

УДК 621.039.526

**ВЕРИФИКАЦИЯ КОДОВ СТАРТ-4А И СТАРТАП ПО РЕЗУЛЬТАТАМ
ИССЛЕДОВАНИЙ ТВЭЛОВ С МОХ-ТОПЛИВОМ В РЕАКТОРАХ МИР
И HALDEN**

П.Г. Демьянов, Е.А. Кулешов, А.А. Ханков, Е.А. Дергунова
АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт
неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва
PGDemyanov@bochvar.ru, EAKuleshov@bochvar.ru

В настоящее время в АО «ВНИИИМ» разрабатывается МОХ-топливо для реакторов на тепловых нейтронах, в связи с чем требуется подготовка расчетных кодов к лицензированию топлива в надзорных органах. В работе представлены результаты моделирования экспериментов с МОХ-топливом, проведенных в исследовательских реакторах МИР и Halden.

Представлены результаты верификации термомеханических кодов СТАРТ-4А и СТАРТАП по облучению экспериментальных твэлов и послереакторным исследованиям. Расчетные данные демонстрируют удовлетворительное совпадение с экспериментальными. По результатам верификации расширена область применимости кода СТАРТ-4А для твэлов с МОХ-топливом.

Начаты испытания экспериментальной ТВС с МОХ-топливом для ВВЭР современной конструкции, завершён первый этап облучения до выгорания ~10 МВтсут/т.а. После получения данных ПРИ будет проведена верификация кода СТАРТ-4А и, при необходимости, корректировка моделей и библиотеки свойств.

Ключевые слова: верификация, МКЭ, СТАРТАП, СТАРТ-4А, МОХ, МИР, НВWR, ВВЭР, PWR, моделирование.

VERIFICATION OF START-4A AND STARTAP CODES BASED ON MOX-FUEL TESTS IN THE MIR AND HALDEN RESEARCH REACTORS

P.G. Demyanov, E.A. Kuleshov, A.A. Khankov, E.A. Dergunova
JSC A.A. Bochvar High-Technology Research Institute of Inorganic Materials, Moscow

MOX-fuel for Light Water Reactors is now being developed in frames of work of JSC «VNIINM». Insofar, fuel performance codes have to be prepared for licensing of the fuel in nuclear supervisory authorities. This paper presents modelling of the MOX-fuel tests in the research reactors MIR and Halden.

START-4A and STARTUP codes verification based on the results of irradiation and post-irradiation examinations of fuel rods with MOX-fuel are being presented. The calculated data demonstrate satisfactory agreement with experimental data. Based on the verification results, the scope of applicability of the START-4A code for fuel rods with MOX-fuel has been expanded.

Irradiation of experimental fuel assembly with MOX-fuel of a modern VVER design has been started. At the end of the first stage of irradiation rods had reached the burnup value of ~10 MWday/h.a.. After receiving PIE data START-4A code will be verified, and the models and property library will be adjusted if it necessary.

Keywords: verification, FEM, STARTAP, START-4A, MOX, MIR, HBWR, VVER, PWR, modelling.

Введение

Применение МОХ-топлива (UO_2+PuO_2) в реакторах типа ВВЭР и PWR является одним из перспективных направлений развития атомной энергетики. Использование твэлов с МОХ-топливом приводит к уменьшению объема радиоактивных отходов – отработанного ядерного топлива, снижению объемов добычи природного урана и делает возможным переход к замкнутому ядерному циклу.

В настоящее время специалисты АО «ВНИИНМ» проводят работы по исследованию МОХ-топлива с целью экспериментального и расчетного обоснования его работоспособности в легководных реакторах. Для расчетного обоснования работоспособности топлива используются проектные коды, лицензированные в ФБУ «НТЦ ЯРБ», одним из таких кодов является термомеханический код СТАРТ-4А. Код предназначен для расчетов поведения твэлов в режимах нормальной эксплуатации и нарушения нормальной эксплуатации [1]. Кроме того, в АО «ВНИИНМ» разрабатывается МКЭ код СТАРТАП, позволяющий производить расчеты как для нормальной эксплуатации, так и для проектных аварий [2].

В данной работе описана подготовка кодов для расчетов поведения МОХ-топлива посредством верификации кода СТАРТ-4А на имеющемся массиве данных реакторных испытаний и кросс-верификации с кодом СТАРТАП.

1. Реакторные эксперименты с МОХ-топливом

МОХ-топливо вызывало интерес и ранее, исследования проводились в рамках программ CEE Programme, PRIMO, Mixed-oxide (MOX) Fuel Performance Benchmark [3]). Для изучения реакторных свойств новых ядерных материалов проводят испытания в исследовательских реакторах. В данной работе использованы результаты реакторных экспериментов, проведенных в петлях исследовательских реакторов МИР (АО «ГНЦ НИИАР», Россия) и HBWR (Halden Boiling Water Reactor, IFE, Норвегия).

Твэл с МОХ-топливом облучался в реакторе МИР с мая 1993 года по февраль 2000 года в течение 776 эфф. сут. до максимального выгорания 50 МВт·сут/кг т.а. в условиях, соответствующих реактору ВВЭР. Сборка IFA-597 с МОХ-топливом облучалась в реакторе HBWR с середины 1997 года по начало 2002 года в течение 793 эфф. сут. до максимального выгорания 32,5 МВт·сут/кг т.а в условиях, соответствующих реактору PWR.

После облучения твэлы с МОХ-топливом были исследованы в защитных камерах АО «ГНЦ НИИАР» [4] и IFE [5], [6].

2. Моделирование облучения МОХ-топлива

Обоснование работоспособности и безопасности МОХ-топлива должно проводиться с использованием расчетных кодов, верифицированных по экспериментальным данным. Для верификации кода СТАРТ-4А были смоделированы эксперименты, проведенные в реакторах МИР («МОХ-МИР») и HBWR («IFA-597»).

Теплофизические и механические свойства МОХ-топлива, используемые для моделирования в кодах СТАРТ-4А и СТАРТАП, были получены на основе данных из открытых источников: температурный коэффициент линейного расширения [7], удельная теплоемкость [8], теплопроводность [9], ползучесть [10], модуль Юнга [10].

В качестве моделей радиационно-термического уплотнения, выхода газовых продуктов деления и других процессов, происходящих в топливе под облучением, были использованы зависимости кода СТАРТ-4А для UO_2 в связи с отсутствием данных для верификации указанных моделей для МОХ-топлива. Изменение средней линейной мощности твэлов в экспериментах МОХ-МИР и IFA-597 представлено на рис. 1.

В указанной истории облучения учитывается только фактическое время облучения экспериментальных сборок, периоды плановых остановок реактора исключены.

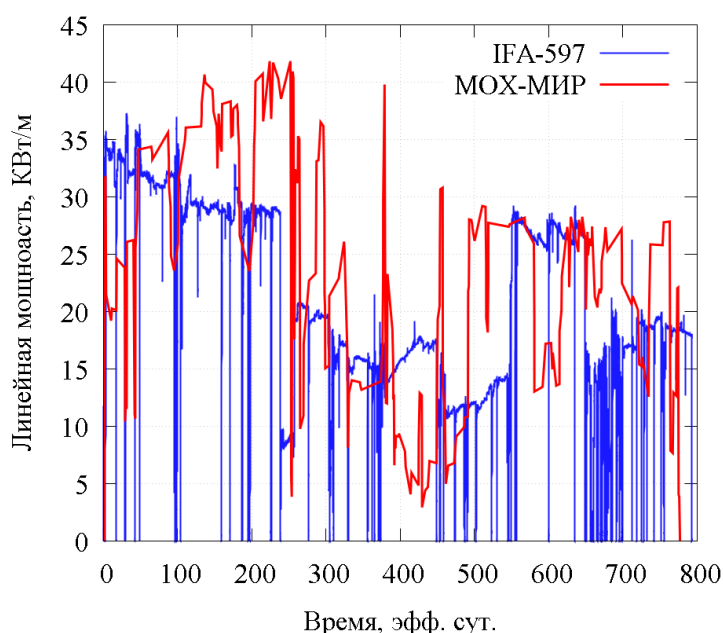


Рис. 1. Линейная мощность твэлов MOX-MIR и IFA-597 в зависимости от времени

Основные конструкционные и технологические характеристики твэлов, принятые в расчетах, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные конструкционные характеристики твэлов с MOX-топливом

Параметр	Принятое для расчетов значение		
	MOX-MIR	IFA-597	
Эксперимент			
Номер твэла	-	10	11
Длина активной части топливного столба, мм	998	224	220
Материал оболочки	Э110	Zr-4	
Наружный диаметр оболочки, мм	9,15	9,5	
Внутренний диаметр оболочки, мм	7,81	8,22	
Наружный диаметр таблетки, мм	7,53	8,05	
Диаметр центрального отверстия, мм	2,3	0,0/1,8	1,8
Высота таблетки, мм	11	10,5	
Содержание Pu, масс. %	5,06	6,07	
Плотность топлива, г/см ³	10,79	10,54	
Давление закачки гелия, МПа	0,1	0,5	

В соответствии с расчетной схемой кода СТАРТ-4А активная часть топливного столба разбивается на аксиальные секции: в эксперименте MOX-MIR топливный столб разбивался на 11 секций, в эксперименте IFA-597 – на 4 секции. Количество секций было выбрано исходя из длины активной части топливного столба моделируемых твэлов.

По результатам гамма-сканирования были рассчитаны коэффициенты неравномерности энерговыделения по высоте твэлов (МОХ-МИР и IFA-597) k_z и коэффициенты подогрева оболочки твэла теплоносителем g_z . Значения k_z , полученные по результатам гамма сканирования (^{137}Cs) для твэла в эксперименте МОХ-МИР и принятые в расчетах усредненные значения по длине секций, выбранные согласно расчетной схеме, представлены на рис. 2.

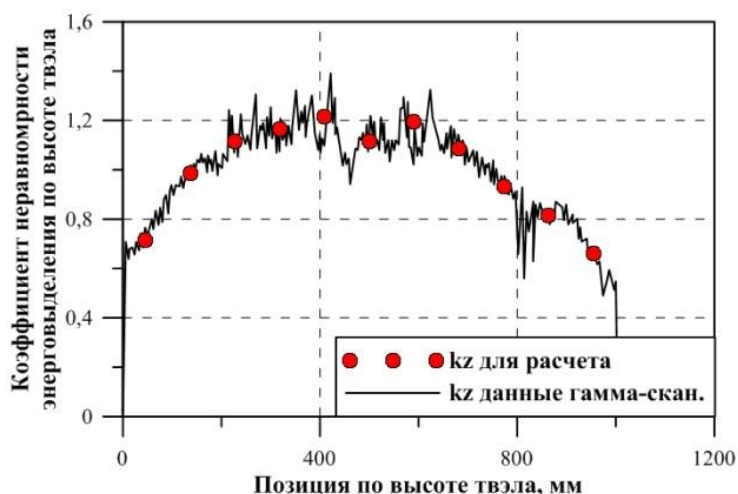


Рис. 2. Значения k_z , полученные по данным гамма-сканирования (^{137}Cs) по высоте твэла в эксперименте МОХ-МИР, и значения коэффициента k_z , принятые в расчетах

В результате моделирования сформированы исходные данные по облучению МОХ-топлива в рассмотренных экспериментах, которые были использованы для верификации кодов.

3. Результаты верификации

Для валидации библиотеки свойств МОХ-топлива проведена верификация кода СТАРТ-4А по результатам послереакторных исследований твэлов экспериментов МОХ-МИР и IFA-597.

Изменение диаметра твэла эксперимента МОХ-МИР

Данные профилограммы твэла были усреднены в соответствии с расчетной схемой разбиения твэла. Сравнение расчетных и экспериментальных значений изменения диаметра приведено на рис. 3.

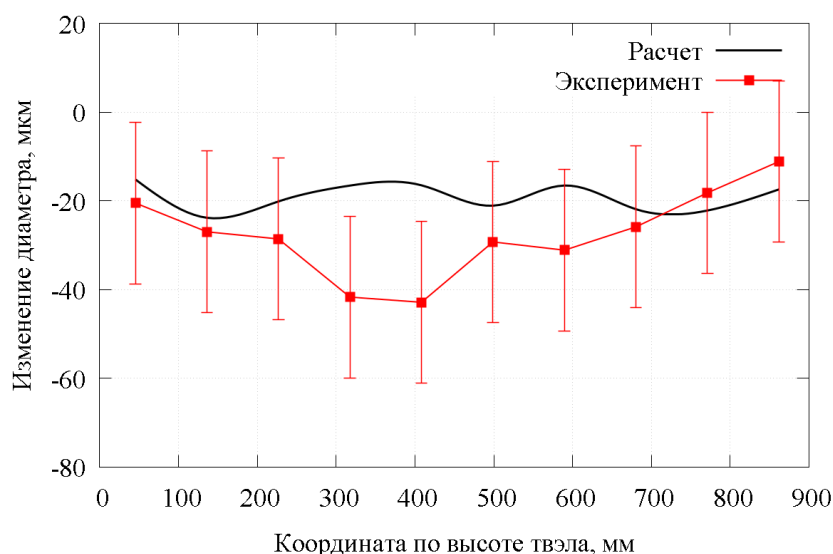


Рис. 3. Сравнение расчетных и экспериментальных профилограмм твэла эксперимента МОХ-МИР

Из рис. 3 видно, что расчетные значения, полученные по коду СТАРТ-4А, превышают экспериментальные данные. Это свидетельствует о более раннем наступлении контакта топлива и оболочки за счет размерных изменений топлива, что говорит о консервативности модели набухания топлива.

Давление и объем газа, выход ГПД в твэле в эксперименте МОХ-МИР

В табл. 2 представлено сравнение расчетных и экспериментальных данных по давлению газа, объему газа в твэле и выходу ГПД эксперимента МОХ-МИР.

Таблица 2

Сравнение расчетных и экспериментальных значений верифицируемых параметров эксперимента МОХ-МИР

Параметр	Расчетное значение	Экспериментальное значение	Абсолютное отклонение расчета от эксперимента
Давление газа в твэле, МПа	0,28	0,27	0,01
Объем газа под оболочкой твэла, см ³	27,5	24,0	7,5
Свободный объем, см ³	10,6	9,0	1,6
Выход ГПД, %	2,7	2,6	0,1

Сравнительный анализ результатов расчетов кодом СТАРТ-4А показал, что они удовлетворительно совпадают с экспериментальными значениями соответствующих параметров.

Температура центра топлива и давление газа в твэлах в эксперименте IFA-597

Твэлы сборки IFA-597 были оснащены термопарами, расположенными в центре топливного столба на расстоянии 40 мм от верхнего торца топлива, и датчиками давления.

На рис. 4 представлено сравнение расчетных значений температуры центра топлива в твэле №10 с показаниями термопары в эксперименте IFA-597.

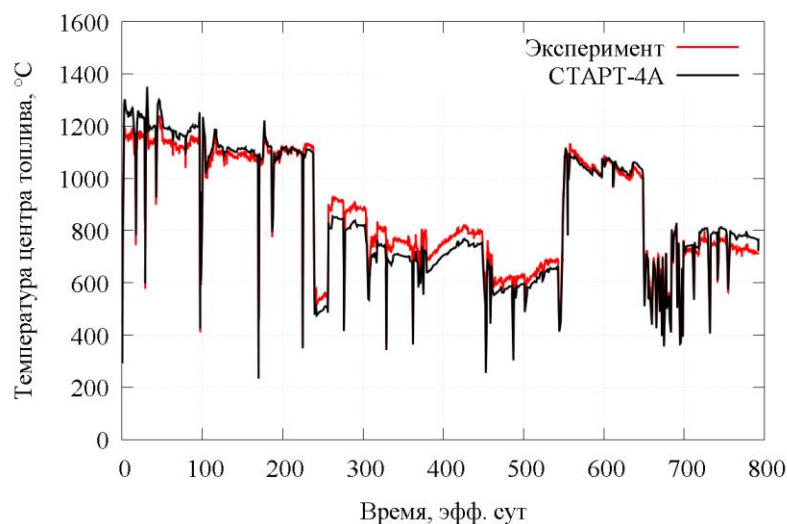


Рис. 4. Сравнение расчетных и экспериментальных значений температуры в центре топлива в месте установки термопары в эксперименте IFA-597

На рис. 5 представлено сравнение расчетных значений давления газа в твэле с показаниями датчика давления в эксперименте IFA-597.

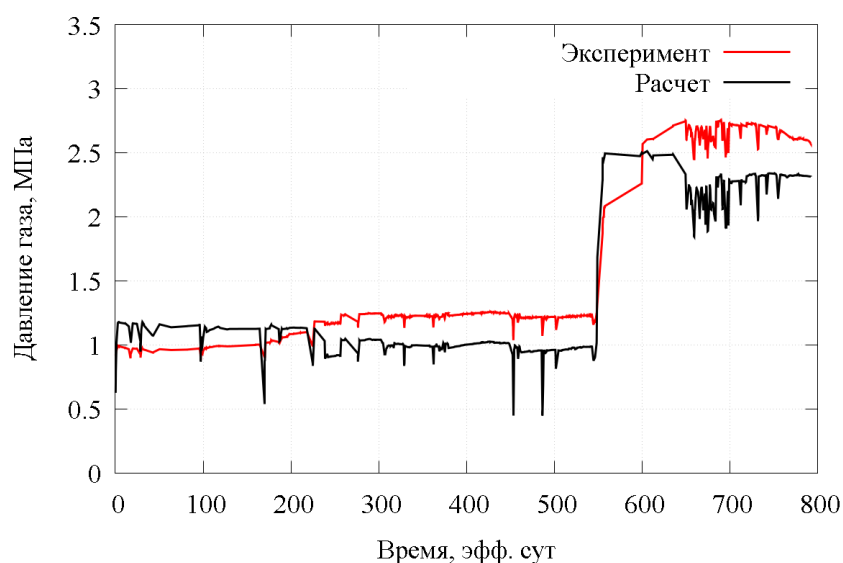


Рис. 5. Сравнение расчетных и экспериментальных значений давления газа в твэле в эксперименте IFA-597

Абсолютные значения максимального отклонения расчетных данных от экспериментальных следующие: по температуре в центре топлива в месте установки термопары 76,2 °С, по давлению в твэле 0,5 МПа, что в относительных единицах составляет ~10% и 18% соответственно. Расхождение расчетных и экспериментальных данных вызвано главным образом неопределенностью задания линейной мощности твэлов в процессе облучения в реакторах, а также тем фактом, что перестройка структуры топлива и выход ГПД рассчитывается по моделям, построенным для UO₂. По мере поступления новых экспериментальных данных будет проведена разработка указанных моделей кода СТАРТ-4А для МОХ-топлива.

Кросс-верификация кодов СТАРТ-4А и СТАРТАП

На данный момент в АО «ВНИИНМ» ведется разработка МКЭ кода СТАРТАП, способного проводить 1D и 2D расчеты поведения твэлов как в режимах нормальной эксплуатации, так и в проектных авариях.

Для кода СТАРТАП разработаны теплофизический и термомеханический модули. В ходе данной работы была проведена верификация теплофизического модуля для МОХ-топлива по показаниям термопары в центре топлива твэла эксперимента IFA-597, также проведена кросс-верификация с кодом СТАРТ-4А.

Для верификации теплофизического модуля кода СТАРТАП решалась тепловая задача для цилиндра со свойствами МОХ-топлива, температура на внешней поверхности цилиндра была задана по результатам расчета кодом СТАРТ-4А, внутреннее энерговыделение задавалось в соответствии с базой данных эксперимента IFA-597.

Значения температуры центра топлива, рассчитанные кодом СТАРТАП, совпадают с показаниями термопары с неопределенностью 11,3%, с результатами расчета по коду СТАРТ-4А с неопределенностью 4,4%.

Неопределенность расчетов по коду СТАРТАП объясняется неопределенностью результатов расчета по коду СТАРТ-4А и отсутствием модели перестройки структуры топлива, влияющей на теплопроводность.

По результатам верификации сделан вывод о готовности теплофизического модуля кода СТАРТАП для проведения расчетов твэлов с МОХ-топливом в первом приближении. По мере поступления новых данных модели кода СТАРТАП также будут обновляться.

4. Новые реакторные испытания МОХ-топлива для ВВЭР

С целью получения экспериментальных данных о поведении МОХ-топлива для твэлов ВВЭР современной конструкции в 2022 году были начаты научно-исследовательские работы. Реакторные испытания запланированы до достижения выгорания топлива ~60 МВт·сут/кг т.а.

Для испытаний были разработаны экспериментальные твэлы с МОХ-топливом и экспериментальная ТВС (ЭТВС-МОКС, рис. 6).

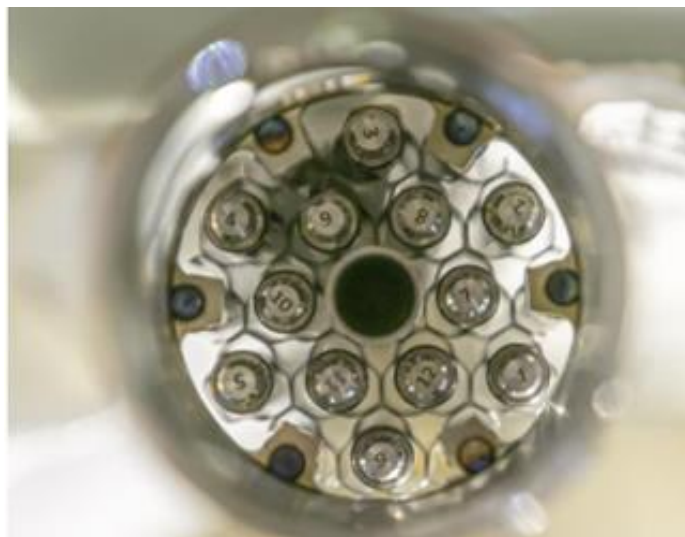


Рис. 6. ЭТВС-МОКС перед испытаниями в реакторе МИР (вид сверху)

В течение 2023 года в реакторе МИР был проведен первый этап реакторного облучения и реакторных экспериментов (RIA) (программа реакторных испытаний запланирована до 2030 года), на 12 ноября 2023 года достигнуто максимальное выгорание ~10 МВт·сут/кг т.а. При осмотре твэлов после стационарного облучения дефектов на оболочках не обнаружено, все твэлы сохранили герметичность.

Выводы

В работе проведена верификация кодов СТАРТ-4А и СТАРТАП по результатам облучения и послереакторных исследований твэлов с МОХ-топливом. Расчетные данные обоих кодов демонстрируют удовлетворительное совпадение с данными экспериментов, однако для повышения точности расчета необходима корректировка моделей перестройки структуры и выхода ГПД для МОХ-топлива. По результатам верификации предполагается расширить область применимости кода СТАРТ-4А для твэлов с МОХ-топливом при прохождении аттестации в 2024 г.

В реакторе МИР начаты испытания экспериментальной ТВС с МОХ-топливом для ВВЭР современной конструкции. После получения данных послереакторных исследований твэлов модели свойств и процессов МОХ-топлива для кодов СТАРТ-4А и СТАРТАП будут откорректированы.

Благодарности

Авторы выражают благодарность специалистам АО «ГНЦ НИИАР» и IFE за профессионально проведенные реакторные эксперименты и послереакторные исследования.

Список литературы

1. *Аттестационный паспорт программы для ЭВМ «СТАРТ-4А», ФБУ «НТЦ ЯРБ», регистрационный номер 570 от 05.12.2022.*
2. *Кузнецов В.И., Крупкин А.В., Белендрасова Е.Г. и др., «2D осесимметричный элемент - предварительные итоги разработки расчетных кодов для конечно-элементной системы общего вида». Материалы ядерной техники: сборник докладов научно-технической конференции, Москва, 2023.*
3. *Brown C., Callens C., Goll W. et al., «Overview on MOX Fuel for LWRs: Design, Performance and Testing, Proceedings of MOX Fuel Technologies for Medium and Long Term Deployment». IAEA, pp.203-212, 2000.*
4. *Демьянов П.Г., Еременко А.С., Королева А.И. и др., «Верификация кодов СТАРТ-4А и СТАРТАП по результатам реакторных испытаний MOX-топлива в реакторах МИР, HALDEN и FUGEN.» Материалы ядерной техники: сборник докладов научно-технической конференции, Москва, 2023.*
5. *Rozzia D., Forgione N., Ardizzone A., Del Nevo A., «Validazione e analisi dei gas di fissione in combustibili MOX ad elevato burnup,» ENEA, 2013.*
6. *Ott L.J., Tverberg Terje, Sartori Encrico, «Mixed Oxide (MOX) fuel performance benchmarks» Annals of Nuclear Energy 36, P. 375-379, 2009.*
7. *Lusher W.G., Geelhood K.J., «Material Property Correlations: Comparisons between FRAPCON-3.4, FRAPTRAN 1.4 and MATPRO». Pacific Northwest National Laboratory, Richland, WA 99352, 2012.*
8. *Fink K.J., «Enthalpy and head capacity of the actinide oxides,» International Journal of Thermophysics: Vol. 3, №2., P. 165-200, 1982.*
9. *Baron D., «About The Modelling of Fuel Thermal Conductivity Degradation at High Burn-Up Accounting for Recovering Processes with Temperature». Thermal Performance of High Burn-Up LWR Fuel, P. 129-143, Cadarache, France, 1998.*
10. *Milet Claude, Piconi Corrado, «Fluage en pile de l'oxyde mixte UO₂-PuO₂». Journal of Nuclear Materials, Vol. 116, P. 195, 1983.*