

## **Особенности проектирования и строительства АЭС**

Автушенко В. В., Фадеева Е. А.

Научный руководитель Шилов А. Е.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь

### **Введение**

Характерной особенностью современной цивилизации является огромная потребность в энергии, без которой она нежизнеспособна. Ядерная энергия в силу уникальной ее концентрации оказалась предельно приспособленной для централизованного производства электроэнергии, которой человечеству для удовлетворения своих энергетических нужд требуется все больше и больше.

В современных проектах АЭС с реакторами нового поколения предусматриваются системы и специальные технические средства, обеспечивающие высокие уровни безопасности не только при проектных авариях, но и при запроектных с тяжелыми последствиями и вероятностью выхода радиоактивности в окружающую среду. Тяжелые аварии имеют очень малую вероятность возникновения. Но, поскольку, как считают специалисты атомной отрасли, безопасности много не бывает, при проектировании современных АЭС разрабатываются специальные меры по управлению такими авариями и по смягчению их последствий. Положения современной концепции безопасности АЭС отражены в документах МАГАТЭ и предусматриваются к реализации национальными нормативно-законодательными и нормативно-техническими документами.

Генеральным проектировщиком и генеральным подрядчиком является объединенная российская компания ОАО «НИАЭП» (Нижегородская инжиниринговая компания «Атомэнергопроект») – ЗАО «АСЭ» (Атомстройэкспорт). Российский проект «АЭС – 2006» с усовершенствованными водо-водяными реакторами поколения три плюс выбран для реализации в Республике Беларусь. Проект соответствует самым строгим нормам и рекомендациям МАГАТЭ и отличается повышенными характеристиками безопасности.

### **Особенности построения конструктивной схемы**

Главный корпус АЭС представляет собой систему сооружений, в общем случае образованных и каркасными конструкциями (турбинное отделение, деаэрационное отделение, этажерка электроустройств), и массивом реакторного отделения. Каркас может выполняться из железобетона, смешанным и стальным. При этом стены отделений, выполняя только функции ограждения для обеспечения требуемого температурно-влажностного режима, возводятся с использованием навесных панелей облегченного типа. Конструктивные схемы каркасов главных корпусов достаточно многообразны. В этих зданиях, по сравнению с обычными промышленными зданиями, влияние структуры технологического процесса на конструктивную схему каркаса наиболее существенно, поэтому конструктивная форма полностью определяется габаритами и расположением основного и вспомогательного оборудования и спецификой его работы и в связи с этим характеризуется большими пролетами и большой высотой отделений. Большинство каркасов зданий главных корпусов проектируется так, что несущая способность и жесткость поперек здания (поперечная жесткость) обеспечиваются поперечными рамами, в которых колонны жестко заделаны в фундаменты и шарнирно или жестко соединены с колоннами в случае железобетонного каркаса. Также устойчивость здания главного корпуса в поперечном направлении обеспечивается еще и монолитным массивом реакторного отделения. Продольная жесткость каркасов обеспечивается с помощью балок-распорок, жестко соединенных с колоннами в случае железобетонного каркаса.

### **Специальные бетоны для защиты от ядерных излучений**

Работу ядерного реактора сопровождают два проникающих вида излучений – гамма-кванты и нейтроны, потоки которых характеризуются интенсивностью и спектром, т. е. распределением частиц по энергиям.

Эффективность ослабления потока гамма-квантов зависит главным образом от числа атомов в единице объема и возрастает с увеличением плотности материала защиты.

Специальные бетоны для защиты от ядерных излучений по сравнению с обычными должны обладать повышенной плотностью и (или) повышенным содержанием водорода (водо) и (или) наличием некоторых специальных элементов (бора и др.) в виде химически устойчивых соединений.

Под действием излучений в материалах защиты могут происходить структурные химические изменения, что сопровождается снижением физико-механических свойств. Поэтому при достаточно высокой интенсивности излучений и длительности их действия может быть поставлен вопрос об использовании в защите специальных радиационно-стойких материалов, в частности бетонов,готавливаемых на заполнителях и вяжущих, обладающих повышенной стойкостью к действию излучений.

Основным материалом защитных конструкций стационарного энергетического реактора является обычный бетон с объемной массой 2200–2400 кг/м<sup>3</sup>. Он обладает высокой плотностью, достаточным содержанием химически связанной воды, хорошей радиационной стойкостью. Однако в отдельных случаях при ограничении общей толщины стены или перекрытия защиту приходится выполнять из более эффективных защитных материалов – бетонов с повышенной плотностью (особо тяжелые бетоны), с повышенным содержанием химически связанной воды (гидратные бетоны), с добавкой специальных элементов – бора и др. (табл. 1, 2, 3).

*Особо тяжелые бетоны.* К особо тяжелым бетонам относятся бетоны с объемной массой больше 2500 кг/м<sup>3</sup>. Такие бетоны готовят на заполнителях плотностью в куске 3–7,8 т/м<sup>3</sup>, металлических рудах, промежуточном сырье металлургической промышленности (железорудный концентрат, окатыши), скрапе (сталь, чугун в виде отходов штамповки, обрезков арматуры, полосового и листового железа), чугунной дроби. В качестве вяжущего, как правило, используют портландцемент или шлакопортландцемент.

*Гидратные бетоны.* К гидратным принято относить бетоны, содержащие химически связанной воды в которых превышает 3–4 % по массе, т. е. 50–100 кг/м<sup>3</sup>, характерных для обычного бетона.

*Лимонитовый бетон.* Содержание связанной воды в лимонитовой руде и бетоне 10–15%. Распространения в защите АЭС не получил.

Таблица 1

## Защитные свойства особо тяжелых бетонов

Энергия гамма-квантов, МэВ	Длина релаксации гамма-квантов, см, при объемной массе бетона, кг/м <sup>3</sup>				
	2300	3200	3600	4200	5200
1	6,4	5,1	4,3	3,9	3,2
2	9,7	7,2	6,6	5,5	4,5
4	13,7	9,6	8,3	7,2	5,9

Таблица 2

Защитные характеристики гидратных бетонов  
(по отношению к быстрым нейтронам)

Содержание воды, % по массе		Длина релаксации, см	
В бетоне с объемной массой, кг/м <sup>3</sup>			
2300	3200	2300	3200
0,9	2,7	13,1	10,5
3,1	4,1	12,6	10,2
5,5	4,8	12,2	10,1
7,3	5,6	11,8	10,0
8,4	7,6	11,4	9,7

Таблица 3

## Составы особо тяжелых бетонов

Материал	Расход материала, кг/м <sup>3</sup> , для составов					
	1	2	3	4	5	6
Портландцемент	350	350	350	350	350	350
Природный песок	—	—	500	300	—	—
Железорудный концентрат	1000	900	—	700	300	—
Техническая дробь	—	600	1000	700	—	2000
Рудный щебень	2000	1800	1800	1600	1550	—
Скрап	—	—	—	—	1400	3900
Итого:	3350	3650	3650	3650	4200	6250

*Серпентинитовый бетон.* Заполнителем бетона служит метаморфическая горная порода – серпентинит, основа которой составляет минералы группы серпентин  $Mg_6(OH)_8[Si_4O_{10}]$ .

Защитные свойства гидратных бетонов от нейтронного излучения значительно выше, чем от гамма-излучения, поэтому часто для

защиты применяют комплексный утяжеленный бетон. Особо интересен в том отношении железосерпентинитовый бетон (табл. 4).

Таблица 4

Составы серпентинитового и железосерпентинитового бетонов

Расход на 1 м <sup>3</sup> бетона*, кг					Объемная масса бетонной смеси кг/м <sup>3</sup>
Портланд-цемент	Воды	Тонко-молотого серпентинита	Песка	Крупный заполнитель	
239	253	239	622	877	2230
330	230	-	660	1100	2320
230	230	230	2080**	830	3600
224	196	224	224+560***	672+1900***	4000

\* - марка бетонов М 100- М 200,

\*\* - песок металлический,

\*\*\* - заполнитель – стальной скрап.

### Радиационно-стойкие бетоны

Радиационное изменение бетонов проявляется в первую очередь в расширении, растрескивании, снижения прочности, модуля упругости и других характеристик. Начальные изменения в зависимости от типа бетона соответствует флюенсу  $1-5 \cdot 10^{19}$  нейрон/см<sup>2</sup> (здесь и ниже подразумеваются нейтроны достаточно высоких энергий – около 10 кэВ и выше, вызывающие радиационные повреждения).

Повреждения бетонов вызываются главным образом изменениями заполнителей, и, в частности, породообразующих минералов. Нарушение кристаллической структуры минералов нейтронами приводит к их аморфизации, что сопровождается анизотропным расширением. Это так называемый первичный эффект облучения. Вторичный эффект заключается в расширении, растрескивании горной породы, а затем бетона вследствие различных степеней расширения и анизотропии расширения материалов составляющих бетон.

По возрастанию радиационной стойкости распространенные магматические горные породы можно расположить в следующем порядке: интрузивные кварцесодержащие (гранит, гранодиорит, кварцевый диорит), интрузивные полевошпатовые (диорит, сиенит, габбро, лабрадорит), эффузивные (базальт, диабаз, андезит). Крупнокристаллические породы менее стойки, чем мелкокристаллические.

Радиационно-стойкими является бетон на хромите, изменение свойств которого незначительны при флюенсе до  $2 \cdot 10^{21}$  нейтрон/см<sup>2</sup>.

Допускаемый флюенс на бетоны, нейтрон/(см<sup>2</sup>·10<sup>19</sup>), зависит от вида крупного заполнителя.

Гранит, диорит, гранодиорит, сиенит, габбро, лабрадориты	2–5
Дуниты, оливиниты, базальт, диабаз, пироксениты, андезит	5–15
Серпентинит	10–50
Песчаник кварцевый	2–5
Известняк	10
Магнетит, гематит	10–100
Хромит кимперсайский	200

Приведенные данные позволяют по заданным условиям работы защиты подобрать тип заполнителя и по общепринятой методике запроектировать состав бетона. Допустимая радиационная нагрузка на выбранный заполнитель, бетон должна уточняться путем экспериментальной проверки.

При выборе типа радиационно-стойкого бетона следует иметь в виду, что интенсивные потоки нейтронов, как правило, сопровождаются значительными потоками гамма-квантов, Тепловыделениями и повышенными температурами. Обычно высокорadiационно-стойкий бетон должен быть и жаростойким.

Требования радиационной стойкости к бетону биологической защиты современных АЭС с водо-водяными и водографитовыми капельными реакторами практически не предъявляются, так как флюенс нейтронов за срок службы реактора значительно ниже величины, соответствующей заметным радиационным изменениям.

### **Бетонные работы**

Опалубочные конструкции АЭС с реакторами ВВЭР выполняют в виде плоских железобетонных панелей или пространственных блоков. Толщина панелей до 80 мм, площадь на нескольких десятках квадратных метров. Панель можно использовать самостоятельно как элемент несъемной опалубки или же из двух панелей на площадке укрупнительной сборки собирают пространственную конструкцию (блок-ячейку) с установкой проходок и дополнительной арматуры. Толщина блок-ячейки равна толщине защитной

стены (0,4; 0,6; 0,9; 1,2; 1,5; 1,8; 2,0), ширина – 3 м, высота – в зависимости от этажа с модулем 0,6 м.

После монтажа ячеек, установки дополнительной арматуры в стыках пространства внутри ячеек заливают бетоном.

Несъемная опалубка защитных конструкций (толщина 500 мм и более) АЭС с реакторами РБМК представляет собой ребристые железобетонные панели (армоопалубочные панели) размером до 3000×6000 мм. В ребрах, устраиваемых во взаимно перпендикулярных направлениях с шагом 600 мм, размещается вся или значительная часть рабочей арматуры будущей защитной стены. Толщина плиты между ребрами 30 мм. На площадке укрупнительной сборки из двух панелей с помощью угловых связей создают пространственный блок.

Для самонесущих и слабонагруженных железобетонных стен предусматривают панели с облегченным армированием.

Защитные перекрытия АЭС выполняют, как правило, также вместе сборно-монолитными с использованием ребристых панелей или балок, или иной конфигурации в качестве потолочной конструкции – опалубки. Перед подачей бетона по панелям (балкам) может быть установлена дополнительная арматура.

### **Заключение**

Итак, чтобы обеспечить требуемую безопасность при эксплуатации АЭС, следует правильно подобрать бетон, который сможет выдержать не только постоянные и временные нагрузки. Бетон должен выдержать испытание радиацией, также обладать достаточной жаростойкостью. Также должна соблюдаться технология бетонных работ, который обладают спецификой из-за массивности сооружения. К сожалению, информации о ходе строительства, применяемых материалов или норм, по которым ведется строительство БелАЭС нет в доступе. Однако, строительством и проектированием занимается одна из ведущих организаций в области атомного строительства, что должно обеспечить гарантию качества АЭС и спокойствие в нашей стране.