

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НАПРЯЖЕННО- ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОГЛОЩАЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ РЕАКТОРОВ БН В УСЛОВИЯХ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СЕРДЕЧНИКА С ОБОЛОЧКОЙ

А.А. Тузов, А.А. Камаев

ГНЦ РФ-Физико-энергетический институт им. А.И. Лейпунского, г. Обнинск



Главной проблемой, возникающей при оценке работоспособности ПЭЛ стержней СУЗ реакторов типа БН для условий глубокого выгорания поглотителя, является корректный учет силового взаимодействия набухающего поглотителя и оболочки ПЭЛ. Для решения этой проблемы разработана физическая модель сложного напряженно-деформированного состояния ПЭЛ в стационарных режимах эксплуатации. Сформулированы основные гипотезы по схеме нагружения оболочки за счет внутреннего давления сердечника с учетом эффектов набухания и ползучести и односторонних пластических деформаций для оболочки. Определен перечень необходимых исходных данных.

Проведен анализ опубликованных отечественных и зарубежных данных по зафиксированным случаям разрушения оболочки в результате силового взаимодействия с поглотителем. По результатам анализа выбрана тестовая модель для верификации расчетной методики оценки работоспособности ПЭЛ, и подготовлены исходные данные для расчетов.

Наиболее распространенным поглотителем для органов регулирования быстрых реакторов является карбид бора. Выбор этого материала обусловлен его хорошими нейтронно-физическими, теплофизическими и технологическими свойствами, возможностью обогащения и доступностью. Вместе с тем, карбид бора под облучением набухает, что потенциально может привести к силовому взаимодействию системы «сердечник-оболочка» при достижении большой глубины выгорания поглотителя. Исследования отечественных и зарубежных специалистов [1–5] показали возможность разрушения оболочек поглощающих элементов (ПЭЛ) стержней системы управления и защиты (СУЗ), обусловленного давлением набухающего поглотителя. Традиционное решение этой проблемы заключалось в конструктивном выборе такой величины зазора между столбом таблеток поглотителя и оболочкой, чтобы обеспечивался необходимый запас на набухание в течение всего срока службы ПЭЛ. Однако ряд соображений, а именно – наличие у оболочки определенного запаса пласт-

тичности и прочности, позволяет допустить возможность того, что механический контакт поглотителя и оболочки в течение некоторого времени не отразится на работоспособности ПЭЛ. В силу этого при анализе работоспособности стержней СУЗ в условиях высоких рабочих температур и достижения значительной глубины выгорания поглотителя возникает необходимость корректно учитывать последствия силового взаимодействия компонентов системы «сердечник–оболочка».

Конструктивно ПЭЛ представляет собой сердечник из поглощающего материала (карбида бора), заключенный в цилиндрическую стальную оболочку. Сердечник отделен от оболочки зазором, который заполнен натрием первого контура. ПЭЛ имеет узел выпуска газообразных продуктов реакции (n, α), соответственно, внутреннее газовое давление на оболочку отсутствует.

ПЭЛ стержней СУЗ быстрого натриевого реактора (РБН) эксплуатируются в активной зоне в условиях неоднородного температурного поля — в срединной части оболочки осевой градиент температур сопоставим с окружной неравномерностью температуры по периметру и на порядок меньше радиального градиента. Процессы радиационно-стимулированного формоизменения конструкционных материалов и распухания поглотителя формируют дополнительные нагружающие факторы, которые определяют напряженно-деформированное состояние (НДС) в оболочке ПЭЛ. Главными факторами являются неоднородное температурное поле, распухание конструкционных материалов и внутреннее давление распухающего сердечника на оболочку.

Расчетные модели НДС системы «сердечник-оболочка» как при отсутствии контакта между сердечником и оболочкой, так и при их силовом взаимодействии, достаточно хорошо изучены для тепловыделяющих элементов быстрых реакторов [6]. При этом оценка НДС ПЭЛ негерметичной конструкции имеет свои особенности в силу отсутствия некоторых нагружающих факторов, характерных для топливного сердечника — внутреннее газовое давление, образование плутония и т. п. Кроме того, карбид бора является весьма твердым материалом, а конкретные условия эксплуатации сильно влияют на его поведение под облучением (скорость распухания имеет ярко выраженную температурную зависимость; также имеет место значительная неравномерность распухания столба поглотителя по высоте).

Таким образом, для оценки работоспособности ПЭЛ при наличии силового контакта поглотителя с оболочкой первостепенными являются:

- уточнение методики расчета НДС системы «сердечник-оболочка» применительно к реальным условиям эксплуатации ПЭЛ и основным факторам нагружения;
- разработка тестовой модели для верификации методики расчета НДС ПЭЛ на основе имеющихся экспериментальных данных по термомеханическому взаимодействию поглотителя и оболочки, полученных по результатам послерадиационных исследований.

Задача оценки работоспособности ПЭЛ стержней СУЗ реакторов БН в условиях силового взаимодействия поглотителя с оболочкой формулируется следующим образом.

1. Необходимо рассчитать НДС ПЭЛ стержня СУЗ РБН в стационарных режимах эксплуатации для определенных ниже условий. Радиальный зазор между поглотителем и оболочкой выбран или полностью, или в некоторых сечениях по высоте; соответственно, в этих сечениях сердечник и оболочка жестко связаны между собой; проскальзывания сердечника нет. Оболочка ПЭЛ при этом нагружается: внешним давлением теплоносителя, неравномерным по объему температурным полем, приводящим к возникновению температурных радиальных и окружных напряжений, и внутренним давлением распухающего сердечника. Основные гипотезы по схеме нагружения оболочки за счет внутреннего давления — сердечник распухает изотропно;

эффекты ползучести в нем отсутствуют. Такие гипотезы могут считаться консервативными, отклонения от этой модели идут в запас прочности при оценках остаточного ресурса оболочки. Собственно расчет НДС оболочки ПЭЛ сводится к решению задачи вязкопластического деформирования элемента при неизотермическом нагружении.

2. При расчете на всех этапах должны учитываться распухание оболочки и поглотителя, эффекты тепловой и радиационной ползучести и возможность возникновения односторонних пластических деформаций для оболочки. В процессе расчета для заданного момента времени должно быть получено распределение напряжений и деформаций в любом аксиальном сечении ПЭЛ. После определения наиболее опасного сечения полученное распределение используется для оценки работоспособности ПЭЛ по выбранным критериям.

Исходными данными для расчета НДС ПЭЛ являются:

- количество этапов нагружения ПЭЛ и их продолжительность;
- исходное распределение напряжений и деформаций в ПЭЛ;
- аксиальное распределение внешнего давления теплоносителя;
- распределение температур в ПЭЛ;
- распределение флюенса и/или повреждающей дозы на начало и конец этапа (или распределение скорости набора повреждающей дозы);
- функциональные зависимости механических свойств используемых конструкционных материалов от температуры и флюенса нейтронов (или повреждающей дозы);
- геометрические параметры ПЭЛ — внешний радиус блочка поглотителя, внешний радиус и толщина оболочки.

РАЗРАБОТКА ТЕСТОВОЙ МОДЕЛИ СИЛОВОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПОГЛОТИТЕЛЯ И ОБОЛОЧКИ ПЭЛ

Эффект силового взаимодействия карбида бора с оболочкой известен давно. Был получен некоторый, хотя и весьма ограниченный, опыт по разрушению ПЭЛ стержней СУЗ на реакторах PHENIX, PFR, EBR-2, JOYO и БОР-60 [1, 7, 8]. Большая часть дефектов объяснялась механическим взаимодействием сердечника с оболочкой с локальной пластической деформацией более 2% вследствие смещения фрагментов сердечника. Выбор тестовой модели для верификации методики расчета НДС представляет собой достаточно сложную задачу в силу скудности достоверных экспериментальных данных. Существует ряд ключевых позиций, которые должны быть известны перед началом верификационных исследований. К ним можно отнести следующие — условия облучения ПЭЛ (режимы работы, распределение рабочих температур по объему, величина набранной оболочкой повреждающей дозы); результаты послерадиационных исследований (достоверный факт силового взаимодействия, величина необратимой пластической деформации оболочки в месте контакта, оценка вклада распухания в эту деформацию и т. п.). Отдельно стоит вопрос о механических свойствах материалов оболочки и поглотителя, изменяющихся под облучением. Полнота и доступность знаний по приведенным позициям и определила выбор тестовой модели, в основу которой были положены результаты исследований силового взаимодействия сердечника и оболочки в ПЭЛ стержней СУЗ японского исследовательского реактора JOYO [7].

Послерадиационные исследования ПЭЛ стержней СУЗ реактора JOYO, отработавших в активной зоне до 316 эфф. сут, показали [7], что вблизи нижнего конца ПЭЛ увеличение наружного диаметра составляет около 2%. При этом в оболочках четверти исследовавшихся ПЭЛ были обнаружены трещины, которые возникали в нижней части ПЭЛ. Максимальная длина трещин была около 0,037 м, максимальная ширина —

около 0,0003 м. В работе [3] установлено, что причиной столь значительного формоизменения оболочки можно считать силовое взаимодействие с поглотителем. Увеличение наружного диаметра начинается еще до момента возникновения контакта поглотителя с оболочкой. Кроме того, характер формоизменения оболочки достаточно сложен. Формоизменение характеризуется сильной анизотропией, форма оболочки имеет тенденцию к возрастанию овальности, что вполне удовлетворительно объясняется смещением в зазор фрагментов растрескавшихся блочков поглотителя. Типичный пример формоизменения и образования трещин в оболочках ПЭЛ стержней СУЗ активной зоны МК-II, вызванных механическим взаимодействием поглотителя с оболочкой, представлен на рис. 1.

Анализ японских данных показывает, что опыт по разрушению оболочек, полученный при исследованиях ПЭЛ реактора JOYO, вполне пригоден для построения тестовой модели для верификации расчетной методики оценки НДС ПЭЛ в условиях силового взаимодействия с поглотителем. В первом приближении рассматривается стационарный режим работы ПЭЛ в течение заданного количества часов. Рассматривается два этапа работы ПЭЛ. На первом этапе зазор между сердечником и оболочкой не выбран, сердечник и оболочка развязаны. В этом режиме рассматривается только НДС оболочки. Основными нагружающими оболочку факторами при этом являют-

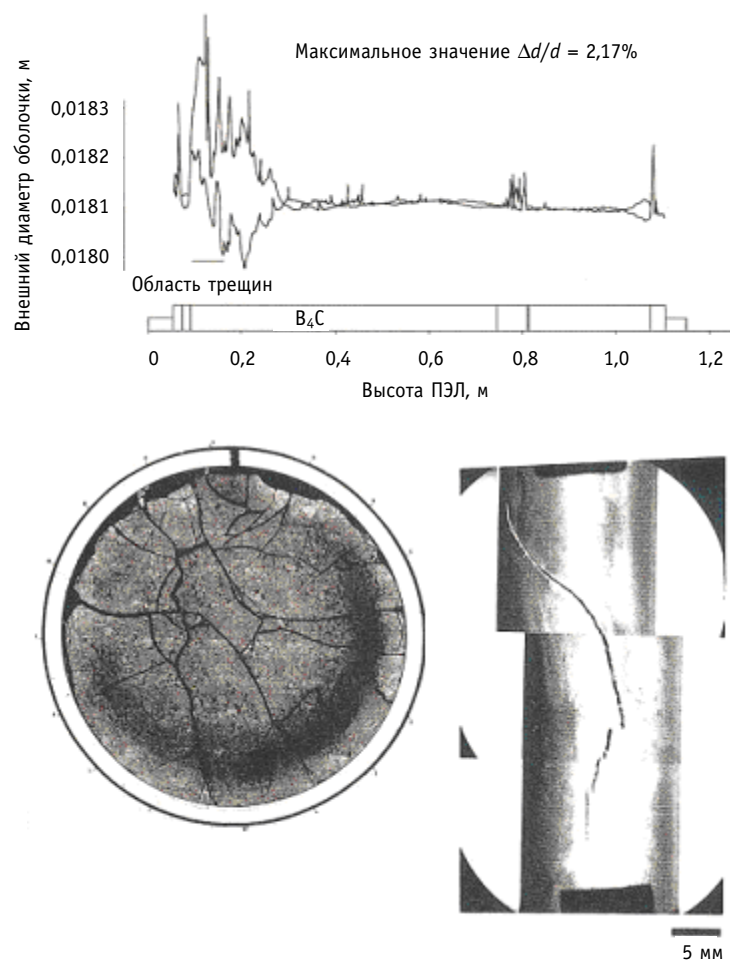


Рис. 1. Формоизменение ПЭЛ реактора JOYO при облучении. Элемент MCR103 D107 [2]

ся неравномерное по объему температурное поле, приводящее к возникновению температурных радиальных и окружных напряжений, и внешнее боковое давление теплоносителя, которое меняется во времени и по высоте ПЭЛ. На втором этапе зазор между поглотителем и оболочкой исчезает за счет распухания поглотителя, которое полагается изотропным. После наступления механического контакта в некоторых сечениях по высоте сердечник и оболочка жестко связаны в этих сечениях. Оболочка ПЭЛ при этом нагружается неравномерным по объему температурным полем, приводящим к возникновению температурных радиальных и окружных напряжений; внутренним давлением распухающего сердечника; внешним боковым давлением теплоносителя, меняющимся во времени и по высоте ПЭЛ. Математическая модель НДС ПЭЛ при этом подразумевает взаимосогласованное решение теплофизической краевой задачи, описывающей нелинейное распространение тепла, и механической краевой задачи вязкопластического деформирования элемента при его неизотермическом нагружении, и учитывающей ползучесть и распухание материалов.

ПОДГОТОВКА ИСХОДНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

Основные геометрические и эксплуатационные параметры стержня СУЗ и ПЭЛ реактора ЮУО приведены в табл. 1 [2, 9].

Распределение выгорания поглотителя по высоте ПЭЛ, необходимое для расчета скорости распухания поглотителя и оболочки, представлено на рис. 2. Эта зависимость также качественно отражает распределения дозовой нагрузки на ПЭЛ и удельного тепловыделения в поглотителе и оболочке ПЭЛ.

Функциональные зависимости кратковременных механических свойств (условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_B , равномерное удлинение δ_p) облученной

Таблица 1

Геометрические и эксплуатационные параметры стержня СУЗ и ПЭЛ реактора ЮУО

Стержень СУЗ	
Длина, м	2,25
Диаметр чехловой трубы, м	0,0647
Число ПЭЛ	7
ПЭЛ	
Внешний диаметр оболочки, м	0,0181
Толщина оболочки, м	0,0007
Диаметр сердечника, м	0,0163
Высота сердечника, м	0,65
Материал сердечника	B ₄ C (90% ат. В ¹⁰)
Материал оболочки	сталь 316 х. д.
Плотность поглотителя, кг/м ³	2140
Максимальное энерговыделение в поглотителе, МВт/м ³	100
Давление теплоносителя на выходе из сборки СУЗ, МПа	0,2
Температура теплоносителя на входе в сборку СУЗ, °C	370
Расход теплоносителя через пучок ПЭЛ, кг/с	2,0
Время облучения, ч	~7600
Флюенс нейтронов ($E > 0,1$ МэВ) н/м ²	$3,02 \cdot 10^{26}$
Максимальное выгорание изотопа В-10, захв/м ³	$5,65 \cdot 10^{27}$

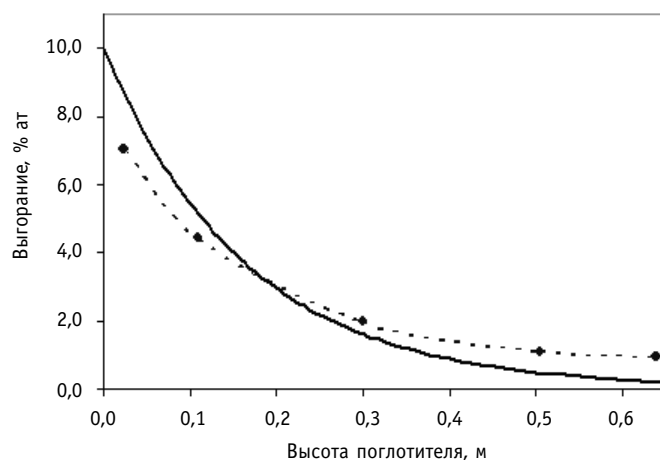


Рис. 2. Распределение выгорания поглотителя по высоте ПЭЛ [9]: — расчет; — ◆ — эксперимент

стали 316 х. д. от температуры и флюенса нейтронов в первом приближении хорошо аппроксимируются данными по отечественной стали ЭИ-847 х. д., представленными, например, в [10].

Распределение полей температур в ПЭЛ рассчитывалось с помощью теплогидравлического кода BUMT [11]. Код BUMT, использующий поканальную модель расчета, может рассчитывать трехмерные поля скорости, давления и температуры теплоносителя и температурные поля в элементах и чехле сборки СУЗ реактора БН в стационарном состоянии и в переходных процессах. Верификация расчетного кода BUMT осуществлялась по результатам экспериментов, проведенных на модельной сборке на жидкометаллическом стенде ФЭИ, и по расчетным результатам, полученным по программе MIF-2 [12]. При расчетах решены следующие задачи – нахождение стационарных полей температуры в ПЭЛ, чехле сборки и теплоносителе и определение полей скорости и давления теплоносителя в сборке. Заданными являлись давление на выходе из сборки и температуры теплоносителя на входе в сборку; закон изменения распределения поля энерговыделения в элементах сборки. Примеры результатов расчетов полей температур в ПЭЛ представлены на рис. 3.

Построенная физическая модель (описаны протекающие в системе физические процессы, сформулированы нагружающие факторы, подготовлены требуемые исход-

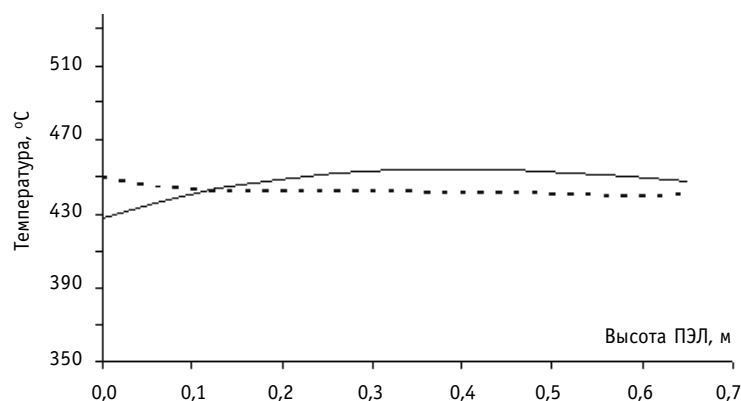


Рис. 3. Распределение усредненной по азимуту температуры оболочек по высоте ПЭЛ: — центральный ПЭЛ; — — — периферийный ПЭЛ

ные данные) пригодна для расчетов НДС ПЭЛ стержня СУЗ реактора БН в стационарных режимах эксплуатации с использованием термомеханических кодов с различной степенью детализации. Результаты термомеханических расчетов и оценка их точности являются предметами специального рассмотрения и в этой работе не приводятся.

Литература

1. Ponomarenko V.B., Risovany V.D. et al. Experience in Development, Operating and Material Investigation of the BOR-60 Reactor Control and Safety Rods. IAEA-TECDOC-884. – 1996. – P.195–203.
2. Сога Т., Тобита К., Мицуги Т., Миякава С. Разработка стержней СУЗ реактора JOYO с натриевым подслоем//Saikuru kikoo gijutsu. – 2000. – № 8. – С. 13–22.
3. Миякава С., Сога Т. и др. Разработка и опыт использования стержней СУЗ активной зоны МК-II реактора JOYO, PNC TN9410 97-068, 1997.
4. Maruyama T., Onose S. et al. Effect of Fast Neutron Irradiation on the Properties of Boron Carbide Pellet//Journal of Nuclear Science Technology. – 1997. – V. 34. – №.10. – P. 1006, 1997.
5. Kryger B., Gosset D., Esclaine J.M. Irradiation Performances of the SUPERPHENIX Type Absorber Element. IAEA-TECDOC-884. – 1996. – P. 127–140.
6. Лихачев Ю.И., Пупко В.Я. Прочность твэлов ядерных реакторов. – М.: Атомиздат, 1975.
7. Маруяма Т., Оносэ С. и др. Послерadiационные исследования стержней СУЗ зоны МК-II JOYO - оценка радиационного поведения ПЭЛ, PNC TN9410 97-077, 1997.
8. Kelly B.T., Kryger B., Esclaine J.M., Holler P. Development of Fast Breeder Reactor Absorber Elements for High Endurance, in Europe, International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycle, Kyoto, Japan, 1991. Proceedings V. III p. 1.10-1 – 1.10-9.
9. Aoyama T., Arai Y. et al. Analysis of Control Rod Worth in Experimental Reactor JOYO. IWGFR/69 ISSN 1011–2758. – Vienna, 1990. – P. 211-235.
10. Козманов Е.А., Рисованый В.Д., Захаров А.В. и др. Результаты исследований опытного стержня АЗ с рефабрицированным карбидом бора после эксплуатации в реакторе БН-600: Сборник докладов. Российский научно-технический форум «Ядерные реакторы на быстрых нейтронах». – Обнинск, 2003.
11. Букша Ю.К., Мариненко Е.Е., Тузов А.А. Разработка программы расчета теплогидравлических параметров ТВС быстрого реактора: математическая модель/ Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша. – 1996. – № 12.
12. Жуков А.В. и др. Межканальный обмен в ТВС быстрых реакторов: расчетные программы и практическое приложение. – М.: Энергоатомиздат, 1991.

Поступила в редакцию 13.09.2004

УДК 621.039.51

On Safety Non-reactor Management of Fissile Materials when a Weak Neutron Source is Available \ Yu.V. Volkov, V.V. Frolov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 5 pages, table, 3 illustrations. – References, 5 titles.

The authors have studied factors contributing into delay of accelerating process when a linear input of super criticality into a system containing fissile materials takes place, there being a weak inherent internal neutron source.

A straightforward procedure of assessing mean time of delay for the acceleration process as well as the multiplication factor at which the process starts developing have been proposed

УДК 621.039.526

Physical Model of Stress-strain State of BN-type Reactor Absorber Pins in Conditions of Absorber-cladding Mechanical Interaction \ A.A. Touzov, A.A. Kamaev; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 1 table, 3 illustrations. – References, 12 titles.

The main problem arising at evaluating the control rod absorber elements efficiency of the BN-type reactors for conditions of absorber high burn up is a correct account of swelling absorber cladding mechanical interaction. To solve this task there has been developed a physical model of complicated stressed-strained state calculation for the absorber element under steady operation conditions. Main hypotheses have been formulated for the scheme of cladding loading due to inner pressure of the absorber stack with taking into account of swelling and creep effects and unidirectional plastic strains for cladding. The list of initial data required has been defined.

An analysis of published domestic and foreign data for recorded cases of cladding failure as a result of mechanical interaction with absorber has been carried out. Based on the analysis results the test model for verification of the calculation procedure element efficiency evaluation has been chosen, and initial data for calculations have been prepared.

УДК 502.3: 546.42

Analysis of Forecast of Sr-90 Run-off with the Techa River Water \ Yu.G. Mokrov; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 7 pages, 4 table, 1 illustration. – References, 8 titles.

Analysis of the Techa River contamination forecast made 10 years ago, is made with the use of a simple prediction model based on hydrological monitoring of the river system and expert assessments of ⁹⁰Sr inflow into the open hydrographic system. It is shown that prediction estimated obtained earlier correspond to up-to-date tasks on Sr-90 runoff in the Techa River middle stream (Muslyumovo vilage). The conclusion is approved that at the moment the Techa River system in the sate of radioactive contamination stabilization. For future predictions it is proposed to use verified data on ⁹⁰Sr filtration capacity from the from the Techa Reservoir cascade in the open hydrographic system.

УДК 621.039.75

Deactivating Polymeric Coats on the Basis of Butylacrilate Latexes \ M.A. Tuleshova, V.K. Milinchuk; Editorial board of Journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy, Yadernaya energetica» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2004. – 6 pages, 4 tables, 1 illustration. – References, 9 titles.

In the article the results of investigation of formation and surface properties of deactivating polymeric coats on the basis of butylacrilate latexes on modeling solid substrates (steel 3, stainless steel, micarta, poly (methyl methacrylate) (PMMA)) is given. Set that the heating-up period of films depends on minimum temperature of formation of a film. The interfacial tensions of latex films lie in an interval from 32 up to 43 mJ/m², solid substrates – from 37 – 46 mJ/m². The share polar builders of interfacial tension for all polymeric films is approximately identical and makes ~ 70 %; for solid