

## КОНСТРУКЦИИ ЗАЩИТНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК ЯДЕРНЫХ УСТАНОВОК

Рапина К.А.

Харьковская национальная академия городского хозяйства  
г. Харьков, Украина

**АННОТАЦИЯ:** Розглянуто конструкції захисних залізобетонних оболонок експлуатованих ядерних установок. Встановлено, що в даний час при будівництві АЕС застосовують переважно подвійні залізобетонні оболонки. Визначено найбільш перспективні напрямки для їх вдосконалення.

**АННОТАЦИЯ:** Рассмотрены конструкции защитных железобетонных оболочек эксплуатируемых ядерных установок. Установлено, что в настоящее время при строительстве АЭС применяют преимущественно двойные железобетонные оболочки. Определены наиболее перспективные направления для их совершенствования.

**ABSTRACT:** Construction the concrete containments operating nuclear plants is considered. Currently used in the construction of nuclear power plants mainly double concrete containments is founded. The most promising areas for improvement are identified.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Защитная оболочка, контайнмент, реактор, АЭС.

При строительстве атомных электростанций (АЭС) наиболее конструктивно сложным, материалоемким и трудоемким является реакторное отделение и особенно зона локализации возможных аварий – защитная оболочка и конструкции внутри нее [1].

Защитная оболочка (герметичная оболочка; контайнмент – от англ. containment) — пассивная система безопасности энергетических ядерных реакторов, главной функцией которой является предотвращение выхода радиоактивных веществ в окружающую среду при тяжёлых авариях. Защитная оболочка является наиболее характерным в

архитектурном плане и важнейшим с точки зрения безопасности сооружением АЭС, последним физическим барьером на пути распространения радиоактивных материалов и ионизирующих излучений [2]. Кроме того, оболочка защищает реакторную установку от внешних воздействий.

Практически все энергоблоки, строившиеся последние несколько десятилетий, оснащены защитной оболочкой. Однако ее возведение длится 3-6 лет и в определенной степени сдерживает темпы строительства всей АЭС.

С учетом этого, в настоящее время особо актуальны исследования, направленные на совершенствование конструктивных решений и технологий возведения защитных оболочек с целью уменьшения стоимости и сроков их строительства.

Для определения основных направлений дальнейших исследований рассмотрим конструкции эксплуатируемых защитных железобетонных оболочек и современные тенденции в их развитии.

Компоновочно-конструктивные решения, форма, размеры оболочек зависят от ряда факторов, среди которых можно выделить следующие [1]:

- тип, мощность реактора;
- технологическая схема АЭС;
- способ снижения давления внутри оболочки при авариях;
- требования по безопасности национальных органов и МАГАТЭ.

С учетом данных факторов конструкция оболочек может сильно различаться. Большинство современных контайнментов (около 95 %) — сооружения оболочечного типа различного размера из железобетона или предварительно-напряжённого железобетона, чаще всего цилиндрической формы [2, 3].

При строительстве АЭС наиболее распространено использование водо-водяных реакторов (более 50% от общего количества). При этом используются следующие решения [1]:

- Одинарные железобетонные преднапряженные цилиндрические оболочки с пологим сферическим или эллипсоидным куполом (и карнизной частью), а также с полусферическим куполом. Диаметр при мощности реактора 900...10 000 МВт – 40...45 м, высота 60...70 м, толщина до 2000 мм. Изнутри оболочка в большинстве случаев имеет стальную герметизирующую облицовку.

- Двойные (двухбарьерные) цилиндрические железобетонные оболочки с пологим сферическим и полусферическим куполом (внешняя оболочка) на общей железобетонной плите. Решение и размеры внутренней оболочки аналогичны ординарной. Наружная оболочка рассчитывается на внешние воздействия, выполняется без предваритель-

ного напряжения и имеет толщину 500...800 мм при диаметре до 55 м и высоте до 80 м (мощность реактора 900...1500 МВт). Основное назначение внутренней оболочки – удержать радиоактивные парогазовые и аэрозольные продукты аварии при расчетном давлении (в зависимости от особенностей АЭС до 0,4...0,5 МПа). Ширина воздушного зазора между оболочками 1,5...2,0 м. В зазоре системой вентиляции поддерживается давление ниже атмосферного. Здесь собираются и отводятся на фильтры газовые протечки из внутренней оболочки.

- Двойные оболочки из металла и железобетона. Внешняя – железобетонная цилиндрическая оболочка с полусферическим куполом. Диаметр и высота около 60 м, толщина 1800-2000 мм (мощность реактора 1200-1300 МВт). Внутренняя стальная сферическая – диаметром до 55...60 м при толщине 30-40 мм. Нижняя часть сферы заделана в железобетонные конструкции фундаментной части.

Длительное время вопрос о целесообразности строительства защитных оболочек над реакторными отделениями оставался дискуссионным. Однако несколько аварий в США в 1960-х – 1970-х гг. послужили убедительным доводом в пользу строительства контейнментов [4].

Впервые предварительно-напряженные оболочки стали применять с начала 1970-х годов в США. Palisades (пуск в 1971 г.) – первая АЭС при строительстве которой было реализовано полное предварительное напряжение стен и купола контейнмента (рис. 1). Диаметр одинарной оболочки – 35 м, высота – 58 м (включая купол), толщина в цилиндрической части – 1100 мм (стальная облицовка – 6,4 мм), в сферической – 910 мм.



Рис. 1. Защитная оболочка АЭС Palisades в США (1971 г.)

Затем практика строительства оболочек из предварительно-напряжённого железобетона стала всё шире распространяться в США, Канаде, Японии, Бельгии, Франции, СССР [5].

Первое применение такой оболочки в советском реакторостроении – АЭС Loviisa с реакторами ВВЭР-440 в Финляндии (первый блок пущен в 1977 г.). Затем, начиная с Нововоронежской АЭС (блок 5, пуск в 1980 г.), в СССР строились блоки с ВВЭР-1000, оснащённые одинарными предварительно-напряжёнными оболочками [1].

Защитная оболочка Нововоронежской АЭС (блок 5), проект которой положен в основу серийного (рис. 2), имеет форму цилиндра, сопряженного с пологим куполом и днищем. Под днищем расположен цокольный этаж.

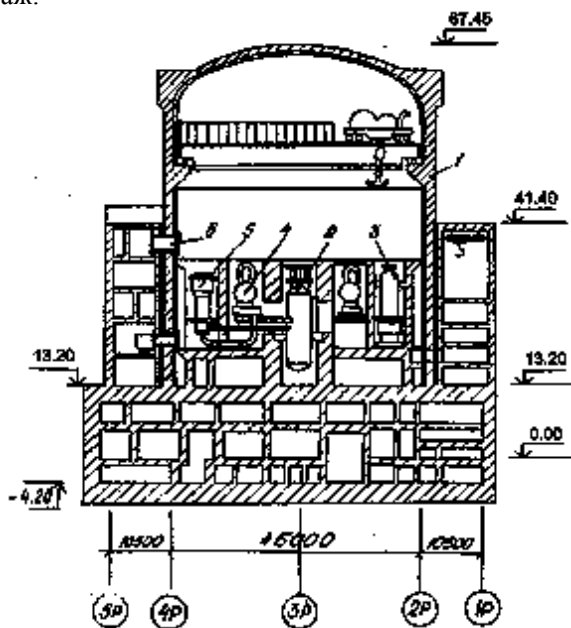


Рис. 2. Реакторное отделение энергоблока АЭС с ВВЭР-1000 (серийный проект):

- 1 – железобетонная преднапряжённая оболочка со стальной облицовкой;
- 2 – реактор; 3 – компенсатор объема; 4 – парогенератор;
- 5 – главный циркулярный насос; 6 – шлюз

Высота оболочки и диаметр ее цилиндрической части равны соответственно 68 и 45 м, толщина стенки цилиндра и купола составляют 1200 мм и 1000 мм. Оболочка выполнена из монолитного бетона, с

внутренней стороны облицована сталью толщиной 6 мм. В месте сопряжения цилиндра с куполом имеется кольцо, в котором с помощью анкерного устройства закрепляется напрягаемая арматура. Купол предварительно напряжен двумя группами арматурных пучков расположенных в плане под углом  $90^{\circ}$  одна к другой. Днище армировано ненапрягаемой арматурой. Цилиндрическая часть оболочки напрягается арматурой, идущей спирально в двух направлениях навстречу одна другой под углом  $35^{\circ}$  к горизонтальной плоскости.

Арматурные пучки цилиндрической части заанкериваются под днищем оболочки и на опорном кольце купола. В цилиндре и куполе устанавливается также значительное количество ненапрягаемой арматуры. Для напряжения оболочки использованы арматурные пучки с контролируемым усилием натяжения 10 000 кН, каналобразователями для пучков служат полиэтиленовые трубы [4, 6].

С конца 1970-х гг. в США, Франции и др. странах начинают применять двойные железобетонные оболочки (рис. 3).

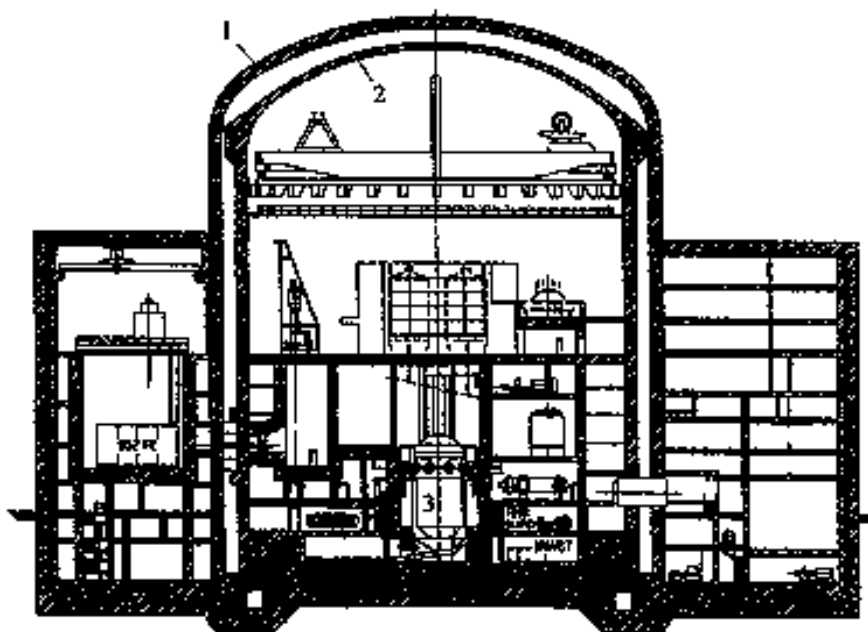


Рис. 3. Реакторное отделение энергоблока с двойной защитной оболочкой:  
1 – внешняя оболочка; 2 – внутренняя оболочка

Вариант строительства для реакторов ВВЭР-1000 двойной оболочки рассматривался в СССР с 1980-х гг. Однако только в 2000-х гг. для нового проекта АЭС-2006 с реакторами ВВЭР-1200 Россией было принято решение использовать двойную оболочку со стальной внутренней облицовкой.

На нескольких АЭС во Франции внутренняя оболочка выполнена без облицовки, объяснялось это следующими причинами [1]:

- преднапряженный бетон внутренней оболочки при тщательном производстве работ по укладке и уплотнению достаточно надежный барьер на пути распространения парогазовой смеси при авариях, конденсация паровой составляющей в порах бетона препятствует выходу радиоактивных газов, что подтверждено экспериментами;

- и при наличии облицовки велики протечки через шлюзы, технологические проходы, сварные соединения облицовки;

- протечки газов из внутренней оболочки собираются и отводятся на фильтры;

- снижается стоимость и трудозатраты на возведение.

Однако при отсутствии облицовки усложняется работы по установке соосных технологических проходов в цилиндрических частях оболочек. Более сложными и трудоемкими становятся работы по возведению купольной части.

Внутренние железобетонные оболочки всех современных АЭС сооружаются с облицовкой.

Двойные оболочки из металла и железобетона характерны для ряда АЭС США и всех АЭС Германии (рис. 4), построенных в конце 1970-х, в 1980-е гг.



Рис. 4. Защитная полусферическая оболочка АЭС Grafenrheinfeld в Германии (1981 г.)

В целом двойные оболочки являются более надежными, чем одинарные, и в настоящее время при строительстве АЭС применяют преимущественно двухбарьерные железобетонные оболочки.

При этом внутренняя оболочка рассчитывается на повышенное давление при аварии, и во избежание раскрытия трещин и утечки газообразных радиоактивных продуктов выполняется преднапрягаемой. Напрягаемые пучки арматурных канатов протягивают внутри металлических или полимерных каналобразователей диаметром до 270 мм, заложенных в бетон. Для цилиндрических с куполом оболочек имеют место геликоидальная и ортогональная схемы расположения каналобразователей-пучков.

Купольная часть обжимается пучками, которые располагаются в двух взаимно-перпендикулярных направлениях. Анкеровка и натяжение осуществляется в карнизе. К недостаткам схемы следует отнести конструктивный узел карниза. Карнизная часть получается материалоемкой и трудоемкой при возведении.

Внешняя железобетонная оболочка предназначена для защиты реакторных установок от внешних опасностей, в том числе взрывной волны и падения самолета (рис. 5).



Рис. 5. Внешние воздействия, учитываемые при проектировании защитной оболочки реакторного отделения [7]

На основании представленных данных, определены основные направления для дальнейших исследований, направленных на совершенствование конструкций защитных железобетонных оболочек

АЭС, а именно: модернизация узлов, систем армирования и предварительного напряжения, а также разработка и создание принципиально новых конструкций контайнментов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пергаменщик Б.К. Возведение специальных защитных конструкций АЭС / Б.К. Пергаменщик, В.И. Теличенко, Р.Р. Темишев; под ред. В.И. Теличенко. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 240 с.
2. Nuclear containments: state-of-art report. – Stuttgart: Fédération internationale du béton, 2001. — P. 1. — 117 p.
3. Nelson R. Manufactured Meltdown / R. Nelson. // Popular Science. – Bonnier Group, 1988. – Т. 232. – № 1. – P. 66–67
4. Коробов Л.А. Железобетонные пространственные конструкции атомных и тепловых электростанций / Л.А. Коробов, О.К. Назарьев, В.Я. Павилайнен. – М.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
5. Демидов А.П. Защитные оболочки реакторных отделений зарубежных АЭС / А.П. Демидов, В.А. Савченко. // Энергетическое строительство за рубежом. – 1989 – № 5. – С. 2-7.
6. Строительство атомных электростанций; под ред. В.Б. Дубровского. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 248 с.
7. Безопасность российских АЭС [электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.rosatom.ru/aboutcorporation/nuclearindustry/npp\\_safety](http://www.rosatom.ru/aboutcorporation/nuclearindustry/npp_safety)

Статья поступила в редакцию 20.02.2013 г.