

PACS 82.80Gk;81.40.Np

## НАКОПЛЕНИЕ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА ПРИ РАДИАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОМ И ТЕРМИЧЕСКОМ РАЗЛОЖЕНИИ ВОДЫ В КОНТАКТЕ С ЦИРКОНИЙ-НИОБИЕВЫМ СПЛАВОМ

Т.Н.АГАЕВ, И.А.ФАРАДЖ-ЗАДЕ, С.М.АЛИЕВ, И.А.МАМЕДЬЯРОВА

Министерство Науки и образования, Институт Радиационных Проблем  
AZ 1143, Азербайджан, г. Баку, ул. Б. Вагабзаде, 9  
*agayevteymur@rambler.ru.*

Получена: 17.04.2024

Принята к печати: 02.10.2024

### РЕФЕРАТ

Исследована кинетика накопления молекулярного водорода на поверхности сплава Zr+1%Nb при различных температурах под действием  $\gamma$ -квантов. Установлено, что скорость радиационной составляющей радиационно-термических процессов, зависящая от мощности излучения, плотности паров воды в среде и температуры, становится заметной в области температур, в которой  $W_T(H_2) < W_{PT}(H_2)$ . Для реакторного циркония и сплава Zr+1%Nb эта область соответствует  $T \sim 300 \div 923\text{K}$  и определена энергия активации процессов.

Ключевые слова: радиолиз, кинетика, молекулярный водород, цирконий, цирконий-ниобиевый сплав.

### ВВЕДЕНИЕ

Циркониевые сплавы благодаря низкому сечению захвата тепловых нейтронов и высокой коррозионной стойкости являются наиболее распространенными материалами первого контура ядерных реакторов. Из них изготавливают оболочки твэлов, трубы высокого давления. Циркониевые сплавы в нормальных или же в аварийных режимах ядерных реакторов в контакте с теплоносителем подвергаются воздействию потоков излучения и температуры. При этом происходит коррозия этих материалов, что приводит к не желаемым последствиям. Коррозия всех циркониевых сплавов чувствительна к реакторной радиации [1-5]. Процесс коррозии циркониевых сплавов чрезвычайно сложен, и нельзя утверждать, что в его понимании достигнута полная ясность. В коррозионной кинетике многих циркониевых сплавов [4-7] можно условно выделить две основные области, разделенные точкой перехода. В переходном периоде окисление носит защитный характер и постепенно замедляется. В

момент перехода скорость возрастает и затем становится приблизительно постоянной. Однако закономерности газовыделения при термических процессах и влияние облучения при различных давлениях, температурах и интенсивности излучения не изучены. Особое место в ядерной энергетике и ядерной промышленности занимает проблема создания и модернизации конструкционных материалов с оптимальной микроструктурой и высокими эксплуатационными свойствами [15]. К конструкционным материалам активной зоны ядерных реакторов принадлежат, прежде всего, циркониевые сплавы и стали. Циркониевые сплавы с различными легирующими добавками обладают высокими механическими и прочностными характеристиками, высокой коррозионной стойкостью при эксплуатации в воде в условиях интенсивного нейтронного облучения. Использование сплавов на основе циркония будет продолжаться и в новых типах реакторов при повышенных температурах эксплуатации тепловыделяющих элементов с целью увеличения степени выгорания ядерного топ-

лива и длительности эксплуатации циркониевых оболочек в маневренных условиях реакторной кампании.

Практическая важность циркония и его сплавов в ядерных технологиях и реакторостроении вызвала значительное число фундаментальных и прикладных исследований сплавов циркония, что привело к уникальному многообразию литературных данных по структуре, фазовым превращениям, облучению и коррозии сплавов. Применение ядерно-физических методов исследования сплавов привело к существенному расширению мультидиапазона исследований и многомасштабного моделирования (включая макро-, микро-, - мезо-, и наноструктуру) металлов и сплавов. Это повысило информативность и точность анализа структурно-фазовых превращений, моделирования и формирования многомасштабных структур в сплавах, и позволило для сплавов циркония, как и для ряда других сплавов переходных металлов [20,21], сформулировать и сформировать новый раздел в физическом металловедении циркония - ядерно-физическое металловедение циркония и его сплавов [22-24].

В данной работе исследована кинетика накопления молекулярного водорода на поверхности сплава Zr+1%Nb при различных температурах под действием  $\gamma$ -квантов.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

В экспериментальных работах создавалась модель реакторных условий контакта конструкционных материалов с теплоносителем. Исследования проводились в статических условиях в специальных кварцевых ампулах объемом 0,25÷0,30 см<sup>3</sup>. В качестве объекта исследования брали реакторный цирконий чистотой 99,9 %, сплав циркония с 1%Nb марки ЗИ-110 в виде тонкой ленты. Контактирующую поверхность образцов определяли на основе их геометрических размеров. С целью исключения вклада органических загрязнений на поверхности в процесс накопления H<sub>2</sub>, образцы предварительно очищались органическими растворителями, этиловым спиртом, ацетоном,

а затем промывались дистиллированной водой. Эту операцию повторяли три раза, после чего образцы высушивали в среде инертного газа при температуре 300÷320К. Высушивание продолжали с одновременной откачкой среды. После чего образцы в кварцевых ампулах подвергали термовакуумной обработке сначала при T=373К, затем при T=673К, P~10<sup>-2</sup> мм.рт.ст. Наполнение ампул водой и запаивание производилось на вакуумно-адсорбционной установке. Плотность паров воды в ампулах составляла ρ<sub>H2O</sub>=5 мг/см<sup>3</sup>. В интервале температур T~673÷773К в объеме ампул давление паров воды составляло P<8 атм.

Температура при проведении экспериментов поддерживалась с точностью ±1С. Радиационные и радиационно-термические процессы проводились на изотопном источнике  $\gamma$ -квантов <sup>60</sup>Со. Дозиметрия источника производилась химическими дозиметрами - ферросульфатным, циклогексановым и метаном. Перерасчет дозы в исследуемой системе производился сравнением электронных плотностей [17].

Газовые продукты процессов переводились в специальные градуированные объемы и анализировались методом газовой хроматографии («Agilent-7890»). При радиолитическом процессе при 296К в составе газовых продуктов кроме H<sub>2</sub> наблюдается также O<sub>2</sub>, а при терморадиационном процессе наблюдается только H<sub>2</sub>.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследована кинетика накопления водорода при радиолизе воды в присутствии металлического циркония под воздействием  $\gamma$ -излучения в статистических условиях при комнатной температуре. На Рис.1 приведены кинетические кривые накопления H<sub>2</sub> при радиолизе чистой воды (кр.1) и в присутствии циркония (кр.2). Радиационно-химический выход водорода при радиолизе воды в условиях экспериментов соответствует литературным значениям выхода молекулярного водорода и равен 0,44 молекул/100эВ. В присутствии пластиинки металлического циркония (m<sub>Zr</sub>~0,06 гр;

$S_{\text{пов.}} \sim 1,95 \text{ см}^2$ ) выход молекулярного водорода растет до  $G_{\text{адс.}}(\text{H}_2) = 0,55 \text{ молекул}/100 \text{ эВ}$  энергии, поглощенной со стороны воды. Прирост значения радиационно-химического выхода при радиолизе воды в присутствии циркония  $\Delta G = 0,14 \text{ молекул}/100 \text{ эВ}$  можно объяснить, с одной стороны, вкладом  $\delta$ -электронов, эмиссионных из металла под воздействием  $\gamma$ -квантов, с другой стороны, акцептированием OH-групп металлической фазой.

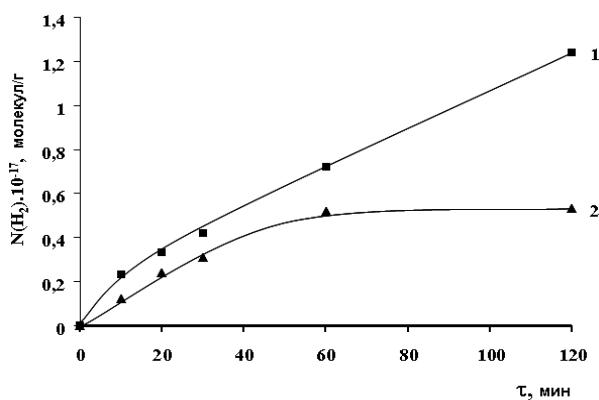


Рис.1

Кинетика накопления  $\text{H}_2$  при радиолизе чистой воды (1) и системы  $\text{Zr}+\text{H}_2\text{O}$  (2) при  $T=300 \text{ K}$ ,  $D=0,7 \text{ Гр/с}$ ,  $m_{\text{H}_2\text{O}}=0,1 \text{ г}$ ,  $m_{\text{Zr}}=0,06 \text{ г}$ .

Исследована кинетика накопления молекулярного водорода при термическом и радиационно-термическом разложении воды в контакте со сплавом  $\text{Zr}+1\% \text{Nb}$ . Образцы сплава брали в виде тонкой пленки. Площадь на единицу массы сплава составляла  $8,56 \text{ см}^2/\text{г}$ . При радиолизе воды в контакте с цирконий-ниобиевым сплавом в качестве газового продукта образуется водород. На поверхности циркония происходит коррозия с образованием оксидной пленки. В результате этих процессов наблюдается изменение веса и цвета образцов цирконий-ниобиевого сплава [10-14]. При гетерогенном радиолизе в интервале температур  $T=300 \div 473 \text{ K}$  цвет сплава почти не меняется, а при повышении температуры  $T > 473 \text{ K}$  поверхность сплава обретает черный цвет, который объясняется образованием оксидной пленки. Образование молекулярного водорода при радиационно-термическом разложении воды в контакте с цирконий-ниобиевым сплавом схематически можно представить следующим образом



С целью выявления вклада радиационного процесса исследована кинетика накопления при радиационно-термическом и термическом разложении воды в контакте со сплавом при различных температурах ( $T \sim 473 \div 1073 \text{ K}$ ). На Рис.2-Рис.4 приведены кинетические кривые накопления  $\text{H}_2$  в результате радиационно-термического и термического разложения воды. На основе этих кривых определены скорости радиационно-термического  $W_{\text{pt}}(\text{H}_2)$  термического  $W_t(\text{H}_2)$  процессов и по их разности скорость радиационного процесса  $W_p(\text{H}_2)$  образования  $\text{H}_2$  на единицу поверхности ( $\text{см}^{-2}$ ) сплава [13].

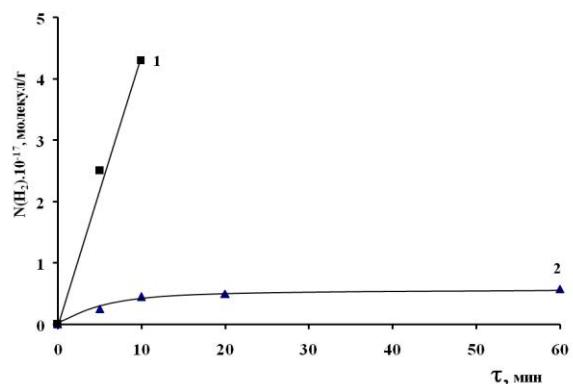


Рис.2

Кинетика накопления  $\text{H}_2$  при термическом (1) и радиационно-термическом (2) процессах разложения воды в контакте со сплавом  $\text{Zr}+1\% \text{Nb}$  при  $T=473 \text{ K}$ ,  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}=5 \text{ Г/см}^3$ .

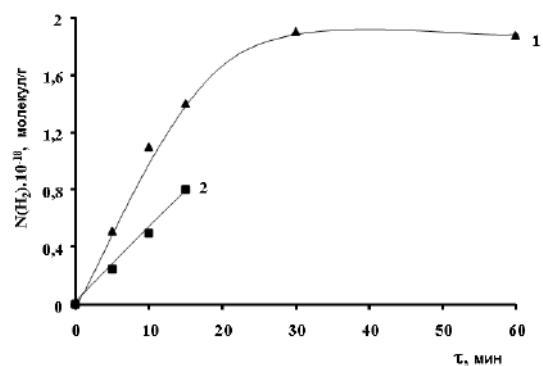


Рис.3

Кинетика накопления  $\text{H}_2$  при термическом (1) и радиационно-термическом (2) разложении воды в контакте со сплавом  $\text{Zr}+1\% \text{Nb}$ , при  $T=573 \text{ K}$ ,  $\rho_{\text{H}_2\text{O}}=5 \text{ Г/см}^3$ ,  $D=0,7 \text{ Гр/с}$ .

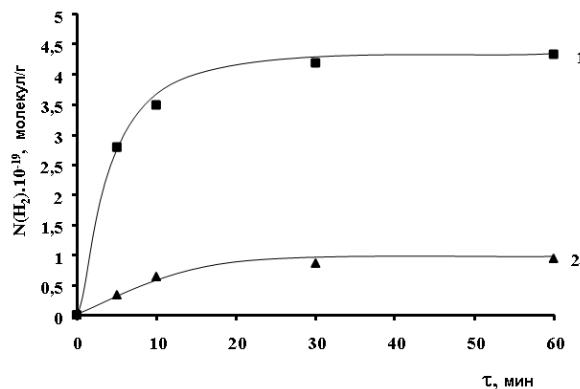


Рис.4

Кинетика накопления водорода при термическом (2) и радиационно-термическом (1) разложении воды в контакте со сплавом Zr+1%Nb при  $T=773\text{K}$ ,  $\rho_{H_2O}=5\text{мг}/\text{см}^3$ ,  $D=0,7\text{Гр}/\text{с}$ .

Сравнение значений  $W_{pt}(H_2)$  и  $W_t(H_2)$  показывает, что вклад радиационных процессов в радиационно-термическом процессе накопления  $H_2$  при разложении воды в контакте со сплавом уменьшается, а с увеличением температуры и при  $T>1073\text{K}$  становится незаметным по сравнению с термическим процессом. Зависимость  $W_{pt}(H_2)$  и  $W_t(H_2)$  от температуры приведена на Рис.5. На основе зависимостей  $lgW_1(H_2)=f(1/T)$  определены энергии активации радиационного и термического процессов, которые равны  $48,36\text{кДж}/\text{моль}$  и  $55,47\text{кДж}/\text{моль}$ , соответственно.

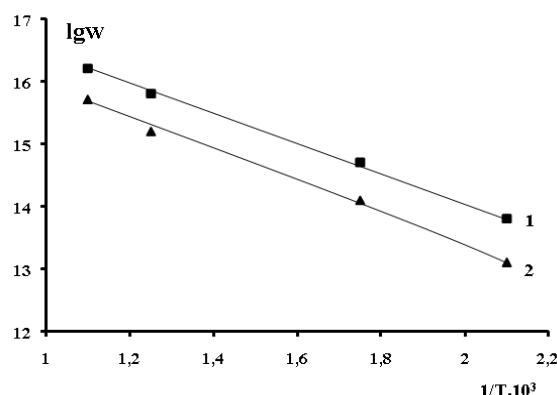


Рис.5

Зависимость  $lgW = f(1/T)$  термической (2) и радиационной (1) составляющих радиационно - термического процесса разложения воды в контакте со сплавом Zr+1%Nb

Как видно из полученных результатов радиационные процессы приводят к повыше-

нию скорости процесса и к повышению скорости процесса накопления  $H_2$  при разложении воды в контакте со сплавом, что приводит к смещению температурой зависимости скорости на  $100\div150\text{K}$  в область низких температур. Сравнение кинетических кривых накопления молекулярного водорода при радиационно-термическом и термическом разложении воды в контакте с металлическим цирконием и сплавом Zr+1%Nb показывает, что в отличие от металлического циркония в процессах с участием сплава в кинетических кривых спада не наблюдается. Это связано с тем, что в условиях эксперимента металлический цирконий поглощает определенную часть продукта процесса с образованием гидридной фазы [16-18]. В случае сплава спад в кинетических кривых наблюдается только при  $T=1073\text{K}$ . Как известно, образование гидридной фазы в металлах приводит к разрушению их структуры, и они становятся хрупкими. Образцы металлического циркония при температурах  $T>773\text{K}$ , а сплав Zr+1%Nb при  $T>1073\text{K}$  становятся хрупкими. Как видно из уравнения (1), скорость радиационно-термического процесса должна зависеть от поверхностной площади металла, температуры, мощности излучения и давления паров воды  $W(v/pt)=f(S, T, \rho_{H_2O}, I)$ . В наших экспериментах  $S_{\text{образцов}}=\text{const}$ . Как видно из приведенных выше результатов, температурная зависимость выражается уравнением Арренауса

$$W_1 = W_0 \cdot e^{-E/RT}.$$

С целью выявления закономерностей зависимости скоростей радиационно-термического, термического и радиационного процессов накопления водорода в результате разложения воды в контакте со сплавом Zr+1%Nb от давления воды исследована кинетика радиационно-термического и термического процессов накопления  $H_2$  при различных плотностях паров воды  $\rho_{H_2O}$  при  $T\sim 873\text{K}$ . На Рис.6-Рис.9 приведены зависимости  $W_{pt}(H_2)$ ,  $W_t(H_2)$  и  $W_p(H_2)$  от плотности паров воды при  $T=\text{const}$  ( $T=873\text{K}$ ). Зависимость  $W_1(H_2)=f(\rho_{H_2O})$  может быть описана уравнением

$$W_1(H_2)=Kb \rho_{H_2O}/I + b \rho_{H_2O},$$

где  $W_1(H_2)$  - скорость процесса (молекул·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>),  
 $b$  - константа адсорбционного равновесия на поверхности,  $\rho_{H2O}$  - плотность паров воды (МГ/см<sup>3</sup>),  
 $K$  - константа скорости.

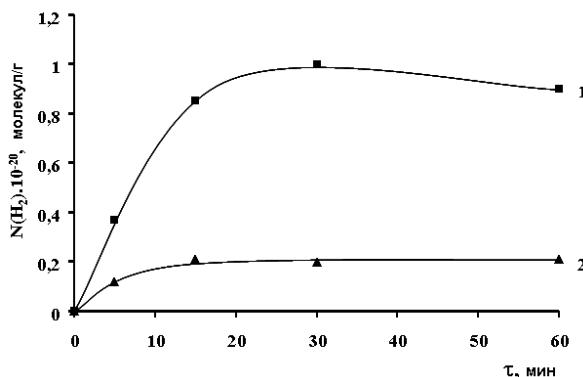


Рис.6

Кинетика накопления водорода при термическом (2) и радиационно-термическом (1) разложении воды в контакте со сплавом Zr+1%Nb при  $T=873\text{K}$ ,  $\rho_{H2O}=5\text{MG}/\text{cm}^3$

При малых значениях  $\rho_{H2O}<1\text{MG}/\text{cm}^3$ ,  $b\rho_{H2O}<1$ ,  $W_1(H_2)=\rho_{H2O}$  - скорость процессов линейно растет с  $\rho_{H2O}$ , а при  $b\rho_{H2O}>1$ ,  $W_1(H_2)=\text{const}$  и не зависит от плотности паров воды. Ввиду того, что стационарная область в этих зависимостях наблюдается при  $\rho_{H2O}>5\text{MG}/\text{cm}^3$ , кинетика и влияние других параметров эксперимента изучены при  $\rho_{H2O}=5\text{MG}/\text{cm}^3$ .

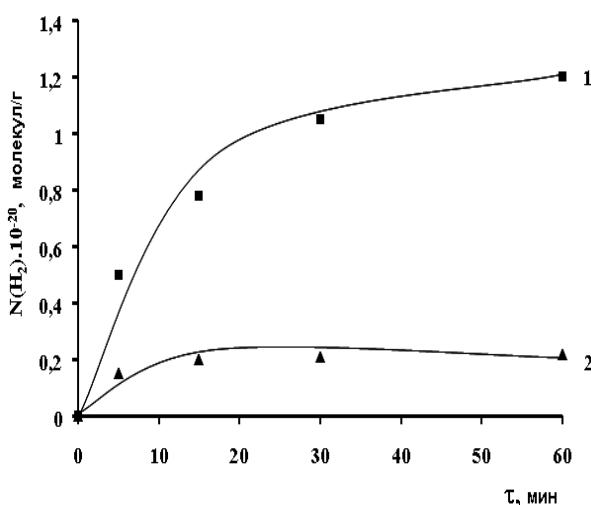


Рис.7

Кинетика накопления водорода при термическом (2) и радиационно-термическом (1) разложении воды в контакте со сплавом Zr+1%Nb при  $T=873\text{K}$ ,  $\rho_{H2O}=5\text{MG}/\text{cm}^3$

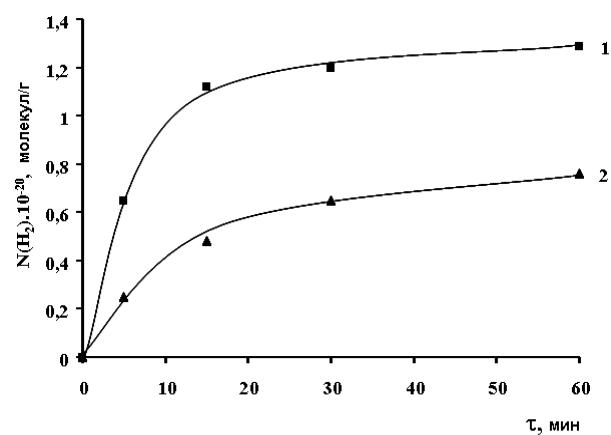


Рис.8

Кинетика накопления водорода при термическом (1) и радиационно-термическом (2) разложении воды в контакте со сплавом Zr+1%Nb при  $T=873\text{K}$ ,  $\rho_{H2O}=10\text{MG}/\text{cm}^3$

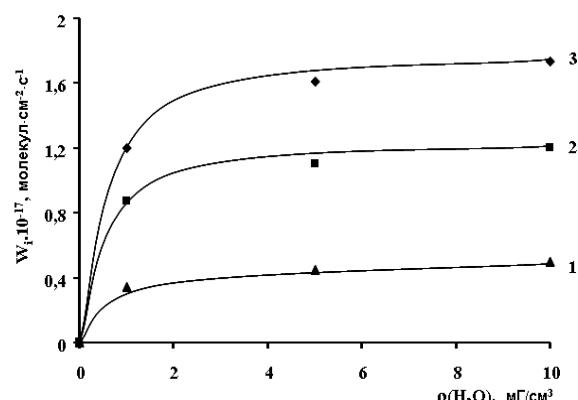


Рис.9

Зависимости скоростей накопления водорода при термическом (1), радиационно-термическом (3) и радиационном (2) процессах разложения воды в контакте со сплавом Zr+1%Nb от плотности паров воды при  $T=873\text{K}$ .

С целью выявления закономерностей влияния мощности дозы облучения на скорость накопления  $H_2$  при радиационно-термических процессах разложения воды в контакте с цирконий-ниобиевым сплавом исследована кинетика накопления  $H_2$  при различных мощностях поглощенной дозы облучения. Мощность поглощенной дозы облучения экспериментально определялась ферросульфатным методом и в экспериментах изменялась в интервале  $0,013\div0,7\text{Гр/с}$ . На Рис.10 приведены кинетические кривые накопления  $H_2$  при радиационно-термическом разложении воды в контакте с цирконий-ниобиевым сплавом

вом при различных мощностях дозы облучения.

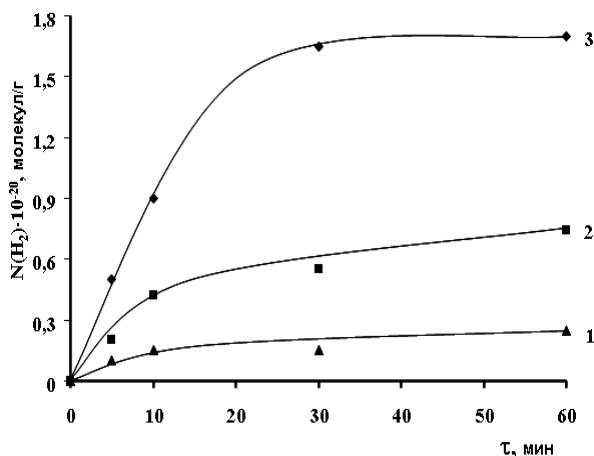


Рис.10

Кинетика накопления водорода при термическом и радиационно – термических процессах разложения воды в контакте со сплавом Zr+1%Nb при  $T = 873$  К при различных мощностях дозы

- 1 – термический процесс;
- 2 – радиационно-термический  $D = 0,13$  Гр/с;
- 3 – радиационно-термический  $D = 0,21$  Гр/с.

На основе данных из Рис.10 определены значения скоростей процессов и на Рис.11 представлена зависимость  $W_p(H_2)$  от мощности излучения.

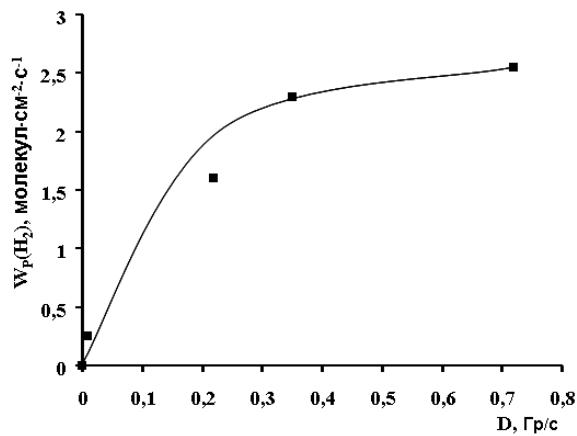


Рис.11

Зависимость скорости радиационной составляющей радиационно-термического процесса накопления  $H_2$  при контакте со сплавом Zr+1%Nb, при  $T=873$  К,  $\rho_{H2O}=5$  Г/см<sup>3</sup> от мощности излучения.

Как видно, в зависимости от мощности в области значений  $D^0=0,4\div0,7$  Гр/с наблюдается стационарная область [14]. Наличие стационарной области свидетельствует о том, что при

больших мощностях происходят обратные процессы. В качестве обратных процессов можно указать рекомбинацию промежуточных активных Н и OH продуктов распада молекул воды или же окисление молекулярного водорода кислородом. В стационарной области наступает равновесие между прямыми и обратными процессами.

При радиолизе воды образуются окислительные промежуточные и молекулярные продукты, которые могут вызывать коррозию металлических конструкционных продуктов в контакте с ними. При этом образуется окисная пленка на поверхности циркония, что приводит к изменению веса образцов. Поэтому часто закономерности коррозионных процессов в металлах изучаются весовым методом. Нами помимо изучения закономерностей накопления молекулярных газообразных продуктов изучена кинетика изменения веса образцов при радиационно-химическом разложении воды в контакте со сплавом. На Рис.12 приведены кинетические кривые коррозии сплава Zr+1%Nb при радиационном и термическом процессах разложения воды при  $T=873$  и 1073К.

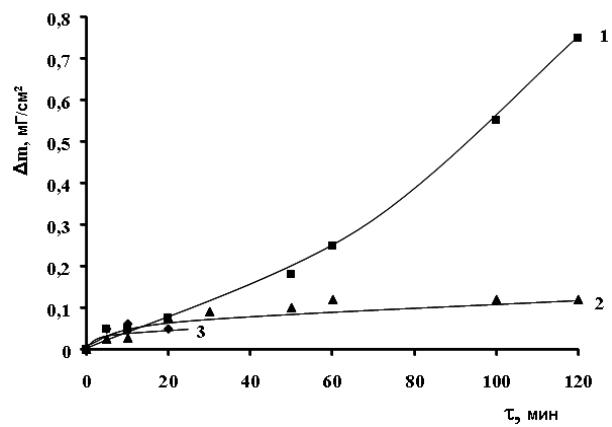


Рис.12

Кинетика коррозии цирконий-ниобиевого сплава в результате радиационно-химического и термического процессов в контакте с водой: 1 - радиационно-термический,  $T=873$  К,  $\rho_{H2O}=5$  Г/см<sup>3</sup>; 2 - термический,  $T=873$  К; 3- радиационно-термический,  $T=1073$  К.

Как видно, характер кривых для радиационно-термического и термического процессов в изучаемом временном интервале ( $t<2$  ч.) отличается. При термическом и радиационно-

термическом ( $\tau < 1\text{ч.}$ ) процессах коррозии при  $T=873\text{K}$  наблюдаются две области.

В первой быстрой - поверхность покрывается тонкой оксидной пленкой, а затем наступает пассивная область. Пассивная область может быть объяснена тем, что первичная оксидная пленка, образовавшаяся на поверхности сплава циркония, оказывает защитное действие от дальнейшей коррозии [23]. В радиационно-термических процессах после определенного времени наблюдается переход пассивной области в активную область. В термических процессах второй активной области в исследуемом интервале времени не наблюдается. Таким образом, эти результаты показывают, что под действием ионизирующего излучения оксидная пленка переходит в активную форму, которая обусловливает протекание коррозионных процессов с высокой скоростью.

Ввиду того, что в результате радиационно-термического процесса в системе сплав+ $\text{H}_2\text{O}$  при этих температурах наблюдается только газообразный водород, то коррозионный процесс можно выразить уравнением. Количество молекулярного водорода в стационарной области кинетических кривых накопления при радиационно-термическом и термическом процессах разложения воды в контакте со сплавом при  $T=873\text{K}$  составляют  $1,75 \cdot 10^{20}$  и  $2,5 \cdot 10^{19}$  молекул/г, соответственно. На основе этих результатов произведен расчет количества оксидной фазы в соответствии со стехиометрией по уравнению (1) ( $m=2 \div 3 \cdot 10^4 \text{ гр}(\text{см}^2)$ ). Наблюданное количество оксидной фазы и молекулярного водорода является стехиометрическим по уравнению (1) в пределах точности экспериментов [6,11].

Полученные результаты свидетельствуют о том, что коррозия цирконий-ниобиевого сплава при радиационно-термическом разложении воды происходит по уравнению (1). Действие ионизирующих излучений при  $T < 873\text{K}$  обуславливает образование активной формы оксидной пленки на поверхности сплава цирконий-ниобиевого сплава.

При высоких температурах ( $T > 1073\text{K}$ ) кинетика радиационно-термических и терми-

ческих процессов разложения воды в контакте с сплавом Zr+1%Nb сильно отличается от кинетики при  $T < 873\text{K}$ . Так как при температурах  $T > 1073\text{K}$  с увеличением времени контакта паров воды с сплавом ( $\tau_k > 3 \cdot 10^2 \text{ с}$ ) в условиях воздействия  $\gamma$ -квантов наблюдается уменьшение количества молекулярного водорода. При этом вес образцов Zr+1%Nb после времени контакта  $\tau_k > 3 \cdot 10^2 \text{ с}$  остается неизменным ( $\Delta m = 0$ ), а изменение веса в активной форме системы составляет Zr+1%Nb при  $T = 873\text{K}$   $\Delta m_{873} > \Delta m_{1073}$ .

Начальная концентрация водорода при температуре  $T = 1073\text{K}$  в реакционной среде ( $V = 0,25 \text{ см}^3$ ,  $m_{\text{сп}} = 0,13 \text{ гр}$ ) составляет  $N^0_{\text{H}_2} = 3,12 \cdot 10^{19}$  молекул, что соответствует значению степени превращения  $\sim 75\%$ . С учетом этих результатов наблюдаемый спад в кинетических кривых накопления  $\text{H}_2$  при разложении воды в контакте с сплавом Zr+1%Nb можно связывать с процессом захвата водорода в сплаве или же окислением  $\text{H}_2$  в реакционной среде в присутствии металлического циркония [7,8-12].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полученных результатов по исследованию закономерностей радиационно-термических, термических и радиационных процессов в контакте реакторного циркония, сплава циркония Zr+1%Nb с водой можно сделать следующие выводы:

- гетерогенные радиолитические процессы, происходящие в контакте цирконий+ $\text{H}_2\text{O}$ , сплав (Zr +1% Nb)+ $\text{H}_2\text{O}$  обусловливают повышение скорости накопления молекулярного водорода при радиолизе воды. В системах реакторный цирконий+ $\text{H}_2\text{O}$  и сплав (Zr+1%Nb)+ $\text{H}_2\text{O}$  наблюдается прирост скорости накопления молекулярного водорода на  $20 \div 25\%$  по сравнению с радиолизом чистой воды при комнатной температуре [24].
- вклад радиационно-гетерогенных процессов превышает прирост скорости накопления при радиационно-термических процессах по сравнению с термическими процессами разложения воды в контакте с металлическими конструкционными материалами. Установлено, что

скорость радиационной составляющей радиационно-термических процессов, зависящей от мощности излучения, плотности паров воды в среде и температуры, становится заметной в области температур, в которой  $W_T(H_2) < W_{PT}(H_2)$ . Для реакторного циркония и сплава Zr+1%Nb эта область соответствует  $T \sim 300 \div 923$ К. В этих интервалах вклад радиационных процессов обуславливает увеличение скоростей радиационно-термических процессов, соответствующих приросту скорости термических процессов при увеличении температуры на  $100 \div 150$ К. Поэтому пороговая температура для ускоренного накопления молекулярного водорода при термических процессах взаимодействия металлических мате-

риалов с водой под действием облучения смещается на  $100 \div 150$ К в область низких температур [25].

- при радиационно-термических и термических процессах взаимодействия реакторного циркония и сплава Zr+1%Nb с водой на их поверхности образуется оксидная пленка. Установлено, что при термических процессах образуются пассивные формы оксидной пленки, которые оказывают защитное действие от коррозии [19]. Под действием излучения после определенного времени ( $\tau_k > 1 \cdot 10^3$ с) оксидная пленка на поверхности сплава Zr+1%Nb и реакторного циркония переходит в активную форму.

1. А.А.Гаривов, В.Ф.Красноштанов, Т.Н.Агаев, Г.З.Велибекова. Эффект радиации в гетерогенных процессах в контакте циркония и сплава Zr+1%Nb с водой, Химия высоких энергий, **26** №3 (1992) 125-129.
2. А.С.Займовский, А.В.Никулина, Н.Г.Решетников. Циркониевые сплавы в ядерной энергетике, М.: Энергоатомиздат, (1994) 254.
3. А.В.Никулина. Конструкционные материалы для элементов активных зон атомных реакторов, Механ. и термич. обработка металлов, № 11 (2004) 8-12; А.В.Никулина. Циркониевые сплавы для элементов активных зон реакторов с водой под давлением, Механ. и термич. обработка металлов, № 8 (2003) 7-12.
4. Н.П.Бродниковский, Ю.Е.Зубец, Н.А.Крапивка и др. Легирование хромом и железом сплавов системы Zr-Nb, XIX Междунар. конф. по физике радиационных явлений и радиационному материаловедению, Крым, (2010).
5. Ж.-П.Пуарье. Ползучесть кристаллов, Механизмы деформации металлов, керамики и минералов при высоких температурах, М.: Мир, (1988) 287.
6. G.Gottstein. Dynamic recrystallization and dynamic recovery in single crystals of nickel and copper, **31** №2 (1983) 175-188.
7. F.Montheillet, J.Thomas. Dynamic recrystallization of low stacking fault energy metals, Proc. of the NATO Advanced Research Working on 137 Metallic Materials with High Structural Efficiency, Kyiv, Ukraine, 7-13 September, **146** (2003) 357-368.
8. J.Urai. Water assisted dynamic recrystallization and weakening in polycrystalline bischofite, *Tectonophysics*, **96** (1983) 125-157.
9. В.И.Трефилов, Ю.В.Мильман, С.А.Фирстов. Физические основы прочности тугоплавких металлов, К.: Наук. думка, (1975) 316.
10. F.Willaime, C.Massobrio. Temperature-induced hcp-bcc phase transformation in zirconium: A lattice and molecular-dynamics study on an N-body potential, *Physical Review Letters*, **63** (1989) 2244-2247.
11. M.I.Mendelev, G.J.Ackland. Development of an interatomic potential for the simulation of phase transformation in zirconium, *Philosophical Magazine Letters*, **87** (2007) 349-359.
12. М.Ю.Тихончев, В.В.Светухин. Расчетное определение пороговых энергий смещения и исследование особенностей развития каскадов атомных смещений вблизи протяженной границы раздела фаз циркония и ниобия: молекуллярно-динамическое моделирование, Вопросы материаловедения, **68** №4 (2011) 140-152.
13. D.Y.Lin et al. An n-body potential for a Zr-Nb system based on the embedded-atom method, *Journal of Physics: Condensed Matter*, **25** (2013) 209501.
14. K.G.Field et al. Dependence on Grain Boundary Structure of Radiation Induced Segregation in a 9 wt.% Cr Model Ferritic/Martensitic Steel, *Journal of Nuclear Materials*, **435** №1-3 (2013) 172-180.
15. И.А.Петельгузов, Н.И.Ищенко, Е.А.Слабоспецкая, М.В.Мухин, Влияние длительности высокотемпературного окисления в водяном паре на структуры и механические свойства

- твэльных труб из сплавов Zr+1%Nb с водой, Вопросы атомной науки и техники, **208** № 2 (2010) 92-99.
16. C.H.Woo, U.Gosele. Dislocation bias in an anisotropic diffusive medium and irradiation growth Journal of Nuclear Materials, **119** №2-3 (1983) 219-228.
17. Y.N.Osetsky, D.J.Bacon, N.De Diego. Anisotropy of point defect diffusion in alpha-zirconium Metallurgical and Materials Transactions, A: Physical Metallurgy and Materials Science, **33** №3 (2002).
18. S.N.Buckley, D.J.Littler. Properties of Reactor Materials and Effects of Radiation Damage, Ed. Butterworth, London, (1961) 413443.
19. R.A.Holt, E.F.Ibrahim. Factors Affecting the Anisotropy of Irradiation Creep and Growth of Zirconium Alloys, Acta Metallurgica, **126** (1978) 1319-1328.
20. A.Rogerson, R.A.Murgatroyd. 'Breakaway' growth in annealed Zircaloy-2 at 353K and 553K, Journal of Nuclear Materials, **113** №2-3 (1983) 256-259.
21. A.Rogerson, Irradiation Growth in Zirconium and its Alloys, Journal of Nuclear Materials, **159** (1988) 43-61.
22. I.Ali, T.Agayev at all. Radiation-catalytic activity of zirconium surface during water splitting for hydrogen production, Journal Radiation Physics and Chemistry, **224** (2024) 112002.
23. A.R.Causey, C.H.Woo, R.A.Holt. The Effect of Intergranular Stresses on the Texture Dependence of Irradiation Growth in Zirconium Alloys, Journal of Nuclear Materials, **159** (1988) 225-236.
24. Г.А.Некрасова, Б.Г.Парфенов, А.С.Пиляев и др. Цирконий в атомной промышленности, Ползучесть и радиационный рост циркониевых сплавов при облучении: Обзорная информация. АИНФ 582, М.: ЦНИИатоминформ, Вып. 10 (1982) Ч.1.
25. Б.С.Родченков. Радиационный рост сплавов циркония, Атомная техника за рубежом, №3 (1985) 8-18.

## SİRKONİUM-NİOBİUM ƏRİNTİSİ MÜHİTİNDƏ SUYUN RADİASIYA-TERMİKİ VƏ TERMİKİ PARÇALANMASI NƏTİCƏSİNĐƏ MOLEKULYAR HİDROGENİN ƏMƏLƏGƏLMƏ KİNETİKASI

T.N.AĞAYEV, İ.A.FƏRƏCZADƏ, S.M.ƏLİYEV, İ.Ə.MƏMMƏDYAROVA

Zr+1%Nb ərintisinin səthində  $\gamma$ -kvantların təsiri altında müxtəlif temperaturlarda molekulyar hidrogenin əmələgəlmə kinetikası tədqiq edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, radiasiya-katalitik proseslərinin radiasiya komponentinin sürəti şualanma gücündən, su buxarının sıxlığından və temperaturdan asılı olub - $W_T(H_2) < W_{PT}(H_2)$ . Reaktor materialı olan Zr+1%Nb ərintisi üçün isə bu  $T \sim 300 \div 923\text{K}$  intervalına uyğundur və proseslərin aktivləşmə enerjisini qiyməti təyin edilib.

## KINETICS OF MOLECULAR HYDROGEN ACCUMULATION DURING RADIATION-THERMAL AND THERMAL DECOMPOSITION OF WATER IN CONTACT WITH ZIRCONIUM-NIOBIUM ALLOY

T.N.AGAYEV, İ.A.FARADJZADE, C.M.ALİYEV, İ.A.MAMMADYAROVA

The kinetics of the accumulation of molecular hydrogen on the surface of the Zr+1%Nb alloy at different temperatures under the influence of  $\gamma$ -quanta has been studied. It has been established that the rate of the radiation component of radiation-thermal processes depends on the radiation power, the density of water vapor in the medium and temperature, becoming noticeable in the temperature range in which  $W_T(H_2) < W_{PT}(H_2)$ . For reactor zirconium and Zr+1%Nb alloy this region corresponds to  $T \sim 300 \div 923\text{K}$  and the activation energy of the processes was determined.

the least studied structure and kinematics. This is the accretion flow falling on the star at high [13,17].

Our first article was devoted to the search for rapid spectral variations in a star based on homogeneous spectral material obtained at the 2 m telescope of the Shamakhy Astrophysical Observatory of Azerbaijan Ministry of Science and Education for 2015-2023 [4]. In this paper, we present the results of observations for 2016-2023, based on materials obtained with a resolution 28000. Detailed information about the observational spectral material is given in the first part of our work.

## SPECTRAL ENERGY DISTRIBUTION

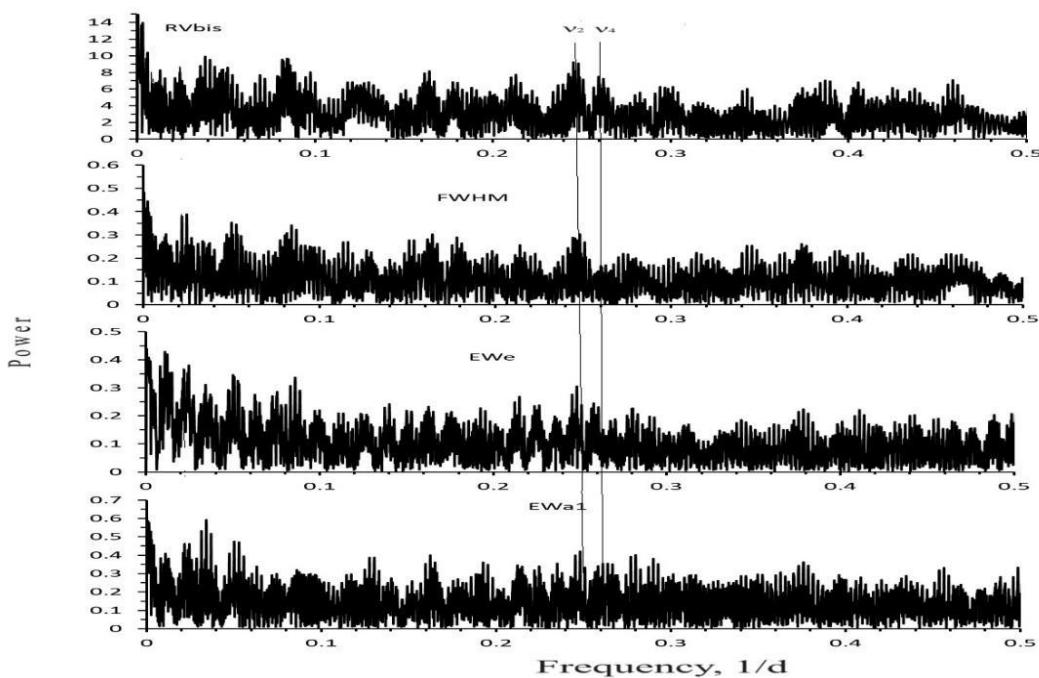
For analysis of the spectral energy distribution (SED) of the star, we constructed a SED curve of the star in the wavelength interval 0.36-100 $\mu$ m. The starting material for constructing the SED curves was multicolor broadband photometry data in the standard UBVRIJHKLM system; for the region of longer waves we used data from the WISE W<sub>1</sub>-W<sub>4</sub> infrared (IR) satellite [11], as well as IRAS data [15], respectively, in the bands of 12, 25, 60,

the boundary region between the wind zone and 100 $\mu$ m. The principle of constructing SED for different objects based on stellar magnitudes obtained in different bands of broadband photometry is to convert the magnitudes  $m_\lambda$  into absolute fluxes  $F_\lambda$  according to the famous expression.

$$F_\lambda = F_0 \cdot 10^{-0.4(m_\lambda - m_0)} , \quad (1)$$

here  $F_0$  is the adapted radiation flux for the zero point of the system when  $m_0$  is taken equal to zero. The reference is usually made to the adapted absolute radiative flux of a standard star of zero magnitude A0V in all emission bands. We described the detailed methodology for constructing the SED curve in the work of Ismailov et al. [9,10] Fig.3.

As can be seen from Fig.1, the SED curve agrees well with observations only in the visible and near-IR region up to the K band (2.2 $\mu$ m). Excess emission from the gas component of the disk mainly begins from this band. The Fig.2 shows examples of phase curves collapsed by phases of the period P<sub>5</sub>=92.1 days.



**Fig.1**

Examples of power spectrum diagrams for different spectral parameters of the H $\beta$  line.  
Vertical lines show the positions of frequencies  $v_2$  and  $v_4$ .