

УДК 621.039.51...17

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ РАСЧЕТНОЙ РАДИАЦИОННОЙ НАГРУЗКИ ВНУТРИКОРПУСНЫХ УСТРОЙСТВ ВВЭР-1000 К НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

*Дайченко Ю.С., Калугин М.А., Прохоров Д.Н., Шкаровский Д.А.**(НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)*

e-mail: prokhorov_dn@nrcki.ru

При обосновании срока эксплуатации ВВЭР-1000 его корпус и внутрикорпусные устройства являются критическими элементами, так как испытывают значительные радиационные и температурные нагрузки. Подтверждение достоверности радиационной нагрузки (флюенса быстрых нейтронов, числа смещений на атом, энерговыделения) является важной задачей при обосновании продления его срока службы.

Оценка влияния ионизирующего излучения на корпус и внутрикорпусные устройства требует расчетного исследования флюенса быстрых нейтронов энергией более 0,5 МэВ на поверхности корпуса и энергией более 0,1 МэВ на поверхности внутрикорпусных устройств, параметра повреждающей дозы, а также энерговыделения [1, 2].

Проектные параметры устанавливаются с регламентированными допусками. Расчетные параметры могут отличаться от истинных по следующим причинам: отклонение интегральных характеристик реактора от номинальных проектных при эксплуатации, методические погрешности расчетных программ, отклонение состава, размеров и формы элементов реакторной установки от номинальных (проектных). Исследование чувствительности результатов к неопределенности исходных данных позволяет создать обоснованную расчетную модель и выделить элементы конструкции, точность изготовления которых существенно влияет на контролируемый параметр. В настоящей работе рассматривается влияние основных допусков на повреждающую дозу и остаточное энерговыделение. Оценка влияния неопределенностей на флюенс быстрых нейтронов — предмет дальнейшего исследования.

Работа выполнялась с использованием программы MCU-PD [3, 4].

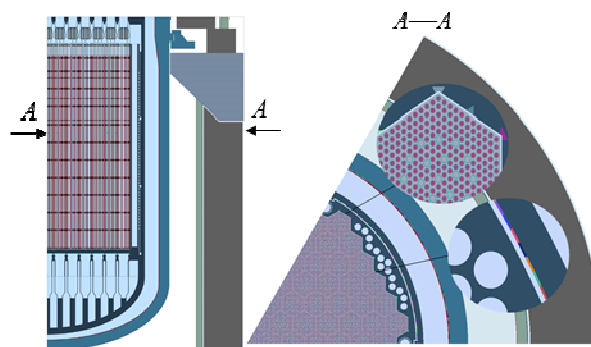
Методика расчета. Для определения радиационной нагрузки разработана расчетная модель — файл исходных данных программы MCU-PD [5]. В расчетной модели в секторе по-

воротной симметрии 60° подробно описана геометрия следующих элементов, начиная от центра: активная зона, выгородка, шахта, корпус реактора, а также некоторые элементы закорпусного пространства.

Для расчета радиационной нагрузки на шахту в модели выделены регистрационные зоны с шагом 1° по азимутальному углу и 1,8 см по аксиальной координате. Радиационная нагрузка на выгородку реактора вычислялась в наиболее напряженных местах — 19 точках, отложенных по азимутальной координате с аналогичным высотным разбиением. Разработанная модель с выделенными зонами показана на рис. 1.

Для каждого варианта моделировалось 10^{11} историй нейтронов с использованием 1000 ядер процессоров. Такое число моделируемых историй обеспечивает оценку смещения на атом и энерговыделения внутрикорпусных устройств в регистрационной зоне со статистической погрешностью (одно стандартное отклонение) не более 0,6%. Статистическая погрешность интегральной радиационной нагрузки внутренней поверхности внутрикорпусных устройств не превышает 0,05%.

В настоящей работе смещение на атом вычисляется приближенным аналитическим методом NRT-стандарт с учетом энергии, затраченной на смещение в единицу времени [6]. Энерговыделение оценивалось с помощью нейтронных и фотонных сечений (керма-факторов) [7].



Р и с. 1. Расчетная модель

При расчете погрешностей, обусловленных технологическими отклонениями, предполагается, что максимально возможное отклонение параметра Δ_x от проектного x^d при номинальных параметрах реактора эквивалентно проектному допуску δx . Относительная погрешность энерговыделения $\Delta_x H/H$ для каждого случая оценивалась по формуле

$$\frac{\Delta_x H}{H} = \frac{H_p(x^d + \Delta_x) - H_d(x^d)}{H_d(x^d)} 100\%, \quad (1)$$

где $H_d(x^d)$, $H_p(x^d + \Delta_x)$ — номинальное и максимально возможное энерговыделение соответственно.

По формуле (1) можно качественно оценить и выявить основные параметры, которые вносят наибольший вклад в чувствительность исследуемой величины.

Полная относительная погрешность рассчитывалась по формуле

$$\Delta^{\Sigma} H/H = \sqrt{\sum_i (\Delta_x H/H)^2}. \quad (2)$$

Аналогичные формулы использовались при определении относительной погрешности расчета смещения на атом.

Чувствительность радиационной нагрузки внутрикорпусных устройств реактора. В рамках исследования были рассмотрены некоторые проектные допуски размера элементов активной зоны, эксплуатационных параметров, параметров загрузки топлива, размера конструкции реактора [8]. Чувствительность радиационной нагрузки внутрикорпусных устройств реактора приведена в таблице. Наибольшая полная относительная погрешность наблюдается в расчетах чувствительности смещения на атом шахты реактора. Отметим, что среди рассмотренных параметров выделяется ее внутренний диаметр, неопределенность в размерах которого вносит наибольший вклад в относительную погрешность смещения на атом. Значительное уменьшение смещения на атом для варианта с увеличением внутреннего диаметра шахты характеризуется снижением плотности потока в области размещения регистрационных зон в результате более отдаленного расположения от источника излучения, а также изменения толщины водяной прослойки между выгородкой и шахтой.

По представленным результатам следует вывод, что допуски, связанные с высотой ТВС и температурой теплоносителя на входе в актив-

Чувствительность радиационной нагрузки внутрикорпусных устройств реактора

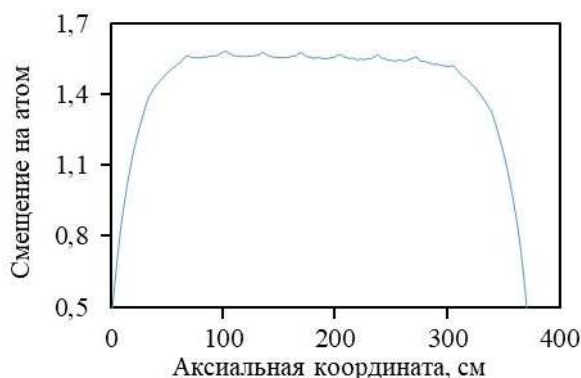
Параметр	Проектный допуск	Выгородка		Шахта
		Δ_x (смещ./ат.)/ (смещ./ат.), %	$\Delta_x H/H$, %	Δ_x (смещ./ат.)/ (смещ./ат.), %
Диаметр центрального отверстия в таблетке, мм	+0,2	+0,38*	+0,37	+0,44
Внешний диаметр твэла, мм	+0,05	+0,25	+0,13	+0,18
	-0,05	-0,25	-0,14	-0,17
Диаметр топливной таблетки, мм	-0,03	+0,32	+0,37	+0,38
Высота ТВС, мм	+1	0	+0,03	0
	-1	0	0	0
Температура теплоносителя в активной зоне, К	+2	+0,46	+0,39	+0,44
	-2	-0,54	-0,5	-0,54
Температура теплоносителя на входе в активную зону, К	+2	0	-0,04	0
	-2	0	-0,05	0
Масса топлива в ТВС, кг	+4,5	-0,35	-0,43	-0,4
	-4,5	+0,34	+0,35	+0,4
Внутренний диаметр шахты, мм	+10	—	—	-1,26
Полная относительная погрешность, %	—	1,06	1,02	11,32

*Статистическая погрешность (одно стандартное отклонение) интегральных смещений на атом и энерговыделения не превышает 0,05%.

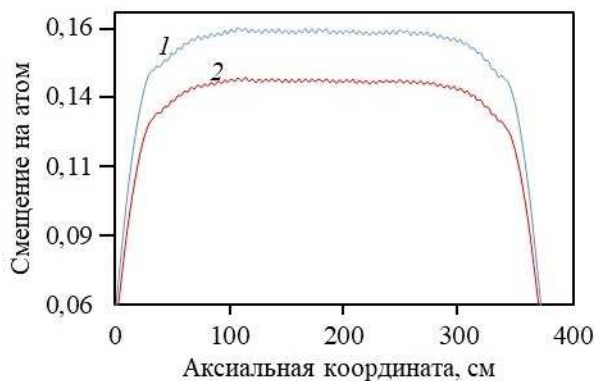
ную зону, не влияют на расчет радиационной нагрузки внутрикорпусных устройств реактора. Оценка чувствительности этих параметров находится в пределах статистической погрешности.

Анализ показал, что радиационная нагрузка на внутреннюю поверхность шахты распределяется более однородно по высоте активной зоны по сравнению с тем же распределением для выгородки реактора (рис. 2, 3). Такая зависимость обусловлена влиянием дистанционирующих решеток и водяных каналов, а также кольцевой проточки, расположенной на внешней поверхности выгородки. Дополнительное влияние оказывает расстояние от источника нейтронов, на котором располагается исследуемый объект.

Для шахты анализ влияния неопределенности исходных данных на расчетное энерговыделение не проводился в связи с малыми значениями величин, при оценке которых наблюдалось преобладающее влияние статистической погрешности.



Р и с. 2. Аксиальное распределение смещения на атом в зоне максимума азимутального распределения на поверхности выгородки для номинального варианта без учета проектных допусков



Р и с. 3. Аксиальное распределение смещения на атом в зоне максимума азимутального распределения на внутренней поверхности шахты реактора для номинального варианта без учета проектных допусков (1) и с увеличенным внутренним диаметром шахты (2)

Заключение. В рамках настоящей работы выполнена оценка погрешности расчета смещения на атом и энерговыделения внутрикорпусных устройств ВВЭР-1000, связанная с неопределенностью исходных данных. Рассмотрены следующие источники неопределенности расчета радиационной нагрузки: проектный допуск размеров элементов активной зоны, проектный допуск эксплуатационных параметров, размер конструкции реактора, параметры загрузки топлива. Показано, что неопределенность рассмотренных исходных данных оказывает небольшое влияние на расчетную радиационную нагрузку выгородки реактора. Полная относительная погрешность смещения на атом выгородки реактора равна 1,06%, энерговыделения — 1,02%.

При анализе влияния допусков на расчетную радиационную нагрузку шахты реактора необходимо отметить влияние неопределенности размера ее внутреннего диаметра, относительная погрешность расчета смещения на атом которого составила 11,26%. При этом полная относительная погрешность равна 11,32%.

Оцененная чувствительность расчетной радиационной нагрузки выгородки и шахты ВВЭР-1000 к неопределенности исходных данных может применяться к расчетным значениям смещения на атом и энерговыделения.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мегакласса» НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Нормы** расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок. ПНАЭ Г-7-002—86. М.: Энергоатомиздат, 1989. 525 с.
2. **Nguyen Huu Tiep, Sy Ming Tuan Hoang, Donny Hartanto e.a.** Investigation of the VVER-1000 reactor pressure vessel neutron fluence and displacement per atom using MCNP6. — Rad. Phys. Chemistry, 2020, v. 177, p. 1—7.
3. **Алексеев Н.И., Большагин С.Н., Гомин Е.А. и др.** Статус MCU-5. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2011, вып. 1, с. 5—23.
4. **Kalugin M.A., Oleynik D.S., Shkarovsky D.A.** Overview of the MCU Monte Carlo software package. — Ann. Nucl. Energy, 2015, v. 82, p. 54—62.
5. **Dement'ev V., Oleinik D.** Monte Carlo simulation of the neutron characteristics of VVER-1000 core using the MCU-PD program and comparison of the results with calculations by the BIPR-7A program and experimental data. — Phys. Atomic Nuclei, 2011, v. 74, p. 1831—1835.

6. Norgett M., Robinson M., Torrens I. A proposed method of calculating displacement dose rates. — Nucl. Engng Des., 1975, v. 33, p. 50—54.
7. Бикеев А.С., Калугин М.А., Кузнецов А.Н., Шкаровский Д.А. Реализация возможности расчета радиационного энерговыделения в программе MCU-PTR с использованием KERMA-факторов. — Вопросы атомной

науки и техники. Сер. Ядерно-реакторные константы, 2018, № 4, с. 15—22.

8. Лескин С.Т., Шелегов А.С., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора ВВЭР-1000. Учебное пос. М., НИЯУ МИФИ, 2011.

Поступила в Редакцию 13.12.22

УДК 551.49

ВЛИЯНИЕ ТЕКТОНИЧЕСКИХ РАЗЛОМОВ НА БЕЗОПАСНОСТЬ ПУНКТА ГЛУБИННОГО ЗАХОРОНЕНИЯ РАДИОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ НА УЧАСТКЕ ЕНИСЕЙСКИЙ

Мальковский В.И. (ИГЕМ РАН, г. Москва)

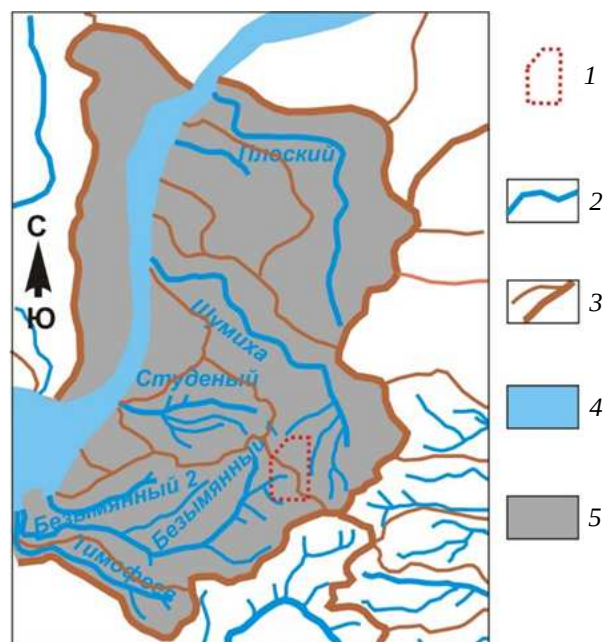
e-mail: malk@igem.ru

Большой и постоянно растущий объем высокоактивных отходов является источником экологической угрозы. Поэтому их изоляция от биосферы — необходимое условие устойчивого развития ядерной энергетики. С точки зрения экономической эффективности и экологической безопасности наиболее перспективным способом изоляции признан перевод жидких отходов в твердые формы и их размещение в пунктах глубинного захоронения радиоактивных отходов (ПГЗРО) на глубине несколько сот метров [1, 2]. Изоляция отвержденных отходов в ПГЗРО обеспечивается инженерными (матрицей, контейнерами) и естественным барьером — массивом пород. Предполагается, что горные выработки после размещения в ПГЗРО высокоактивных отходов будут заполнены подземными водами. С течением времени вследствие разгерметизации контейнеров подземные воды вступают в непосредственный контакт с отходами. В результате этого происходит выщелачивание матрицы, и радионуклиды поступают в подземные воды. Основным механизмом распространения радиоактивного загрязнения — перенос радионуклидов подземными водами. Изоляция отходов в ПГЗРО может считаться удовлетворительной, если за время переноса радионуклидов от ПГЗРО до биосферы их концентрация в подземных водах уменьшится за счет разбавления и радиоактивного распада до безопасного уровня.

Скорость течения подземных вод и, следовательно, переноса радионуклидов зависит от наличия в породах разрывных нарушений. В связи с этим при создании ПГЗРО в плотных кристаллических массивах рекомендуется выбирать монолитные блоки пород без разломов и

густой сети трещин. В состав отходов входят долгоживущие радионуклиды с периодом полураспада примерно сотни и тысячи лет. Следовательно, необходимо изолировать отходы от биосферы на срок, в несколько раз превышающий эти значения. За это время вероятность проявлений тектонической активности становится заметной даже в сейсмически стабильных районах.

В настоящее время рассматривается проект создания ПГЗРО на участке Енисейский Нижнеканского гранитоидного массива в Красноярском крае (рис. 1). Массив расположен в зоне активного орогенеза в узле сочленения древней



Р и с. 1. Область питания подземных вод на участке Енисейский: 1 — территория хранилища; 2 — реки и ручьи; 3 — локальные и региональные водоразделы; 4 — пойма Енисея; 5 — область питания подземных вод