

6. Федоров Ю.С., Бибичев Б.А., Зильберман Б.Я., Кудрявцев Е.Г. Использование регенерированного урана и плутония в тепловых реакторах. — Атомная энергия, 2005, т. 99, вып. 2, с. 136—141.
7. Fedorov Yu.S., Kudryavtsev E.G., Bibichev B.A. et al. Use of regenerated uranium and plutonium in WWER reactors. — In: Proc. of Intern. Conf. Global'2005. Tsukuba, Japan, Oct. 9—13, 2005, paper 124, p. 5.
8. Novikov A.N. Development of VVER physical calculation codes. — In: Proc. of the Tenth Symp. of AER. Moscow, Russia, Oct. 18—22, 2000, v. 1, p. 433—448.

Поступила в Редакцию 10.07.06

УДК 621.039.54

## СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА И ПОСЛЕРЕАКТОРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ТВЭЛОВ ВВЭР-1000 ВЫГОРАНИЕМ 49 МВт·сут/кг

*Пассаж Г., Стефанова С. (ИЯИЯЭ — БАН, Болгария),  
Щеглов А.С., Проселков В.Н. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

ТВС Е0325 отработала на 1-м энергоблоке Запорожской АЭС четыре топливных цикла (с июня 1988 г. до конца марта 1994 г.) до среднего выгорания 48,94 МВт·сут/кг. Продолжительность работы составила 1142 эф. сут. Обогащение всех твэлов 4,4%  $^{235}\text{U}$ . За время эксплуатации ТВС следует отметить значительное число остановов реакторной установки и работы на пониженной мощности (больше половины последнего топливного цикла реактор работал на мощности 60% номинальной), что было обусловлено требованиями потребителя электроэнергии.

В исходных данных, предоставленных OECD NEA [1], содержится информация об изменении мощности всех 312 твэлов во времени (403 временных «точках»), температуре оболочки, линейной мощности, флюенсе быстрых нейтронов и выгорании для 10 аксиальных зон. Для расчетов выбраны 55 твэлов, подвергнутых послереакторным исследованиям, в результате которых измерены выгорание, выход газообразных продуктов деления из топлива, давление газа внутри твэла, свободный объем под оболочкой, среднее уменьшение диаметра в области активной части твэла, удлинение твэла и диаметральный зазор топливо—оболочка.

Сравнительные расчеты выполняли с помощью трех программ, предназначенных для определения работоспособности твэлов ВВЭР.

Программа PINw99 [2], полученная из OECD NEA [1] в 1999 г., является усовершенствованной версией программы PIN-micro [3] и предназначена для термомеханических расчетов твэлов ВВЭР при стационарных и медленных переходных режимах. Она валидирована на данных советско-финского эксперимента и сопоставлении данных расчета и послереакторных исследований твэлов ВВЭР-440, отработавших на 3-м энергоблоке Кольской АЭС [1].

Программа TRANSURANUS (VIMIV03) [4, 5] предназначена для термического и механического анализа твэлов легководных и быстрых реакторов при стационарных, переходных и аварийных режимах работы. Наиболее существенными ее чертами являются четкая механико-математическая структура, в которую легко можно включать новые физические модели, совместимость моделирования различных режимов эксплуатации, гибкость при моделировании твэлов разной конструк-

ции и в разных условиях облучения, подробная база данных и свойств для оксидного, смешанного оксидного, карбидного и нитридного топлива, для оболочек из циркониевых и стальных сплавов и разных теплоносителей. В настоящей работе использовали стандартную версию этой программы со специфическими для ВВЭР моделями и опциями. Обзор современного состояния валидации программы TRANSURANUS представлен в работах [5, 6].

Программа TOPRA-2 [7] предназначена для моделирования теплофизических и механических (прочностных) характеристик твэлов (и твэлов с поглотителем) энергетических и исследовательских реакторов и обоснования их работоспособности в квазистационарных режимах работы. При прочностном расчете используются методы теорий упругости, пластичности и ползучести, деформирование оболочки рассчитывается по теории течения, учитывается анизотропия циркониевых труб. Деформирование топлива моделируется по модифицированной теории старения. Решается связанная нелинейная краевая задача совместного деформирования топлива и оболочки. В расчетной схеме толстостенного цилиндра топливо и оболочка рассматриваются как отдельные элементы. Задача решается с учетом взаимосвязанности давления газов под оболочкой, контакта топливо—оболочка и осевой силы, в том числе обусловленной трением.

Для расчета в исходные данные были внесены изменения:

поскольку первая временная точка для каждого твэла соответствовала нагретой оболочке, была введена дополнительная точка, в которой температура оболочки составляла 20 °С, давление теплоносителя 0,1 МПа. Принималось, что в этой точке линейная мощность и нейтронный поток равны нулю (или очень малому значению), второй временной точке (через 0,1 сут) соответствует температура оболочки точки № 1, приведенная в исходных данных. В программах при расчете поведения твэла между первыми двумя точками, равно как и между любыми другими, принималось, что все параметры (температура оболочки, линейная мощность и др.) изменяются линейно со временем;

аналогично введена последняя временная точка, в которой все параметры соответствовали первой точке;

в данных для перегрузок топлива приведены параметры, соответствующие одной точке перед перегрузкой и другой после нее. При этом временные значения этих точек равны. Во избежание резких перепадов значений параметров принято, что время перехода от одной точки к следующей соответствует 4 ч. Использовалась линейная аппроксимация;

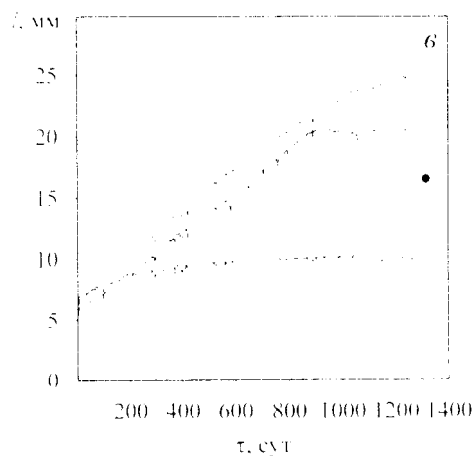
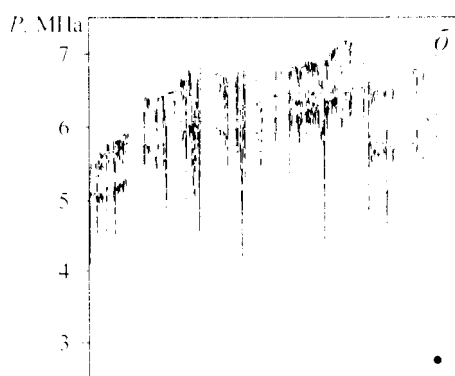
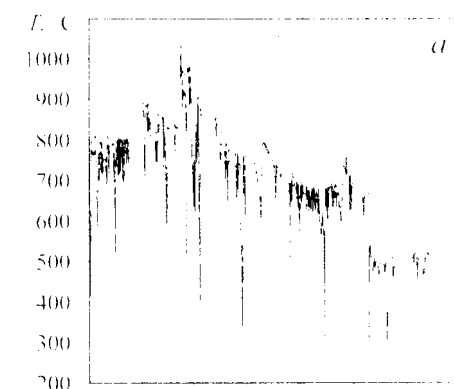
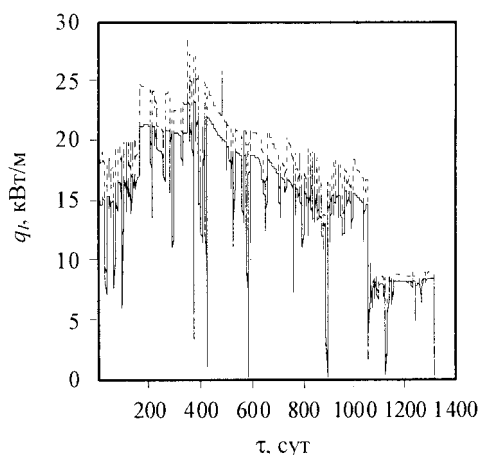
плотность потока быстрых нейтронов определяли по флюенсу, приведенному в исходных данных. Принимали, что в течение любого временного интервала плотность потока в каждой высотной зоне постоянная и равна частному от деления флюенса, набранного за интервал, на продолжительность этого интервала. При переходе от приведенного в первичных данных флюенса нейтронов энергией более 0,1 МэВ к флюенсу нейтронов энергией более 1 МэВ, используемому для расчетов ползучести и радиационного роста оболочки, применяли зависимость, вычисленную с помощью нейтронно-физической программы HELIOS с коррекцией РНЦ «Курчатовский институт».

Р и с. 1. Временная зависимость средней (—) и максимальной линейной мощности (---) твэла № 148

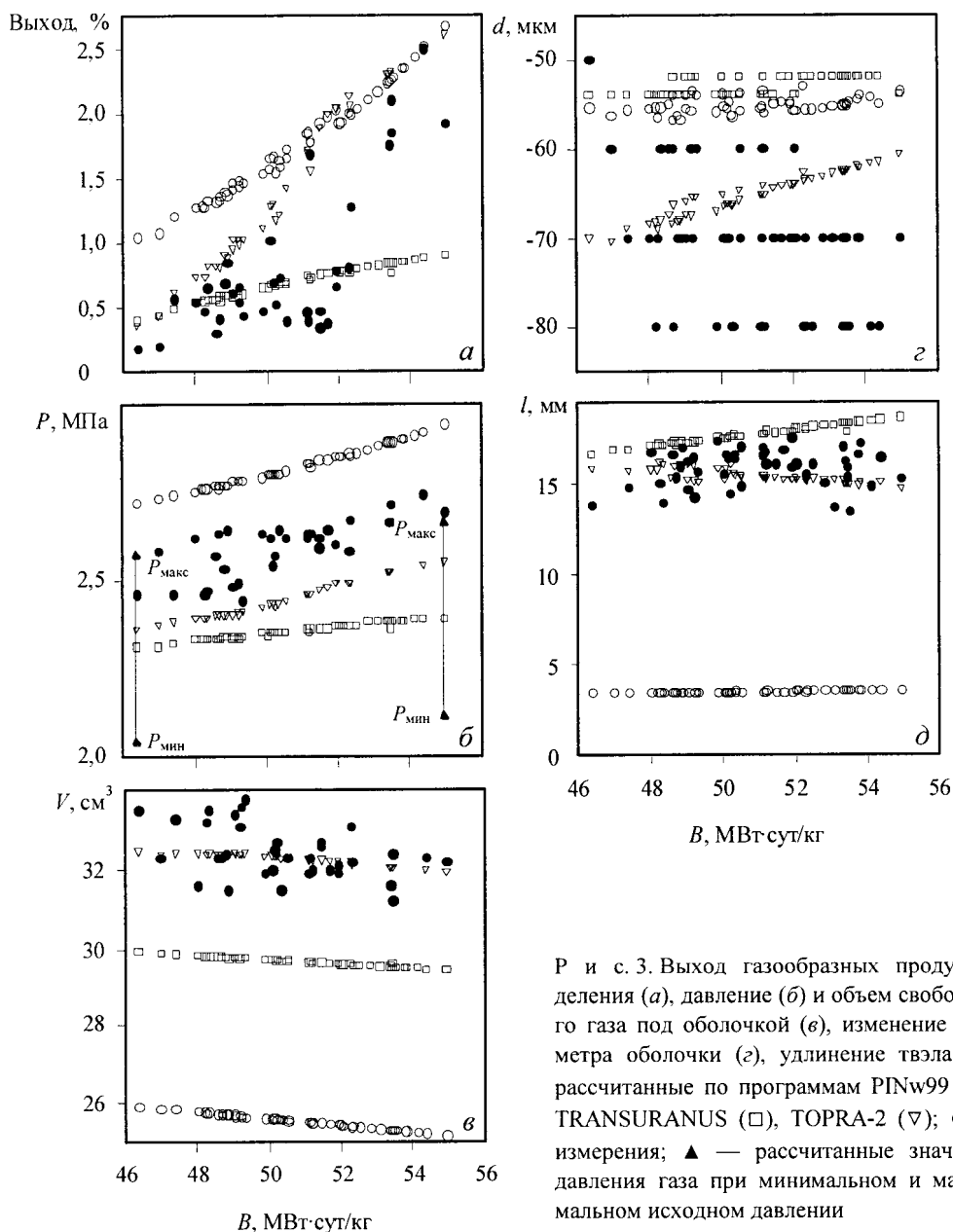
Корректировалась и линейная мощность. Используя первичные данные, для каждого твэла можно получить несколько значений выгорания. Учитывая результаты проведенных в РНЦ «Курчатовский институт» уточняющих нейтронно-физических расчетов, использовали исходные значения линейной мощности, уменьшенные на 2%.

Исходные геометрические и конструкционные параметры скорректировали по результатам статистической обработки параметров твэлов ВВЭР-1000, произведенных на Новосибирском заводе химконцентратов в 1989—1990 гг. [8], на 2—3 года позже, чем там же изготавливались рассчитываемые твэлы. Были приняты следующие исходные параметры: топливный столб высотой 3,55 м, массой 1465 г, наружный диаметр оболочки 9,13 мм, внутренний 7,755 мм, наружный диаметр таблетки 7,55 мм, внутренний 2,3 мм, обогащение 4,4%, плотность 10,585 г/см<sup>3</sup>, размер зерна 6 мкм, максимальное доспекание 0,8%, давление заполнения гелием 2 МПа, объем газосборника 11,4 см<sup>3</sup>.

Расчетные зависимости на рис. 1, 2 приведены для твэла № 148 с наибольшим выгоранием. Максимальное среди всех твэлов измеренное выгорание было у этого твэла и составляло 51,33 МВт·сут/кг. При расчете по программе TOPRA-2 оно равно 54,37 МВт·сут/кг. Для твэла № 302 расчетное выгорание больше — 54,95 МВт·сут/кг, в то время как измеренное меньше — 49,39 МВт·сут/кг. Это следует учитывать при анализе рис. 3, где сопоставлены расчетные (применительно к нормальным условиям) по трем программам и измерен-



Р и с. 2. Временная зависимость максимальной температуры топлива (а), давления газа под оболочкой (б), удлинения твэла (в), рассчитанная по программам PINw99 (---), TRANSURANUS (- - -), TOPRA-2 (- · -); ● — измерение



ные значения как функции от выгорания. В связи с различием измеренных и расчетных данных для наглядности в качестве выгорания твэлов принимали значения, полученные при расчете по программе TOPRA-2.

**Выгорание.** Измеренное выгорание каждого твэла меньше расчетного. Так, измеренное выгорание отдельных твэлов меньше полученного по программе TOPRA-2 на 4,5—10% со средним отклонением 7—8%. Близкая разница (5—7%) и при сопоставлении измеренного (46,5—46,9 МВт·сут/кг) и расчетного (48,94—50 МВт·сут/кг) среднего выгорания топлива ТВС.

Расчетные значения, полученные по разным программам, также отличаются. По сравнению с рассчитанными по программе TOPRA-2 полученные по программе TRANSURANUS меньше на 3,7—3,8%, по PINw99 — на 1,3—1,4%. Поскольку при

расчете выгорания по программе TOPRA-2 используется минимально возможное содержание урана в топливе (0,7895), это приводит к завышению выгорания. Одновременно следует учитывать различие высоты топливного столба: как записано в исходных данных, в нейтронно-физических расчетах использовано значение 3,536 м, тогда как следовало применить 3,54—3,55 м, для исходного состояния — 3,53 м.

**Выход газообразных продуктов деления из топлива.** Небольшой измеренный выход ( $< 0,7\%$ ) для многих твэлов ТВС Е0325 может быть объяснен невысокой линейной мощностью, особенно в конце работы. При анализе данных учитывали, что за счет возможного занижения измеренного выгорания выход газообразных продуктов деления должен быть еще меньше (на 5—8%). Расчетный по программам PINw99 и TOPRA-2 выход почти всегда больше измеренного. Выход, полученный по программе TRANSURANUS, соответствует измеренному при выгорании до 51 МВт·сут/кг и меньше измеренного при большем выгорании.

Особенностью модели выхода газообразных продуктов деления во всех программах серии PIN, включая PINw99, является установление значения  $\approx 0,5\%$  сразу же после выхода на мощность, что отражает более старую консервативную концепцию этой модели. В современной версии PIN2K [9] применяемая авторами для расчетов в рамках международной программы FUMEX-II [10] эта особенность устранена.

Выход газообразных продуктов деления из топлива двух твэлов с наименьшим выгоранием значимо меньше расчетного по всем программам. При анализе следует учитывать значительную погрешность измерения состава газовой среды под оболочкой, по-видимому, увеличивающуюся при малом количестве вышедших газообразных продуктов деления. Отметим, что расчетный выход по программе СТАРТ-3 [11] для этих твэлов также больше измеренного, хотя разница меньше: 0,3 и 0,2% для твэла № 34 и 0,24 и 0,19% для твэла № 163.

**Давление газа под оболочкой.** С учетом больших погрешностей [12] определения давления газов в целом результаты расчетов по программам TRANSURANUS и TOPRA-2 близки к измеренным, но всегда меньше их. Разница невелика и составляет  $\approx 0,05$ —0,15 МПа, или  $\approx 5\%$  для результатов расчета по программе TOPRA-2 и  $\approx 10\%$  по программе TRANSURANUS. Рассчитанные по программе PINw99 значения выше и отклонение от измеренных составляет  $\sim 0,2$  МПа. Разницу при расчете по первым двум программам можно объяснить тем, что среднее давление исходного заполнения твэлов могло составлять не 2 МПа (как принималось в расчетах), а например, 2,25 МПа, и погрешностями измерения. Влияние разброса начального давления газа (1,75—2,25 МПа) на конечные рассчитанные по программе TRANSURANUS значения показано на рис. 3, б. Разброс составляет примерно  $\pm 0,3$  МПа (расчет). Расчеты по программам PINw99 и TOPRA-2 дают близкие отклонения конечного давления. Вместе с тем измеренное изменение диаметра больше расчетного по программам TOPRA-2 и TRANSURANUS, возможно, расхождение измеренных и расчетных значений давления газа объясняется и этим.

При анализе результатов расчета давления газов следует учитывать, что вышедшее под оболочку количество газа в абсолютных величинах относительно не-

велико по отношению к исходному количеству, вклад вышедших газов в общее давление под оболочкой меньше 5%, для большинства твэлов меньше 0,5%. Доля гелия под оболочкой — больше 94,8%. Поэтому отличия измеренных и расчетных значений не приводят к значимым отличиям давления газа под оболочкой.

**Свободный объем под оболочкой.** Результаты расчетов по программе TOPRA-2 показывают почти полное совпадение с измеренными значениями (с учетом вариаций средних геометрических параметров для реальных твэлов). Расчетный по программе TRANSURANUS свободный объем на  $1,5\text{—}3\text{ см}^3$  меньше измеренного. С учетом значительной погрешности определения объема разница относительно невелика. Отметим, что приведенный в исходных данных как дополнительная информация расчетный по программе СТАРТ-3 свободный объем примерно на столько же меньше измеренного. Результаты расчетов по программе PINw99 значимо (на  $5\text{—}7\text{ см}^3$ ) меньше измеренного, что объясняет завышение расчетных значений давления газа под оболочкой твэлов.

**Зазор топливо—оболочка на высоте активной части твэла.** Следует отметить, что верификация программ по этому параметру требует использования модельных предположений. Это обусловлено наличием как при экспериментальном исследовании, так и при анализе расчетных результатов стадий «мягкого» и «жесткого» контакта топлива и оболочки. Первый предполагает касание топлива и оболочки, но с наличием трещин в топливе, способных частично смягчать давление контакта. При втором трещин нет, и топливо можно рассматривать как целое. Таким образом, расчетный зазор между топливом и оболочкой является функцией модели релокации, используемой в программах. Зазор, особенно при жестком контакте обусловлен условиями работы в последние 20—40 сут (давлением контакта и скоростью ползучести оболочки). В расчетах по всем программам получено, что зазор топливо—оболочка в рабочих условиях исчезает, в нормальных условиях он составляет 5 мкм и более, что хорошо коррелирует с экспериментальными данными (от 4 до 44 мкм). Рассчитанный по программе TRANSURANUS диаметральный зазор составляет 3—12 мкм, TOPRA-2 — 6—9 мкм, PINw99 — 10,8 мкм. Последний соответствует шероховатостям топлива и оболочки (устаревшая концепция программы PIN-micro [3]).

**Уменьшение диаметра оболочки.** В связи с тем, что исходный диаметр оболочки известен с погрешностью +80, –50 мкм, его изменение на высоте активной части твэла определяли в виде разницы измеренного на участках с максимальным выгоранием и высоте газосборника [12]. Результаты сопоставления вследствие большой погрешности измерения ( $\pm 10$  мкм) имеют качественный характер. В целом измеренные и расчетные значения близки. При этом результаты расчетов по программам PINw99 и TRANSURANUS показывают меньшее снижение диаметра (–52 — –57 мкм), по программе TOPRA-2 дают разумное соответствие с измеренными (–50 для одного твэла, от –60 до –80 мкм для других). Ни одна из программ не показала результаты, приближающиеся к измеренным — 80 мкм для нескольких твэлов.

**Удлинение твэлов.** Исходная длина твэлов была известна с погрешностью до  $\pm 2$  мм. С учетом погрешности измерений  $\pm 0,3$  мм [12] можно констатировать, что результаты расчетов по программам TRANSURANUS и TOPRA-2 хорошо коррелируют.

лируют с измеренными. Большинство рассчитанных по программе TRANSURANUS значений удлинения на 2—6 мм больше измеренных и возрастают с ростом выгорания. Рассчитанные по программе TOPRA-2 удлинения более близки к измеренным. Особо следует отметить, что рассчитанное по программе TOPRA-2 удлинение твэлов после начала жесткого контакта с ростом выгорания твэла уменьшается. Это обусловлено используемой в программе моделью осевой силы, обуславливающей преобладание вклада увеличения его диаметра после начала жесткого контакта в укорочение твэла над вкладом удлинения твэла за счет радиационного роста и растяжения оболочки распухающим столбом топлива [13]. До начала жесткого контакта удлинение твэла наряду с термическим обусловлено анизотропным радиационным ростом и удлинением, обусловленным уменьшением диаметра за счет ползучести. После начала жесткого контакта из-за обратного хода изменения диаметра (его увеличения) твэл начинает укорачиваться, из-за появления осевой силы — удлиняться. Вклад первого механизма больше, что и приводит к укорочению твэла.

Рассчитанное по программе PINw99 удлинение на 10—15 мм меньше измеренного и рассчитанного по другим программам. Это можно объяснить тем, что не учитывается вклад в удлинение твэла уменьшения диаметра в процессе ползучести до начала жесткого контакта и осевой силы, обусловленной взаимодействием топлива и оболочки после жесткого контакта.

**Выводы.** В целом результаты сопоставления с экспериментальными данными свидетельствуют о возможности использования программ для расчета теплофизических и механических параметров работоспособности твэлов ВВЭР-1000. При этом следует учитывать значительный консерватизм в расчете давления газа по программе PINw99 при выгорании, превышающем 30 МВт·сут/кг, что объясняется занижением расчетного удлинения и свободного объема под оболочкой. Улучшенная версия PIN2K, которая находится на стадии дальнейшего усовершенствования модели выхода газообразных продуктов деления при глубоком выгорании, дает возможность гораздо более адекватного определения выхода и давления газа. В программе TRANSURANUS также есть области, где необходимо дальнейшее улучшение концепций и моделей, являющееся предметом текущих исследовательских проектов [5]. Подробное сопоставление расчетных и измеренных геометрических данных твэлов позволило эмпирически корректировать модель ползучести оболочки и улучшить результаты [6]. Однако необходимы дополнительные экспериментальные данные, чтобы прийти к лучшим количественным результатам.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chantoin P., Turnbull J. The compilation of a public domain database on nuclear fuel performance for the purpose of code development and validation. — In: Proc. of the Intern. Topical Meeting on LWR Fuel Performance. Portland, Oregon, March 1997, p. 515—522.
2. Strijov P., Valach M. Description of the PIN-micro Innovation to the PINw99 code. UJV Draft-T.M. NRI Rez plc, August 1999.
3. Pazdera F., Valach M., Strijov P. e.a. User's Guide for the Computer Code PIN-micro. UJV 9515-T. Rez, CSFR, November 1991.
4. Lassmann K. TRANSURANUS, a fuel rod analysis code ready for use. — J. Nucl. Mater., 1992, v. 188, p. 295—302.

5. Van Uffelen P., Bruynooghe C., Györi Cs. e.a. Status and perspectives of fuel performance modelling at the institute for transuranium elements. — In: Proc. of the 6th Intern. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Albena, Bulgaria, 19—23 September 2005, Paper 3B.1.
6. Шуберт А., Лассман К., Лаар Дж. и др. Верификация кода TRANSURANUS, используемого при анализе температурных эффектов в ядерном топливе. — Атомная техника за рубежом, 2004, № 9, с. 20—24.
7. Scheglov A.S., Proselkov V.N. Code package to analyze behaviour of the WWER fuel rods in normal regimes of operation. TOPRA-s code. — In: Proc. of the 4th Intern. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Albena, Bulgaria, 1—5 October 2001, p. 220—228.
8. Щеглов А.С., Проселков В.Н., Енин А.А. Статистическая обработка конструкционных и технологических параметров твэла ВВЭР-1000. — Атомная энергия, 1991, т. 71, вып. 6, с. 503—506.
9. Zymak J., Valach M., Miasnikov A. Results of first step in the development of PIN2FRAS computer code coupling, NRI Rez plc. — In: Proc. of the 5th Intern. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Albena, Bulgaria, 29 September — 3 October 2003, p. 382—384.
10. Killeen J., Inozemtsev V., Turnbull J. Fuel modelling at extended burnup: IAEA coordinated research project FUMEX-II. — In: Transactions of the Top Fuel 2006 Intern. Meeting on LWR Fuel Performance. Spain, 22—26 October 2006, Paper P.II.08.
11. Bibilashvili Yu., Medvedev A., Khvostov G. e.a. Fission gas products behaviour modelling in the START-3 code for the WWER fuel at high burnup and transient conditions. — In: Proc. of the 3rd Intern. Sem. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Pamporovo, Bulgaria, 4—8 October 1999, p. 194—199.
12. Kanashov B.A., Amosov S.V., Lyadov G.D. e.a. Change in geometrical parameters of VVER high burnup fuel rods under operation conditions and transient testing. — In: Proc. of the 4th Intern. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Albena, Bulgaria, 1—5 October 2001, p. 88—102.
13. Proselkov V.N., Saprykin V.V., Scheglov A.S. Advanced fuel cycles and burnup increase of WWER-440 fuel. — In: Proc. of the 5th Intern. Conf. on WWER Fuel Performance, Modelling and Experimental Support. Albena, Bulgaria, 29 September — 3 October 2003, p. 43—51.

Поступила в Редакцию 19.04.06

УДК 546.11.661.96

## НАРАБОТКА, ХРАНЕНИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВОДОРОДА НА АЭС

*Рязанцев Е.П., Чабак А.Ф., Ульянов А.И. (Ин-т реакторных технологий  
и материалов РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Повышенную заинтересованность в качественном и скорейшем развитии водородной энергетики в настоящее время проявляют атомная и химическая промышленность, автомобилестроение, аэрокосмический комплекс, все виды транспорта: авто-, водный, железнодорожный, а также производство портативных источников питания (мобильные телефоны, компьютеры, бытовая техника) и др.

Перед водородной энергетикой обозначены три основные задачи: получение водорода путем разложения воды — электролиз или термолиз или за счет диссоциации углеводородов. Основная проблема — снижение стоимости, прямое преобразование энергии окисления водорода в электрическую энергию. Технологически эта проблема уже решена как в нашей стране, так и за рубежом с помощью топливных элементов различного типа, остается вопрос их стоимости и ресурса, безопасное хранение и доставка к потребителю.