

М. Л. Еременко, В. А. Халимончук

Государственный научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности

Экспертиза материалов обоснования внедрения новых типов ядерного топлива на украинских АЭС. Опыт выполнения независимых поверочных расчетов

Рассмотрен опыт ГНТЦ ЯРБ в проведении экспертизы документов обоснования внедрения новых типов топлива реакторов ВВЭР на АЭС Украины. Приведены данные по типам используемых ТВС на украинских атомных станциях, перечень основных нормативных документов, определяющий порядок внедрения и лицензирования новых типов топлива, ближайшие планы по дальнейшему их внедрению. Представлена практика выполнения независимых поверочных расчетов, принятая в ГНТЦ ЯРБ при проведении Государственной экспертизы по ядерной и радиационной безопасности применительно к проблемам внедрения новых типов топлива на АЭС Украины.

Ключевые слова: ВВЭР, ТВС, активная зона, нейтронно-физические расчеты, анализ безопасности, экспертиза, поверочные расчеты.

М. Л. Еременко, В. А. Халимончук

Експертиза матеріалів обґрунтування впровадження нових типів ядерного палива на АЕС України. Досвід виконання незалежних перевірочних розрахунків

Розглянуто досвід ДНТЦ ЯРБ проведення експертизи документів обґрунтування впровадження нових типів палива реакторів ВВЕР на АЕС України. Наведено дані щодо типів використовуваних ТВЗ на українських атомних станціях, перелік основних нормативних документів, що визначають порядок впровадження й ліцензування нових типів палива, найближчі плани з подальшого їх впровадження. Представлено практику виконання незалежних перевірочних розрахунків, яка прийнята в ДНТЦ ЯРБ у процесі проведення Державної експертизи ядерної та радіаційної безпеки стосовно проблеми впровадження нових типів палива.

Ключові слова: ВВЕР, ТВЗ, активна зона, нейтронно-фізичні розрахунки, аналіз безпеки, експертиза, перевірочні розрахунки.

© М. Л. Еременко, В. А. Халимончук, 2011

Для эксплуатации украинских АЭС характерен процесс постоянного совершенствования топливных циклов с целью повышения экономических показателей топливоиспользования за счет внедрения в эксплуатацию различных модификаций топливных кассет реакторов ВВЭР. Внедрение новых типов ТВС начинается с организации и проведения их опытной эксплуатации, которая в Украине осуществлялась по-разному — малыми и большими (перегрузочными) партиями. Как пример внедрения малыми партиями можно рассматривать загрузку кассет типа УТВС, различных модификаций ТВС с гадолиниевым выгорающим поглотителем, увеличенной массой урана, первых кассет производства фирмы Westinghouse (ТВСW). Примером внедрения топлива в опытную эксплуатацию крупными партиями служит внедрение циркониевых кассет и кассет второго поколения реактора ВВЭР-440, кассет ТВСА и усовершенствованных ТВСW для реактора ВВЭР-1000.

ГНТЦ ЯРБ осуществляет техническую поддержку регулирующего органа Украины и принимает непосредственное участие в анализе документации и разработке заключений Государственной экспертизы. Политикой ГНТЦ ЯРБ при проведении технической экспертизы является всестороннее использование независимых расчетных кодов для проведения собственных расчетных оценок безопасности, а также выполнения поверочных расчетов для установления качества представленных обоснований. Такой подход полностью соответствует рекомендациям нормативных документов МАГАТЭ по использованию независимых расчетных методик при проектировании активной зоны и проведении внутриреакторных измерений, а кроме того позволяет: 1) поддерживать квалификацию сотрудников ГНТЦ ЯРБ на современном уровне в области оценок безопасности объектов атомной энергетики и обеспечивать тем самым готовность специалистов ГНТЦ ЯРБ к проведению анализов различных ситуаций, инцидентов и т. д. по заказу регулирующего органа Украины; 2) проводить количественную оценку параметров объекта с использованием собственных результатов расчета в случае отсутствия соответствующих оценок в материалах обоснований.

Типы ТВС, используемые на АЭС Украины. На текущий момент активная зона реакторов полностью состоит из ТВСА на блоках №№ 1—6 ЗАЭС, № 1 ЮУ АЭС и № 4 РАЭС. Активная зона нескольких реакторов содержит одну-две ТВСМ, загруженные вместо отбракованных кассет. Активная зона блока № 3 ЮУ АЭС содержит топливо ТВСМ+ТВСА+ТВСW (табл. 1).

Основные нормативные документы, определяющие порядок внедрения и лицензирования новых типов топлива. В процессе лицензирования внедрения в Украине новых типов топлива ВВЭР нормативная база существенно дополнялась и разрабатывалась. В начальный период испытывался дефицит нормативных актов, определяющих порядок внедрения нового топлива. Нормативная база того времени основывалась на документах бывшего СССР. На сегодня процесс внедрения нового топлива достаточно урегулирован созданными и обновленными НД, определяющими также основные этапы внедрения топлива.

Основные нормативные документы, определяющие порядок внедрения и лицензирования новых типов топлива:

- Подходы к регулированию ядерной и радиационной безопасности в рамках проектов внедрения в Украине новых модификаций ядерного топлива;

Таблица 1. Характеристики использования топлива на АЭС Украины

АЭС	№ блока	Реактор	Топливо
Ровенская	1	ВВЭР-440	Zr РК+ТВС
	2		Zr РК+ТВС, РК-П+ТВС-П, Hf поглощающие вставки
	3	ВВЭР-1000	ТВСМ+ТВСА
	4		ТВСА
Запорожская	1–6	ВВЭР-1000	ТВСА
Южно-Украинская	1	ВВЭР-1000	ТВСА
	2		ТВСМ+ТВСА
	3		ТВСМ+ТВСА+ТВСВ
Хмельницкая	1, 2	ВВЭР-1000	ТВСМ+ТВСА

• НП 306.2.106–2005. Требования к проведению модификаций ЯУ и порядку оценки их безопасности;

• НП 306.2.141–2008. Общие положения безопасности атомных станций;

• НП 306.2.145–2008. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций с реакторами с водой под давлением;

• РД-95. Требования к содержанию отчета по анализу безопасности действующих на Украине энергоблоков АЭС с реакторами типа ВВЭР.

В соответствии с требованиями первых двух документов внедрению новых типов топлива в промышленную эксплуатацию предшествует этап опытной эксплуатации на протяжении срока, предусмотренного в технических условиях. При этом пилотная модификация (т. е. опытная эксплуатация), как правило, производится на одной ЯУ. В совокупности данный перечень документов определяет основные этапы внедрения топлива, состав и содержание материалов обоснования безопасности предлагаемого внедрения.

Отметим ряд особенностей развития атомной энергетики Украины, влияющих на процесс лицензирования новых типов топлива:

в отсутствие собственной производственной базы топливных кассет Украина покупает топливо без привязки к конкретному производителю. Поэтому этап опытной эксплуатации нового топлива может быть исключен и это топливо может быть сразу рекомендовано к промышленной эксплуатации, если имеется положительный опыт его эксплуатации на других реакторах ВВЭР в течение срока, соответствующего длительности опытной эксплуатации, определенной в НД Украины;

стратегия на продление срока эксплуатации РУ АЭС Украины определяет необходимость оценки воздействий внедряемого топлива и топливного цикла на корпус реактора;

стратегия на создание централизованного хранилища отработанного топлива определяет необходимость оценки возможности и условий хранения топливных кассет после эксплуатации в активной зоне реактора;

согласно заявленной политике евроинтеграции, процесс лицензирования новых типов топлива должен учитывать рекомендации МАГАТЭ и опыт стран-членов ЕС, обеспечивать возможность проведения независимой экспертизы с привлечением международных организаций.

При лицензировании новых типов топлива возникают дискуссии по двум вопросам:

1) верификации и валидации программных средств, используемых при разработке материалов обоснования;

2) соответствию используемых методик и подходов современному состоянию науки и техники.

Первый вопрос связан с существованием института аттестации программных средств и аттестационных паспортов в России, где применимость расчетных кодов подтверждается аттестационным паспортом, который выдается на основе верификационно-валидационного отчета. Однако такой отчет с паспортом на программное средство не поставляется. Отсутствие доступа к ознакомлению с валидационным и верификационным отчетом не дает возможности оценить полноту работы по аттестации этого расчетного средства и использовать данный отчет для сопоставительной оценки по аттестации аналогичного расчетного средства.

Второй вопрос связан с необходимостью использовать при обосновании безопасности реалистичные модели и современные методики, адекватно описывающие протекание изучаемого процесса, в отличие от упрощенной методологии, пытающейся получить консервативную оценку на использовании предположений, очевидность которых может быть доказана только исходя из реалистичного моделирования рассматриваемого процесса.

Лицензирование топливных кассет ВВЭР-440 с циркониевыми дистанционирующими решетками. В первой половине 1990-х годов началась эксплуатация топливных загрузок реактора ВВЭР-440 блока № 2 Ровенской АЭС с использованием рабочих кассет начального обогащения 4,4 % с дистанционирующими и верхними решетками из циркония для реализации четырехлетнего топливного цикла. В то время происходило становление ГНТЦ ЯРБ как экспертной организации. Специалисты ГНТЦ ЯРБ не были готовы к выполнению собственных расчетных оценок параметров безопасности РУ. Поэтому не все важные аспекты были проанализированы, по некоторым из них отсутствовала нормативная база. При лицензировании внедрения этого топлива возник ряд вопросов и проблем, актуальность которых в полной мере не снята и по сей день:

соблюдение критериев критичности при хранении топлива в приреакторном бассейне выдержки;

соблюдение критериев критичности при транспортных операциях с отработавшим топливом в контейнере ТК-6;

темпы накопления флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора.

На сегодня, когда циркониевое топливо находится в промышленной эксплуатации и на РАЭС реализован уже пятнадцатый топливный цикл, проблема накопления флюенса снята благодаря компоновке активной зоны с пониженной утечкой и использованию современных трехмерных моделей по расчету потока быстрых нейтронов. Также решается проблема соблюдения критериев критичности при хранении топлива в приреакторном бассейне выдержки путем

замены стеллажей на новые, содержащие борный поглотитель в составе конструкционных материалов. А вот проблема с критичностью транспортного контейнера ТК-6 и обоснование выполнения критерия $K_{эф} < 0,95$ в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-14-029-91 не решена. Для обеспечения критерия $K_{эф} < 0,95$ используется частичная загрузка контейнера. Поэтому актуален пересмотр данного нормативного документа, определяющего условия расчета $K_{эф}$ при обосновании критерия $K_{эф} < 0,95$. Прежде всего, это касается учета выгорающего поглотителя, интегрированного в топливо (в соответствии с ПНАЭ Г-14-029-91 выгорающий поглотитель не учитывается), и возможности использования принципа "burnup-credit" (учет изотопного состава выгоревшего топлива).

Лицензирование топливных кассет ВВЭР-440 второго поколения. Внедрение топливных кассет второго поколения на реакторах ВВЭР-440 Ровенской АЭС началось в 2009 г. в качестве топлива подпитки на блоке № 2. Кассеты содержат повышенное количество урана за счет увеличения высоты столба топлива и уменьшения внутреннего диаметра урановой таблетки. Кроме того, в верхней части кассеты размещен гафниевый поглотитель для снижения всплеска энерговыделения в твэлах соседних ТВС при перемещении ОР СУЗ. Основные замечания и проблемы, которые были отмечены в ходе проведения экспертиз технических решений по внедрению этого топлива:

невыполнение критерия критичности $K_{эф} < 0,95$ для хранилища свежего топлива при использовании кассет второго поколения. Предложено размещать кассеты данного типа через ряд;

различие в моделях поведения теплопроводности газового зазора между оболочкой топлива и урановой таблеткой при различных уровнях выгорания в документации поставщика топлива и независимых оценках ГНЦТ ЯРБ. До разъяснения ситуации предложено для оценки максимальных температур топлива и оболочки твэла использовать более консервативную модель теплопроводности газового зазора;

ввиду более высоких уровней выгорания топлива отмечена необходимость переоценки радиологических последствий аварий.

Лицензирование топливных кассет типа ТВСА. Внедрение топливных кассет типа ТВСА на реакторах ВВЭР-1000 АЭС Украины началось в 2003 г. в качестве топлива подпитки на блоке № 3 ЗАЭС. Вторым шагом по внедрению ТВСА было формирование пусковой загрузки на блоке № 2 ХАЭС в 2004 г. На последнем этапе внедрения ТВСА в 2006 г. переведен блок № 1 ЮУ АЭС (проект В-338) на подпитку топливом этого типа. Основные замечания и проблемы, отмеченные в ходе проведения экспертиз соответствующих технических решений:

в 2003 г. кассеты ТВСА внедрены в опытную эксплуатацию, а не в промышленную. Это связано с тем, что на момент разработки материалов обоснования опыт эксплуатации кассеты ТВСА в предлагаемом конструктивном исполнении составлял два года;

ввиду более высоких уровней выгорания топлива нужно переоценивать радиологические последствия аварий;

для ТВСА необходим анализ безопасности систем обращения с топливом в соответствии с требованиями ПНАЭ Г-14-029-91 без учета наличия выгорающего поглотителя;

отсутствует обоснование соблюдения критерия по 15 %-му набросу линейного энерговыделения для топлива четвертого года эксплуатации;

необходимо представлять более детальные верификационные отчеты по кодам, которые использовались при обосновании безопасности перевода реактора на топливо ТВСА;

характеристики реально реализуемых топливных загрузок могут выходить за пределы диапазона (рамочные значения), для которого выполнен анализ безопасности.

Лицензирование топливных кассет типа ТВСВ. Решение о возможности загрузки в активную зону топлива альтернативного поставщика принято в 1990-х годах. В рамках реализации этого решения в 2005 г. в активную зону реактора блока № 3 ЮУ АЭС загружено шесть кассет производства компании Westinghouse для опытной эксплуатации. Внедрена и новая система внутрореакторного контроля BEACON. Основные замечания и проблемы, отмеченные в ходе проведения экспертиз технических решений по внедрению пилотных кассет ТВСВ:

использование модели точечной кинетики программы TWINKLE с трехмерной программой стационарного расчета активной зоны ВВЭР-1000 ANC-N для анализа аварии, связанной с выбросом одного наиболее эффективного кластера, возможно. Однако из-за поверхностного описания в ОАБ сценария этой аварии, отсутствия описания взаимодействия программ и подробного обоснования выбора консервативных условий сделать вывод о достигнутой консервативной оценке безопасности этого события затруднительно. В связи с этим рекомендовано в анализе безопасности перегрузочной партии использовать современную методологию на основе программ трехмерной кинетики;

необходимо предусмотреть выполнение валидационных работ для уточнения погрешностей определения характеристик топлива и активной зоны ВВЭР-1000 расчетными кодами, которые используются при обосновании безопасности внедрения топлива ТВСВ;

нужны сведения о методологии и программных средствах оценки напряженно-деформированного состояния и работоспособности ТВС производства Westinghouse (как цельной конструкции) в составе активной зоны во всех режимах эксплуатации реакторной установки с ВВЭР-1000.

Лицензирование топливных кассет ТВСВ перегрузочной партии. После завершения опытной эксплуатации шести пилотных ТВС производства компании Westinghouse и оценки их технического состояния принято решение о продолжении эксплуатации топлива этого типа на блоке № 3 ЮУ АЭС и загрузке перегрузочной партии в количестве 42 шт. в 2009 г. Экспертиза материалов обоснования загрузки перегрузочной партии выполнялась двумя организациями: ГНЦТ ЯРБ и TUV SUD Industrie Service, Мюнхен, Германия. Основные замечания и проблемы, отмеченные в ходе проведения экспертизы технического решения по загрузке перегрузочной партии кассет типа ТВСВ:

низкое качество документации и отчетов, необходимость предоставления более детальной информации по валидации и верификации расчетных кодов;

использование «старых» методов и приближений. В основном это касается применения точечной кинетики для анализа реактивных аварий (RIA) с несимметричным поведением поля энерговыделения;

возможность превышения максимально допустимого энерговыделения твэла K_r . Необходимо дополнительно выполнить оценку K_r при различных положениях рабочей группы из допустимого диапазона;

отсутствие оценки флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора и внутрикормовые устройства;

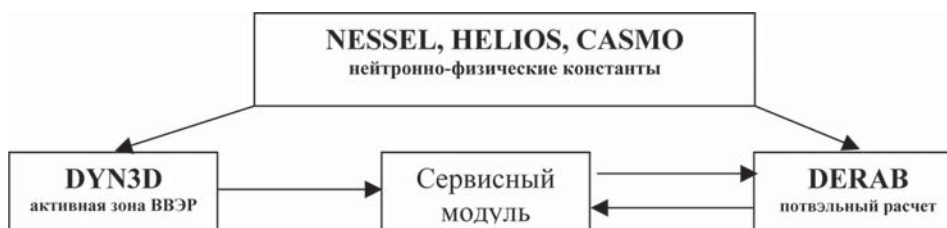


Рис. 1. Нейтронно-физические характеристики активной зоны реакторов ВВЭР в стационарных режимах, Хе-переходных процессах и при авариях

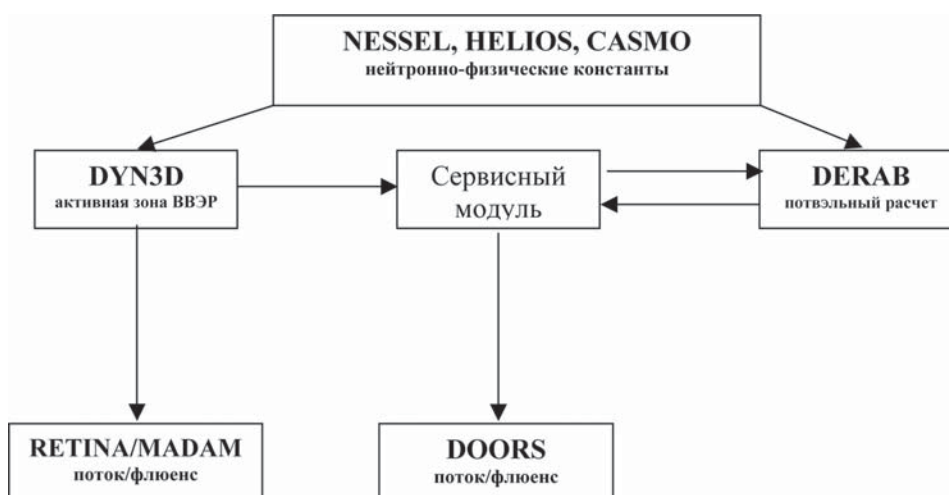


Рис. 2. Оценка флюенса быстрых нейтронов на корпус реактора ВВЭР

отсутствие оценки возможности использования регулирующих стержней с топливом данного типа;

необходимость переоценки радиологических последствий аварий ввиду более высоких уровней выгорания топлива.

Планы по внедрению нового топлива на АЭС Украины определяются необходимостью повышения экономических показателей энергоблоков, стратегией развития атомной энергетики Украины до 2030 г. (распоряжение КМУ № 436-р от 27.07.2006), указом Президента Украины 156/2008. Основными ближайшими планами обозначено:

внедрение кассет второго поколения ВВЕР-440 на блоке № 1 РАЭС (2010–2011 гг.);

перевод блоков № 1 и № 2 Южно-Украинской АЭС на подпитку топливом ТВСВ.

Коды, используемые при выполнении независимых расчетов. При расчетах характеристик активных зон реакторов ВВЭР и оценки критичности систем хранения и транспортирования топлива используются следующие коды:

SCALE — проблемы критичности, отработавшее топливо;

MCNP — проблемы критичности, разработка расчетных бенчмарков для потвального энерговыделения и флюенса нейтронов на корпус реактора;

NESSEL, HELIOS, CASMO (в кооперации с TUV) — подготовка библиотек нейтронно-физических констант;

DYN3D — безопасность активной зоны, переходные режимы, аварии;

DERAB — потвальное распределение энерговыделения;

RETINA/MADAM, DOORS — поток нейтронов и флюенс на корпус реактора;

TRANSURANUS — термомеханическое поведение твэла.

С помощью этих кодов выполняются независимые расчеты по основным направлениям, представленным на рис. 1–4.

Валидация и верификация используемых кодов. В основном перечисленные ранее коды передавались в ГНТЦ ЯРБ в рамках международного сотрудничества и технической помощи Украине:

проектов TACIS (NESSEL, DERAB, RETINA/MADAM);

сотрудничества с IAEA (HELIOS, DYN3D, TRANSURANUS);

сотрудничество с BMU, Германия (поддержка кодов NESSEL, DYN3D, DERAB, RETINA/MADAM; создание библиотек с использованием кода CASMO);

сотрудничества с NRC, США (SCALE, MCNP, DOORS).

С момента получения и освоения кодов начались работы по всестороннему их тестированию и применению для оценки безопасности АЭС Украины. По итогам валидационных работ выпущено несколько отчетов [1]–[4]. Большой объем результатов сравнения включается в технические экспертизы, выполненные по заказу регулирующего органа Украины, представляется в статьях и докладах.

Кроме всестороннего тестирования расчетных кодов в ГНТЦ ЯРБ проводится работа и по модернизации кодов,

адаптации комплекса к реальным условиям эксплуатации АЭС Украины. Наиболее успешно это направление развивается в рамках сотрудничества с немецкими организациями TUV, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (FZD) при поддержке ВМУ. В свете этого сотрудничества проводится модернизация кода DYN3D, улучшение его расчетных возможностей. Совместно со специалистами TUV подготовлена библиотека нейтронно-физических констант с использованием кода CASMO. Результаты этой работы использованы при подготовке констант с применением кода HELIOS.

Результаты. Главный вопрос, который возникает в ходе дискуссий о необходимости выполнения поверочных расчетов, сводится к следующему: зачем пересчитывать уже полученные данные? Ответ можно сформулировать так: невозможно количественно оценить параметры объекта без использования собственных результатов расчета. И в подтверждение этому приведем ряд примеров из деятельности ГНТЦ ЯРБ:

доказана ошибочность проекта хранилища отработавшего топлива для Чернобыльской АЭС (превышение критерия критичности, $K_{эф} > 0,95$);

доказана ошибочность выбора двух топливных кампаний. Компоновки активной зоны изменены;

по требованию экспертов изменен режим пуска блока после ППР (пуск с погруженной группой ОР СУЗ);

доказана ошибочность обоснования критерия критичности для транспортного контейнера ТК-6;

по требованию экспертов выполняются дополнительные обоснования критичности контейнеров хранения отработавшего топлива на ЗАЭС;

доказана недостаточность обоснования критерия критичности для областей бассейнов выдержки, в которых расположены ячейки системы обнаружения дефектных сборок;

доказано невыполнение критерия критичности $K_{эф} < 0,95$ для хранилища свежего топлива ВВЭР-440 при использовании кассет второго поколения. Предложено размещать кассеты данного типа через ряд.

Обнаруженные в результате использования при анализе безопасности проведения поверочных расчетов недостатки достаточно существенны. Помимо этого имеется большое количество не таких принципиальных моментов, которые выясняются в ходе независимых расчетов и служат основой для корректировок обоснований со стороны АЭС Украины.

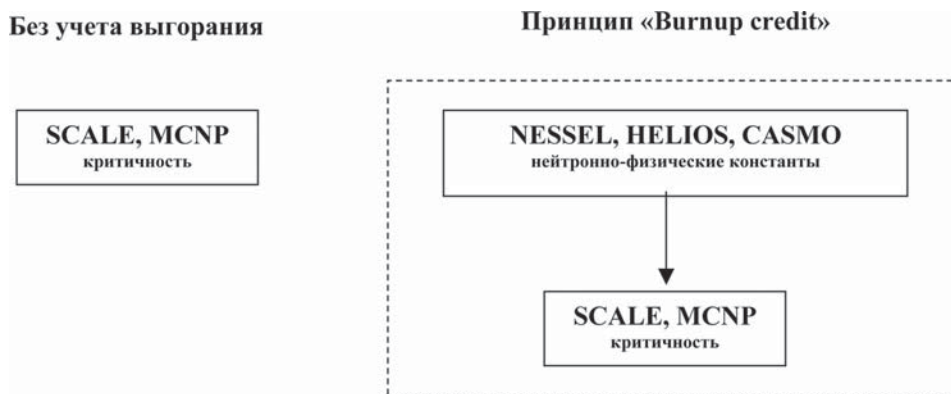


Рис. 3. Критичность систем хранения и транспортирования топлива

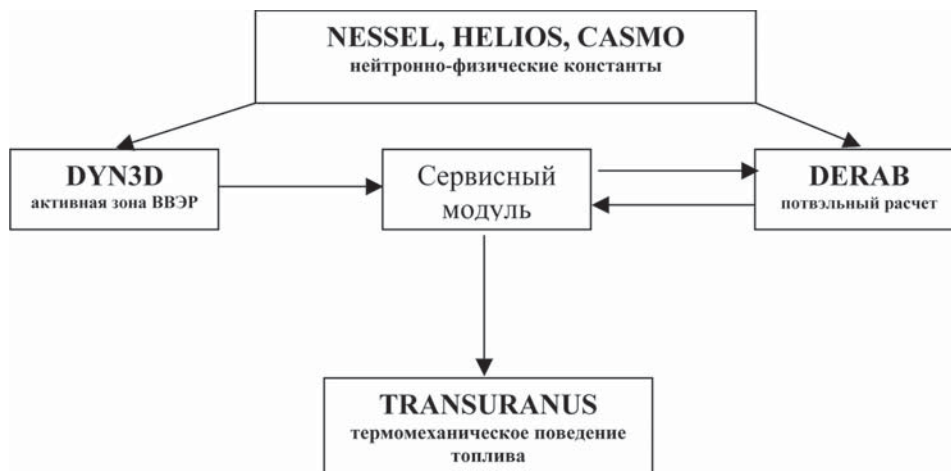


Рис. 4. Оценка термомеханического поведения топлива (перспективное направление)

Выводы

Нормативная база Украины достаточно полно определяет процесс внедрения нового топлива с точки зрения потребности атомной энергетики Украины и определяет основные этапы внедрения.

За время работы ГНТЦ ЯРБ сформирован коллектив специалистов, позволяющий качественно проводить технический анализ документов обоснования внедрения новых типов топлива практически по всем основным аспектам и направлениям оценки безопасности. При этом специалисты ГНТЦ ЯРБ имеют возможность проверить количественные характеристики выполнения критериев безопасности, проводя независимые поверочные расчеты.

В ГНТЦ ЯРБ освоено, внедрено и используется расчетный комплекс, основанный на общепризнанных кодах. Сотрудничество с международными организациями позволяет поддерживать и развивать расчетный комплекс ГНТЦ ЯРБ на современном уровне. Наиболее успешно это направление развивается в рамках сотрудничества с немецкими организациями TUV, Forschungszentrum Dresden-Rossendorf (FZD) при поддержке ВМУ.

Практика выполнения поверочных расчетов в ходе технической экспертизы в ГНТЦ ЯРБ оправданна, необходима и вносит весомый вклад в систему обеспечения ядерной безопасности в Украине.

Список литературы

1. Code transfer/implementation and qualification training of UKRSCNRS experts. Final report. Project Number WW 9306/02/03 B001, 1995.
2. Kovbasenko Y., Khalimonchuk V., Kuchin A., Bilodid Y., Yeremenko M., Dudka O. Validation of scale sequence CSAS26 for criticality safety analysis of VVER and RBMK fuel DESIGNS-NUREG/CR-6736 PNNL-13694, 2002.
3. Kovbasenko Yu., Khalimonchuk V., Yeremenko M., Bilodid E., Dudka O. Validation of ORIGEN-ARP and SCALE SAS2H for VVER and RBMK FUEL DESIGNS. Contract BOA 409199-A-R4 (Task Order No. 1). Final Report / SSTC NRS. — Kyiv, 2004.
4. Kovbasenko Yu., Khalimonchuk V., Vlasenko P., Ovdienko Yu., Bilodid E. Development of licensing and inspection capabilities implementation of new methodology for calculating neutron fluence on VVER reactor pressure vessels. Contract NRA-01/05-00. Final Report / SSTC NRS. — Kyiv, 2005.

Надійшла до редакції 25.11.2010.