



Пути экономии стали в реакторостроении

А. Н. Комаровский

В статье рассматриваются основные пути экономии стали в реакторостроении. Показывается, что в стационарных ядерных реакторах основным путем экономии стали является замена ее бетоном. Приводятся данные, свидетельствующие о том, что механическая прочность и радиационная стойкость бетонов в настоящее время значительно недоиспользуются и что возникающие в бетоне волосянные трещины не влияют на его защитные свойства. Разбирается вопрос о применении защитных противовзрывных оболочек. В качестве примера, доказывающего экономическую целесообразность применения защитной камеры (вместо защитной оболочки), рассчитанной на избыточное внутреннее давление, приводится проект советского кипящего реактора.

Рациональным и экономным проектированием всей реакторной установки в целом можно достичь существенной экономии стали при сооружении реакторов.

Рассмотрим несколько основных конструктивных путей такой экономии:

1) устройство активного корпуса реактора не из стали, а из предварительно напряженного железобетона;

2) отказ от тепловой защиты (обычно стальной);

3) использование камеры реактора, образуемой железобетонной боковой и верхней защитой, в качестве герметичной противовзрывной защиты вместо сооружения отдельной стальной защитной оболочки;

4) значительное сокращение или полный отказ от армирования бетонных конструкций биологической защиты.

Активный корпус реактора

Определяемая из условий обеспечения биологически допустимого уровня излучения толщина бетонной защиты (обычно 2—3 м) значительно больше толщины, необходимой для статической прочности и устойчивости камеры, образуемой боковой и верхней защитой реактора.

Напряжение на сжатие в бетоне защиты в этом случае в несколько раз меньше пре-

дела прочности материала. Например, в нижней части боковой защиты из обычного бетона высотой 20 м напряжение на сжатие составляет $4,6 \text{ кг/см}^2$.

Для такой же защиты из бетона со стальным скрапом с объемным весом $4,5 \text{ т/м}^3$ это напряжение составит $9,0 \text{ кг/см}^2$.

Предел прочности на сжатие для различных составов обычного бетона марки 300 равен $\sim 140 \text{ кг/см}^2$, а для различных составов бетона со стальным скрапом— $110\text{—}150 \text{ кг/см}^2$ [1]. Таким образом, в боковой защите даже весьма крупного реактора прочность бетона на сжатие значительно недоиспользуется. Если учесть самую невыгодную схему распределения температурных напряжений, то коэффициент запаса прочности сократится хотя все же будет равен 3—7.

Несколько меньшие, но тоже весьма значительные запасы прочности на сжатие имеются и в верхней бетонной защите реактора.

Напряжения на растяжение могут возникнуть в результате температурных перепадов только во внешних слоях защиты. Эти напряжения невелики и в крупных реакторах обычно воспринимаются небольшим количеством стальной арматуры.

Несмотря на столь значительное недоиспользование прочности бетона, внутри бетонной камеры устанавливается металлический (обычно стальной) корпус, испыты-

вающий значительные температурные напряжения. Этот корпус рассчитывался на возможное аварийное, а в некоторых типах реакторов и эксплуатационное внутреннее давление жидкости или газа. Давление в корпусе большинства реакторов не превышает 15 ат. Температурные напряжения внутри корпуса могут достичь существенных величин.

Если бетон боковой биологической защиты в основном работает на сжатие, то материал стального корпуса — на растяжение. При подобном различии напряжений, естественно, возникает вопрос о возможности дополнительной нагрузки на бетонные конструкции биологической защиты. Изменяя форму и размеры камеры, которая образуется защитой, ее можно использовать в качестве корпуса под давлением.

Допускаемое напряжение бетона на растяжение невелико: для обычного бетона марки 300 оно составляет $10,5 \text{ кг/см}^2$. Временное сопротивление такого бетона на растяжение равно $\sim 30 \text{ кг/см}^2$, а, например, для тяжелого бетона марки 300 на стальном скрапе — 16 кг/см^2 [2].

Очевидно, без специальных мер и передачи основной части растягивающих напряжений на стальную арматуру обычные конструкции бетонной биологической защиты не смогут выдержать передаваемых им усилий. Одной из таких мер является предварительное обжатие бетона так называемой напряженной (обычно при помощи домкратов) арматурой (стальными стержнями, высокопрочной проволокой или стальным тросом). Предварительное напряжение железобетона за последние годы применяется в практике все шире.

Однако при применении для корпуса реактора предварительно напряженного железобетона возникают следующие трудности:

1. Приближение массивной бетонной биологической защиты к активной зоне реактора вызывает существенное увеличение температурных напряжений в защите.

2. Ввиду отсутствия достоверных данных о поведении конструкций из предварительно напряженного железобетона в условиях резких и значительных колебаний температур потребуется, очевидно, создавать большие запасы прочности.

3. Расчет конструкции с учетом неравномерности ее нагревания очень сложен.

При этом возможные ошибки для изотропного тела могут дать не только количественно неточные результаты. При расчете анизотропного тела могут возникнуть и качественные отклонения от истинных величин (смена знака напряжения бетона).

4. Большое количество отверстий в стенках и днище корпуса заставит устанавливать ряд закладных деталей, что затруднит работы по сооружению железобетонных конструкций.

Эти трудности заставили объединенную советско-чехословацкую экспертизу отказаться от интересного проекта корпуса из напряженного железобетона, разработанного академиком Чехословацкой академии наук Бэхине для чехословацкой атомной электростанции А-1. Тем не менее экспертиза все же подтвердила принципиальную возможность сооружения такого корпуса.

Изготовить совершенно газонепроницаемый бетон практически невозможно, поэтому необходима внутренняя облицовка камеры сваренными стальными листами, непосредственно прилегающими к бетону и не рассчитанными на восприятие давления газа. Такой стальной кожух одновременно может служить внутренней опалубкой для бетонирования корпуса.

Преимущества корпуса из напряженного железобетона заключаются в общей экономии стали (учитывая напряженную арматуру железобетона и внутреннюю обмуровку) и в ликвидации сложных работ по изготовлению криволинейных листов, сварке их на месте и снятию термических напряжений, возникающих при сварке отдельных элементов корпуса. Эти преимущества определили применение такого корпуса во французских горизонтальных реакторах G-2 и G-3 (рис. 1 и 2).

Отказ от применения обычного металлического корпуса в основном вызван ожидавшимися трудностями его сварки и отпуска напряжений цилиндрического корпуса диаметром 14 м и длиной 18 м. Расчеты показывают, что трещины в напряженном железобетоне в этой конструкции смогут возникнуть только при внутреннем давлении, в два раза большем расчетного, т. е. при 30 ат. Авторы проекта считают, что устройство необходимых отверстий в стенках и днищах корпуса проще при изготовлении его из железобетона. Внутри корпус представляет собой

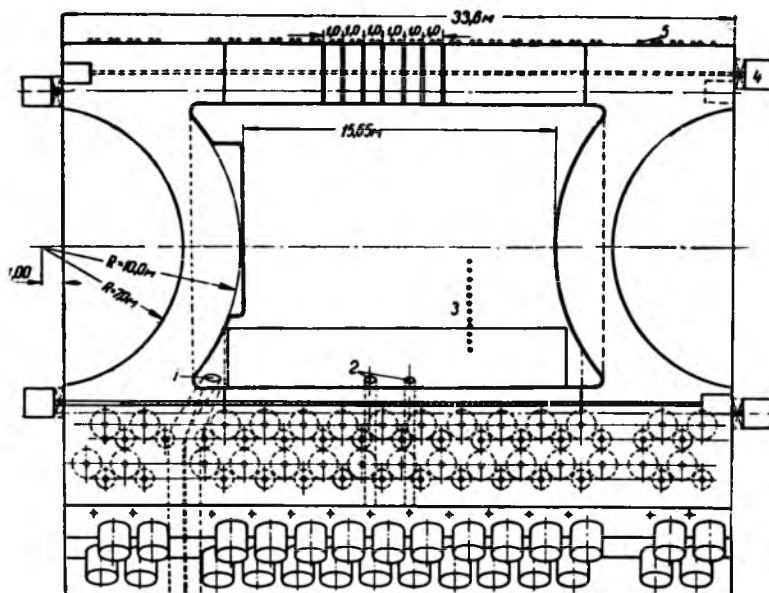


Рис. 1. Продольный разрез корпуса реактора G-2.

1—вход CO_2 ; 2—понижационные камеры; 3—выход CO_2 ; 4—продольные тросы; б—поперечные тросы.

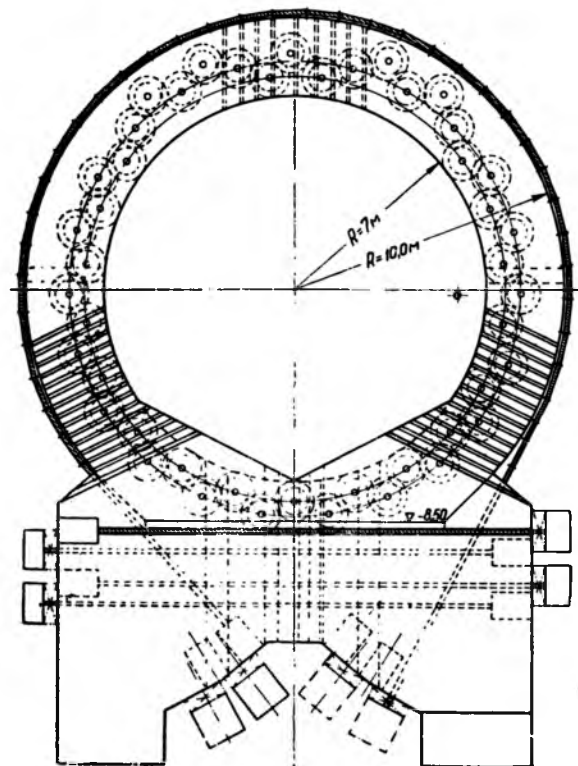


Рис. 2. Поперечный разрез корпуса реактора G-2.

цилиндр, переходящий внизу в две наклонные плоскости. Это, по мнению авторов проекта, облегчает предварительное напряжение железобетонного корпуса.

Напряженной арматурой, обеспечивающей предварительное сжатие бетона, служат стальные тросы из пучков высокопрочной проволоки. Каждый трос натягивается при помощи домкратов с усилием 1200 т. Кроме напряженных тросов, в бетоне корпуса имеется и кольцевая арматура (обручи).

Внутренняя часть корпуса с целью герметизации облицована сваренными листами из мягкой стали. Эта облицовка, скрепленная с бетоном корпуса при помощи ряда приваренных анкеров,

позволила вести монтаж реактора внутри корпуса одновременно с сооружением его железобетонной части. Торцы корпуса закрыты сферическими железобетонными куполами толщиной по 3 м. Продольные усилия, действующие на торцовые купола, воспринимаются продольной тросовой арматурой.

Всего для сооружения корпуса было израсходовано 500 т арматуры из обычной стали (не считая 2500 т для фундамента) и 760 т стальной проволоки [2, 3].

По данным работы [4], благодаря экономии, достигаемой применением активного корпуса-защиты из напряженного железобетона, значительно сокращаются расходы на строительство.

Изложенное выше свидетельствует о возможности экономии стали путем устройства для активной зоны реактора камер из напряженного железобетона, одновременно играющего роль и биологической защиты реактора. Однако отсутствие убедительных проектно-сметных данных пока не позволяет сделать вывод о безусловной экономичности этого способа.

В реакторах с графитовым замедлителем и водяным теплоносителем, протекающим по трубам (т. е. в реакторах без внутреннего давления газа или жидкости непосредственно

на активный корпус), образование активной камеры только железобетонными конструкциями биологической защиты (без предварительного напряжения арматуры) в ряде случаев технически возможно и дает экономию стали. При этом внутренний слой бетона (толщиной ~ 50 см) целесообразно делать жароупорным, а внутреннюю поверхность камеры в целях герметизации облицевать тонкими стальными листами; в случае применения стальной тепловой защиты целесообразно совместить с ней эту облицовку.

Тепловая защита

Внутренняя часть бетонной защиты реактора при его работе в результате радиационного тепловыделения может значительно нагреваться. С целью уменьшения чрезмерного нагрева бетона (вызывающего в нем большие температурные напряжения и резко сокращающего содержание в нем химически связанной воды, что ухудшает защитные свойства бетона) применяется тепловая защита.

В большинстве случаев эта защита представляет собой экран из малоуглеродистой стали толщиной 15—20 см. В отдельных случаях она изготовлена из свинца или боросодержащих материалов. При значительном энерговыделении тепловая и биологическая защиты имеют искусственное охлаждение. Вес тепловой защиты довольно велик. Например, в реакторах английских атомных электростанций в Колдер-Холле и Беркли вес стальной тепловой защиты составляет соответственно 1925 и 4340 т.

Иногда тепловая защита устроена весьма сложно. Например, в исследовательском реакторе FR-2 (ФРГ) алюминиевый активный корпус окружен тепловой защитой, состоящей из слоев борала (7 мм), стали (15 мм), охлаждаемой проточной водой, свинца (60 мм), стали (35 мм) и железа (180 мм), охлаждаемого воздухом.

Однако опыт эксплуатации реакторов и результаты ряда исследований вызывают серьезные сомнения в обоснованности применения тепловой защиты. Эффективность ее в отношении заметного уменьшения нежелательного нагрева бетона также невелика.

Действительно, на количество тепла, передаваемого бетонной защите нагретым активным корпусом реактора, тепловая защита практически не оказывает влияния, а коли-

чество тепла, выделяющееся в бетонной защите при поглощении в ней излучений, невелико. Устраивать же тепловую защиту ради сравнительно небольшого снижения потоков излучений, падающих на бетонную защиту, в большинстве случаев экономически нецелесообразно.

В ряде иностранных работ, основанных на опыте проектирования и эксплуатации реакторов, также высказывается сомнение относительно целесообразности применения тепловой защиты. Например, в работе [5] отмечается, что в исследовательском реакторе Брукхейвенской лаборатории (США), не имеющем тепловой защиты, после десяти лет работы в бетонной защите, расположенной непосредственно у активной зоны, не обнаружено заметных повреждений. Испытания образцов бетона, вырезанных из этой защиты, показали, что прочность и влагосодержание образцов не уменьшились (следует учесть, что бетонная защита этого реактора имела битумную внешнюю изоляцию). В работах [6—8] также отмечается возможность и экономическая целесообразность отказа от применения тепловой защиты.

Применение тепловой защиты связано главным образом с проблемой напряжений, обусловленных тепловыделением в защите. Рассмотрим этот вопрос подробнее.

Влияние температуры на прочность бетона. Бетон защиты особенно сильно нагревается в сравнительно тонком внутреннем слое.

По данным работы [6], толщина этого слоя всего несколько сантиметров. Распределение температуры по толщине бетонной защиты приведено на рис. 3 [9]. Из рисунка следует, что применение тепловой защиты сдвигает максимум температуры к внутренней поверхности защиты только на 0,15—0,20 м, т. е. всего на обычную толщину стальной тепловой защиты.

В работе [7] сообщается, что при постоянном воздействии на обычный бетон температур 65—95° С потери прочности бетона весьма незначительны, даже при температурах 260—315° С ухудшение конструктивных свойств бетона для ряда защитных конструкций при их равномерном нагреве считается допустимым. Для лимонитового бетона, имеющего сравнительно редкое применение, рекомендуется ограничить допустимый предел нагревания $\sim 200^\circ$ С, несмотря на то что

по произведенным исследованиям при температуре 350°C предел прочности на сжатие этого бетона уменьшается всего на 5%. При повышении температуры до $\sim 600^{\circ}\text{C}$ предел прочности уменьшается на 35%. При больших и частых колебаниях температуры потеря прочности бетона, по данным работы [7], в два-три раза больше, чем при постоянном воздействии высоких температур.

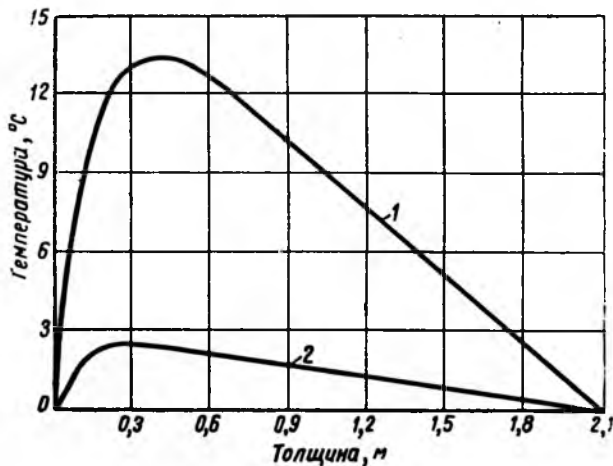


Рис. 3. Распределение температуры по толщине биологической защиты:

1—без тепловой защиты; 2—с тепловой защитой.

Другие авторы рекомендуют несколько меньшие пределы допустимого нагрева бетона.

В работе [10] температуру обычного бетона рекомендуется ограничить 250°C . При этом следует учитывать возможность снижения прочности бетона на 20—25% при длительном нагревании в пределах 100 — 250°C . Температуру баритовых и лимонитовых бетонов рекомендуется ограничить 200°C , так как при температурах от 100 до 200°C в этих бетонах возникают волосяные трещины, а при температурах выше 200°C могут происходить деформации, более опасные для целостности конструкций.

В работе [8] сообщается, что лимонитовый бетон может быть использован для защиты реактора при температуре не выше 100°C .

Допустимые напряжения на сжатие в бетоне при высоких температурах (даже у наиболее слабых в условиях высоких температур лимонитовых бетонов) значительно больше напряжений на сжатие, действующих

в боковой биологической защите реактора. Например, предел прочности на сжатие лимонитового бетона 28-дневного возраста при высокой температуре (540°C) с учетом частых и резких ее смен составляет 47 кг/см^2 . В то же время в стене защиты из лимонитового бетона высотой 20 м будет действовать напряжение на сжатие $5,4 \text{ кг/см}^2$ [1].

Если учесть температурные напряжения, возникающие в бетонной защите, то запас прочности для обычного (не лимонитового) бетона будет не менее чем трех- или четырехкратный. Таким образом, критериями прочности бетона защиты при воздействиях температуры будет не напряжение на сжатие, а термическое напряжение на разрыв во внешней зоне защиты (обычно воспринимаемое арматурой) и физико-химические процессы в нагретом материале бетона. Оба эти фактора в худшем случае могут вызвать только волосяные несквозные трещины во внешнем растягиваемом слое бетона, не влияющие на целостность и работоспособность бетонной конструкции.

Особо стоит вопрос о верхней бетонной биологической защите реактора, где бетон (обычно разборные плиты), если он не лежит на жестком каркасе, подвержен изгибу и, следовательно, растяжению.

Бетон имеет малый предел прочности на растяжение, особенно при повышенных температурах. Так, по данным работы [7], при нагревании с 85 до 350°C лимонитового бетона 120-дневного возраста предел прочности на растяжение сокращается на 30,5%. Поэтому работающий на изгиб бетон верхней защиты надо или предохранять от значительного нагревания, или обеспечивать достаточное армирование зоны растяжения.

Влияние волосяных трещин на защитные свойства бетона. Исследования и расчеты [8] показали, что трещины в бетоне не имеют геометрически гладких поверхностей, параллельно которым излучение может проникать через защиту. Поверхности этих трещин носят ломаный шероховатый характер. В бетоне даже сквозная трещина шириной 1,6 мм имеет минимальное отклонение от прямой линии—5 мм [8]. Прострельное излучение через такую трещину невелико, и в целом интенсивность излучения на внешней поверхности защиты в районе волосяной трещины примерно такая же, как и на целом участке бетона.

Таким образом, о температурных напряжениях в бетоне можно сделать следующие выводы:

1. При применении обычного качественного бетона для биологической защиты даже мощных реакторов, работающих в устойчивом эксплуатационном режиме, нет никакой опасности разрушения или повреждения бетона защиты от температурных нагрузок, включая случай отсутствия между активным корпусом и биологической защитой тепловой защиты и специального охлаждения.

2. При применении лимонитового бетона для внутреннего слоя биологической защиты реакторов с температурой активного корпуса 150—300° С, по-видимому необходима тепловая защита или охлаждение. В отдельных случаях следует осуществлять оба эти мероприятия. Поэтому применение лимонитового бетона во внутренней зоне защиты нежелательно.

3. При частых и резких колебаниях температуры защиты желательно применять тепловую защиту или охлаждение бетона или использовать специальные жароупорные виды бетона во внутренней части биологической защиты.

4. Для верхней бетонной защиты, работающей на изгиб, в каждом отдельном случае необходимо экономическое изучение целесообразности снижения температуры бетона путем установки тепловой защиты или же соответствующего армирования зоны растяжения бетона.

Влияние температуры на состав и защитные свойства бетона. При нагревании бетона содержание в нем химически не связанной и связанной воды уменьшается. Для различных видов цемента и заполнителей, а также для различного возраста бетона это уменьшение неодинаково. Вызываемое этим ухудшение защитных свойств бетона от нейтронного излучения является наряду с понижением прочности бетона главной причиной стремления уменьшить температуру бетона и применять специальную тепловую защиту.

На рис. 4 приведены данные о содержании воды в цементном камне в зависимости от температуры [8], в табл. 1 — данные о потере веса различными бетонами, нагретыми до 100° С за счет испарения воды [11], а в табл. 2—данные, характеризующие зависимость количества химически связанной воды в цементном камне из обычного

песка и портланд-цемента от температуры [12].

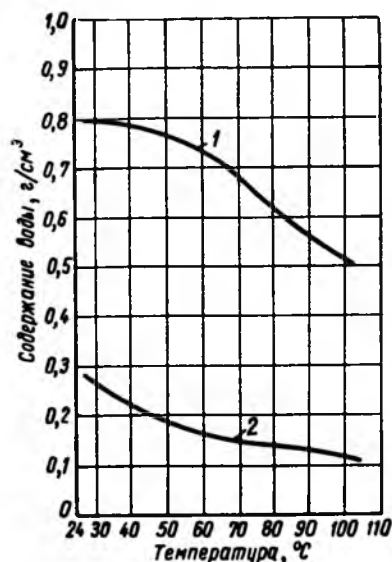


Рис. 4. Содержание воды в цементном камне в зависимости от температуры:

1 — магневооксихлоридный цемент;
2 — портланд-цемент.

Таблица 1

Средняя потеря влаги при нагревании различных марок бетонов до 100°С в течение семи дней

Бетон	Потеря влаги, %
Обычный	5,1
Лимонитовый	12,7
Магнетитовый	6,0
Баритовый	3,4
На чугуном скрапе и песке	2,5
На чугуном скрапе и лимоните	1,7

Таблица 2

Зависимость количества химически связанной воды в цементном камне от температуры

Температура образца, °С	Количество воды, вес. %	Относительное содержание воды, %
50	22,3	100
100	17,8	80
200	12,2	55
300	10,1	45,5
400	8,0	36,3
500	3,0	13,6
600	2,1	5,5

Таблица 3

Поглощение быстрых нейтронов нагретыми бетонными плитами

Температура сушки, °С	Железо-лимонитовый бетон		Магнетито-лимонитовый бетон		Магнетитовый бетон		Обычный бетон	
	γ , г/см ³	λ , см	γ , г/см ³	λ , см	γ , г/см ³	λ , см	γ , г/см ³	λ , см
Начальная	4,23	7,4	3,39	8,9	3,29	8,75	2,35	12,06
100	4,14	7,9	3,33	9,7	3,27	9,52	2,29	12,80
175	4,04	9,0	3,24	10,5	—	—	—	—
200	—	—	—	—	3,25	9,75	—	—
300	—	—	—	—	3,21	10,10	—	—
320	4,05	9,4	3,26	10,5	—	—	—	—

В работах [13, 14] сообщается, что лимонитовые руды могут рассматриваться как водородсодержащий материал до тех пор, пока их температура не превысит $\sim 190-200^\circ\text{C}$.

Табл. 3 содержит данные об исследовании замедления нейтронов в нагретых до различной температуры плитах из бетона разного состава [15]. Из этих данных следует, что длина релаксации нейтронов с повышением температуры бетона увеличивается. Таковы же данные для обычного и магнетитового бетонов [11]. Таким образом, по условиям влагосодержания применение тепловой защиты или охлаждения биологической защиты (или же одновременное проведение этих мероприятий) может быть оправдано только при температуре обычного бетона более $200-250^\circ\text{C}$, а лимонитового бетона более $100-150^\circ\text{C}$ (с некоторым запасом).

Влияние излучения на прочность бетона. Опубликованных данных о систематических исследованиях влияния излучений на механические свойства бетона не имеется. В мировой практике не зафиксированы факты разрушения или повреждения бетона биологической защиты ядерных реакторов или ускорителей под воздействием радиоактивных излучений. Отдельные деформации бетона защиты (волосные трещины) в основном являются следствием обычных усадочных или температурных напряжений.

Опытами на реакторе ВЕРО [15] установлено, что обычный бетон в защите при потоке 10^{11} нейтр/см²·сек без изменения прочности будет работать по крайней мере в течение десяти лет. Опыты также показали [16], что бетон на портланд-цементе может иметь некоторые повреждения в том случае,

если он подвергнется интегральному потоку свыше $3 \cdot 10^{20}$ нейтр/см²·сек (или γ -лучей). (Эти выводы основаны на весьма ограниченном числе экспериментов и не являются окончательными.)

Сравнительные испытания 48 необлученных и облученных в реакторе (при мощности дозы γ -излучения 10^6 р/ч) потоком нейтронов 10^{12} нейтр/см²·сек бетонных образцов с водо-цементным отношением 1 : 3 и размерами $5 \times 5 \times 20$ см показали стойкость бетона к воздействию излучений [8]. Эти и ряд других данных говорят о том, что обычный качественный бетон хорошо противостоит действию облучения. В отдельных случаях отказ от тепловой защиты потребует некоторого утолщения бетонной биологической защиты; это, как правило, дешевле и проще, чем устройство тепловой защиты, и дает существенную экономию металла.

Все изложенное подтверждает недоказанность во многих случаях необходимости тепловой защиты при качественно выполненной биологической бетонной защите. Применение специальной тепловой защиты, возможно, будет оправдано только в высокотемпературных реакторах.

До последнего времени в практике реакторостроения не находил применения жароупорный бетон, хотя в отдельных работах [17] упоминается о возможности и целесообразности его применения.

Учитывая, что точка максимальной температуры в бетоне при отсутствии тепловой защиты находится на расстоянии 0,35—0,40 м от внутренней поверхности, вероятно, можно ограничиться слоем жароупорного бетона толщиной 0,5—0,6 м. За этим слоем температура и ее перепад даже в высокотем-

пературных реакторах, очевидно, не окажут влияния на прочность бетонной защиты (включая зону ее растяжения) и не приведут к существенному снижению содержания влаги. Этот сравнительно тонкий слой жароупорного бетона (даже с добавками обычного красного кирпича тонкого помола или крупного заполнителя из этого кирпича) может надежно выдерживать температуру до 700°C [12].

Некоторое снижение объемного веса жароупорного бетона по сравнению с обычным ($1,7\text{ т/м}^3$ против $2,3\text{ т/м}^3$) в худшем случае вызовет необходимость незначительного утолщения защиты (всего на 13–14 см). Это же утолщение бетонной защиты вполне компенсирует некоторое снижение (сравнительно с обычным) химически связанной воды в слое жароупорного бетона. Безусловно, что утолщение бетонной защиты значительно дешевле применения металлической тепловой защиты.

Камера реактора

При применении усиленных и герметических камер, образуемых бетонной биологической защитой как самого реактора, так и парогенераторов (в энергетических установках), в качестве защитной оболочки боковая и верхняя бетонная биологическая защита должна быть рассчитана на соответствующее избыточное аварийное внутреннее давление (обычно не более 3–3,5 атм). Некоторые затруднения вызывает требование герметизации при наличии в защите проходов дверей и т. д., однако это требование выполнимо.

При строительстве реактора в местности с мягким климатом оболочка может одновременно играть роль здания для всей установки, что, безусловно, экономично. В условиях среднего и северного климата применение защитной камеры, рассчитанной на восприятие внутреннего давления, с одновременным строительством здания реактора обычного типа может оказаться экономичнее, чем сооружение стальной оболочки с тепловой изоляцией.

Примером использования в указанных целях бетонной защиты служит строящийся

в СССР кипящий энергетический реактор с тепловой мощностью 300 Мвт (рис. 5). В нем армированная бетонная биологическая защита используется в качестве противовзрывной защиты. Для большей герметизации защитная камера внутри облицована обычной листовой сталью. Все железобетон-

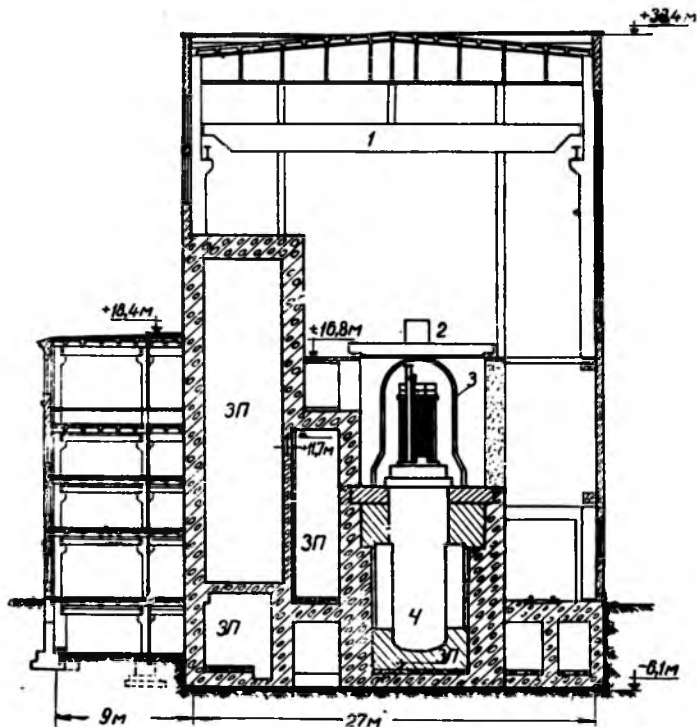


Рис. 5. Вертикальный разрез здания советского кипящего реактора:

1—мостовой кран; 2—перегрузочный мост; 3—колпак реактора; 4—реактор; 3П—помещения, заполняемые радиоактивным паром в случае аварии.

ные конструкции боковой и верхней биологической защиты рассчитаны на избыточное внутреннее давление в 3,5 атм. Непосредственно над реактором устанавливается стальной защитный колпак.

Для увеличения объема, заполняемого в случае аварии радиоактивным паром (в целях уменьшения его давления), все помещения первого контура, смежные с камерой реактора, соединены с ней и между собой мембранными клапанами, которые срабатывают при повышении давления в любом смежном отсеке.

Установлено, что приспособление биологической защиты в качестве аварийной защитной оболочки вызвало необходимость

увеличить армирование бетонных конструкций защиты на 250—300 т, что составляет ~50% от веса арматуры в обычной, неусиленной биологической защите и 25—30% от общего расхода арматуры на все железобетонные конструкции здания, составляющего ~1000 т.

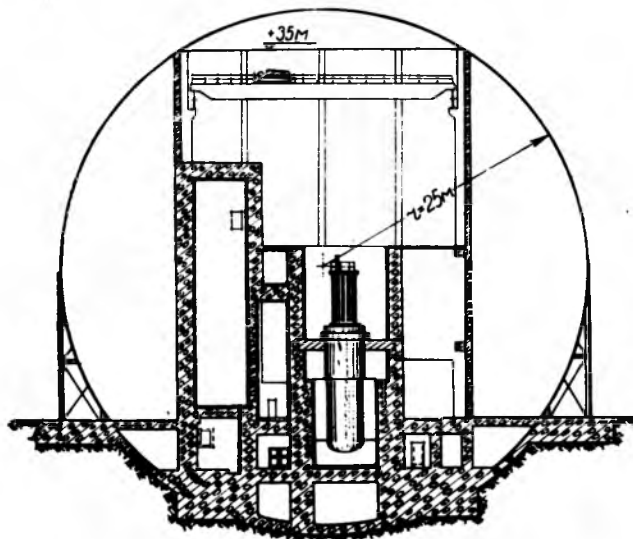


Рис. 6. Вертикальный разрез здания советского кипящего реактора с наружной защитной металлической оболочкой (вариант проекта).

Чтобы выяснить затраты металла на строительные конструкции при использовании стальной защитной оболочки вокруг всей реакторной установки, был разработан эскиз проекта сферической стальной защитной оболочки. Так как пространство, заполняемое радиоактивным паром при аварии больше, чем пространство, заполняемое при применении только защитной бетонной камеры, расчетное давление внутри оболочки было уменьшено до 2 *атм*. Схема этой оболочки диаметром 50 м при толщине стальных листов 35 мм представлена на рис. 6. Вес листового металла, идущего только на оболочку, составил 2150 т.

Сравнивая два варианта, можно видеть, что при использовании конструкции биологической защиты в качестве защитной аварийной камеры можно достигнуть экономии металла на строительные конструкции не менее чем в 2,5 раза. Необходимо также учесть, что вариант со стальной оболочкой требует значительного количества листовой стали (более дефицитной, чем строительная

арматура) и, кроме того, при этом усложняется производство работ по сооружению здания реактора, особенно, если учесть необходимость даже для средней климатической полосы СССР применения значительной тепловой изоляции всей стальной оболочки.

Армирование бетона

Во внешней зоне бетонной биологической защиты, как правило, устанавливается стальная арматура. Расход арматурной стали весьма значителен. Например, в крупных реакторах английской атомной электростанции в Хинкли-Пойнт он достигает нескольких тысяч тонн.

Армирование бетонной защиты делается прежде всего из-за опасности возникновения чрезмерных температурных напряжений, приводящих к образованию волосных трещин и других деформаций бетона.

В последнее время иногда армирование бетона производится на основании расчетов напряжений, действующих в бетоне [7]. Однако эти расчеты не являются достоверными ввиду отсутствия достаточных экспериментальных данных о распределении температур в толще монолитной бетонной защиты.

Часто установка арматуры не обосновывается каким-либо расчетом. В работе [8] сообщается, что если перепад температуры по толщине бетонной защиты не превышает 30—50° С, то нет необходимости в специальном армировании бетона. При температурном перепаде до 90° С количество арматуры необходимо резко увеличивать. В этом случае, по мнению авторов, с целью выбора наиболее экономичного решения должно быть проведено сравнение стоимости дополнительного армирования бетона и устройства специальной тепловой защиты. При перепаде температуры свыше 90° С армирование бетона конструктивно невозможно, поэтому необходимо снизить перепад температуры применением тепловой защиты или охлаждения (или обоих мероприятий одновременно).

В работе [7] рекомендуется руководствоваться следующими положениями при расчете температурных напряжений в бетонной защите реакторов:

1. Чтобы неармированный бетон не подвергался растрескиванию, средняя температура защиты не должна превышать температуру холодной стороны защиты более чем на 11° С.

2. При армировании растянутой зоны бетонной защиты общий перепад температуры (между нагретой и холодной сторонами) может быть увеличен до 67° С. При нелинейном законе распределения температуры по толщине бетона этот перепад не должен превышать 55° С.

3. При многочисленных температурных колебаниях перепад температуры рекомендуется ограничивать 22—28° С.

4. Для заметного увеличения перепада температуры необходимо существенно увеличить армирование. Например, при увеличении перепада температуры с 70 до 100° С армирование необходимо увеличить с 0,2 до 1,6% (чтобы избежать образования волосяных трещин). Поэтому в некоторых случаях более экономично не усиление арматуры, а утолщение внутренней стальной тепловой защиты или усиление искусственного охлаждения бетона.

5. Если бетонную защиту пронизывают трубы с теплоносителем при температуре 150—315° С, то может оказаться невозможным обеспечение достаточного охлаждения защиты. В этом случае бетон обычно заключают в несущую стальную конструкцию.

В СССР расчет бетонных и железобетонных элементов защиты, нагретых до температуры 100° С, производится по «Нормам и техническим условиям проектирования бетонных и железобетонных конструкций». При более высоких температурах расчет производится по «Временным указаниям по проектированию жароупорных железобетонных конструкций». Тем не менее до настоящего

времени не разработаны достаточно точные методы определения температурных напряжений при одностороннем нагреве таких массивных бетонных и железобетонных конструкций, какими являются конструкции биологической защиты толщиной ~2—3 м.

Из всех приведенных данных можно сделать следующие выводы:

1. В связи с ограниченностью сведений о распределении температур по толщине бетонной биологической защиты расчеты температурных напряжений и необходимого процента армирования защиты являются весьма условными. Поэтому необходимы соответствующие эксперименты и разработка методики точного расчета напряжений и армирования бетона.

2. Ряд действующих реакторов, в том числе и высокотемпературных, не имеет армирования бетонной или тепловой защиты. Тем не менее, в бетоне защиты этих реакторов нет деформаций, кроме возникновения в отдельных случаях неопасных волосяных трещин. Поэтому приведенные рекомендации иностранных авторов по ограничению перепадов температуры в бетонной защите при определенных пределах ее армирования сделаны с неоправданно большим запасом и не обоснованы достоверными расчетами.

3. В бетонной биологической защите большинства реакторов с малыми и средними температурами, несомненно, можно исключить незначительное армирование, а армирование внутренней сжатой зоны защиты излишне во всех случаях.

Поступила в Редакцию 4/IV 1959 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. Н. Комаровский. Строительные материалы для защиты от излучений ядерных реакторов и ускорителей. М., Атомиздат, 1958.
2. Description of Reactors G-2—G-3. Доклад № 1134, представленный Францией на Вторую международную конференцию по мирному использованию атомной энергии (Женева, 1958).
3. I. Bellier, M. Tourasse. Nucl. Energy Engng., 13, No. 129, 11 (1959).
4. A. Vaker. Indian Concrete J., 32, No. 12 (1958).
5. И. Р. Стефенсон. Введение в ядерную технику. М., Гостехиздат, 1956.
6. L. Ohlinger. Nucleonics, 5, No. 4 (1949).
7. H. Davis. J. Structural Division, 84, IX, 1958.
8. Б. Прайс, С. Хортон, К. Спинней. Защита от излучений. М., Изд-во иностр. лит., 1959.
9. Атомная энергетика в Англии (сб. переводов), вып. 32. М., Атомиздат, 1958.
10. К. Д. Некрасов. Жароупорный бетон. М., Промстройиздат, 1957.
11. А. Е. Десов. Тяжелые и гидратные бетоны (научное сообщение ЦНИПС). М., Госстройиздат, 1956.
12. Chem. Engng Progr. 51, No. 2, 11 (1955).
13. H. Davis. Nucleonics, 13, No. 6 (1955); H. Davis. Civil Engng, 26, No. 6 (1956).
14. H. Davis, F. Brawne, H. Witter. J. Amer. Concrete Inst., 27, No. 7, 111 (1956).
15. D. Halliday. Heat Release in Concrete Reactor Shield. AERE R/R, No. 1963, May (1956).
16. Т. Роквелл. Защита ядерных реакторов. М., Изд-во иностр. лит., 1958.
17. Николас. Проблемы материалов атомного реактора. Материалы, применяемые в атомной технике. М., Атомиздат, 1957.