

ОЦЕНКА ВЫПОЛНЕНИЯ КРИТЕРИЯ ЯДЕРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА СТАДИИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ СВЕЖИХ ТВС РЕАКТОРА ВВЭР-1200

С.Н. Сикорин, С.А. Полозов, Ю.В. Доморад

(Государственное научное учреждение «Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны»
Национальной академии наук Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь)
sikorin@sosny.bas-net.by

Рассмотрены варианты сценариев по инцидентам, связанным с проектными и запроектными авариями на стадии транспортирования свежих ТВС реактора ВВЭР-1200 железнодорожным транспортом. С помощью программного кода MCU-PD выполнены расчетные исследования и представлены результаты расчетов критичности размножающих систем в составе различного количества транспортных упаковочных комплектов ТК-С5, содержащих свежие ТВС реактора ВВЭР-1200, с учетом вариантов нарушения целостности транспортных упаковочных комплектов и полного (частичного) их заполнения водой. В рамках консервативного подхода оценено выполнение критерия ядерной безопасности на стадии транспортирования свежих ТВС реактора ВВЭР-1200.

Ключевые слова: реактор ВВЭР-1200, тепловыделяющая сборка ТВС-2М, транспортный упаковочный комплект ТК-С5, ядерная безопасность, обращение и транспортирование ТВС, железнодорожный транспорт, расчетные исследования, MCU-PD, критерий безопасности.

EVALUATION OF NUCLEAR SAFETY CRITERION FULFILMENT AT THE STAGE OF TRANSPORTATION OF FRESH FUEL ASSEMBLIES FOR VVER-1200 REACTOR / S.N. SIKORIN, S.A. POLAZAU, YU.V. DAMARAD // Scenarios for incidents connected with design basis and beyond-design basis events at the stage of transportation of fresh fuel assemblies for VVER-1200 reactor by rail transport were considered. With the use of the MCU-PD code analytical studies were performed and there were presented the criticality calculation results for neutron multiplying systems comprising the various number of transport casks TK-S5 containing fresh fuel assemblies for VVER-1200 reactor, taking into account the cases of loss of integrity of transport casks and their complete/partial filling with water. According to the conservative approach, the fulfilment of nuclear safety criterion at the stage of transportation of fresh fuel assemblies for VVER-1200 reactor was evaluated.

Keywords: VVER-1200 reactor, TVS-2M fuel assembly, transport cask TK-S5, nuclear safety, handling and transportation of fuel assemblies, analytical researches, MCU-PD, safety criteria.

В работе представлены результаты комплекса расчетных исследований по анализу проектных и запроектных аварий, касающихся транспортирования и обращения со свежим ядерным топливом (ЯТ) реактора ВВЭР-1200. Комплекс работ выполняется в рамках подпрограммы «Научное сопровождение развития атомной энергетики в Республике Беларусь» Государственной программы «Наукоемкие технологии и техника» на 2016–2020 годы и экспертизы ядерной и радиационной безопасности Белорусской АЭС на основе материалов ПООБ (блоки № 1 и 2 Белорусской АЭС).

Как было отмечено ранее [1] при анализе исходных событий проектных и запроектных аварий, связанных с транспортированием свежих ТВС реактора ВВЭР-1200, необходимо рассматривать следующие возможности:

– перегруппировка ТВС внутри упаковок, приводящая к увеличению эффективного коэффициента размножения нейтронов;

– проникновение воды в упаковку свежих ТВС.

В рамках консервативного подхода критерий безопасности определяет, что если запроектная авария не исключена на основе внутренней самозащитенности устройств или не показано превышение вероятностного критерия безопасности, то рассмотрение вышеописанных исходных событий аварий должно быть выполнено вне зависимости от вероятности возникновения указанных событий.

Основными этапами обращения и транспортирования свежих ТВС реактора ВВЭР-1200 являются:

– транспортирование свежих ТВС реактора ВВЭР-1200 от завода-изготовителя до пристанционного перегрузочного узла на территории АЭС;

– прием и перегрузка ТУК со свежим ЯТ на пристанционном перегрузочном узле с

железнодорожных платформ на специальный автомобиль для перевозки ТУК со свежим ЯТ по территории АЭС;

– транспортно-перегрузочные операции со свежим ЯТ в хранилище свежего топлива (ХСТ), входной контроль, хранение свежего ЯТ в ХСТ;

– транспортно-перегрузочные операции по загрузке свежего ЯТ в реактор.

В настоящей статье рассмотрен сценарий возможных аварий на этапе транспортировании свежих ТВС реактора ВВЭР-1200 в составе железнодорожных вагонов (платформ).

Согласно ПООБ, транспортирование свежего ЯТ с завода-изготовителя на АЭС осуществляется спецэшелонам, в составе которого могут находиться специально оборудованные железнодорожные платформы (с размещением на них 2 групп по 6 контейнеров, укрытых специальными колпаками-крышками). Поскольку на этапе транспортирования ТВС в аварийных ситуациях возможно полное или частичное затопление транспортных упаковочных комплектов (ТУК), на различных этапах заполнения или опорожнения ТУК возможно произвольное распределение воды внутри и снаружи труб ТУК. С целью определить максимально неблагоприятное распределение воды по объему входящих в массив ТУК, построена соответствующая расчетная модель и проведен расчетный анализ так называемой критической «разноуровневости» при заливе ТУК – превышения уровня воды в ТВС, находящихся во внутритрубном пространстве ТУК, над уровнем воды в зазоре между трубами в составе ТУК. Построенная расчетная модель предусматривает:

– полное заполнение водой объемов внутри труб с ТВС и между трубами в нижней половине по высоте топливных сердечников твэлов ТВС;

– последовательное заполнение водой объемов внутри труб с ТВС в верхней половине по высоте топливных сердечников твэлов ТВС, при фиксированном уровне воды в зазоре между трубами.

В докладе представлены результаты расчетных исследований критичности размножающей системы в составе массива из 6 ТУК ТК-С5, содержащих 12 ТВС-2М типа Z49, для исходных событий ЗПА, связанных с перегруппировкой ТУК и нарушением целостности ТУК, при заполнении водной

средой пространства внутри и снаружи ТУК.

Для расчетов критичности вышеуказанной размножающей системы в различных вариантах заполнения водной средой использовался программный код MCU-PD. Расчетные модели построены на основе данных о материальном составе и геометрических характеристиках ТУК ТК-С5 и штатных ТВС реактора ВВЭР-1200, приведенных в материалах ПООБ Белорусской АЭС.

При построении расчетной модели ТУК ТК-С5 в рамках консервативного подхода сделаны следующие упрощения и допущения:

– корпус ТУК смоделирован в виде двух стальных труб наружным диаметром 426 мм и толщиной стенки 9 мм с фланцами, соединенных между собой ребрами жесткости;

– опоры с фиксаторами и строповочными проушинами, ручки и болты крепления крышек к фланцам труб корпуса, уплотнительные прокладки между фланцем трубы корпуса и крышкой, а также прокладки с внутренней стороны крышек не моделировались;

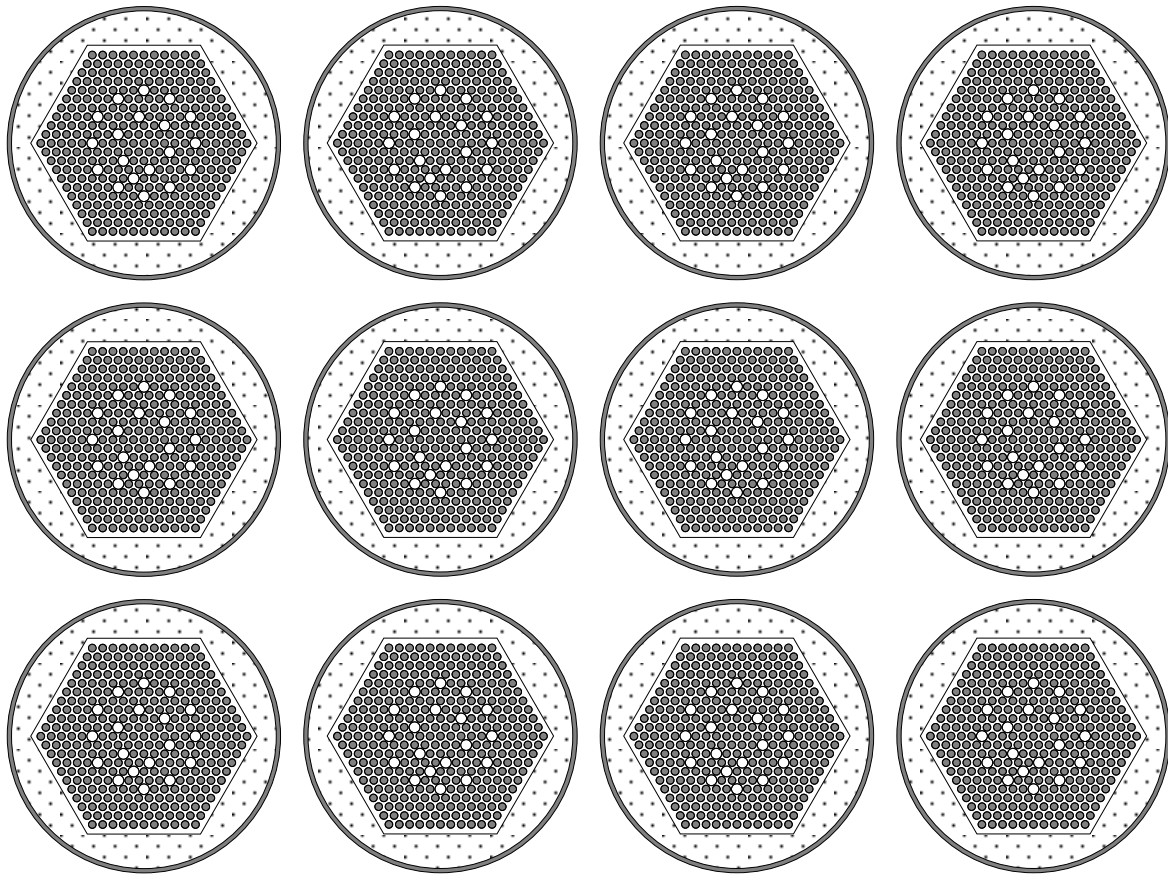
– каждая из 4 торцевых крышек смоделирована в виде сплошного стального диска;

– футеровка во внутренней полости каждой трубы корпуса смоделирована в виде сплошного цилиндра со сквозным, центрально расположенным каналом в виде правильной шестигранной призмы.

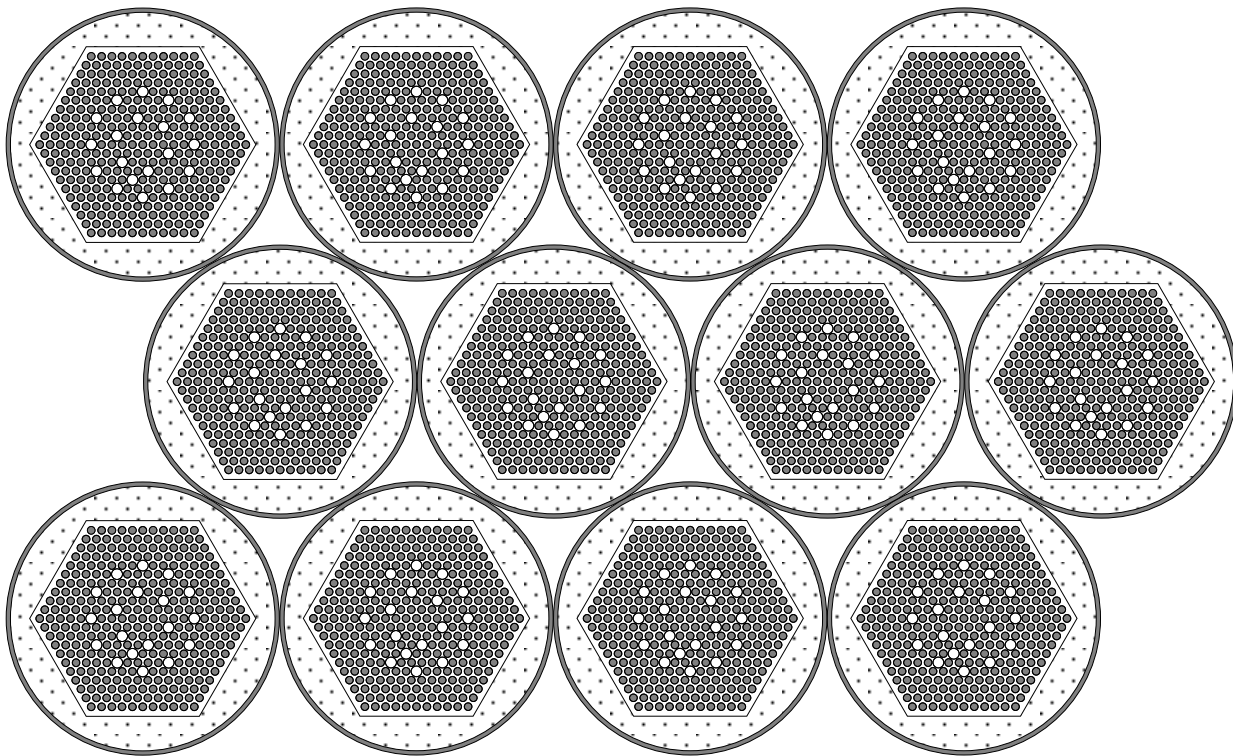
Упрощения и допущения, специфичные для консервативной модели ТВС-2М, приведены в работе [1]. Для расчетных исследований была выбрана ТВС-2М типа Z49, твэлы которой содержат максимальное количество делящегося материала.

На рисунке 1 представлены картограммы 2 конфигураций системы из 6 ТУК ТК-С5, содержащих в совокупности 12 ТВС-2М типа Z49. Первая конфигурация соответствует размещению ТУК в штабеле 3x2. Вторая конфигурация соответствует выбранному «наихудшему» сценарию плотной упаковки труб ТУК, для которого эффективный коэффициент размножения нейтронов вышеназванной системы имеет максимальное значение.

Значения эффективного коэффициента размножения нейтронов, соответствующие конфигурациям для выбранных размножающих систем с различными значениями «разноуровневости» при заливе ТУК, представлены в табл. 1.



а) штабель целостных ТУК размерностью 3x2



б) плотная упаковка труб ТУК с шагом гексагональной решетки, равным диаметру крышки ТУК

Рис.1. Картограммы 2 конфигураций системы из 6 ТУК ТК-С5 с 12 ТВС (Z49) с различным взаимным расположением труб ТУК

Таблица 1. Эффективный коэффициент размножения нейтронов K_{eff} системы в составе 6 ТУК ТК-С5 с 12 ТВС-2М типа Z49 при различном взаимном расположении ТУК

Разноуровневость, см	K_{eff} (MCU-PD)	
	Картограмма А (рис. 1)	Картограмма Б (рис. 1)
0,00	0,9277±0,0005	0,9583±0,0005
10,00	0,9286±0,0005	0,9586±0,0005
20,00	0,9300±0,0005	0,9612±0,0005
30,00	0,9341±0,0005	0,9640±0,0005
40,00	0,9383±0,0005	0,9664±0,0005
50,00	0,9466±0,0005	0,9705±0,0005
60,00	0,9542±0,0006	0,9762±0,0005
70,00	0,9629±0,0006	0,9820±0,0006
80,00	0,9684±0,0006	0,9848±0,0006
90,00	0,9740±0,0006	0,9902±0,0006
100,00	0,9779±0,0006	0,9927±0,0006
110,00	0,9821±0,0006	0,9953±0,0006
120,00	0,9859±0,0006	0,9988±0,0006
130,00	0,9883±0,0006	1,0014±0,0006
140,00	0,9913±0,0007	1,0011±0,0006
150,00	0,9933±0,0007	1,0034±0,0007
160,00	0,9941±0,0007	1,0052±0,0007
170,00	0,9962±0,0007	1,0067±0,0007
180,00	0,9976±0,0007	1,0068±0,0007
190,00	0,9994±0,0007	1,0077±0,0007
200,00	0,9981±0,0007	1,0088±0,0007
210,00	0,9979±0,0007	1,0081±0,0007
220,00	0,9990±0,0007	1,0073±0,0007
228,50	0,9975±0,0007	1,0089±0,0007

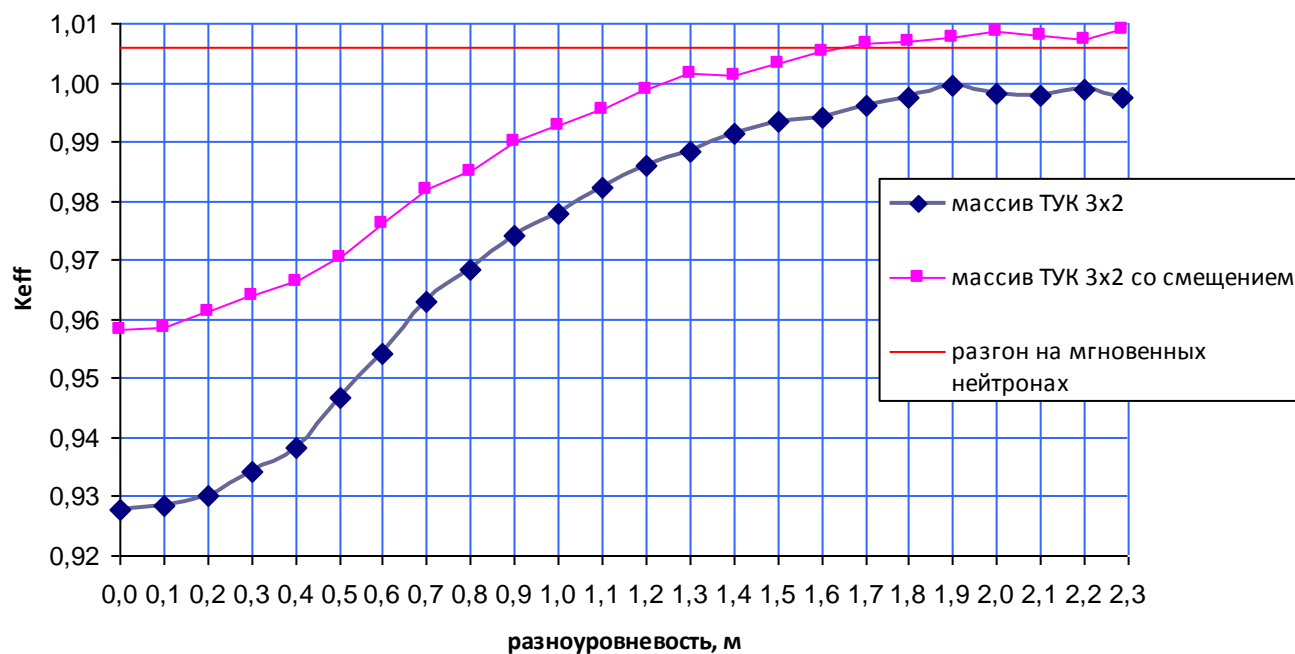


Рис.2. Зависимость K_{eff} от «разноуровневости» при заливе системы из 6 ТУК ТК-С5 с 12 ТВС (Z49)

Результаты расчетов показывают, что в случае полного затопления массива из 6 целостных ТУК ТК-С5, содержащих в совокупности 12 ТВС-2М (Z49), при шаге расположения труб ТУК, соответствующем присоединительным размерам ТУК, эффективный коэффициент размножения нейтронов системы $K_{\text{eff}} = 0,9144 \pm 0,0005$, что соответствует требованиям нормативных документов по ядерной безопасности при транспортировании и обращении с ТВС. В случае нарушения целостности массива из 6 ТУК, при плотном смыкании труб упаковочных комплектов и их расположении в узлах гексагональной решетки, критерий ядерной безопасности также выполняется ($K_{\text{eff}} = 0,9435 \pm 0,0005$) при полном затоплении массива ТУК.

Расчетные оценки показывают невыполнение критерия ядерной безопасности при следующих условиях:

– частичный залив водой (при разноуровневости 60 см и более) массива целостных ТУК с шагом расположения труб ТУК, соответствующим присоединительным размерам ТУК;

– частичный залив водой (при любой разноуровневости) массива ТУК при нарушении целостности ТУК и расположении труб ТУК в узлах гексагональной решетки с шагом, равным диаметру торцевой крышки ТУК. При «разноуровневости» более 120 см данная система надкритична.

Выводы

Результаты расчетных исследований по консервативной оценке выполнения критерия ядерной безопасности при транспортировании и обращении со свежим ЯТ реактора ВВЭР-1200 подтверждают выполнение критерия ядерной безопасности в случае полного затопления массива из 6 ТУК ТК-С5, содержащих 12 ТВС-2М типа Z49, вне зависимости от взаимного расположения ТУК и их состояния с точки зрения целостности. Однако при неравномерном заполнении (опорожнении) системы указанного состава критерий не выполняется. Кроме того, в случае нарушения целостности массива из 6 ТУК, возможен вариант взаимного расположения труб ТУК, при котором неравномерное заполнение (опорожнение) системы способно привести к ее переходу в надкритическое состояние, в том числе с разгоном на мгновенных нейтронах.

Список литературы

1. Sikorin S., Polazau S., Damarad Yu., Possible beyond design-basic accident analysis dealing with crippling of reactor VVER-1200 fuel assemblies. 26th Symposium of AER on VVER Reactor Physics and Reactor Safety, Helsinki, Finland, 2016.

Контактная информация –

Сикорин Святослав Николаевич,
Заведующий лабораторией,
Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси,
тел. +375 17 391 14 01,
e-mail: sikorin@sosny.bas-net.by

Полозов Сергей Алексеевич,
Старший научный сотрудник,
Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси,
тел. +375 17 391 14 45
e-mail: polazau@sosny.bas-net.by

Доморад Юрий Владимирович,
Научный сотрудник,
Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси,
тел. +375 17 391 14 45
e-mail: damarad@sosny.bas-net.by