

- cooled fusion reactor components. — J. Nucl. Mater., 1996, v. 233—237, p. 586—591.
6. Solonin M.I., Kondrat'ev V.P., Rechitsky V.N. et al. Cr—Ni alloys for fusion reactors. — Ibid., 1998, v. 258—263, p. 1762—1766.
7. Гурович Б.А., Фролов А.С., Мальцев Д.А. и др. Фазовые превращения в облученном сплаве 42ХНМ после отжига при повышенных температурах, а также после быстрого отжига, имитирующего условия максимальной проектной аварии. Тезисы докл. XI конф. по реакторному материаловедению. Димитровград, 27—31 мая 2019 г., с. 30—33.

8. Макаров Ф.В., Пономаренко А.П., Захаров Р.Г. и др. Вопросы разработки технологии изготовления многофиламентного непрерывного волокна на основе β -SiC. Тезисы докл. конф. «Материалы ядерной техники (МАЯТ-2017)». Москва, АО «ВНИИНМ», 28—29 ноября 2017 г., с. 75—76.
9. Макаров Ф.В., Пономаренко А.П., Захаров Р.Г. и др. Создание труб-оболочек твэлов из композиционных материалов на основе карбида кремния. — Наноиндустрия, 2017, № 3 (73), с. 60—67.

Поступила в Редакцию 16.10.20

УДК 624.04.45.001.3

ВЛИЯНИЕ РАБОТЫ ПОЛЯРНОГО КРАНА НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АЭС

*Медведев В.Н., Скоринова М.И., Киселев Александр С., Киселев Алексей С.,
Стрижов В.Ф., Ульянов А.Н. (ИБРАЭ РАН, г. Москва)
e-mail: skorikova@ibrae.ac.ru*

Защитная оболочка АЭС предназначена для удержания радиоактивных веществ в целях ограничения их распространения в окружающую среду при проектных авариях, предохранения систем и элементов реакторного отделения от внешних природных и техногенных воздействий и биологической защиты от ионизирующего излучения [1, 2].

Одним из факторов, вызывающих неравномерность напряженно-деформированного состояния защитной оболочки АЭС, является мостовой кран кругового действия (полярный кран). Он установлен под куполом в здании реакторного отделения и перемещается по круговому рельсу на 360° над шахтой реактора, что позволяет совершать транспортные операции в любой точке здания. На стадии строительства кран выполняет основные грузоподъемные и транспортные операции в защитной оболочке, в частности, подъем и транспортирование на монтажные места оборудования первого контура (корпуса реактора, парогенераторов, циркуляционных насосов, трубопроводов), машины перегрузки топлива и иных грузов. На стадии эксплуатации он обслуживает механомонтажные операции в период текущих планово-предупредительных работ, перемещает свежее и отработавшее топливо, при выводе из эксплуатации энергоблока выполняет подъемно-транспортные

операции по демонтажу оборудования герметичной зоны реакторного отделения.

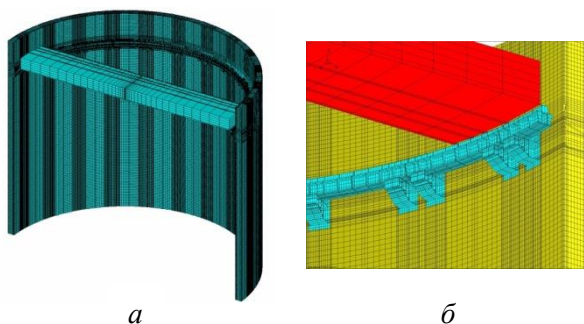
Для анализа напряженно-деформированного состояния защитной оболочки АЭС на воздействие неравномерно распределенных нагрузок, вызванных работой мостового крана кругового действия, и определения влияния этих нагрузок на эксплуатационные качества сооружения разработаны расчетные модели, позволяющие учитывать не только симметричные варианты нагружения крана по центральной оси оболочки, но и несимметричные при смещении нагрузки вдоль оси крана к стенке защитной оболочки.

В настоящей статье приводятся результаты расчета напряженно-деформированного состояния защитной оболочки на действие нагрузок полярного крана — собственной массы, воздействия при испытаниях и монтаже корпуса реактора.

Расчеты выполнялись с использованием программы CONT, прошедшей аттестацию в Ростехнадзоре РФ (паспорт № 347), обеспечивающей погрешность решения рассматриваемого класса задач менее 5%, т.е. в пределах разброса данных о свойствах материалов.

Расчетная модель. Модель защитной оболочки АЭС с полярным краном имеет одну плоскость симметрии — вдоль оси крана и включает половину ее цилиндрической части.

Расчетная модель состоит из 1 396 263 узлов и 1 672 288 конечных элементов: 8-узловых, моделирующих бетон, стальную облицовку, кран, подкрановые конструкции, и 2-узловых, моделирующих окружающую, меридиональную и радиальную арматуру, а также дополнительную арматуру в зоне закладных деталей под подкрановую консоль (рис. 1). Кран упрощенно моделируется в виде призматического тела эквивалентной массой. Подробно смоделированы подкрановые пути, подкрановые консоли и зоны их крепления к стенке оболочки. Модель соответствует стадии возведения оболочки, при которой цилиндрическая часть построена, купола еще нет [3—6].



Р и с. 1. Модель половины защитной оболочки с полярным краном (а) и ее укрупненный фрагмент (б)

Напряженно-деформированное состояние защитной оболочки при воздействии собственной массы полярного крана после монтажа. Как показали расчеты, перемещение стенки оболочки и подкрановых конструкций в направлении оси крана составляет 2,27 мм, что увеличивает диаметр защитной оболочки на 4,54 мм (рис. 2, а). Это соответствует измерениям при повороте крана на 90° после монтажа — диаметр вдоль оси крана увеличился на 4,66 мм.

Расчет перемещений в направлении, перпендикулярном оси крана, показал уменьшение диаметра на 2,3 мм, измерения — на 3,02 мм. Различие расчетных и экспериментальных значений можно объяснить тем, что модель в точности соответствует проектной документации, конструкция подкрановых путей на реальной оболочке может иметь отклонение от проектных размеров.

Качественно картина изменения геометрии оболочки от воздействия собственной массы

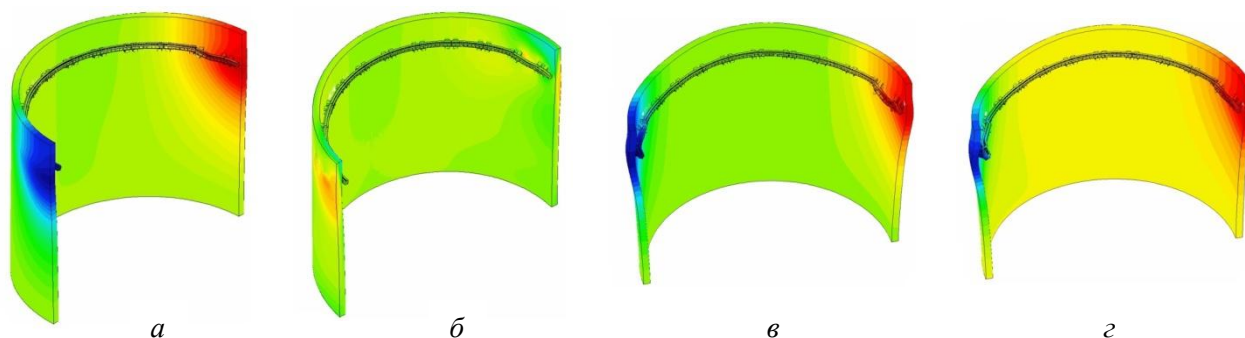
полярного крана, полученная в расчетах, соответствует измерениям: диаметр оболочки, расположенный вдоль оси крана, увеличивается, поперечный диаметр сокращается.

Анализ показал, что при воздействии на цилиндрическую часть оболочки полярного крана в результате выпучивания наружу стенки защитной оболочки в зоне подкрановых консолей, расположенных вдоль оси крана, на внешней поверхности бетонной стенки оболочки возникают растягивающие окружные и меридиональные напряжения ~2 МПа (см. рис. 2, б). Зона растягивающих меридиональных напряжений менее протяжена, чем окружных напряжений. Уровень растягивающих напряжений близок к пределу прочности бетона на растяжение, следовательно, в зонах расположения подкрановых консолей на внешней стороне защитной оболочки могут образовываться меридиональные трещины незначительной глубины [7, 8]. Напряжения в указанных областях могут быть и больше расчетных с учетом отклонений рельсового пути крана от идеальной окружности. Особенно неблагоприятно уменьшение диаметра подкрановых путей, так как усилие распора подкрановых путей и стенки оболочки в результате совместного деформирования с краном в этом случае должно возрастать.

Основной причиной появления растягивающих напряжений на внешней поверхности защитной оболочки в зоне подкрановых консолей является совместное деформирование крана (прогиб), подкрановых конструкций и стенки оболочки. Под действием массы крана и поднимаемого груза подкрановая консоль прогибается вниз. При этом головка рельса из-за поворота сечения стремится переместиться к оси оболочки. Однако опорные конструкции крана не позволяют ей смещаться — кран и подкрановые конструкции совместно распирают оболочку наружу.

Снижение риска образования указанных трещин возможно при отсутствии искажения подкрановых путей в сторону уменьшения их диаметра.

Напряженно-деформированное состояние защитной оболочки при испытаниях полярного крана. Статические испытания проводятся гидронагружателем с усилием, равным 125%



Р и с. 2. Расчетные радиальные перемещения стенки защитной оболочки и подкрановых конструкций в направлении оси крана и окружающих напряжений в бетоне: ■ — максимальные значения

паспортной грузоподъемности крана 462 т. В реакторном отделении энергоблока № 4 Ростовской АЭС были измерены геометрические параметры крана кругового действия в период его испытания [3]. Итогом работ стали следующие результаты:

деформация оболочки на диаметре, совпадающем с направлением строительных осей II—IV, составила +2 мм, при последующем нагружении крана до 420 т — +1,6 мм;

перемещения отражающих элементов, установленных на концах контролируемого диаметра, составили равные значения, соответствующие –1 мм;

изменение строительного подъема достигло –50 мм, при полной разгрузке крана мост в течение суток после испытания вернулся в исходное положение.

Расчетные перемещения составляют ~2,01 мм, что соответствует измерениям (см. рис. 2, в). В зоне подкрановых консолей, ближайших к опорным конструкциям крана, наблюдается характерное выпучивание стенки оболочки, показанное в увеличенном масштабе с умножением перемещений на 1000. Это связано с совместным деформированием крана, подкрановых путей и стенки оболочки.

Напряженно-деформированное состояние защитной оболочки при монтаже корпуса реактора. При монтаже были выполнены контрольные измерения по точкам, расположенным на герметичной оболочке и головке рельсового пути крана. При подъеме корпуса реактора из транспортного коридора нагрузка от полярного крана воздействовала, главным образом, на одну сторону крана. В дальнейшем при подъеме на

отметку 36 м она перемещалась к центру оболочки.

Анализ показал, что воздействие крана кругового действия на подкрановый путь и защитную оболочку в период его испытаний не является максимальным. Следует отметить, что масса корпуса реактора составляет 320 т и при его подъеме на ближнюю к транспортному коридору сторону крана приходится 297,7 т распределенной нагрузки, в то время как при испытаниях на ту же сторону только 230 т. Следствием этого является образование меридиональных трещин на наружной поверхности защитной оболочки. Это необходимо учитывать при проектировании и строительстве защитных оболочек АЭС нового поколения (АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ).

Расчет показал, что перемещение стенки оболочки, ближней к транспортному коридору, составляет 1,23 мм (см. рис. 2, г). В результате выпучивания наружу стенки защитной оболочки в зоне установки подкрановых консолей, расположенных вблизи транспортного коридора, на внешней поверхности оболочки возникают растягивающие окружные и меридиональные напряжения ~3 МПа. Уровень растягивающих напряжений превышает предел прочности бетона на растяжение и, следовательно, в зонах расположения подкрановых консолей на внешней стороне защитной оболочки могут образовываться меридиональные трещины. Например, при обследовании внешней поверхности защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС обнаружены трещины, сформированные в результате усадки бетона. Их расположение по поверхности оболочки имеет случайный характер. На горизонте крепления консолей полярного крана были обнаружены трещины, равномер-

но распределенные по всей окружности оболочки. Анализ показал, что со временем увеличивается не только ширина и глубина трещин, но и их число. Поскольку трещины расположены, главным образом, в вертикальном направлении, можно предположить, что они образовались от кольцевых усилий в стенке оболочки. Эти усилия могут быть вызваны только работой полярного крана.

Выводы. С использованием разработанной расчетной модели защитной оболочки АЭС был проведен анализ напряженно-деформированного состояния при различных вариантах нагружения полярного крана в процессе его работы. В каждом из рассмотренных случаев отмечается характерное выпучивание стенки оболочки в зоне подкрановых консолей, что связано с совместным деформированием крана, подкрановых путей и стенки оболочки. Уровень растягивающих окружных напряжений близок к пределу прочности бетона на растяжение, следовательно, в зонах расположения подкрановых консолей на внешней стороне защитной оболочки могут образовываться меридиональные трещины. Это говорит о необходимости мониторинга напряженно-деформированного состояния защитной оболочки на стадии как строительства, так и эксплуатации.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-38-90121.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Правила** устройства и эксплуатации локализирующих систем безопасности атомных станций (НП-010—16). М., НТЦ ЯРБ, 2016. 63 с.
2. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных машин и механизмов, применяемых на объектах использования атомной энергии (НП-043—18). М., НТЦ ЯРБ, 2018. 71 с.
3. **Пимшин Ю.И., Ключин Е.Б., Губеладзе О.Е. и др.** Влияние крана кругового действия на техническое состояние строящейся защитной герметичной оболочки АЭС. — Глобальная ядерная безопасность, 2016, № 2 (19), с. 33—42.
4. **Пимшин Ю.И., Ключин Е.Б., Медведев В.Н. и др.** Диагностика технического состояния защитных герметичных оболочек АЭС. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2016, № 4, с. 55—59.
5. **Пимшин Ю.И., Ключин Е.Б., Медведев В.Н. и др.** Единство и различие конструктивных решений защитных оболочек АЭС и реактором ВВЭР. — Там же, 2017, № 1, с. 22—27.
6. **Пимшин Ю.И., Демиденко А.С., Пимшин И.Ю.** Проблемы защитной оболочки при испытаниях крана радиального действия и его использовании при монтаже основных тяжеловесных конструкций на строящейся АЭС. — Глобальная ядерная безопасность, 2019, № 3 (32), с. 41—49.
7. **Медведев В.Н., Киселев Александр С., Киселев Алексей С. и др.** Натурные наблюдения на этапе строительства защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС. — Там же, 2014, № 3 (12), с. 89—99.
8. **Медведев В.Н., Скорикова М.И.** Влияние реологических характеристик бетона на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки АЭС. — Атомная энергия, 2019, т. 126, вып. 6, с. 317—320.

Поступила в Редакцию 13.05.21

УДК 621.039.73

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНОГО КОМПАУНДА КАК МАТРИЦЫ ДЛЯ ОТВЕРЖДЕНИЯ ВЫСОКОАКТИВНЫХ ОТХОДОВ

Варлаков А.П., Германов А.В., Маряхин М.А., Варлакова Г.А., Крапивина М.К.
(АО «ВНИИНМ», г. Москва), *Жеребцов А.А.* (АО «Прорыв», г. Москва),
Петров В.Г., Калмыков С.Н. (МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва)
e-mail: dgermanich@mail.ru

Радиоактивные отходы разного состава, состояния и уровня активности приводят в формы, пригодные для захоронения, с помощью разных способов и технологий. Для перевода в отвержденное состояние, в основном, используют остекловывание и цементование, техно-

логические процессы и оборудование которых хорошо проработаны.

По требованиям и правилам нормативов остекловывают преимущественно высокоактивные отходы, твердые и жидкие средне- и низкоактивные отходы цементируют. Переработка