

существенно их уменьшать. Поэтому модели турбулентной диффузии для расчета переноса радиоактивных веществ, в которых учитывается влияние промышленной застройки, таких, как в РОУЗ, позволяют получать более реалистичные, а для некоторых условий и более консервативные оценки дозы облучения персонала на объектах использования атомной энергии. Это улучшает степень достоверности расчетного обоснования радиационной безопасности персонала на АЭС как для условий нормальной эксплуатации, так и при аварийных ситуациях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Требования** к содержанию отчета по обоснованию безопасности блока атомной станции с реактором типа ВВЭР (НП-006—16). М., Ростехнадзор, 2017. 410 с.
2. **Рекомендуемые** методы оценки и прогнозирования радиационных последствий аварий на объектах ядерного топливного цикла (РБ-134—17). М., Ростехнадзор, 2017. 44 с.
3. **Авария** на АЭС «Фукусима-1»: опыт реагирования и уроки. Под ред. Л.А. Большова. М.: Наука, 2013. 246 с.
4. **Отчет** об экологической безопасности за 2020 год. Нововоронежская АЭС. М., АО «Концерн Росэнергоатом», 2020. 59 с.
5. **Авария** на ЧАЭС. Дозы облучения участников ЛПА, аварийный контроль, ретроспективная оценка. М., ФМБА России, 2011. 278 с.
6. **Гусев Н.Г., Беляев В.А.** Радиоактивные выбросы в биосфере. Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1991. 256 с.
7. **Беликов В.В., Семенов В.Н., Катышков Ю.В. и др.** НОСТРАДАМУС — система прогнозирования радиационной обстановки. — В сб.: Труды ИБРАЭ, 2008, с. 41—103.
8. **Wilcox C.** Turbulence Modeling for CFD. Third ed. Anaheim: DCW Industries, 2006. 515 p.
9. **Дзама Д.В., Семенов В.Н., Сорокикова О.С.** Трехмерный код расчета радиационной обстановки на промышленной площадке АЭС с учетом застройки. Версия 1.1 (РОУЗ). Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018616065, 22.05.2018.
10. **Дзама Д.В., Сорокикова О.С.** Верификация математической модели расчета мощности эффективной дозы облучения от загрязненной почвы и стен зданий с учетом экранирования. — Атомная энергия, 2019, т. 126, вып. 6, с. 337—340.
11. **Руководство** пользователя. Компас-3D V12. М., ЗАО «АСКОН», 2010. 416 с.
12. **Отчет** по обоснованию безопасности. Гл. 15. Анализ аварий. Кн. 9. М., АО «Атомэнергопроект», 2015. 210 с.
13. **Рекомендуемые** методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух (РБ-106—21). М., Ростехнадзор, 2021. 72 с.
14. **Отчет** по обоснованию безопасности. Гл. 2 Характеристика района и площадки АС. Кн. 1. М., АО «Атомэнергопроект», 2015. 303 с.
15. **Мониторинг** гидрологических, метеорологических и аэрологических условий в районах размещения объектов использования атомной энергии (РБ-046—21). М., Ростехнадзор, 2021. 45 с.

Поступила в Редакцию 03.06.24

УДК 624.04.45.001.3

КОНТРОЛЬ УСИЛИЙ В АРМАТУРНЫХ ПУЧКАХ ЗАЩИТНЫХ ОБОЛОЧЕК АЭС И ОБОСНОВАНИЕ ВОСПРИЯТИЯ АВАРИЙНОЙ НАГРУЗКИ

Медведев В.Н., Киселев А.С., Киселев А.С., Стрижов В.Ф., Ульянов А.Н., Скорикова М.И.

(ИБРАЭ РАН, г. Москва)

e-mail: skorikova@ibrae.ac.ru

Защитная оболочка АЭС должна воспринимать аварийную нагрузку, что определяется, главным образом, уровнем предварительного напряжения, который находится в прямой зависимости от действующих усилий в арматурных пучках ее системы предварительного напряжения (СПЗО).

В 2015—2020 гг. в нашей стране введено в эксплуатацию шесть энергоблоков: построенные по проекту В-320 унифицированной серии

3-й, 4-й Ростовской АЭС и по проекту АЭС-2006 первые два энергоблока Нововоронежской АЭС-2 и Ленинградской АЭС-2. На этапе возведения защитной оболочки АЭС-2006 и ВВЭР-ТОИ устанавливаются:

восемь датчиков силы для контроля усилий в арматурных пучках СПЗО — отслеживают изменение усилий в двух вертикальных и двух кольцевых пучках;

датчики измерения напряжений в стержневой арматуре, деформаций и температуры в бе-

тоне для контроля напряженно-деформированного состояния;

система контроля радиального и вертикального перемещения оболочки.

При эксплуатации требуется регулярно контролировать усилия в арматурных пучках методом lift-off, который выполняется с использованием метрологически аттестованного оборудования. К оборудованию lift-off предъявляются следующие требования: возможность измерения усилий в любом пучке без расконсервации арматурных канатов, при снятии только огнезащитного колпака, упор домкрата на поверхность анкерного колодца (закладной детали), захват анкерного устройства (анкерного блока) специальным механизмом. Усилия натяжения СПЗО-М контролируются путем оттяжки домкратом анкерного блока арматурного пучка до появления минимального зазора между ним и опорной плитой. В этот момент фиксируется усилие натяжения арматурного пучка.

Изначально арматурные канаты, применяемые для предварительного напряжения защитных оболочек АЭС, характеризовались значительными потерями усилий при эксплуатации [1]. Инструкция [2] предусматривала регулярное проведение контрольно-профилактических работ, включающих подтяжку арматурного каната до усилия первоначального натяжения по журналу предварительного напряжения оболочки. Предложения по повышению эксплуатационных качеств защитной оболочки АЭС нашли отражение в нормативных документах [3, 4]. Согласно этим документам оценка измеренного усилия натяжения каждого арматурного каната должна выполняться путем сравнения минимального (проектного) остаточного усилия с прогнозируемыми (расчетными) потерями, уровня предварительного напряжения защитной оболочки — по средним усилиям натяжения проверенных арматурных канатов СПЗО. Следовательно, подтяжка арматурного каната до усилия первоначального натяжения не требуется. Позднее вместо этих документов был введен в действие стандарт [5], в котором указано, что контроль усилия натяжения проводится:

на 25 арматурных канатах, установленных в стенах, и 10 в куполе защитной оболочки энергоблоков с реакторными установками проекта В-338, В-187;

на 16 арматурных канатах, установленных в стенах, и шести в куполе защитной оболочки энергоблоков с реакторной установкой В-320;

на 12 арматурных пучках защитной оболочки АЭС с ВВЭР-1200.

Для выполнения этих работ требуются значительные материальные затраты.

В настоящей статье рассматривается способ обоснования эксплуатационной пригодности защитной оболочки, разработанный ИБРАЭ РАН и внедренный на 3-м, 4-м энергоблоках Ростовской АЭС, особенностью которого является возможность прогнозировать усилия на анкерах арматурных пучков и обосновывать их работоспособность без применения гидродомкратов и метода lift-off. Такая возможность возникла, главным образом, в результате установки датчиков силы на каждом арматурном пучке СПЗО на этапе возведения.

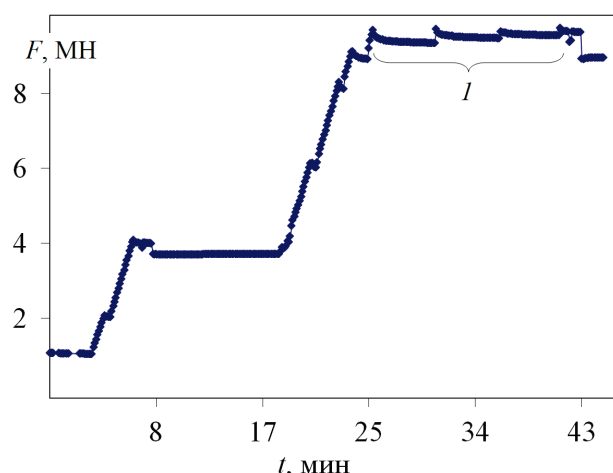
Преимущества датчиков силы на каждом арматурном пучке. Для измерения усилий на концах арматурных пучков защитной оболочки 3-го, 4-го энергоблоков Ростовской АЭС было установлено 150 датчиков силы ПСИ-01, 105 и 45 — на концах арматурных пучков цилиндра и купола соответственно [6]. Датчики силы устанавливались на обоих концах девяти арматурных пучков: в цилиндрической части — на группе канатов без дополнительных отгибов, с дополнительными отгибами и огибающих крупные технологические проходки, в куполе — в центральной, средней и пограничной зонах. Таким образом, установка датчиков силы на каждом арматурном пучке позволила контролировать усилия на этапе предварительного напряжения защитной оболочки, исправность оборудования для натяжения арматурных пучков и регулярно получать показания датчиков в период эксплуатации.

Контроль усилий в арматурных пучках на этапе предварительного напряжения защитной оболочки. На этой стадии на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки АЭС влияют проектные усилия и последовательность натяжения арматурных пучков, технология предварительного напряжения, качество монтажа пучков и инъектирования каналобразователей, а также деформации ползучести бетона, колебания температуры окружающей среды и релаксация напряжений в про-

волоках арматурных канатов системы предварительного напряжения.

Предварительное напряжение защитных оболочек 3-го, 4-го энергоблоков Ростовской АЭС выполнялось с использованием СПЗО-М на базе витых канатов французской фирмы Freyssinet. Результаты работ показали, что после предварительного напряжения первых девяти пучков в цилиндре оболочки 3-го энергоблока усилия на анкере в среднем составляли 8,33 МН, что на 4,3% ниже проектных. Поэтому было предложено увеличить время выдержки при натяжении арматурных пучков до 15 мин, при этом каждые 5 мин повышать давление до проектного. Предложенная технология показала, что давление на домкрате после первого повышения быстро снизилось на 1,5 МПа, после второго — на 0,6 МПа, третьего — на 0,2 МПа. При этом перед передачей нагрузки с домкрата на анкер усилия были больше и имели более стабильный характер, что важно для их распределения по длине каждого арматурного пучка. На анкере усилия приблизились к проектным (рис. 1).

На основании измерений был изменен способ натяжения арматурных пучков системы предварительного напряжения защитной оболочки: на последнем этапе натяжения пучка после достижения проектного давления 4,56 МН выдерживалась нагрузка в течение 15 мин, при этом через каждые 5 мин повышалось давление до проектного [7]. В результате в арматурных пучках цилиндра защитных оболочек 3-го, 4-го энергоблоков средние усилия после передачи нагрузки с домкрата на анкер составили 99%



Р и с. 1. Натяжение арматурного пучка № 12Б, расположенного в защитной оболочке 3-го энергоблока Ростовской АЭС: I — выдержка три этапа по 5 мин

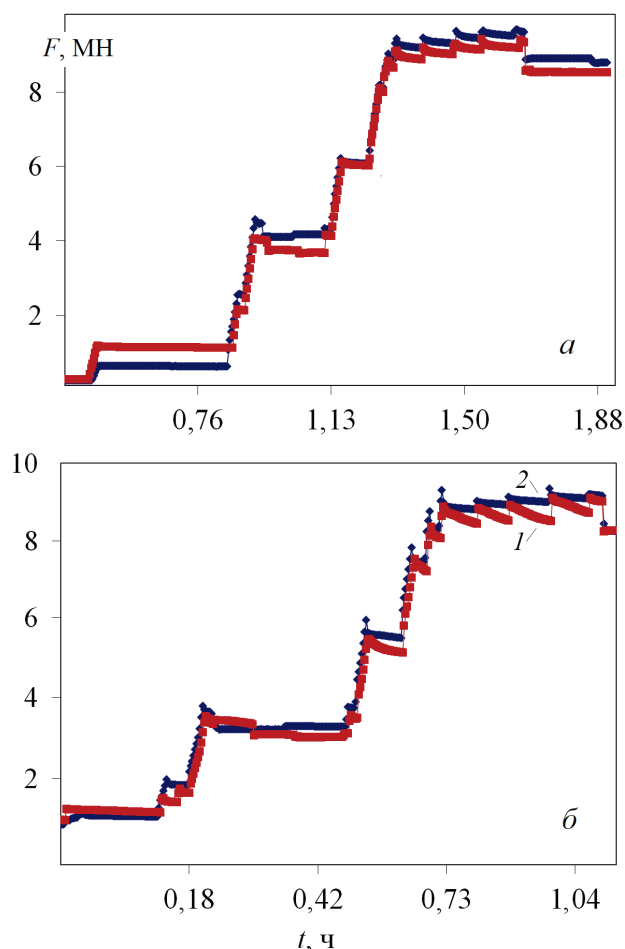
проектных, в пучках купола даже немного превысили проектное (см. таблицу). При этом потери на анкеровку в среднем составили 7,9% в цилиндрической и 7,1% в купольной части.

Усилия в арматурных пучках при предварительном напряжении защитной оболочки Ростовской АЭС, МН

Оборудование	Проектное	Энергоблок	
		3-й	4-й
Домкрат:			
цилиндр	9	9,32	9,33
купол	9	9,29	9,24
Анкерное устройство:			
цилиндрическая часть	8,7	8,62	8,59
купольная часть	8,58	8,63	8,58

Таким образом, установка датчиков силы ПСИ-01 на каждом арматурном пучке позволила контролировать качество работ по предварительному напряжению защитной оболочки. Изменения в способе натяжения арматурных пучков позволили приблизиться к проектным значениям, получая стабильно более высокую нагрузку на домкрате перед передачей на анкер без превышения проектного уровня натяжения арматурных пучков, повысить усилия на анкере, максимально приблизив к проектным.

Контроль исправности оборудования для натяжения арматурных пучков. Синхронность действия оборудования, используемого для натяжения арматурных пучков, также влияет на качество предварительного напряжения. На рис. 2 видно, что после анкеровки усилия на ветви A составили 8,63 МН, на ветви B — 8,34 МН. Один из домкратов не поддержал требуемое давление на последнем этапе натяжения арматурных пучков, следовательно, и требуемое усилие в канатах, что привело к неоднородности напряженно-деформированного состояния защитной оболочки. Например, при предварительном напряжении арматурного пучка № Ц-81 (см. рис. 2, б) на анкере A наблюдалась стабильная работа домкрата, снижение усилий на всех этапах выдержки связано только с перемещением пучка по длине. На анкере B на всех этапах выдержки наблюдалось значительное уменьшение усилий, которое, вероятно, дополнительно связано со снижением давления в домкрате из-за утечки масла. Так, на третьем этапе выдержки на анкере A снизились усилия на 0,13 МН (с 8,98 до 8,85 МН), на анкере B — на 0,39 МН (с 8,78

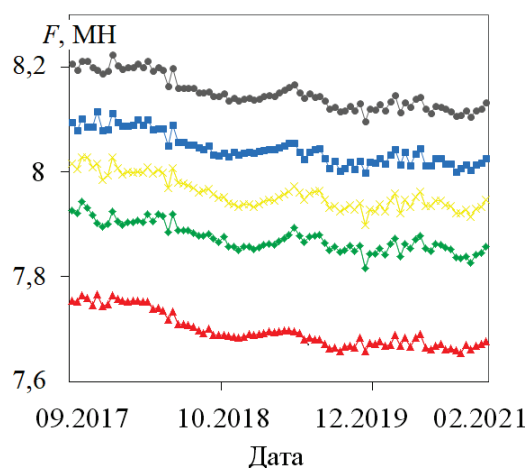


Р и с. 2. Натяжение арматурных пучков Ц-63 (а) и Ц-81 (б), расположенных в цилиндре защитной оболочки 4-го энергоблока Ростовской АЭС, при выдержке четырех этапов по 5 мин: 1, 2 — снижение усилий на 0,13 и 0,39 МН соответственно; ■, ■ — ветвь А, Б соответственно

до 8,39 МН). В этой связи было рекомендовано обратить особое внимание на исправность оборудования при натяжении арматурных пучков в целях обеспечения требуемых усилий на обоих концах пучка.

Таким образом, установка датчиков силы ПСИ на каждом арматурном пучке позволяет контролировать исправность оборудования для натяжения и обеспечивать более однородное напряженно-деформированное состояние защитной оболочки.

Контроль усилий в арматурных пучках в период эксплуатации защитной оболочки. Усилия натяжения арматурных пучков СПЗО на тяжных анкерах в период предварительного напряжения, предпусковых испытаний и эксплуатации измеряются с помощью системы контроля усилий. Анализ рис. 3 показывает, что все приборы работали стабильно, реагировали на колебания сезонной температуры. За рассматри-



Р и с. 3. Усилия на тяжных анкерах арматурных пучков Ц-2А (▲), Ц-6А (◆), Ц-3Б (×), Ц-8Б (■), Ц-4Б (●) цилиндра защитной оболочки 4-го энергоблока Ростовской АЭС с сентября 2017 по февраль 2021 г., измеренные с помощью датчиков силы ПСИ-01

ваемый период произошло незначительное снижение усилий — на 76,5 кН (0,94%), что соответствует проектным. Снижение усилий на тяжных анкерах произошло вследствие релаксации напряжений в проволоках арматурных канатов и деформаций ползучести железобетона.

Таким образом, установка датчиков силы ПСИ-01 на всех арматурных пучках позволяет оценивать надежность работы СПЗО во время эксплуатации.

Обоснование эксплуатационной пригодности защитных оболочек. При эксплуатации на напряженно-деформированное состояние защитной оболочки влияют нагрузка от предварительно напряженных арматурных пучков, собственная масса оболочки, конструктивные особенности сооружения (разные траектории и фактическое число арматурных пучков, наличие утолщений в зоне отверстий большого диаметра и др.) и температура.

На каждом этапе эксплуатации защитной оболочки изменение напряженно-деформированного состояния должно рассматриваться с учетом предшествующего этапа с анализом выявленных при строительстве особенностей.

Для оценки потерь усилий в арматурных пучках системы СПЗО-М из-за изменения геометрии оболочки вследствие ползучести бетона выполнено моделирование деформирования защитной оболочки 3-го энергоблока Ростовской АЭС на этапе эксплуатации с учетом действующих нагрузок и характеристик ползучести бетона. Моделирование позволило расчетным путем

определить прогнозируемые усилия в арматурных пучках при следующем ремонте.

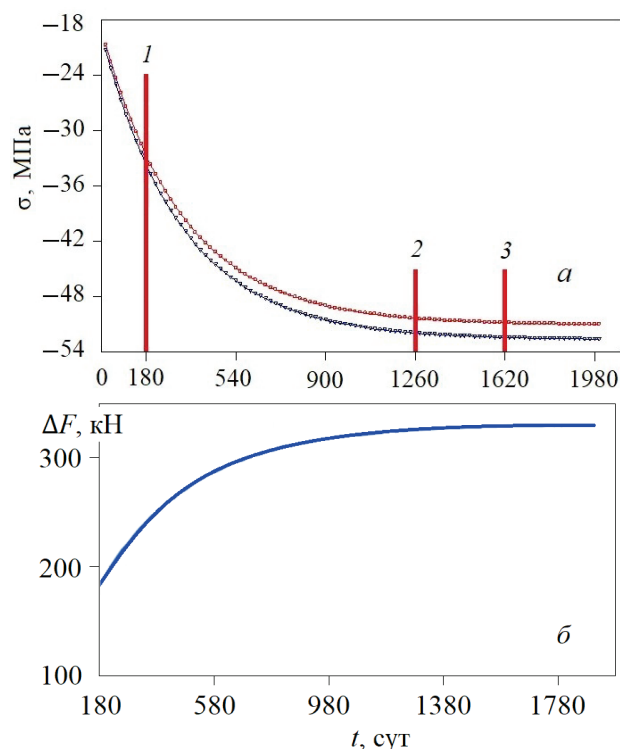
Методика расчета напряженно-деформированного состояния защитной оболочки построена на основе эффективных численных методов — конечных элементов и суперэлементов [8, 9]. Она реализована в аттестованном программном комплексе CONT для расчета напряженно-деформированного состояния строительных железобетонных конструкций, разработанном ИБРАЭ РАН. Для расчетов разработана детальная конечно-элементная модель, описывающая сложную трехмерную геометрию, наличие металлической облицовки на внутренней поверхности и стержневой арматуры, неоднородностей в виде крупных технологических проходов. Расчеты проводятся с учетом воздействия собственной массы, неравномерного обжатия со стороны арматурных канатов СПЗО, определяемого с учетом их реальной трассировки в стенке оболочки, внутреннего давления и неравномерных полей температуры.

Потери усилий в арматурных пучках обусловлены уменьшением радиуса защитной оболочки вследствие ползучести бетона, что приводит к сокращению длины предварительно натянутого каната, снижению его продольной деформации. В результате ползучести напряжения в бетоне и арматуре перераспределяются.

Напряжения в арматуре увеличиваются после предварительного напряжения по сравнению с исходным состоянием (рис. 4). Представленная методология позволяет прогнозировать усилия на анкерах арматурных пучков и обосновывать их работоспособность без применения гидродомкратов и метода lift-off. Поэтому постоянный контроль усилий натяжения в арматурных пучках при расчетных значениях, близких к измеренным датчиками силы, рекомендуется проводить с использованием рассматриваемой методологии. Метод lift-off следует применять только для пучков, данные моделирования которых будут существенно отличаться от измеренных усилий на анкерах.

Обоснованием возможности применения указанного способа натяжения арматурных пучков на АЭС служат результаты, полученные на 3-м, 4-м энергоблоках Ростовской АЭС:

установленные на каждом арматурном пучке датчики силы ПСИ-01 позволили отслежи-



Р и с. 4. Зависимость напряжений в меридиональной арматуре от времени на отметке 32,6 м (а), средние потери усилий в пучках цилиндра вследствие ползучести бетона (б): 1 — завершение испытаний; 2, 3 — 3 и 4 года эксплуатации соответственно

вать качество предварительного напряжения и обеспечивать контроль состояния защитной оболочки во время эксплуатации;

измерения датчиками силы ПСИ-01 показали, что при использовании установленного разработчиком способа натяжения арматурных пучков усилия на анкере оказались ниже проектных. После этого работы по предварительному напряжению проводили по усовершенствованной технологии, что позволило сократить потери усилий на анкерровку до 7—8%. В результате было получено более однородное напряженно-деформированное состояние защитной оболочки, что положительно повлияло на ее эксплуатационные качества;

стабильные показания каждого из 150 датчиков ПСИ-01 со времени окончания предварительного напряжения до настоящего времени свидетельствуют о надежной работе арматурных пучков;

все 12 датчиков типа ПЛПС (струнных преобразователей линейных перемещений), измеряющих перемещение защитной оболочки в средней части цилиндра на отметке 36,9 м, находятся в исправном состоянии. Пределы из-

мерения перемещения оболочки на сжатие составляют ~25 мм, что позволит фиксировать уменьшение диаметра от деформаций ползучести и усадки железобетона при длительной эксплуатации сооружения;

контрольно-измерительная аппаратура автоматизированной системы наблюдения напряженно-деформированного состояния защитной оболочки находится в исправном состоянии;

защитная оболочка прошла испытания на прочность и герметичность. Установлено, что уровень предварительного напряжения достаточен для восприятия предусмотренных проектом нагрузок и воздействий при длительной эксплуатации [10, 11].

Подобная методология расчета и детальная расчетная модель, позволяющая на основе показаний контрольно-измерительной аппаратуры автоматизированной системы наблюдения напряженно-деформированного состояния определять усилия на анкерах арматурных пучков при эксплуатации, может быть разработана для внутренней защитной оболочки АЭС-2006. При этом число датчиков силы на анкерах арматурных пучков должно быть увеличено. В настоящее время датчики силы ПСИ-02 устанавливаются на двух вертикальных и двух горизонтальных пучках.

Таким образом, установка датчиков силы ПСИ-01 на всех арматурных пучках позволяет прогнозировать усилия на анкерах и обосновывать их работоспособность без применения гидродомкратов и метода lift-off. При необходимости может быть оптимизирован контроль усилий в арматурных пучках методом lift-off.

Предложенный способ обоснования эксплуатационной пригодности и возможности восприятия аварийной нагрузки защитной оболочкой является перспективным направлением. Отказ от метода lift-off сократит эксплуатационные расходы по обслуживанию СПЗО, позволит избежать трудоемких и технологически сложных работ с применением домкрата.

Точность контроля усилий натяжения арматурных пучков методом lift-off. Применение этого метода для определения усилий в арматурных пучках должно быть сведено к минимуму, поскольку увеличение числа циклов нагружения арматурных пучков и элементов системы предварительного напряжения защитной оболочки может привести к снижению их

эксплуатационных качеств. При этом необходимо учитывать трение в разные периоды эксплуатации для более точного прогнозирования возможности восприятия защитной оболочкой проектной аварийной нагрузки при ее длительной эксплуатации.

Анализ показал, что контактные напряжения, возникающие при взаимодействии арматурного каната с полиэтиленовой оболочкой после предварительного напряжения, увеличивают реологические процессы — повышают внедрение единичных неровностей в деформированное контртело и силы трения [12]. Следовательно, при контроле уровня натяжения арматурных пучков СПЗО-М усилие отрыва будет выше действующего в пучках, что приведет к завышенной оценке напряженно-деформированного состояния защитной оболочки по сравнению с фактической. Кроме того, при воздействии повышенной температуры и предварительного напряжения при эксплуатации полиэтиленовая оболочка с течением времени будет повторять профиль витого арматурного каната и при использовании метода lift-off возможно ее разрушение и продавливание до инъецированного раствора. В этом случае смазка будет уходить из полиэтиленовой оболочки и могут возникнуть условия для корродирования проволок арматурного каната (рис. 5).

При длительной эксплуатации будут увеличиваться продавливание полиэтиленовой оболочки и коэффициент трения. Следовательно, возрастет расхождение между действующими усилиями в пучке и результатами контроля усилий методом lift-off.

Выводы. Усовершенствованный способ натяжения арматурных пучков позволил приблизиться к проектным значениям с достижением высокой стабильной нагрузки на домкрате



Р и с. 5. Образцы полиэтиленовых трубок после натяжения арматурного пучка (в местах перекрещивания пучков)

перед передачей на анкер без превышения проектного уровня натяжения и повысить усилия на анкере, максимально приблизив к проектным.

Предложенный способ натяжения пучков может быть использован при замене арматурных канатов СПН-1000 на арматурные пучки СПЗО-М на действующих блоках АЭС, а также при предварительном напряжении защитной оболочки АЭС нового поколения (АЭС-2006, ВВЭР-ТОИ).

Установка датчиков силы на каждом арматурном пучке позволяет:

оценивать надежность работы системы предварительного напряжения защитной оболочки при эксплуатации;

контролировать качество предварительного напряжения защитной оболочки;

контролировать исправность оборудования для натяжения арматурных пучков и обеспечивать более однородное напряженно-деформированное состояние защитной оболочки.

Имеющихся средств контроля напряженно-деформированного состояния защитной оболочки 3-го, 4-го энергоблоков Ростовской АЭС при их использовании совместно с разработанной методологией расчета и детальной моделью достаточно для определения ее эксплуатационной пригодности. В связи с этим контроль усилий методом lift-off может быть оптимизирован.

Дополнительные циклы нагружения арматурных пучков и элементов системы предварительного напряжения защитной оболочки при использовании метода lift-off приведут к повышенному износу элементов СПЗО. При длительной эксплуатации будут увеличиваться продавливание полиэтиленовой оболочки и коэффициент трения. Следовательно, будет возрастать расхождение между действующими усилиями в пучке и результатами контроля усилий методом lift-off. Отказ от применения метода lift-off для обследования 100% арматурных пучков снизит затраты на организацию работ и повысит коэффициент готовности АЭС.

Предложенный способ позволит существенно сократить эксплуатационные расходы на обслуживание СПЗО, избежать трудоемких и технологически сложных работ с применением домкрата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Киселев А.С., Киселев А.С., Киселев Е.А. и др. Повышение эксплуатационных качеств защитных оболочек АЭС. — В сб.: Механика преднапряженных защитных оболочек АЭС. Труды ИБРАЭ, вып. 6. М.: Наука, 2008, с. 30—46.
2. Инструкция по техническому обслуживанию системы преднапряжения защитных оболочек головной серии и модернизированной конструкции для АЭС с энергоблоками ВВЭР-1000 типов 302, 338 и 187. М., АО «Концерн Росэнергоатом», 1989.
3. РД ЭО-0129—98. Требования к техническому обслуживанию и ремонту системы преднапряжения защитных оболочек АЭС с ВВЭР-1000 и реакторной установкой В-320. М., АО «Концерн Росэнергоатом», 1998.
4. РД ЭО-0130—98. Требования к техническому обслуживанию и ремонту системы преднапряжения защитных оболочек АЭС с ВВЭР-1000 и реакторными установками 302, 338, 187. М., АО «Концерн Росэнергоатом», 1998.
5. СТО 1.1.1.01.002.1853—2021. Техническое обслуживание и ремонт системы преднапряжения защитных оболочек атомных станций с ВВЭР-1000 и 1200. Требования. М., АО «Концерн Росэнергоатом», 2021.
6. Медведев В.Н., Киселев А.С., Киселев А.С. и др. Натурные наблюдения на этапе строительства защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС. — Глобальная ядерная безопасность, 2014, № 3(12), с. 89—99.
7. Большов Л.А., Медведев В.Н., Стрижов В.Ф., Ульянов А.Н. Способ натяжения арматурных канатов. Заявл. 22.01.2014. Опубл. 20.04.2015. — Бюл. «Изобретения. Полезные модели», 2015, № 11.
8. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. Пер. с англ. М.: Мир, 1975. 341 с.
9. Постнов В.А., Дмитриев С.П. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений. Л.: Судостроение, 1979. 287 с.
10. Медведев В.Н., Ульянов А.Н., Стрижов В.Ф. и др. Анализ результатов предварительного напряжения защитной оболочки энергоблока № 3 Ростовской АЭС. — В сб.: МНТК-2014. Москва, 21—23 мая 2014 г., с. 290—295.
11. Пимшин Ю.И., Ключин Е.Б., Медведев В.Н. и др. Диагностика технического состояния защитных оболочек АЭС. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2016, № 4, с. 55—59.
12. Ульянов А.Н., Медведев В.Н. Экспериментальные исследования по определению коэффициента трения арматурных канатов о стенки каналовобразователей на существующих защитных оболочках АЭС. — В сб.: Механика преднапряженных защитных оболочек АЭС. Труды ИБРАЭ, вып. 6. М.: Наука, 2008, с. 22—29.

Поступила в Редакцию 15.10.24