminov, A.N. Egorov, V.E. Yurin // Conf. Proc. 17 International Multidisciplinary Scientific GeoConference «Energy and Clean Technology». Albena. – 2017. – Vol. 41. – 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. – Is. 4. – P. 289–292.
- [6] Aminov, R.Z. Multifunctional Backup for NPP Internal Needs / R.Z. Aminov [et al.] // Atomic Energy. – 2017. – Vol. 121. – Is. 5. – P. 327–333.
- [7] Aminov, R.Z. Comparison and analysis of residual heat removal systems of reactors in station blackout accidents / R.Z. Aminov, A.N. Egorov // Atomic Energy. – 2017. – Vol. 121. – No. 6. – P. 402–408
- [8] 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.
- [9] 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.

[10] Forsberg, C.W. Nuclear Wind hydrogen systems for variable electricity and hydrogen production [Электронный ресурс] / C.W. Forsberg, G. Naratyk // International Congress on Energy. – 2011. – New York. (<https://www.aiche.org/academy/videos/conference-presentations/nuclear-wind-hydrogen-systems-variable-electricity-and-hydrogen-production>). – (Дата обращения: 03.09.2019.).

[11] Forsberg, C.W. Is hydrogen the future of nuclear energy [Электронный ресурс] / C.W. Forsberg. – International topical meeting on the safety and technology of nuclear hydrogen production, control and management. – Boston, 2007. – Режим доступа: <http://www.350.me.uk/TR/Hansen/Forsberg01.pdf>. – (Дата обращения: 03.09.2019.).

[12] Forsberg, C.W. Hydrogen futures and technologies / C. W. Forsberg. - Rohsenow Symposium on Future Trends in Heat Transfer. – Massachusetts, 2003. – Режим доступа: <https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/7303/FO-RSBERG.pdf?sequence=1>. – (Дата обращения: 03.09.2019.).

[13] Aminov, R.Z. Hydrogen-oxygen steam generator for a closed hydrogen combustion cycle / R.Z. Aminov, A.N. Egorov // International Journal of Hydrogen Energy. – 2019. – Vol. 44. – I. 21. – P. 11161–11167.

[14] Дьяков, А.Ф. Техническая диагностика, мониторинг и прогнозирование остаточного ресурса паропроводов электростанций / А.Ф. Дьяков, В.Г. Канцдалов, Г.П. Берлявский. – М.: Издательство МЭИ, 1998. – 176 с.

[15] Бугай, Н.В. Работоспособность и долговечность металла энергетического оборудования / Н.В. Бугай, Т.Г. Березина, И.И. Трунин. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 272 с.

[16] Aminov, R.Z. Study of Hydrogen Combustion in an Oxygen Environment / R.Z. Aminov, A.N. Egorov // High Temperature. – 2018. – Vol. 56. – Is. 5. – P. – 744–750.

[17] Зельдович, Я. Б. Математическая теория горения и взрыва / Я. Б. Зельдович [и др.]. – М.: Наука, 1980. – 478 с.

[18] Михеев, М.А. Основы теплопередачи / М.А. Михеев, И.М. Михеева. – М.: Энергия, 1977. – 344 с.

[19] Юренев, В.Н. Теплотехнический справочник: Т. 2. Изд. 2-е, перераб. / В.Н. Юренев, П.Д. Лебедев. – М.: Энергия, 1976. – 896 с.

[20] Глинка, Н.Л. Общая химия. 24-е изд. / Н.Л. Глинка. – Л.: Химия, 1985. – 702 с.

[21] Ледуховский, Г.В. Разработка и апробация метода идентификации математических моделей конденсаторов паровых турбин по малой выборке экспериментальных данных / Г.В. Ледуховский // Вестник ИГЭУ. – 2017. – № 1. – С. 5–10.

[22] Pattanayaka, L. Thermal performance assessment of steam surface condenser / L. Pattanayaka, V.

Padhib, B. Kodamasingh // Case Studies in Thermal Engineering. – 2019. – Vol. 14. – P. 100484.

[23] Акционерное Общество «Сумское машиностроительное научно-производственное объединение» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://snpo.ua/ru/kontakty/>. – (Дата обращения: 03.09.2019.).

[24] ОАО «Пензкомпрессормаш» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.pkm.ru/catalog/gazovye-kompressory-porshnevye/>. – (Дата обращения: 03.09.2019.).

[25] Трояновский, Б.М. Турбины для атомных электростанций / Б.М. Трояновский. – М.: Энергия, 1978. – 232 с.

[26] Baily, F. Predicting the performance of 1800-rpm large steam turbine generators operating with light-water-cooled reactors / F. Baily [et al.]. – NY General Electric Company, 1973. – 66 p.

[27] Spenser, R.C. A method for predicting the performance of steam turbine-generators 16,500 KW and larger / R.C. Spenser, K.C. Cotton, C.N. Cannon // J. of Eng. for Power. – 1963. – Vol. 85. – 2449 p.

[28] Аминов, Р.З. Определение оптимальной продолжительности работы электролизных установок во внепиковой части графика электрических нагрузок при реализации паро-водородного цикла на АЭС / Р.З. Аминов, А.Н. Егоров, А.Н. Байрамов // Труды Академэнерго. – 2012. – № 1. – С. 113–124.

[29] Gas Turbine World Handbook. – Fairfield: Pequot Publishing Inc, 2019. – 148 p.

[30] Текущий ремонт газотурбинных установок ГТУ ст.№ 6-9 СП «Майская ГРЭС» / Центр электронных торгов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.b2b-center.ru>. – (Дата обращения: 03.09.2019.).

[31] Аминов, Р.З. Оценка технико-экономической эффективности замкнутого водородного цикла на АЭС / Р.З. Аминов, А.Н. Егоров // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). – 2019. – Vol. 10–12. – С. 23–35.

References

[1] Favorskii O.N., Leont'ev A.I., Fedorov V.A., Mil'man O.O. Scientific and technical foundations of highly efficient electricity production with the integrated use of organic and hydrogen fuel (Nauchno-tekhnicheskie osnovy vysokoeffektivnogo proizvodstva elektroenergii s kompleksnym ispol'zovaniem organicheskogo i vodorodnogo topliva). *Energetik*, 2008;1:3–6 (in Russ.).

[2] Tarasov B.P., Lototskii M.V. Hydrogen for energy production: problems and prospects (Vodorod dlya proizvodstva energii: problemy i perspektivy). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, 2006;8(40):72–90 (in Russ.).

[3] Malysenko S.P., Schastlivtsev A.I., Nazarova O.V., Prigozhin V.I., Savich A.R., Il'ichev V.A. Effectiveness of steam generation in oxyhydrogen steam ge-



nerators of the megawatt power class. *High Temperature*, 2012;50(6):765–773 (in Eng.).

[4] Aminov R.Z., Egorov A.N., Yurin V.E. Emergency cooling system for water-cooled reactors. Conf. Proc. 17 International Multidisciplinary Scientific Geo-Conference "Energy and Clean Technology". Albena, 2017;41:3–10 (in Eng.).

[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 (in Eng.).

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

[7] Aminov R.Z., Egorov A.N. Comparison and analysis of residual heat removal systems of reactors in station blackout accidents. *Atomic Energy*, 2017;121(6):402–408 (in Eng.).

[8] Shpil'rain E.E., Sarumov Yu.A., Popel' O.S. The use of hydrogen in the energy sector and in energy technology complexes (Primenenie vodoroda v energetike i v energotekhnologicheskikh kompleksakh). *Atomno-vodorodnaya energetika i tekhnologiya*, 1982;4:5–22 (in Russ.).

[9] Malysenko S.P., Nazarova O.V., Sarumov Yu.A. Some thermodynamic and technical-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). *Atomno-vodorodnaya energetika i tekhnologiya*, 1986;7:105–126 (in Russ.).

[10] Forsberg C.W., Haratyk G. Nuclear Wind hydrogen systems for variable electricity and hydrogen production. International Congress on Energy, 2011 [E-resource]. Available on: aiche.org/academy/videos/conference-presentations/nuclear-wind-hydrogen-systems-variable-electricity-and-hydrogen-production. (09.03.2019) (in Eng.).

[11] Forsberg C.W. Is hydrogen the future of nuclear energy. International topical meeting on the safety and technology of nuclear hydrogen production, control and management2007 [E-resource]. Available on: 350.me.uk/TR/Hansen/Forsberg01.pdf. (09.03.2019) (in Eng.).

[12] Forsberg C.W. Hydrogen futures and technologies. Rohsenow Symposium on Future Trends in Heat Transfer, 2003 [E-resource]. Available on: dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/7303/FORSBERG.pdf?sequence=1. (03.09.2019) (in Eng.).

[13] Aminov R.Z., Egorov A.N. Hydrogen-oxygen steam generator for a closed hydrogen combustion cycle.

International Journal of Hydrogen Energy, 2019;44(21):11161–11167 (in Eng.).

[14] D'yakov A.F., Kantsedalov V.G., Berlyavskii G.P. Technical diagnostics, monitoring and forecasting the residual life of steam pipelines of power plants (Tekhnicheskaya diagnostika, monitoring i prognozirovaniye ostatochnogo resursa paroprovoda v elektrostantsii). Moscow: Izdatel'stvo MEI, 1998; p. 176 (in Russ.).

[15] Bugai N.V., Berezina T.G., Trunin I.I. The performance and durability of metal of power equipment (Rabotosposobnost' i dolgovechnost' metalla energeticheskogo oborudovaniya). Moscow: Energoatomizdat Publ., 1994; p. 272 (in Russ.).

[16] Aminov R.Z., Egorov A.N. Study of Hydrogen Combustion in an Oxygen Environment. *High Temperature*, 2018;56(5):744–750 (in Eng.).

[17] Zel'dovich Ya.B., Barenblatt G.I., Librovich V.B., Makhviladze G.M. The mathematical theory of combustion and explosion (Matematicheskaya teoriya gorennya i vzryva). Moscow: Nauka, 1980; p. 478 (in Russ.).

[18] Mikheev M.A., Mikheeva I.M. Heat Transfer basics (Osnovy teploperedachi). Moscow: Energiya Publ., 1977; p. 344 (in Russ.).

[19] Yurenev V.N., Lebedev P.D. Heat engineering reference book. Vol. 2. Ed. 2nd, rewrite (Teplotekhnicheskii spravochnik. Tom 2. Izd. 2-e, pererab). Moscow: Energiya Publ., 1976; p. 896 (in Russ.).

[20] Glinka N.L. General chemistry. 24th ed. (Obshchaya khimiya. 24-e izd.). Leningrad: Khimiya Publ., 1985; p. 702 (in Russ.).

[21] Ledukhovskii G.V. Development and testing of a method for identifying mathematical models of steam turbine condensers from a small sample of experimental data (Razrabotka i aprobatsiya metoda identifikatsii matematicheskikh modelei kondensatorov parovykh turbin po maloi vyborke eksperimental'nykh dannykh). *Vestnik IGEU*, 2017;1:5–10 (in Russ.).

[22] Pattanayaka L., Padhib B., Kodamasingh B. Thermal performance assessment of steam surface condenser. *Case Studies in Thermal Engineering*, 2019;14:100484 (in Eng.).

[23] Joint Stock Company Sumy Engineering Scientific-Production Association (Aktionernoe Obshchestvo "Sumskoe mashinostroitel'noe nauchno-proizvodstvennoe ob"edinenie"). [E-resource]. Available on: snpou.ua/ru/kontakty/. (03.09.2019) (in Russ.).

[24] OJSC Penzkompresormash (OAO "Penzkompresormash"). [E-resource]. Available on: pkm.ru/catalog/gazovye-kompresory-porshnevye/. (09.03.2019) (in Russ.).



[25] Troyanovskii B.M. Turbines for nuclear power plants (Turbiny dlya atomnykh elektrostantsii). Moscow: Energiya Publ., 1978; p. 232 (in Russ.).

[26] Baily F., Booth J., Cotton K., Miller E. Predicting the performance of 1800-rpm large steam turbine generators operating with light-water-cooled reactors. NY General Electric Company, 1973; 66 p. (in Eng.).

[27] Spenser R.C., Cotton K.C., Cannon C.N. A method for predicting the performance of steam turbine-generators 16,500 KW and larger. *J. of Eng. for Power*, 1963;85:2449 (in Eng.).

[28] Aminov R.Z., Egorov A.N., Bairamov A.N. Determining the optimal duration of the electrolysis plants in the off-peak part of the schedule of electrical loads during the implementation of the steam-hydrogen cycle at nuclear power plants (Opredelenie optimal'noi prodolzhitel'nosti raboty elektroliznykh ustanovok vo vne-

pikovoi chasti grafika elektricheskikh nagruzok pri realizatsii paro-vodorodnogo tsikla na AES). *Trudy Akademenergo*, 2012;1:113–124 (in Russ.).

[29] Gas Turbine World Handbook. Fairfield: Pequot Publishing Inc, 2019; p. 148 (in Eng.).

[30] Current repair of gas turbine units of the GTU, st. No 6-9 of the joint venture Mayskaya TPP (Tekushchii remont gazoturbinykh ustanovok GTU st. № 6–9 SP "Mayskaya GRES") [E-resource]. Available on: b2b-center.ru. (09.03.2019) (in Russ.).

[31] Aminov R.Z., Egorov A.N. Evaluation of the technical and economic efficiency of a closed hydrogen cycle at nuclear power plants (Otsenka tekhniko-ekonomicheskoi effektivnosti zamknutogo vodorodnogo tsikla na AES). *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2019;10–12:23–35 (in Russ.).



Транслитерация по BSI



**VII Международная конференция по водной экотоксикологии
«Антропогенное влияние на водные организмы и экосистемы»**

Город: Борок
Тезисы до: 01.12.2019.

Даты: 16.09.20 – 20.09.20

Организаторы: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации; ФГБУН Институт биологии внутренних вод им. И.Д. Папанина РАН

Научные проблемы конференции:

- судьба, биодоступность, биотрансформация, биоаккумуляция загрязняющих веществ;
- биохимические, физиологические, поведенческие реакции гидробионтов на действие антропогенных факторов;
- структурные и функциональные характеристики популяций гидробионтов и водных экосистем в условиях антропогенной нагрузки;
- биомониторинг и оценка экотоксикологического состояния водных объектов, проблемы экологического нормирования.

Е-мейл Оргкомитета: toixc2020@ibiw.ru; +7 (485-47)-24-816

Веб-сайт конференции: <http://ibiw.ru/index.php?p=conf&id=61&lang=ru>

<https://www.science-community.org/ru/node/208410>

