



АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ATOMIC ENERGY

АТОМНО-ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

ATOMIC HYDROGEN ENERGY

Статья поступила в редакцию 26.01.18. Ред. рег. № 2642-2

The article has entered in publishing office 26.01.18. Ed. reg. No. 2642-2

УДК 621.039:62-622:620.169.1

**ОЦЕНКА ПОКАЗАТЕЛЕЙ РАБОЧЕГО РЕСУРСА ОСНОВНОГО
ОБОРУДОВАНИЯ ВОДОРОДНОГО ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА ПО КРИТЕРИЮ ПРЕДЕЛЬНОГО
ЧИСЛА ЦИКЛОВ НАГРУЖЕНИЯ****А.Н. Байрамов*ФГБУН «Саратовский научный центр РАН»
Отдел энергетических проблем ШЦ РАН
оф. 13, д. 77, ул. Политехническая, Саратов, 410054, Россия
тел.: +7(8452)56-91-95; факс: +7(8452)52-55-10; e-mail: oerpan@inbox.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.04-06.025-036

Заключение совета рецензентов: 05.02.18 Заключение совета экспертов: 12.02.18 Принято к публикации: 16.02.18

Представлена актуальная проблема обеспечения атомной электростанции (АЭС) базисной электрической нагрузкой во внепиковые часы ночного минимума электропотребления. В поисках решения этого вопроса анализировались технологии аккумулирования энергии, например, такие, как гидроаккумулирующая электростанция. Но, поскольку сооружение данной станции сопряжено с разного рода рисками (техническими, экологическими, сейсмическими и т.д.) и вблизи АЭС невозможно, зарядку гидроаккумулирующей электростанции можно осуществлять только из энергосистемы по тарифу, в 2–3 раза превышающему себестоимость электроэнергии АЭС, что существенно влияет на стоимость производимой пиковой электроэнергии и на конкурентоспособность. В качестве более рентабельной технологии аккумулирования электроэнергии рассматривался водородный энергетический комплекс с производством водорода и кислорода электролизом воды за счет ночной избыточной электроэнергии АЭС, главным преимуществом которого является его расположение вблизи АЭС с возможностью зарядки по себестоимости её электроэнергии. При этом выработка водорода и кислорода с последующим их использованием в паротурбинном цикле АЭС носит периодический характер и связано с ежесуточными пусками и остановами основного оборудования.

Целью данной работы являлось определение рабочего ресурса основного оборудования водородного энергетического комплекса в условиях циклических нагрузок. На базе теории усталостного разрушения анализировался циклический режим работы пуска-останова основного оборудования водородного энергетического комплекса в комбинировании с АЭС. Произведена оценка скорости роста усталостной трещины в зависимости от частоты нагружений для критического элемента электролизных установок, компрессоров, металлических емкостей хранения водорода и кислорода, водород-кислородной камеры сгорания. Учтено влияние водородной коррозии на скорость роста усталостной трещины. Предложен комплексный критерий оценки числа циклов до разрушения. По критерию предельного числа циклов до разрушения определена и рекомендована граница зоны эффективного режима работы основного оборудования водородного энергетического комплекса.

* Байрамов А.Н. Оценка показателей рабочего ресурса основного оборудования водородного энергетического комплекса по критерию предельного числа циклов нагружения // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEE). 2018;(04-06):25-36.



Ключевые слова: атомная электростанция; АЭС; водородный энергетический комплекс; усталостное разрушение; частота циклических нагружений; водородная коррозия; эффективный режим.

LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE HYDROGEN ENERGY FACILITY BY CRITERION FOR MAXIMUM LOAD FREQUENCY

A.N. Bairamov

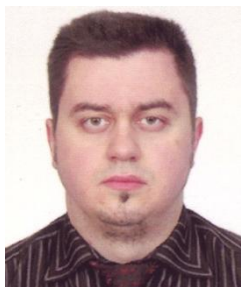
Saratov Scientific Center RAS
of. 13, 77 Polytechnicheskay St., Saratov, 410054, Russia
tel.: +7 (8452) 56 91 95, fax: +7 (8452) 52 55 10, e-mail: oepran@inbox.ru

doi: 10.15518/isjaee.2018.04-06.025-036

Referred 5 February 2018 Received in revised form 12 February 2018 Accepted 16 February 2018

The paper deals with the issue of providing the Nuclear Power Plant (NPP) by the base load in the nighttime off-peak load hours. In order to search a solution to this issue, we analyze the energy storage technologies including the hydroelectric power stations. Since the construction of this station is associated with various risks (technical, environmental, seismic, etc.), and their deployment in the immediate vicinity of Near Nuclear Power Plants is unacceptable. This implies the tariffs for the power supply from the grid transmission system may exceed the nuclear generating costs 3 or 4 times, and significantly affect the cost for the produced peak energy and competitive advantages of these stations. As more competitive technology of electric energy storage, the paper reviews the system based on utilizing hydrogen energy facilities with hydrogen and oxygen produced by water electrolysis due to excess power from nuclear power plants in the nighttime. The key advantage of these facilities is location in the vicinity of NPPs with the possibility of charging at the cost of the NPP energy. At the same time, hydrogen and oxygen production and their further utilization in the NPP steam cycle has the recurrent nature and connected with the daily startup and shutdown procedures of the main facilities. Thus, the aim of this research is to determine the life cycle of the main hydrogen energy facility under cyclic loads. The fatigue fracture theory is applied to analyze the performance of startup/shutdown cycles in the main hydrogen energy facility in combination with the NPP. We have conducted the estimation of fatigue crack growth depending on the load frequency for the critical components of electrolysis plants, compressors, metal hydrogen and oxygen storage tanks, as well as hydrogen-oxygen combustion chambers. The paper focuses on the impact of hydrogen corrosion on the rate of fatigue crack growth and proposes criterion defining the number of cycles occurred prior to the fracture extension process. Based on the criterion of maximum cycles prior to the fraction extension process, we have defined the boundaries for effective performance of the main hydrogen energy facility.

Keywords: nuclear power plant; NPP; hydrogen energy complex; fatigue failure; cyclic load frequency; hydrogen corrosion; effective regime.



Арте́м Николаевич
Байра́мов
Artem Bairamov

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

Образование: Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина (2007 г.).

Область научных интересов: водородная 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: 37.

h-index: 4

SPIN-код: 1620-2441

Information about the author:

Ph.D. in Engineering, Senior Researcher at Saratov Scientific Center of the RAS.

Education: Saratov State Technical University named Yuri Gagarin, 2007.

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

Publications: 37.

Введение

Программой развития атомной энергетики России предусмотрено существенное увеличение доли АЭС в энергосистемах европейской части страны. Так, в Энергетической стратегии России на период до 2035 г. [1] развитие атомной энергетики и замкнутого ядерного топливного цикла включено в число задач, поэтому проблема обеспечения АЭС базисной электрической нагрузкой приобретает особую актуальность [2–5]. С этой целью наряду с использованием гидроаккумулирующих электростанций (ГАЭС) рассматриваются и разрабатываются научные основы использования водородного энергетического комплекса [2, 6–10], в том числе данная концепция актуальна и за рубежом [11–13]. Преимуществом водородного комплекса является возможность потребления электроэнергии непосредственно от АЭС по себестоимости в часы ночного минимума электропотребления для выработки водорода и кислорода, в то время как ГАЭС заряжается от энергосистемы по тарифу в 2–3 раза превышающему себестоимость электроэнергии АЭС.

Эффективная выработка пиковой электроэнергии на АЭС за счёт комбинирования с водородным комплексом может осуществляться посредством пароводородного перегрева свежего пара перед основной турбиной [2, 6, 7, 9], а также перед дополнительной

турбиной за счет вытеснения пара, предназначенного для промперегрева [8, 10, 14–18].

Специфика комбинирования водородного энергетического комплекса с АЭС для обеспечения базисной электрической нагрузкой в ночные внепиковые часы заключается в том, что в данных условиях неизбежны циклические пуски для выработки и аккумуляирования водорода и кислорода и, соответственно, остановы по завершению внепикового и пикового периодов. Циклическое нагружение оборудования обуславливает рост усталостных трещин [19–24]. В этой связи основное оборудование водородного энергетического комплекса – электролизные установки, система хранения водорода и кислорода, водородно-кислородная камера сгорания пароводородного перегрева рабочего тела в паротурбинном цикле атомной электростанции – подвергается циклическим нагрузкам, связанным с пуском и последующим останом. Это приводит к развитию усталостных трещин, при этом влияние на динамику усталостной трещины оказывает и явление водородного охрупчивания стали.

Впервые получены показатели рабочего ресурса и предельное число циклов до разрушения основного оборудования водородного комплекса в условиях циклического нагружения. Данные факторы необходимо проанализировать, изучить и учитывать при оценке эффективности комбинирования водородного энергетического комплекса и АЭС.

| Список обозначений | |
|----------------------------------|---|
| <i>Буквы греческого алфавита</i> | |
| α | Угол наклона линии к оси абсцисс, отражающей изменение скорости роста усталостной трещины при увеличении частоты нагружения, градус |
| β | Безразмерный коэффициент, учитывающий геометрический фактор и характер распределения напряжения |
| σ | Напряжение цикла, МПа |
| ν | Скорость роста усталостной трещины, мм/цикл |
| <i>Буквы латинского алфавита</i> | |
| C | Коэффициент интенсивности напряжений цикла, $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ |
| ΔC | Коэффициент интенсивности размаха напряжений цикла, $\text{МПа}\sqrt{\text{м}}$ |
| f | Частота циклов напряжений, Гц |
| l | Длина усталостной трещины, мм/цикл |
| N | Число циклов |
| P_1 | Давление водорода, соответствующее некоторой минимальной скорости роста усталостной трещины, МПа |
| P_2 | Фактическое давление водорода над металлом, МПа |
| <i>Индексы нижние</i> | |
| 0 | Пороговая |
| max | Максимальный |
| min | Минимальный |
| <i>Аббревиатуры</i> | |
| АЭС | Атомная электростанция |
| ГАЭС | Гидроаккумулирующая электростанция |
| B95AT1 | Магниевый деформируемый сплав |
| MA8 | Высокопрочный алюминиевый сплав |
| MA18 | Магниево-литиевый сверхлегкий сплав |
| 09Г2С | Конструкционная сталь |
| 31Х19Н9МВБТ | Конструкционная коррозионно-стойкая сталь |
| X15H35B3T (ЭИ612) | Конструкционная жаропрочная сталь |

Теоретический анализ

Методические основы по оценке скорости роста усталостных трещин и числа циклов до разрушения и исходные данные к расчету

Зависимость скорости роста усталостной трещины от частоты нагружения для фиксированных значений коэффициента интенсивности размаха напряжений ΔC описывается уравнением, мм/цикл [19]:

$$v = v_0 f^{-tga}, \tag{1}$$

где v_0 – пороговая (начальная) скорость роста усталостной трещины, мм/цикл ($10^{-8} \div 10^{-6}$ мм/цикл в зависимости от характера воздействия циклических нагрузок [19, 21]); f – частота циклов напряжений, Гц; tga – тангенс угла наклона логарифмической линии к оси абсцисс, отражающей изменение скорости роста усталостной трещины при увеличении частоты нагружения.

Частота нагружения влияет на динамику развития трещин, причём повышение этой частоты способно интенсифицировать закрытие трещин. Такие зависимости характерны для некоторых конструкционных сталей, титановых и алюминиевых сплавов [19].

Коэффициент интенсивности напряжений цикла в общем случае, $M\text{Па}\sqrt{м}$, [19–24]

$$C = \sigma\beta\sqrt{\pi l_0}, \tag{2}$$

где σ – напряжение цикла, МПа; β – безразмерный коэффициент, учитывающий геометрический фактор и характер распределения напряжений; l_0 – пороговая (минимальная) длина трещины, м.

В расчетах в основу определения безразмерного коэффициента β положена модель сосуда с внутренним давлением [24].

Коэффициент интенсивности размаха напряжений цикла ΔC есть алгебраическая разность максимального и минимального значений коэффициента интенсивности напряжений цикла [19].

Дополнительному увеличению напряжений будут способствовать термические напряжения стенки рабочего сосуда. Таким образом, суммарные напряжения определялись с учетом термических напряжений [25].

Длина усталостной трещины при соответствующем числе циклов с учетом (1) определялась по выражению, мм:

$$l_N = v_0 f^{-tga} N + l_0 \leq 0,1 \dots 1, \tag{3}$$

где N – число циклов.

В условиях появления наводораживания стали скорость роста усталостной трещины увеличивается почти прямо пропорционально повышению давления водорода над металлом, то есть существенно зависит от давления [19, 26, 27]. При этом чем выше давление водорода, тем ниже уровень температуры, при которой начинается процесс наводораживания [26, 27]. В этой связи критерий (3) примет следующий вид:

$$l_N = v_0 f^{-tga} \frac{P_2}{P_1} N + l_0 \leq 0,1 \dots 1, \tag{4}$$

где P_1 – давление водорода, соответствующее некоторой минимальной скорости роста усталостной трещины, МПа; P_2 – фактическое давление водорода над металлом, МПа.

На рис. 1 [19, 21, 23] представлен общий вид диаграммы усталостного разрушения в координатах $v - \Delta C$.

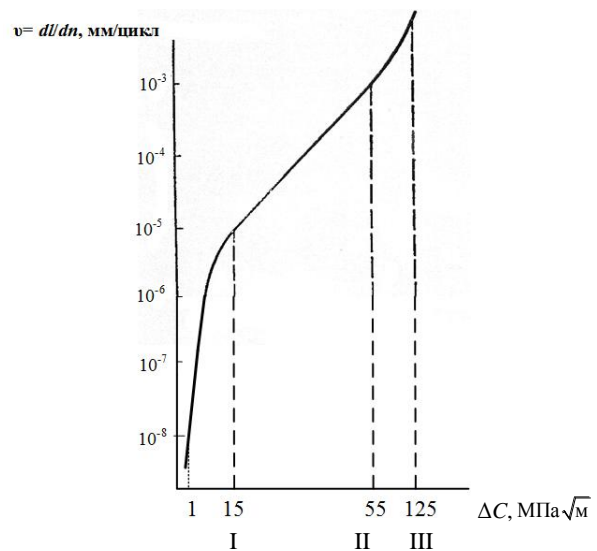


Рис. 1 – Диаграмма усталостного разрушения:

- I – область порога развития усталостной трещины;
- II – область среднеамплитудной скорости роста усталостной трещины;
- III – область прогрессивного развития усталостной трещины

Fig. 1 – Fatigue failure diagram: I – the threshold region of fatigue crack propagation; II – the region of the average amplitude fatigue crack growth;

- III – the region of progressive fatigue crack propagation

На рис. 2 [19] на примере конструкционных сплавов В95АТ1, МА8 и МА18 и согласно экспериментальным данным приведена аппроксимационная зависимость показателя степени в уравнении (1) от значений коэффициента интенсивности размаха напряжений.



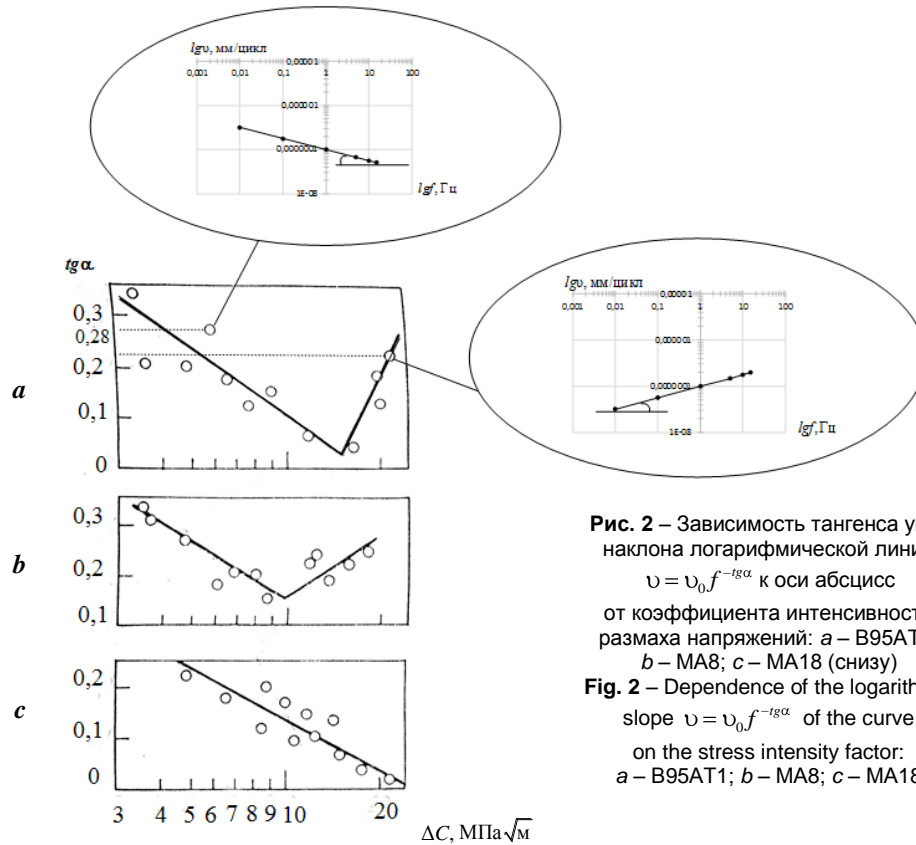


Рис. 2 – Зависимость тангенса угла наклона логарифмической линии $\nu = \nu_0 f^{-\lg \alpha}$ к оси абсцисс от коэффициента интенсивности размаха напряжений: а – В95АТ1; б – МА8; с – МА18 (снизу)
Fig. 2 – Dependence of the logarithmic slope $\nu = \nu_0 f^{-\lg \alpha}$ of the curve on the stress intensity factor: а – В95АТ1; б – МА8; с – МА18

Как показано на рис. 2, на участке до излома чем меньше $\text{tg}\alpha$, тем более пологий характер убывания принимает зависимость скорости роста усталостной трещины по мере увеличения частоты нагружений при фиксированном ΔC , то есть рост усталостной трещины замедляется, и при этом $\frac{\partial \nu}{\partial \lg \alpha}$ убывает. На

участке после излома чем больше $\text{tg}\alpha$, тем более крутой характер возрастания имеет зависимость скорости роста усталостной трещины по мере увеличения частоты, то есть рост усталостной трещины не замедляется, и $\frac{\partial \nu}{\partial \lg \alpha}$ возрастает, что приводит к интенсивному увеличению скорости роста усталостной трещины. Следовательно, на участке до излома производная $\frac{\partial \nu}{\partial \lg \alpha}$ характеризует интенсивность замедления роста усталостной трещины, а на участке после излома – интенсивность ускорения роста усталостной трещины.

Таким образом, повышение частоты нагружения на примере указанных материалов вплоть до $15 \div 20$ Гц вследствие явления закрытия усталостных трещин может снизить скорость роста усталостной трещины при коэффициенте интенсивности размаха напряжений, соответствующих только области поро-

га развития усталостной трещины на диаграмме усталостного разрушения [19].

Результаты и их обсуждение

Оценка показателей рабочего ресурса электролизных установок

При выработке водорода и кислорода растягивающие и термические напряжения имеют место как в ячейках рабочего сосуда электролизера, так и в последующих теплообменниках, в которых происходит очистка и охлаждение водорода и кислорода. При останове давление сбрасывается до атмосферного, что обуславливает максимальные циклические нагрузки. Соответственно, для рабочих сосудов электролизной установки характерны отнулевые знакопостоянные циклические напряжения. Для этого случая $\Delta C = C_{\max}$. В качестве критического элемента рассматривается стенка рабочего сосуда электролизера на примере стали 31Х19Н9МВБТ с учетом коэффициента запаса прочности для отнулевого цикла $1,9 \div 2,2$ [23].

В расчетах рабочее давление в электролизере составило 3 МПа, а температура – порядка 150°C [28, 29]. При этом сумма растягивающих и термических напряжений равнялась 372,6 МПа. Значение коэффициента интенсивности напряжений с учетом (2) соответствует области порога развития усталостной

трещины на диаграмме усталостного разрушения (см. рис. 1).

В работе анализировались условия ежедневного нагружения электролизеров. В варианте пуска один раз в сутки общая продолжительность одного цикла нагружения составила 7 ч/сут (ночной внепиковый период), а в варианте пуска два раза в сутки общая продолжительность дополнительного цикла нагружения – 2 ч/сут. Частота нагружений для обоих вариантов составила менее 0,1 Гц.

Таким образом, для электролизеров при пуске один раз в сутки при эффективном режиме расчетная скорость роста усталостной трещины не превышает $7,5 \cdot 10^{-6}$ мм/цикл. При этом диапазон числа циклов до разрушения составляет от 13 тыс. до 130 тыс. ($90 \cdot 10^3$ и $90 \cdot 10^4$ ч соответственно) и более, если пороговая скорость роста усталостной трещины будет менее $1 \cdot 10^{-8}$ мм. С учетом водородной коррозии допустимый режим соответствует расчетной скорости роста усталостной трещины не выше $1,88 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл. При этом допустимое число циклов до разрушения составляет не менее 5,5 тыс. ($38 \cdot 10^3$ ч).

При пуске электролизера два раза в сутки при эффективном режиме расчетная скорость роста усталостной трещины не превышает $5,78 \cdot 10^{-6}$ мм/цикл. При этом диапазон числа циклов до разрушения составляет от 17 тыс. до 170 тыс. ($15 \cdot 10^4$ и $15 \cdot 10^5$ ч соответственно). С учетом водородной коррозии допустимый режим соответствует расчетной скорости роста усталостной трещины не выше $1,44 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл, а допустимое число циклов до разрушения составляет не менее 7 тыс. ($63 \cdot 10^3$ ч).

Итак, водородная коррозия оказывает значительное влияние на скорость роста усталостной трещины и, следовательно, на предельное число циклов до разрушения. Кроме того, по мере увеличения частоты нагружений ввиду явления закрытия усталостных трещин, характерного для пороговой области диаграммы усталостных разрушений [19], возможно некоторое замедление скорости роста усталостной трещины и соответствующее увеличение предельного числа циклов до разрушения, и наоборот.

Оценка показателей рабочего ресурса металлических емкостей цилиндрического типа со сферическими днищами

При аккумулировании водорода и кислорода растягивающие напряжения возникают в стенке емкости, после разрядки давление сбрасывается до остаточного минимального, то есть для этого процесса характерен отнулевой знакопостоянный цикл напряжений ($\Delta C = C_{\max}$). Критический элемент – стенка емкости на примере конструкционной стали 09Г2С с учетом коэффициента запаса прочности для отнулевого цикла $1,9 \div 2,2$ [23].

Давление аккумулирования водорода и кислорода составило 4 МПа, при этом термические напряжения были пренебрежимо малы, так как в условиях подзем-

ного размещения [30] и предварительного охлаждения водорода и кислорода температурная разница по обе стороны стенки емкости мала. Поскольку температура аккумулируемого водорода невысокая (порядка 20 °С), с учетом данных [26, 27] условий для водородной коррозии не создается, и растягивающие напряжения равны 171 МПа. Значение коэффициента интенсивности напряжений соответствует области порога развития усталостной трещины на диаграмме усталостного разрушения (см. на рис. 1).

Автором данной статьи рассматривались условия ежедневного нагружения системы хранения. В варианте аккумулирования один раз в сутки продолжительность зарядки составила 7 ч/сут, а продолжительность разрядки – 5 ч/сут, статический период до начала разрядки – 2 ч/сут. В варианте аккумулирования два раза в сутки общая продолжительность дополнительного цикла нагружения составила 5 ч/сут, при этом частота нагружений для обоих вариантов – менее 0,1 Гц.

Таким образом, для емкостей хранения водорода и кислорода при нагружении один раз в сутки при эффективном режиме расчетная скорость роста усталостной трещины не превышает $1,1 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл. При этом диапазон числа циклов до разрушения составляет от 9,2 тыс. до 92 тыс. ($12 \cdot 10^4$ и $12 \cdot 10^5$ ч соответственно).

По мере увеличения частоты нагружений вследствие явления закрытия усталостных трещин [19] может происходить некоторое замедление скорости роста усталостной трещины и соответствующее некоторое увеличение предельного числа циклов до разрушения, и наоборот. В этой связи при нагружении емкостей хранения два раза в сутки при эффективном режиме расчетная скорость роста усталостной трещины не превышает $7,96 \cdot 10^{-6}$ мм/цикл. При этом диапазон числа циклов до разрушения равняется $12,3 \div 123$ тыс. ($23 \cdot 10^4$ и $23 \cdot 10^5$ ч соответственно).

Оценка показателей рабочего ресурса компрессорных установок поршневого типа

Рассматривается двухступенчатое сжатие водорода и кислорода с промежуточным охлаждением, предполагается использование рабочих цилиндров с рубашкой охлаждения.

Растягивающие напряжения имеют место в цилиндрах компрессора, для которых характерен знакопостоянный цикл напряжений, то есть наряду с максимумом напряжения цикла при нагнетании газа имеется и минимум, до которого понижается нагрузка при расширении объема мертвого пространства с целью всасывания новой порции газа. При этом максимальные напряжения возникают в фазе отнулевого знакопостоянного нагружения, которая появляется в момент пуска под нагрузку и остановка компрессорной установки. В этой связи следует считать, что рост усталостной трещины в стенках рабочих цилиндров



происходит в фазе отнулевого знакопостоянного нагружения, а в фазе знакопостоянного нагружения роста усталостной трещины не происходит. На этом основании установлено, что число пусков не сокращает период до капитального ремонта, определенный заводом изготовителем на уровне $9\,000 \div 12\,500$ ч [31].

Оценка показателей рабочего ресурса водородно-кислородной камеры сгорания

На рис. 3 [7] показано устройство пароводородного перегрева основного рабочего тела паротурбинного цикла АЭС на примере свежего пара из парогенераторов при давлении порядка 6 МПа.

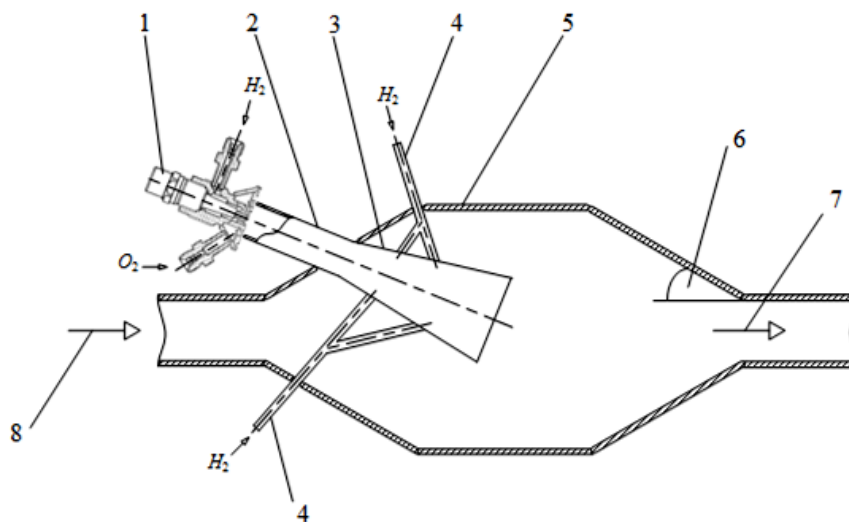


Рис. 3 – Система сжигания водорода для перегрева свежего пара в цикле АЭС: 1 – запальное устройство; 2 – водородно-кислородная камера сгорания первоначального нестехиометрического окисления; 3 – дожигающая водородно-кислородная камера сгорания стехиометрического окисления; 4 – подводящие магистрали, осуществляющие подачу водорода в дожигающую водородно-кислородную камеру сгорания; 5 – полость смешения высокотемпературного пара со свежим паром; 6 – 30-45°; 7 – перегретый пар в турбину; 8 – пар от парогенераторов АЭС

Fig. 3 – The hydrogen combustion system for superheating the main steam in the NPP cycle: 1 – the ignition device; 2 – the hydrogen-oxygen combustion chamber for initial off- stoichiometric oxidation; 3 – the post-injection hydrogen-oxygen combustion chamber for stoichiometric oxidation; 4 – the supply mains providing hydrogen to the post-injection hydrogen-oxygen combustion chamber; 5 – the chamber providing high-temperature steam mixed with the main steam; 6 – 30-45°; 7 – the superheated steam directed to the turbine; 8 – the steam from the NPP steam generators

Пароводородный перегрев основан на двухступенчатом сжигании водорода с кислородом: на первой ступени в нестехиометрическом соотношении, а затем на второй – в стехиометрическом соотношении за счет подачи оставшейся доли водорода. Снаружи дожигающая камера сгорания омывается свежим паром. Затем происходит смешение со свежим паром турбоустановки атомной станции, в результате возможно повышение температуры пара при входе в турбину до значений порядка $370 \div 450$ °С, в зависимости от расхода водородного топлива [2–4, 6–10, 14, 32–35].

В период до использования водородно-кислородной камеры сгорания она находится под воздействием сжимающих усилий омывающего ее снаружи свежего пара. В период использования при покрытии пика электрической нагрузки дополнительно возникают внутренние растягивающие напряжения. Таким образом, для водородно-кислородной камеры сгорания характерен знакопеременный цикл напряжений. Критический элемент – стенка дожигающей части водородно-кислородной камеры сгорания на примере конструкционной стали X15NH35B3T

(ЭИ612) с учетом коэффициента запаса прочности для знакопеременного цикла $2,4 \div 3$ [23]. Для этого случая $\Delta C = C_{\max} - C_{\min}$. Напряжения сжатия и растяжения определялись по методике [25]. При давлении рабочего тела порядка 6 МПа возникающие напряжения составляли 138 МПа. При этом значение коэффициента интенсивности напряжений соответствует области порога развития усталостной трещины на диаграмме усталостного разрушения (см. на рис. 1).

Следует отметить, что оценивалось только влияние сжимающих и растягивающих напряжений на скорость роста усталостной трещины, а влияние термических напряжений анализировалось в работе [36].

Автор данной статьи рассмотрел условия ежесуточного нагружения. В варианте пуска один раз в сутки общая продолжительность цикла нагружения составила 5 ч/сут, в варианте пуска два раза в сутки общая продолжительность дополнительного цикла нагружения – 2 ч/сут. Частота нагружений для обоих вариантов составила менее 0,1 Гц.

Помимо циклического режима работы, особенно водородно-кислородной камеры сгорания является проблема возможного водородного охрупчива-



ния стали [26, 27]. Поэтому предельное число циклов нагружения определялось по выражению (4).

Таким образом, для водородно-кислородной камеры сгорания при пуске один раз в сутки при эффективном режиме расчетная скорость роста усталостной трещины не превышает $1,2 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл. При этом диапазон числа циклов до разрушения составляет от 8 тыс. до 80 тыс. ($40 \cdot 10^3$ и $40 \cdot 10^4$ соответственно). С учетом водородной коррозии допустимый режим соответствует не выше расчетной скорости роста усталостной трещины, равной $5,9 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл. При этом допустимое число циклов до разрушения составляет не менее $1\ 650$ ($8 \cdot 10^3$ ч).

При пуске водородно-кислородной камеры сгорания два раза в сутки при эффективном режиме расчетная скорость роста усталостной трещины не превышает $8,9 \cdot 10^{-6}$ мм/цикл. При этом диапазон числа циклов до разрушения находится в диапазоне $11 \div 110$ тыс. ($70 \cdot 10^3$ и $70 \cdot 10^4$ соответственно). С учетом водородной коррозии допустимый режим соответствует не выше расчетной скорости роста усталостной трещины, равной $4,4 \cdot 10^{-5}$ мм/цикл. При этом допустимое число циклов до разрушения составляет не менее 2,4 тыс. ($16 \cdot 10^3$ ч).

На основании этих данных можно сделать вывод о том, что влияние водородной коррозии значительно сокращает предельное число циклов до разрушения. Кроме того, по мере увеличения частоты нагружений вследствие явления закрытия усталостных трещин, характерного для пороговой области диаграммы усталостных разрушений [19], возможно некоторое замедление скорости роста усталостной трещины и соответствующее некоторое увеличение предельного числа циклов до разрушения, и наоборот.

Заключение

В ходе данного исследования были обоснованы и получены показатели рабочего ресурса, определяющие зоны эффективных режимов работы основного оборудования водородного энергетического комплекса в комбинировании с АЭС. Показано, что в условиях водородной коррозии скорость роста усталостной трещины на примере конструкционных коррозионно-стойких хромоникелевых сталей возрастет примерно на два порядка. По критерию предельного числа циклов до разрушения допустимая граница зоны эффективного режима составила:

- для конструкционной стали стенок рабочих сосудов электролизеров с учетом термических напряжений – 13 тыс. ($90 \cdot 10^3$ ч) и 5,5 тыс. ($3,8 \cdot 10^3$ ч) в условиях водородной коррозии соответственно;

- для конструкционной стали металлических емкостей хранения водорода и кислорода – 9,2 тыс. циклов ($12 \cdot 10^4$ ч) (вследствие охлаждения водорода и кислорода перед подачей в емкости и их подземного размещения условия водородной коррозии не проявляются и термические напряжения имеют пренебрежимо малую величину);

- для конструкционной стали стенки рабочих цилиндров I ступени сжатия поршневых компрессорных установок – порядка 200 тыс. пусков и 4,5 тыс. пусков в условиях водородной коррозии соответственно в фазе отнулевого знакопостоянного нагружения;

- для конструкционной стали стенки водородно-кислородной камеры сгорания (без учета термических напряжений) – 8 тыс. циклов ($40 \cdot 10^3$ ч) и 1,6 тыс. циклов ($8 \cdot 10^3$ ч) в условиях водородной коррозии соответственно.

Установлено, что для основного оборудования водородного энергетического комплекса характерен низкочастотный диапазон циклических нагружений, то есть менее 0,1 Гц при коэффициенте интенсивности размаха напряжений, соответствующих области порога развития усталостной трещины на диаграмме усталостного разрушения. Повышение частоты нагружений при этом способно интенсифицировать явление закрытия трещин, что, в свою очередь, может замедлить скорость роста усталостной трещины, и привести к некоторому увеличению предельного числа циклов до разрушения.

Список литературы

[1] Энергетическая стратегия России на период до 2035 г. [Текст] / Министерство энергетики Российской Федерации. – Москва, 2014. – 263 с.

[2] Аминов, Р.З. Комбинирование водородных энергетических циклов с атомными электростанциями [Текст] / Р. З. Аминов, А. Н. Байрамов – М.: Наука, 2016. – 254 с.

[3] 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. – No 42. – P. 21617–21625.

[4] 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. – No 42. P. – 20843–20848.

[5] Аминов, Р.З. Оценка конкурентной эффективности получения водорода методом электролиза воды на основе внепиковой электроэнергии [Текст] / Р.З. Аминов, А.Н. Байрамов // Известия РАН. Энергетика. – 2016. – № 4. – С. 84–90.

[6] Аминов, Р.З. Системная эффективность водородных циклов на основе внепиковой электроэнергии АЭС [Текст] / Р.З. Аминов, А.Н. Байрамов // Известия РАН. Энергетика. – 2011. – № 4. – С. 52–61.

[7] Пат. 2427048 Российская Федерация, МПК⁷ F 22В 1/26, G 21D5/16, F 01K3/18. Система сжигания водорода для паро-водородного перегрева свежего пара в цикле атомной электрической станции / Аминов Р.З, Байрамов А.Н.; заявители и патентообладатели Аминов Р.З, Байрамов А.Н. – № 2009117039/06 ; заявл. 04.05.2009; опубл. 20.08.2011, Бюл. № 23. – 8 с. : ил.



- [8] Аминов, Р.З. Методика оценки термодинамической эффективности дополнительного подвода тепла во влажно-паровых циклах АЭС / Р.З. Аминов, А.Н. Егоров // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. – 2011. – № 11–12. – С. 20–29.
- [9] 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.
- [10] 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. – М.: Энергоатомиздат., 1986. – Вып. 7. – С.105–126.
- [11] 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.- Режим доступа: <https://www.aiche.org/academy/videos/conference-presentations/nuclear-wind-hydrogen-systems-variable-electricity-and-hydrogen-production>. – (Дата обращения 26.02.2018).
- [12] 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: 26.02.2018).
- [13] 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_RSBURG.pdf?sequence=1. – (Дата обращения: 26.02.2018).
- [14] Пат. № 2459293 Российская Федерация, МПК⁷ G 21D1/00. Турбинная установка атомной электростанции (варианты) / Аминов Р.З., Байрамов А.Н., Егоров А.Н.; заявители и патентообладатели Аминов Р.З, Байрамов А.Н., Егоров А.Н. – № 2011123255/07; заявл. 08.06.2011; опубл. 20.08.2012, – Бюл. № 23. – 9 с.
- [15] Аминов, Р.З. Резервирование собственных нужд АЭС в условиях полного обесточивания на основе водородного цикла [Текст] / Р.З. Аминов, А.Н. Егоров, В.Е. Юрин // Атомная энергия. – 2013. – № 4 (114). – С. 234–236.
- [16] Bairamov, A.N. Evaluation of the operating resource of the most loaded rotor element of the additional steam turbine with steam-hydrogen overheating of the working fluid at a nuclear power station [Text] / A.N. Bairamov // Journal of Physics: Conference Series. – 2017. – Vol. 891. – P. 012252.
- [17] Aminov, R.Z. Nuclear power plant safety improvement based on hydrogen technologies [Text] / R.Z. Aminov, V.E. Yurin // Nuclear Energy and Technology. – 2015. – С. 77–81.
- [18] Пат. № 2488903 РФ, МПК7G21D5/16 (2006.01). Система сжигания водорода в цикле АЭС с регулированием температуры водород-кислородного пара / Аминов Р.З., Байрамов А.Н., Юрин В.Е.; заявители и патентообладатели Аминов Р.З., Байрамов А.Н., Юрин В.Е. – № 2012118303/07; заявл. 03.05.12; опубл. 27.07.13, Бюл. № 21. – 17 с. : ил.
- [19] Механика разрушения и прочность материалов: справочное пособие / Под общ. ред. В.В. Панасюка. – Т. 4. – Киев: Наук. думка, 1990. – 680 с.
- [20] Машиностроение: энциклопедия по машиностроению [Текст] / Ред. совет: К.В.Фролов [и др.]. – Т. II-1. – М.: Машиностроение, 2010. – 852 с.
- [21] Когаев, В.П. Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность [Текст] / В. П. Когаев, Н. А. Махутов, А.П. Гусенков. – М.: Машиностроение, 1985. – 223 с.
- [22] Павлов, П.А. Основы инженерных расчетов элементов машин на усталость и длительную прочность [Текст] / П.А. Павлов. – Л.: 1988. – 252 с.
- [23] Трощенко, В.Т. Трещиностойкость металлов при циклическом нагружении [Текст] / В.Т. Трощенко, В.В. Покровский, А.В. Прокопенко. – Киев: Наукова думка, 1987. – 256 с.
- [24] Черепанов, Г.П. Механика хрупкого разрушения [Текст] / Г.П.Черепанов. – М.: Наука, 1974. – 640 с.
- [25] Лашинский, А.А. Основы конструирования и расчета химической аппаратуры [Текст] / А.А. Лашинский, А.Р. Толчинский / Под редакцией Н.Н. Логинова. – Л.: Машиностроение. 1970. – 752 с.
- [26] Арчаков, Ю.И. Водородоустойчивость стали. Серия: достижения отечественного металловедения [Текст] / Ю.И. Арчаков. – М.: Металлургия, 1978. – 152 с.
- [27] Арчаков, Ю.И. Водородная коррозия стали [Текст] / Ю.И. Арчаков. – М.: Металлургия, 1985. – 192 с.
- [28] Шпильрайн, Э.Э. Введение в водородную энергетику [Текст] / Э.Э. Шпильрайн, С. П. Малышенко, Г.Г. Кулешов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 264с.
- [29] Якименко, Л. М. Электролиз воды [Текст] / Л.М. Якименко, И.Д. Модылевская, З.А. Ткачек. – М.: Химия, 1970. – 263с.



[30] Байрамов, А.Н. Техничко-экономические аспекты подземного размещения металлических емкостей хранения водорода и кислорода в составе водородного энергетического комплекса [Текст] / А.Н. Байрамов // Труды академэнерго. – 2014. – № 2. – С. 79–86.

[31] Байрамов, А.Н. Системный анализ напряженно-циклического режима работы основного оборудования водородного энергетического комплекса [Текст] / А.Н. Байрамов // Труды академэнерго. – 2017. – № 1. – С. 71–96.

[32] Аминов, Р.З. Разработка дифференциальных уравнений выработки энергии при дополнительном подводе тепла во влажно-паровых циклах АЭС [Текст] / Р.З. Аминов, А.Н. Егоров // Вестник СГТУ. – 2011. – №1 (54). – С.18–25.

[33] Малышенко, С.П. Исследования и разработки ОИВТ РАН в области технологий водородной энергетики [Текст] / С.П. Малышенко // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» (ISJAEЕ). – 2011. – № 3 (95). – С.10–34.

[34] Разработка и исследование экспериментального водородо-кислородного парогенератора мощностью 10 МВт(т) [Текст] / И.Н. Бебелин [и др.] // Теплоэнергетика. – 1997. – № 8. – С. 48–52.

[35] Егоров, А.Н. Исследование параметров водород-кислородного парогенератора с охлаждаемой камерой сгорания [Текст] / А.Н. Егоров // Труды Академэнерго. – 2017. – № 4. – С. 16–23.

References

[1] Strategy Energy of Russia on Period Till 2035 year (Energeticheskaya strategiya Rossii na period do 2035). The Ministry of Energy of the Russian Federation (Ministerstvo energetiki Rossiiskoi Federatsii). Moscow, 2014 (in Russ.).

[2] Aminov R.Z., Bairamov A.N. Kombinirovanie vodorodnykh energeticheskikh tsiklov s atomnymi elektrostantsiyami. Moscow: Nauka Publ., 2016 (in Russ.).

[3] Aminov R.Z., Bairamov A.N. Performance evaluation of hydrogen production based on off-peak electric energy of the nuclear power plant (Otsenka effektivnosti polucheniya vodoroda na baze vnepekovoi elektroenergii AES), *International journal of hydrogen energy*, 2017;42:21617–21625 (in Eng.).

[4] Aminov R.Z., Schastlivtsev A. I., Bairamov A. N. On the issue of investigating the kinetics of processes in dissociated water steam (K voprosu issledovaniya kinetiki protsessov v dissotsirovannom vodyanom pare),

International journal of hydrogen energy, 2017;42:20843–20848 (in Eng.).

[5] Aminov R.Z., Bairamov A. N. Hydrogen production competitive efficiency estimated with the method of water electrolysis on basis off-peak electricity (Otsenka konkurentnoi effektivnosti polucheniya vodoroda metodom elektroliza vody na osnove vnepekovoi elektroenergii), *Izvestiya RAN. Energetika*, 2016;4:84–90 (in Russ.).

[6] Aminov R.Z., Bairamov A. N. System efficiency investigation of hydrogen cycles on basis off-peak electricity of a nuclear power plant (Sistemnaya effektivnost' vodorodnykh tsiklov na osnove vnepekovoi elektroenergii AES), *Izvestiya RAN. Energetika*, 2011;4:52–61 (in Russ.).

[7] Aminov R.Z., Bairamov A.N. Pat. 2427048 RF, MPK7 F 22B 1/26, G 21D5/16, F 01K3/18. System combustion of hydrogen for steam-hydrogen overheating of fresh steam in the cycle of an atomic power station (Sistema szhiganiya vodoroda dlya paro-vodorodnogo peregreva svezhego para v tsikle atomnoi elektricheskoi stantsii) / 20.08.2011, Bul. № 23, 8 p. (in Russ.).

[8] Aminov R.Z., Egorov A.N. Methods of estimation of thermodynamic efficiency of additional heat in humid-steam cycles of atomic power plant (Metodika otsenki termodinamicheskoi effektivnosti dopolnitel'nogo podvoda tepla vo vlazhno-parovykh tsiklakh AES), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Problemy energetiki*, 2011;11–12:20–29 (in Russ.).

[9] Shpil'rain E.E., Sarumov Yu.A., Popel' O.S. Use of hydrogen in power engineering and in energytechnological complexes (Primenenie vodoroda v energetike i v energotekhnologichekikh kompleksakh), *Atomno-vodorodnaya energetika i tekhnologiya*, 1982;4:5–22 (in Russ.).

[10] Malysenko S.P., Nazarova O.V., Sarumov Yu.A. Some aspects of the use of hydrogen as energy carrier in power engineering some thermodynamic and technical-economy aspects about this (Nekotorye termodinamicheskie i tekhniko-ekonomicheskie aspekty primeneniya vodoroda kak energonositelya v energetike), *Atomno-vodorodnaya energetika i tekhnologiya*, 1986;7:105–126 (in Russ.).

[11] Forsberg C.W., Haratyk G. Nuclear Wind hydrogen systems for variable electricity and hydrogen production (Atomnye vodorodnye sistemy dlya proizvodstva elektroenergii i vodoroda), *International Congress on Energy*, New York, 2011. Available on: <https://www.aiche.org/academy/videos/conference-presentations/nuclear-wind-hydrogen-systems-variable-electricity-and-hydrogen-production> (26.02.2018) (in Eng.).



[12] Forsberg C. W. Is hydrogen the future of nuclear energy? (Yavlyaetsya li vodorod budushchim yadernoi energii?), *International topical meeting on the safety and technology of nuclear hydrogen production, control and management*, Boston, 2007. Available on: <http://www.350.me.uk/TR/Hansen/Forsberg01.pdf> (26.02.2018) (in Eng.).

[13] Forsberg C. W. Hydrogen futures and technologies (Budushchie vodorodnye tekhnologii), *Rohsenow Symposium on Future Trends in Heat Transfer*, Massachusetts, 2003. Available on: https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/7303/FO_RSBURG.pdf?sequence=1 (26.02.2018) (in Eng.).

[14] Aminov R.Z., Bairamov A.N., Egorov A.N. Turbine plant of the nuclear power plant (options) (Turbinnaya ustanovka atomnoi elektrostantsii (varianty)). Pat. № 2459293 RF, MPK7 G 21D1/00. / 20.08.2012, Bul. № 23, 9 p. (in Russ.).

[15] Aminov R.Z., Egorov A.N., Yurin V.E. Reservation of NPP's own needs in conditions of de-energization based on the hydrogen cycle (Rezervirovanie sobstvennykh nuzhd AES v usloviyakh polnogo obestochivaniya na osnove vodorodnogo tsikla), *Atomnaya energiya*, 2013;4 (114):234–236 (in Russ.).

[16] Bairamov A.N. Evaluation of the operating resource of the most loaded rotor element of the additional steam turbine with steam-hydrogen overheat of the working fluid at a nuclear power station (Otsenka rabocheho resursa naibolee nagruzhennogo elementa rotora dopolnitel'noi parovoi turbiny s paro-vodorodnym peregrevom rabocheho tela v sostave AES), *Journal of Physics: Conference Series*, 2017;891 (in Eng.).

[17] Aminov R.Z., Yurin V.E. Nuclear power plant safety improvement based on hydrogen technologies (Puti povysheniya bezopasnosti AES na osnove vodorodnykh tekhnologii). *Nuclear Energy and Technology*, 2015;1:77–81 (in Eng.).

[18] Aminov R.Z., Bairamov A.N., Yurin V.E. System of hydrogen burning in the nuclear power plant cycle with the adjustment of the temperature of hydrogen-oxygen steam (Sistema szhiganiya vodoroda v tsikle AES s regulirovaniem temperatury vodorod-kislorodnogo para). Pat. №2488903 RF, MPK7G21D5/16 (2006.01) / 27.07.13, Bul. 21, 17 p. (in Russ.).

[19] Mechanics of Destruction and Strength of Materials (Mekhanika razrusheniya i prochnost' materialov: spravocnoe posobie) / Ed. V.V. Panasyuka, Kiev: Nauk. dumka Publ., 1990;4:680 (in Russ.).

[20] Machine-Building: Encyclopedia on Machine-Building (Mashinostroenie: entsiklopediya po mashinostroeniyu) / Editorial Board: K.V. Frolov [et al.]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2010;II-1:852 (in Russ.).

[21] Kogaev V.P., Makhutov N. A., Gusenkov A.P. The Calculations Detail of Machines and Constructions on Strength and Long-Lived (Raschety detalei mashin i konstruktсии na prochnost' i dolgo-vechnost'). Moscow: Mashinostroenie, 1985:223 (in Russ.).

[22] Pavlov P.A. The Foundations of Engineering's Calculations of Elements Machines on Fatigue and Long-Lived Strength (Osnovy inzhenernykh raschetov elementov mashin na ustalost' i dlitel'nyuyu prochnost'), Leningrad, 1988:252 (in Russ.).

[23] Troshchenko V.T., Pokrovskii V.V., Prokopenko A.V. The Stability of Metals Crack in Cycles Loads (Treshchinostoikost' metallov pri tsiklicheskom nagruzhenii), Kiev: Naukova dumka Publ., 1987 (in Russ.).

[24] Cherepanov G.P. The Mechanics of Frail Destructions (Mekhanika khрупкого razrusheniya) Moscow: Nauka, 1974:640 (in Russ.).

[25] Lashchinskii A.A., Tolchinskii A.R. Basics calculating and designing chemical equipment (Osnovy konstruirovaniya i rascheta khimicheskoi aparatury) / Ed. N.N. Loginova. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1970 (in Russ.).

[26] Archakov Yu. I. Hydrogen resistance of steel. Series: the achievements of domestic metallurgy (Vodorodoustoichivost' stali. Seriya: dostizheniya otechestvennogo metallovedeniya) Moscow: Metallurgiya Publ., 1978:152 (in Russ.).

[27] Archakov Yu.I. Hydrogen corrosion of steel (Vodorodnaya korroziya stali), Moscow: Metallurgiya Publ., 1985:192 (in Russ.).

[28] Shpil'rain E.E., Malysenko S. P., Kuleshov G. G. Introduction to hydrogen power engineering (Vvedenie v vodorodnyuyu energetiku), M.: Energoatomizdat, 1984:264 (in Russ.).

[29] Yakimenko L.M., Modylevskaya I. D., Tkachek Z.A. Electrolysis of water (Elektroliz vody), Moscow: Khimiya Publ., 1970 (in Russ.).

[30] Bairamov A. N. Technical and economic aspects placement of the underground of metal storage tanks for hydrogen and oxygen in the hydrogen energy complex (Tekhniko-ekonomicheskie aspekty podzemnogo razmeshcheniya metallicheskih emkosteí khraneniya vodoroda i kisloroda v sostave vodorodnogo energeticheskogo kompleksa), *Trudy akademenergo*, 2014;2:79–86 (in Russ.).

[31] Bairamov A.N. System analysis operation of the main equipment of the hydrogen energy complex of the stress-cyclic mode (Sistemnyi analiz napryazhenno-tsiklicheskogo rezhima raboty osnovnogo oborudovaniya vodorodnogo energeticheskogo kompleksa), *Trudy akademenergo*, 2017;1:71–96 (in Russ.).

[32] Bairamov A.N., Egorov A. N. Estimation of the geometric size of the two-stage combustion system of



hydrogen with oxygen in the steam turbine cycle of the nuclear power plant (Otsenka geometricheskikh razmerov dvukhstupenchatoi sistemy szhiganiya vodoroda s kislorodom v paroturbinnom tsikle atomnoi stantsii). *Trudy akademenergo*, 2014;1:41–53 (in Russ.).

[33] Aminov R.Z., Egorov A.N. Development production energy differential equations with additional heat supply in humid-steam cycles of nuclear power plants (Razrabotka differentsial'nykh uravnenii vyrabotki energii pri dopolnitel'nom podvode tepla vo vlazhno-parovykh tsiklakh AES). *Vestnik SGTU*, 2011;1(54):18–25 (in Russ.).

[34] Malysenko S.P. The Institute of High Temperatures of RAS research and development in the field of hydrogen energy technologies (Issledovaniya i

razrabotki OIVT RAN v oblasti tekhnologii vodorodnoi energetiki), *International Scientific Journal for Alternative Energy and Ecology (ISJAE)*, 2011;3(95):10–34 (in Russ.).

[35] Bebelin I.N. [and others] Development and investigation of an experimental hydrogen-oxygen generator with a capacity of 10 MW (heat) (Razrabotka i issledovanie eksperimental'nogo vodorodo-kislorodnogo parogeneratora moshchnost'yu 10 MVt(t)). *Thermal Engineering*, 1997; 8:48–52 (in Russ.).

[36] Egorov A.N. Parameters study of a hydrogen-oxygen steam generator with a cooled combustion chamber (Issledovanie parametrov vodorod-kislorodnogo paro-generatora s okhlazhdaemoi kameroi sgoraniya), *Trudy Akademenergo*, 2017;4:16–23.

Транслитерация по BSI



TATA

VII Международная конференция с элементами научной школы для молодежи

ФНМ 2018

Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества



Уважаемые коллеги!

Приглашаем Вас принять участие в работе VII Международной конференции с элементами научной школы для молодежи «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества», которая является крупным международным научным форумом, охватывающим: фундаментальные основы разработки наноматериалов функционального назначения, в том числе металлических, особо чистых, керамических, полимерных и композиционных; технологические основы создания наноматериалов; проблемы анализа, аттестации функциональных наноматериалов и их применение, а также экономическую эффективность использования инновационных разработок в этой области.

Основная тематика конференции

- Секция 1. Магнитные материалы и системы
- Секция 2. Композиционные материалы, включая полимерные
- Секция 3. Функциональные неорганические материалы, включая высокочистые
- Секция 4. Инновационные технологии получения и обработки давлением неорганических материалов

Вопросы, рассматриваемые в рамках тематики конференции:

1. Размерно-структурный и примесный факторы в материаловедческих и технологических разработках
2. Информационные технологии в материаловедческих и технологических разработках
3. Инновационные технологии порошковой и гранульной металлургии
5. Структура и свойства функциональных неорганических материалов
6. Новые подходы к обработке металлов давлением
7. Методы исследования функциональных наноматериалов
8. Инновационные технологии получения, очистки и обработки неорганических материалов
9. Редкоземельные металлы: природные ресурсы, получение, очистка, создание функциональных материалов с их участием в новейших отраслях техники
10. Композиционные материалы в конструкциях ракетно-космической техники. Структура и свойства УККМ
11. Функциональная керамика
12. Инновационные области применения функциональных неорганических материалов

В рамках VII Международной конференции «Функциональные наноматериалы и высокочистые вещества» будет проходить молодежная школа-конференция

Научная программа молодежной школы-конференции предусматривает:

лекции ведущих специалистов из крупнейших научных центров России и зарубежных университетов; молодежные сессии, на которых молодые ученые смогут выступить с устными и стендовыми докладами; конкурс научных докладов.

Будем рады видеть Вас в г. Суздале!

<http://ru.fnm2018.imetran.ru/>