

# ТЕХНОЛОГИЯ БЕТОНИРОВАНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ РЕАКТОРНОГО ЗДАНИЯ АЭС ИЗ САМОУПЛОТНЯЮЩЕГОСЯ БЕТОНА (ПО ОПЫТУ СООРУЖЕНИЯ ВЗО АЭС «РУППУР»)

При строительстве атомных электростанций (АЭС) наиболее ответственным, конструктивно сложным, материало- и трудоемким сооружением является здание реактора (УА) и особенно зона локализации возможных аварий — защитная оболочка и конструкции внутри нее [1].

Защитная оболочка реактора является архитектурной доминантой атомной электростанции и важнейшим сооружением для обеспечения эксплуатационной надежности работы АЭС.

**Л. М. Якобсон,  
Д. Г. Суриков  
М. Я. Якобсон**

(ООО Инженерная компания «НИИЖБ»),

**Д. А. Толстов**

(ООО Трест «РосСЭМ»).

Как правило, современные здания УА Российских АЭС предусматривают комбинированную пространственную конструкцию двойной защитной оболочки реактора, включающую внутреннюю и наружную защитные оболочки. При этом функции герметичного контейнента выполняет внутренняя защитная оболочка, а функции защиты от внешних воздействий — наружная. Кроме того, внутренняя защитная оболочка является опорой для установки технологического оборудования, опорой при размещении трубопроводов и систем безопасности. В целом, назначение защитных оболочек сводится к обеспечению безопасных условий работы персонала и технологического оборудования АЭС, защите окружающей среды при любых природных и техногенных воздействиях. Оболочки защищают от: повышения избыточного давления до 0,4 МПа и температуры внутри герметичного объема до 150°C;

- экстремальных ветровых и снеговых нагрузок повторяемостью один раз в 10 000 лет;
- ураганов, смерчей (торнадо), волн цунами;
- максимального расчетного землетрясения;
- максимальной проектной аварии;
- падения самолета;
- воздушной ударной волны и других экстремальных воздействий.

В соответствии с «Нормами строительного проектирования АС с реакторами различного типа» (Пин АЭ-5.6) здание реактора относится к конструкциям зданий и сооружений I категории (по условиям их ответственности за радиационную и ядерную безопасность и обеспечения функционирования размещаемого в них оборудования и систем и I категории сейсмостойкости по НП 031-01).

Как правило, современные конструкции внутренней защитной оболочки (ВЗО) — это предварительно напряженные железобетонные конструкции цилиндрической формы с толщиной стенки до 1200 мм (для отдельных элементов до 2000 мм) и высотой цилиндрической части до 55 м. Нижняя часть цилиндрической части ВЗО усилена вутум высотой до 3 м с максимальной толщиной в основании до 1,6 м.

Наружная оболочка — не напряженная, предназначенная для защиты от внешних воздействий, имеет толщину 500–800 мм при диаметре до 55 м и высоте до 80 м (мощность реактора 900–1500 МВт).

Для размещения предварительно напряженных армоэлементов в цилиндрической части ВЗО в основном используют две схемы:

- а) ортогональная схема армирования с расположением пучков в кольцевом и меридиональном направлениях; кольцевые армоэлементы проходят в каналообразо-

ООО Инженерная компания «НИИЖБ»  
+7 499 390 1866  
info@ik-niizhb.ru

вателях и закрепляются на пилястрах, количество которых может быть от 2 до 6 с углами охвата от 360 до 120°; меридиональные пучки закрепляются в кольцевой галерее фундаментной части и на карнизе кольцевой балки жесткости.

б) диагональная схема преднапряжения или геликоидальная с расположением армозащитных элементов по спирали — по винтовым линиям, идущим навстречу друг другу с наклоном примерно 35° к горизонту, что обеспечивает равномерное обжатие бетона в кольцевом и меридиональном направлениях. Анкеровка диагональной арматуры осуществляется либо в двух уровнях — под днищем плиты и на карнизе кольцевой балки, либо только на кольцевой балке.

В качестве напрягаемой арматуры применяют высокопрочные канаты К-7 (пряжи), собираемые в арматурные пучки с контролируемым усилием натяжения 10000 кН. Каналообразователями служат полиэтиленовые трубы диаметром 220–270 мм. После натяжения пучков каналообразователи заполняют инъекционным высокопрочным раствором.

Каналообразователи закреплены на системе поддерживающих ферм из профильной арматуры, что наряду со стержневой

Табл. 1. Объемы работ, по гермозоне реакторного отделения АЭС с реактором ВВЭР-1000 (АЭС «Куданкулам», Индия) [1]

Конструктивный элемент	Расход материалов			Удельный расход, кг/м <sup>3</sup>		
	Бетон, м <sup>3</sup>	Арматура, т	Металлоконструкции, т	Арматуры	Металла	Всего арматуры и металла
Плита на отметке +5,40	6000,0	585,0	740,0	97,5	123,3	220,8
Цилиндрическая часть внутренней оболочки	2300,0	300,0	360,0	130,4	156,5	286,9
Купол внутренней оболочки	3850,0	500,0	240,0	129,9	62,3	192,2
Цилиндрическая часть внешней оболочки	9270,0	927,0	-	100,0	-	100,0
Купол внешней оболочки	2500,0	250,0	-	100,0	-	100,0
Строительные конструкции СПОТ	3700,0	370,0	130,0	100,0	35,1	135,1
Конструкции гермозоны:	2230,0	290,0	370,0	130,0	300,0	430,0
— до отметки +14,10	660,0	86,0	70,0	130,0	106,1	236,1
— перекрытие на отм. 14,10	3280,0	426,0	600,0	129,9	182,9	312,8
— до отметки +31,70	500,0	65,0	140,0	130,0	280,0	410,0
— на отметке +31,70						
Шахта реактора	2110,0	274,0	220,0	129,9	104,3	234,2
Всего	36 400,0	4073,0	4288,0	111,9	117,8	229,7



Рис. 1. Армирование блока В30 с установленными каналообразователями



Рис. 2. Объемный блок В30 готовый к монтажу

арматурой создает густоармированную конструкцию с расходом металла 200–260 кг на 1 м<sup>3</sup> бетона. В отдельных элементах оболочки с учетом закладных и поддерживающих конструкций каналообразователей и облицовки содержание металла может достигать 400 кг/м<sup>3</sup>. Удельная масса закладных деталей составляет 15–20 кг на 1 м<sup>3</sup> конструкции (табл. 1).

Такая конструкция реализована при сооружении Нововоронежской АЭС, Ростовской АЭС и других современных АЭС.

Расстояние между арматурными стержнями диаметром до 40 мм может составлять менее 100 мм (рис. 1). С учетом пилястр, элементов карниза и наличия труднодоступных участков, оболочка В30 представляет собой конструктивно сложное сооружение.

Высокий уровень ответственности, требования к качеству, сложность арматурных и бетонных работ определяют сроки сооружения В30. При объеме бетонных работ, составляющем менее 5% от общего объема строительства блока АЭС, именно про-

Высокий уровень  
ответственности,  
требования  
к качеству,  
сложность  
арматурных  
и бетонных работ  
предопределяют  
сроки сооружения  
ВЗО

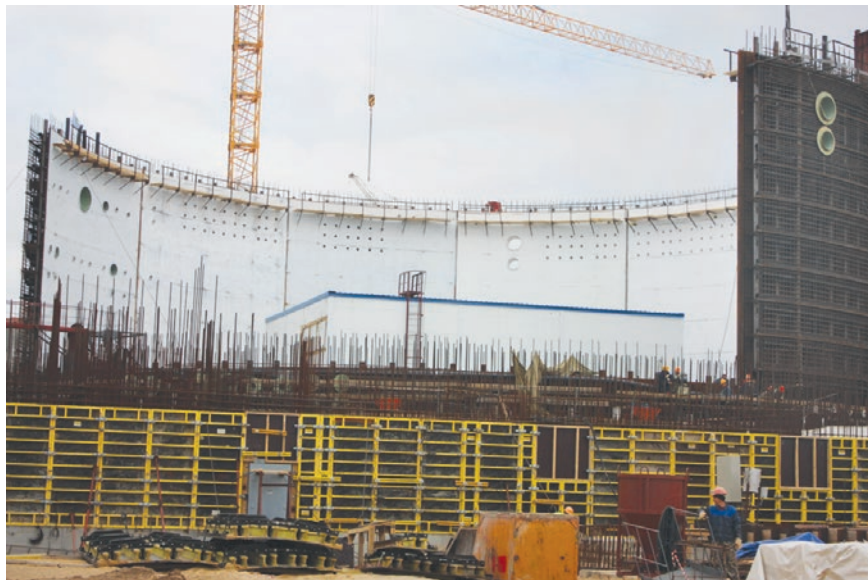


Рис. 3. Установленные объемные блоки ВЗО

должительность возведения конструкции ВЗО, как правило, определяет сроки строительства блока и в определенной степени сдерживает темпы сооружения всей АЭС.

Возведение ВЗО современных АЭС выполняется крупными объемными блоками массой до 250 т, предварительно изготовленными на площадке предмонтажной сборки и/или поставляемыми в готовом для монтажа виде (рис. 2). В качестве внутренней опалубки при бетонировании внутренней защитной оболочки используется стальная гермооблицовка, которая объединена с арматурным каркасом, установленными закладными деталями, трубными проходками, поддерживаю-

щими фермами, анкерующими уголками, вспомогательными несущими элементами (обеспечивающими прочность и жесткость монтажных блоков в процессе изготовления, транспортировки, монтажа и бетонирования оболочки), контрольными приборами и каналобразователями.

Один ярус ВЗО АЭС «Руппур» — это 12 объемных блоков-лепестков высотой 13,2 м. Всего в конструкции ВЗО четыре яруса и купол.

Для бетонирования внутренних защитных оболочек АЭС с использованием подвижных и литых бетонных смесей ранее применяли подъемно-переставную опалубку с высотой щита 1,5 м. Такая высота

яруса обусловлена ограничением гидростатического давления свежееуложенной бетонной смеси на опалубку, допустимым давлением свежееуложенной бетонной смеси на каналобразователи, удобством виброуплотнения (Нововоронежская АЭС, Калининская АЭС).

Технология бетонирования с высотой яруса не более 1,5 м имеет существенные недостатки:

- большое количество горизонтальных рабочих швов (по количеству перестановок опалубки), соответственно — большие трудозатраты по подготовке этих швов перед последующим бетонированием (очистка от цементной пленки и продувка сжатым воздухом);
- значительное количество операций по монтажу и демонтажу карт (щитов) опалубки, соответственно — увеличение общего времени возведения ВЗО с учетом длительности набора прочности каждого бетонизируемого яруса;
- вероятность образования во время бетонирования каверн, раковин и пустот при недостаточном вибрировании или расслоении бетонной смеси; как следствие — уменьшение прочности бетона, необходимость ремонтно-восстановительных работ [2].

Сокращение трудо- и энергозатрат при выполнении работ по сооружению защитных оболочек является актуальной задачей. Одним из способов увеличения возможной высоты захватки и соответственно снижения трудозатрат, уменьшения количества рабочих швов бетонирования является использование самоуплотняющихся бетонных смесей (СУБ), которые не требуют виброуплотнения. Опыт использования СУБ был реализован при бетонировании яруса ВЗО высотой 4 м на Ленинградской АЭС и Белорусской АЭС.

Табл. 2.

Показатели свойств бетонной смеси	Фактические значения	
	Удобоукладываемость	Температура, °С
При приготовлении бетонной смеси	Расплав конуса 670 × 670 мм	t=23,5°С
Через 1 час	Расплав конуса 710 × 710 мм	t=25,5°С
Через 2 час	Расплав конуса 700 × 700 мм	t=27,0°С
Через 3 час	Расплав конуса 650 × 660 мм	t=29,8°С
Через 3 час 30 мин	Расплав конуса 500 × 510 мм	t=34,8°С
Через 4 час	Осадка конуса 16 см	t=39,1°С
Через 5 часов бетон схватился		
Вязкость VS2/VF2, сек	20	
Проходимость PA2	0,9	
Сохраняемость, ч	3	
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	2520	
Водоотделение, %	нет	
Раствороотделение, %	1,5	



Рис. 4. Бетонирование яруса В30

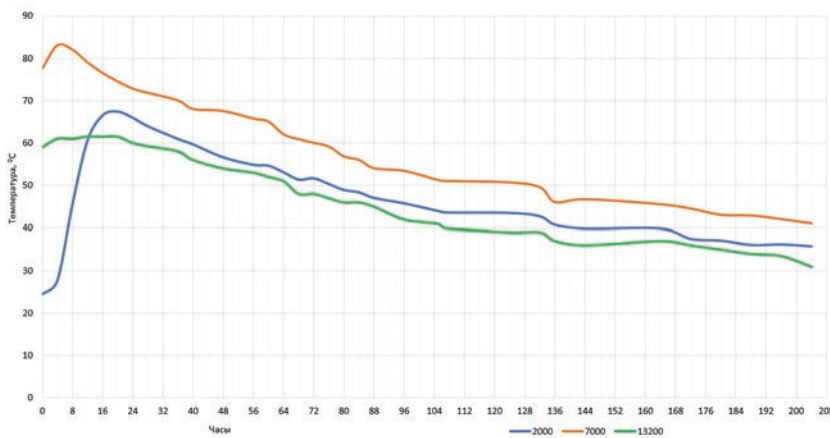


Рис. 5. Изменение температуры бетона после завершения бетонирования яруса В30 на глубине: 2000 мм, 7000 мм, 13200 мм

Укладка СУБ в конструкции В30 без виброуплотнения позволила решить следующие задачи:

- Поддержание высокого темпа возведения сооружений, позволяющего производить бетонирование крупногабаритными блоками с меньшим количеством строительных швов (3 перестановки опалубки и соответственно 3 горизонтальных строительных шва на высоту одного объемного блока-лепестка В30 высотой 12 м) и меньшим количеством последующих мероприятий по их подготовке и герметизации;
- Возможность бетонирования густоармированных конструкций сложной формы;
- Заполнение труднодоступных частей конструкций с обеспечением их монолитности;
- Получение бездефектной и плотной структуры лицевой поверхности бетона, что обеспечивает эксплуатационную на-

дежность и долговечность возводимых конструкций и сооружений;

- Улучшение условий труда. Высота яруса бетонирования 4 м выбрана после оценки давления подобранной свежеложенной бетонной смеси на опалубку и с учетом сроков схватывания бетонной смеси. Темпы бетонирования составляли 50 м<sup>3</sup>/ч с перерывами на промывку бетононасоса после каждого яруса бетонирования [2].

Дальнейшее развитие технологии самоуплотняющихся бетонных смесей позволило разработать бетонные смеси с регулируемым временем схватывания в условиях повышенных температур при сооружении АЭС «Руппур» в Бангладеш, что позволило проводить бетонирование одного яруса высотой 13,2 м одной захваткой. В соответствии с проектом к бетону внутренней защитной

оболочки АЭС «Руппур» были предъявлены следующие требования:

- Класс бетона по прочности на сжатие: В60;
- Марка по водонепроницаемости: W6;
- Предельная величина усадки: 30 × 10<sup>-5</sup>;
- Предельное значение коэффициента ползучести: 2,0;
- Средняя плотность бетона, не менее: 2350 кг/м<sup>3</sup>.

С учетом плотности армирования и условий бетонирования назначены следующие технологические показатели качества бетонной смеси:

- Удобокладываемость бетонной смеси SF2 (распль конуса на месте укладки бетона): 660–750 мм;
- Вязкость, VF2: не более 25 с;
- Проходимость, PA2: не менее 0,8;
- Марки по устойчивости и раскисляемости — SR2;
- Температура воздуха в период бетонирования изменялась от 14 °С ночью и до 34 °С днем.

Работы по возведению В30 АЭС «Руппур» выполнял ООО Трест «РосСЭМ» — лидирующая организация АО «Атомстройэкспорт» по изготовлению, монтажу и бетонированию укрупненных объемных блоков В30. Бетонную смесь приготавливали на бетономесительных установках с принудительным перемешиванием смеси. В составе самоуплотняющейся бетонной смеси в качестве вяжущего использовали портландцемент СЕМ I 52,5N производства AMAN cement, в качестве микронаполнителей — микрокремнезем и известняковый минеральный порошок, щебень диабазовый смесь фр. 5–15 мм, песок речной Мкр.2,7, добавку Sika ViskoCrete 3006 ES (Rossem). Температуру бетонной смеси в пределах 25±3 °С обеспечивали за счет введения в бетономеситель чешуйчатого льда.

Для определения темпов бетонирования, исключающих превышение допустимого давления на опалубку, были проведены исследования по оценке изменения во времени показателей удобокладываемости (табл. 2).

Расчет опалубки производили по максимальному гидростатическому давлению бетонной смеси, которое она оказывает на опалубку за время бетонирования до начала схватывания бетонной смеси. Темпы бетонирования назначали из условия ограничения максимальной горизонтальной нагрузки от свежеложенного бетона на элементы облицовки — не более 30 кН/м. Анализ экспериментальных данных показал, что скорость бетонирования должна быть такой, чтобы через 5 часов непрерывного бетонирования уровень свежеложенной бетонной смеси был не более 1,2 м. Прочность бетона через 6 часов составляет 1,0–1,5 МПа, что позволяет полностью воспринимать нагрузку от вышележащих слоев бетонной смеси. При производстве работ скорость бетонирования при ширине яруса бетонирования 1200 мм



Рис. 6. Снятие опалубки яруса ВЗО



Рис. 7. Поверхность конструкции ВЗО после распалубки

в среднем составляла  $35 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Использовали 4 бетонораспределительные стрелы с бетононасосами, установленные равномерно по периметру ВЗО (рис. 4). Бетонирование вели с помощью неизвлекаемых бетонлитных труб. Щиты опалубки усилены ригелями, объединенными между собой. Продолжительность непрерывного бетонирования яруса ВЗО объемом  $1960 \text{ м}^3$  высотой 13,2 м составила 56 часов.

Особое внимание уделяли качеству бетонной смеси. При оценке технологических свойств смеси при был обеспечен контроль расплыва конуса, расслаиваемости смеси; каждые 2 часа бетонирования проверяли вязкость смеси (V-воронка), текучесть (L-box).

Наибольшая температура бетона ( $85 \text{ }^\circ\text{C}$ ) была определена в срединном слое на глубине 7000 мм от поверхности через 30–34 часа после укладки этого слоя. Наибольшую скорость изменения температуры бетона в период подъема температуры ( $9 \text{ }^\circ\text{C}/\text{час}$ ) наблюдали на глубине 2000 мм через 10 часов после бетонирования этого слоя (рис. 5).

Для уменьшения температурного градиента по объему конструкции, организации благоприятного изменения температурно-напряженного состояния во времени, снижения вероятности возникновения температурно-усадочных трещин, опалубка была утеплена и со стороны щитовой опалубки и со стороны гермооблицовки. Изменение температуры на этапе охлаждения бетона после установки теплоизоляции составило  $1\text{--}2 \text{ }^\circ\text{C}/\text{час}$ .

Снятие теплоизоляции и опалубки производили через 17–20 суток после бетонирования, когда разница между температурой поверхности бетона и температурой воздуха составила не более  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  (рис. 5).

Табл. 3.

№№ серии	Прочность бетона на сжатие, МПа/Плотность бетона, кг/м <sup>3</sup>	
	в возрасте 7 суток	в возрасте 28 суток
1	74,1/2525	79,2/2530
2	64,8/2483	81,4/2570
3	64,5/2446	82,4/2568
4	72,6/2557	81,0/2522
5	67,4/2501	88,5/2515
6	65,2/2491	82,0/2521
среднее	68,1/2501	82,4/2538
ср.кв. откл.	4,21/37,84	3,18/24,74
коэф. вариации, %	6,2/1,5	3,86/1,0

После распалубки отмечено высокое качество открытой лицевой поверхности, отсутствие каверн, раковин, трещин. Количество анкеров от крепления опалубки также сведено к минимуму, что облегчает ремонтные и отделочные работы (рис. 6).

Контроль прочности бетона проводили неразрушающим методом при испытании методом ударного импульса по ГОСТ 22690-2015, а также при испытании контрольных образцов кубов. Через каждые 6–8 часов бетонирования отбирали пробы бетонной смеси для изготовления контрольных образцов. Каждую серию, состоящую из 12 образцов, испытывали в возрасте 7 и 28 суток. Результаты испытаний показаны в таблице 3.

Таким образом показано, что при разработке технологии бетонирования самоуплотняющимися бетонными смесями с регулируемым сроком схватывания

и при должном контроле качества технологических свойств возможно обеспечить бетонирование конструкции ВЗО захватками высотой до 13,2 м и обеспечить значительное уменьшение трудо- и энергозатрат, сократить время производства работ более чем в 4 раза.

#### Литература

1. Пергаменчик Б. К., Теличенко В. И., Тишев Р. Р. Возведение специальных защитных конструкций АЭС. Москва: Издво МЭИ, 2011.
2. Коротких Д. Н., Кокосадзе А. Э., Кулинич Ю. И., Паникин Д. А. Технология бетонирования внутренней защитной оболочки реакторного здания Белорусской АЭС // Строительные материалы, №5, 2016. С. 10–15.