

УДК 621.039.5 (624.042.7)

КРИТЕРИИ ПРОЧНОСТИ ЗАЩИТНОЙ ОБОЛОЧКИ АС ПРИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Нефёдов С.С., к.т.н. (nefedov@secnrs.ru), Родин П.А. (prodin@secnrs.ru)
(ФБУ «НТЦ ЯРБ»)

Одним из целевых ориентиров безопасности, установленных для АЭС, является годовая вероятность большого аварийного выброса. При сейсмическом воздействии и других внешних воздействиях эта вероятность будет определяться годовой вероятностью реализации рассматриваемого внешнего воздействия того или иного уровня, условной вероятностью аварии с разрывом трубопроводов реакторной установки при реализации воздействия данного уровня и условной вероятностью повреждения защитной оболочки в случае реализации аварии с разрывом трубопроводов реакторной установки. В качестве повреждения защитной оболочки рассматривалось достижение напряжениями в критической точке конструкции величины критерия прочности. С учетом этого было получено значение обеспеченности данного критерия как число стандартных отклонений от математического ожидания прочности для различных уровней внешних воздействий и различных вероятностей разрыва трубопроводов реакторной установки. Получено, что для выполнения целевого ориентира безопасности по большому аварийному выбросу необходимо принимать большие запасы прочности для воздействий с более высокой годовой вероятностью реализации и для более высокой вероятности разрыва трубопроводов реакторной установки. Эта зависимость численно продемонстрирована на примере бетона, используемого для реальных защитных оболочек.

► **Ключевые слова:** АЭС, защитная оболочка, вероятность, прочность, критерии.

STRENGTH CRITERIA FOR NPP CONTAINMENT AT EXTERNAL LOADS

Nefedov S., Ph.D., Rodin P. (SEC NRS)

One of the probabilistic safety targets established for NPP by Regulatory body is the annual probability of big radioactive release. At seismic and other external loadings this probability depends on annual probability of seismic loads of different levels, on conditional probability of rupture of piping of reactor facility in the case of realization of seismic load of some level and of conditional probability of damage of containment in the case of rupture of reactor facility piping. Achievement the strength criterion by stress in critical point of containment is considered as a damage of containment. Considering this fact, probabilistic evaluations of this criterion was defined in the terms of numbers of standard deviations from mathematical expectation of strength for different levels of external load and different probabilities of rupture of reactor facility piping. As a result was obtained that to correspond with safety target it is necessary to use for the same material as bigger strength margin, the bigger is annual probability of considered level of external action and the bigger is the probability of rupture of reactor facility piping. This function was numerically demonstrated for concrete used for real containment of reactor.

► **Key words:** NPP, containment, probability, strength, criteria.

Основной функцией защитной оболочки АЭС (рис.1) является удержание в своем объеме радиоактивных продуктов в случае аварии с нарушением целостности сосудов и трубопроводов реакторной установки. В условиях аварии защитная оболочка оказывается под воздействием повышенной температуры и интенсивного внутреннего давления радиоактивной паровоздушной смеси. При этих воздействиях защитная оболочка должна с требуемой надежностью предотвращать выброс радиоактивных продуктов в окружающую среду.

Требования по надежности защитной оболочки определяются целевыми ориентирами безопасности АС, которые установлены нормативным документом [1]. Эти целевые ориентиры сформулированы в терминах годовых вероятностей наступления тех или иных неблагоприятных событий. Один из этих ориентиров регламентирует годовую вероятность большого аварийного выброса радиоактивных веществ:

$$p_a < [p_a] = 10^{-7}/\text{год}. \quad (1)$$

Исходным событием большого аварийного выброса может быть сейсмическое воздействие, а также другие внешние воздействия природного и техногенного происхождения, учет которых пред-

усмотрен нормативным документом [2]. Критерии прочности защитной оболочки при внешних воздействиях должны назначаться таким образом, чтобы обеспечивалось выполнение целевого ориентира (1).

Вероятность большого аварийного выброса при внешних воздействиях может быть записана как произведение вероятностей наступления 4-х независимых событий:

$$p_a = p_l \cdot p_r^l \cdot p_a^r \cdot p_a^d, \quad (2)$$

где p_l – годовая вероятность реализации рассматриваемого внешнего воздействия уровня l ;

p_r^l – условная вероятность аварии с нарушением целостности сосудов и трубопроводов реакторной установки при реализации воздействия уровня l ;

p_a^r – условная вероятность повреждения защитной оболочки в случае реализации аварии с нарушением целостности сосудов и трубопроводов реакторной установки;

p_a^d – условная вероятность реализации большого аварийного выброса в случае повреждения защитной оболочки.

Величина p_a^d зависит от состояния окружающей атмосферы и ряда других факторов, трудно

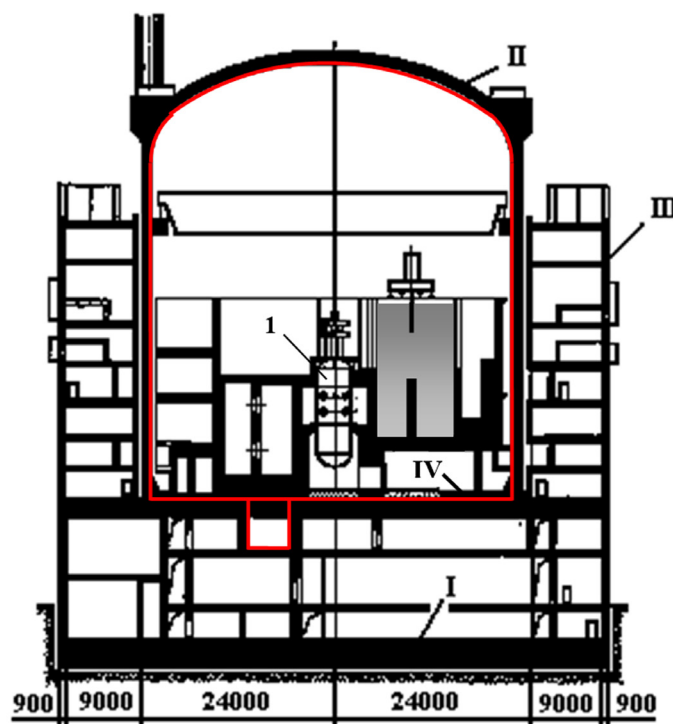


Рис.1. Компонка здания реакторного отделения:

I – фундаментная плита; II – защитная оболочка; III – обстройка;
IV – опорная плита; 1 – реактор

поддающихся учету. В связи с этим в настоящей работе консервативно принято:

$$p_a^d = 1. \quad (3)$$

Из условия $p_a < [p_a]$ с учетом (3) можно получить условие надежности защитной оболочки в форме требования по вероятности ее повреждения в случае аварии с нарушением целостности сосудов и трубопроводов реакторной установки при внешнем воздействии:

$$p_d^r < \frac{[p_a]}{p_l \cdot p_r^l} = \frac{10^{-7}}{p_l \cdot p_r^l}. \quad (4)$$

В настоящей работе задача о требуемой надежности защитной оболочки решается при различных значениях вероятности аварии p_r^l : 1; 0,1; 0,01.

Пусть $p_r^l = 1$ – случай реакторной установки, не обладающей сейсмостойкостью и стойкостью к другим внешним воздействиям.

Рассмотрим воздействие на такую реакторную установку максимального расчетного землетрясения (МРЗ). В соответствии с нормами [3] в качестве расчетной сейсмической нагрузки МРЗ принимается нагрузка 50 % вероятности повторяемостью 1 раз в 10000 лет. Годовая вероятность реализации этой нагрузки:

$$p_l = 0,5 \cdot 10^{-41} / \text{год}. \quad (5)$$

Тогда условие (4) примет вид:

$$p_d^r < 2 \cdot 10^{-3}. \quad (6)$$

Таким образом, предельно допустимая вероятность повреждения защитной оболочки при МРЗ $[p_d^r] = 2 \cdot 10^{-3}$.

В качестве повреждения защитной оболочки в данной работе рассматриваются случаи, когда напряжения в конструкционных материалах превышают предельно допустимые для МРЗ значения критерия прочности R_{MP3} :

$$p_d^r = p(\sigma_l > R_{MP3}) < 2 \cdot 10^{-3}, \quad (7)$$

где σ_l – напряжения в расчетных точках защитной оболочки при воздействии сейсмической нагрузки уровня МРЗ.

Прочностные характеристики конструкционных материалов $[\sigma]$ (предел прочности бетона, предел текучести арматуры и металлоконструкций)

являются случайными величинами, каждому значению которых соответствует определенная обеспеченность ϵ и количество n стандартных отклонений s на кривой распределения случайной величины $[\sigma]$. Требуемая обеспеченность критерия R_{MP3} определяется выражением:

$$\epsilon_{MP3} = 2 \cdot 10^{-3}. \quad (8)$$

Этому значению обеспеченности соответствует $n_{MP3} = 2,9$.

Примем, что прочностные характеристики конструкционных материалов распределены по нормальному закону (рис. 2). Тогда величина n_{MP3} определит положение критерия R_{MP3} на оси абсцисс. На кривой рис. 2 могут быть также отмечены точки, соответствующие нормативному и расчетному сопротивлениям по СНиП, R_n и R_d , для которых ϵ равны соответственно 0,950 и 0,999, а n , соответственно, 1,64 и 3,0. Из рис. 2 видно, что R_{MP3} практически совпадает с расчетным сопротивлением R_d и лежит несколько правее него. Это означает, что при расчетах защитной оболочки на воздействие МРЗ для достижения целевого ориентира безопасности (1) могут быть использованы критерии прочности, назначенные в строительных нормах и правилах.

По данной методике могут быть определены численные значения критериев прочности при расчете на МРЗ для конкретных строительных материалов.

В качестве примера может быть взят бетон класса В50, используемый для защитных оболочек в современных проектах АС. Для этого бетона в соответствии с [4] $R_n = 36$ МПа, $R_d = 27,5$ МПа.

Величина стандартного отклонения прочности (временного сопротивления) для этого бетона:

$$s = \frac{R_n - R_d}{3,0 - 1,64} = 6,25 \text{ МПа}. \quad (8)$$

Величина R_{MP3} может быть определена по значению R_d с учетом расстояния между ними, составляющего 0,1s:

$$R_{MP3} = R_d + 0,1s = 28,1 \text{ МПа}. \quad (9)$$

Соотношение между R_{MP3} и R_d можно охарактеризовать с помощью коэффициента приведения расчетного сопротивления k_R , который составляет:

$$k_R^{MP3} = \frac{R_{MP3}}{R_d} = 1,02. \quad (10)$$

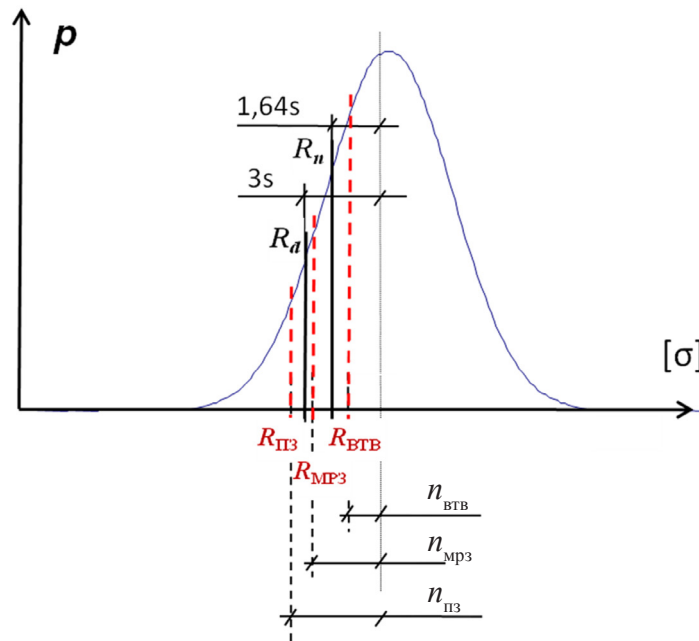


Рис. 2. Нормальное распределение характеристик прочности конструкционных материалов защитной оболочки

Рассмотрим теперь воздействие проектного землетрясения (ПЗ). В соответствии с нормами [3] в качестве расчетной сейсмической нагрузки ПЗ принимается нагрузка 50 % вероятности повторяемостью 1 раз в 1000 лет. Годовая вероятность реализации этой нагрузки составляет:

$$p_l = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{1/год.} \quad (11)$$

Повторяя выше приведенный анализ, получим, что требуемая для ПЗ обеспеченность критерия прочности $R_{ПЗ}$ следующая: $\epsilon_{ПЗ} = 2 \cdot 10^{-4}$. Этому значению обеспеченности соответствует $n_{ПЗ} = 3,54$. Таким образом, $R_{ПЗ}$ на горизонтальной оси рис. 2 расположится значительно левее не только $R_{МРЗ}$, но и общестроительного критерия прочности R_d . Это означает, что при расчете на ПЗ необходимо принимать более консервативные критерии прочности, чем при расчете на МРЗ, что объясняется большей вероятностью реализации ПЗ на площадке АЭС. При этом в расчете на ПЗ для защитной оболочки должны приниматься критерии прочности, более жесткие, чем критерии строительных норм и правил.

Для бетона класса В50 с учетом (9) величина $R_{ПЗ}$ может быть получена как:

$$R_{ПЗ} = R_d - s(n_{ПЗ} - 3) = 24,1 \text{ МПа.} \quad (12)$$

Коэффициент приведения расчетного сопротивления составит:

$$k_R^{ПЗ} = \frac{R_{ПЗ}}{R_d} = 0,877. \quad (13)$$

Аналогичный подход может быть применен для назначения критериев прочности защитной оболочки при внешних техногенных воздействиях. К их числу относятся: воздушная ударная волна, возникающая при аварийных взрывах на площадке АЭС или в ее окрестностях, падение летательного аппарата и другие воздействия, приведенные в [2].

В соответствии с нормами [2] в качестве расчетного уровня техногенных воздействий принимаются воздействия повторяемостью 1 раз в 10^6 лет ($p_l = 10^{-6}$ 1/год). Для такой повторяемости допустимая вероятность повреждения защитной оболочки в соответствии с (5) составит $[p_d^*] = 10^{-1} = 0,1$. Этой вероятности соответствует количество стандартных отклонений по горизонтальной оси рис. 2 $n_{ВТВ} = 1,28$.

Для бетона В50 критерий прочности при внешних техногенных воздействиях $R_{ВТВ}$ может быть определен с учетом (9) из выражения:

$$R_{ВТВ} = R_d - s(n_{ВТВ} - 3) = 38,3 \text{ МПа.} \quad (14)$$

Коэффициент приведения расчетного сопротивления для этого критерия составит:

$$k_R^{ВТВ} = \frac{R_{ВТВ}}{R_d} = 1,39. \quad (15)$$

Таким образом, малые вероятности реализации расчетных уровней техногенных воздействий, которые установлены нормами [4], позволяют с учетом целевых ориентиров безопасности АЭС принять при расчете защитной оболочки существенно более

высокие (менее консервативные) значения критериев прочности, чем принято в строительных нормах и правилах.

Коэффициенты приведения расчетного сопротивления k_R конструкционных материалов защитной оболочки, которые позволяют обеспечить соответствие целевому ориентиру безопасности (1) при внешних воздействиях различной вероятности реализации, представлены на рис. 3 (кривая 1) для значения вероятности аварии $p_r^l=1$.

В таблице в качестве примера представлены значения критерия прочности (приведенного сопротивления) для бетона класса В50, которые надо использовать для достижения целевого ориентира безопасности (1) при вероятности аварии $p_r^l=1$.

Из рис. 3 следует, что коэффициенты k_R увеличиваются с уменьшением вероятности реализации нагрузки. Для воздействий с годовой вероятностью реализации $p_l=0,5 \cdot 10^{-4}$ (МРЗ) и менее значения k_R больше единицы. Это означает, что при рас-

чете защитной оболочки на воздействия со столь малой годовой вероятностью реализации общестроительные критерии прочности R_d оказываются более жесткими, чем критерии прочности, полученные на основе целевого ориентира безопасности (1). Критерии прочности R_d для основных конструкционных материалов защитной оболочки (бетона, арматурной стали) установлены в сводах правил, которые в соответствии с постановлением Правительства РФ от 26.12.2014 № 1521 (ред. от 07.12.2016) [5] являются обязательными для применения в строительстве. В соответствии с этим общестроительный критерий прочности R_d должен применяться в расчетах прочности защитной оболочки на воздействия с вероятностью реализации $0,5 \cdot 10^{-4}$ и менее (МРЗ, ВТВ). В расчетах прочности защитной оболочки на воздействия с вероятностью реализации более $0,5 \cdot 10^{-4}$ (ПЗ) должны применяться критерии прочности, полученные на основе целевого ориентира безопасности (1).

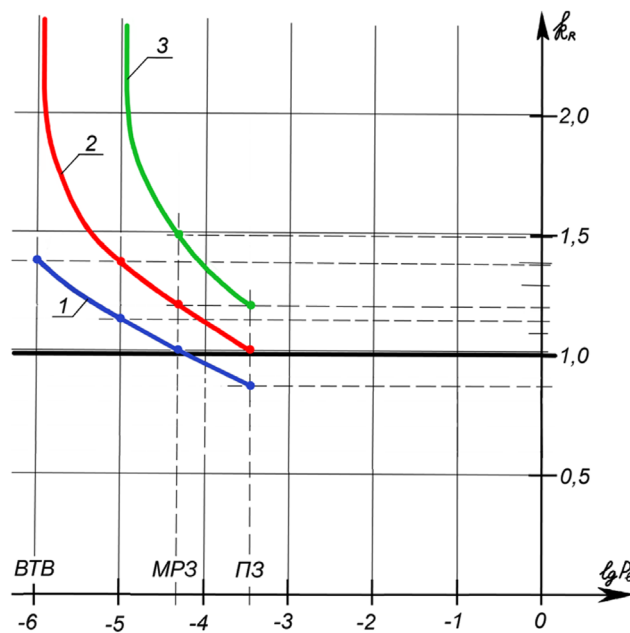


Рис. 3. Графики коэффициента приведения расчетного сопротивления:
1 – при $p_r^l=1$; 2 – при $p_r^l=0,1$; 3 – при $p_r^l=0,01$

Таблица

Приведенное сопротивление бетона В50 для различных воздействий

Вид воздействия	Годовая вероятность реализации p_l	Коэффициент приведения k_R	Приведенное сопротивление для бетона В50, МПа
ПЗ	$0,5 \cdot 10^{-3}$	0,877	24,1
МРЗ	$0,5 \cdot 10^{-4}$	1,02	28,1
	10^{-5}	1,15	31,7
ВТВ	10^{-6}	1,39	38,3

Также могут быть построены зависимости критериев прочности защитной оболочки от вероятности реализации нагрузки для других значений вероятности аварии p_r^l .

Кривая 2 на рис. 3 показывает зависимость критериев прочности защитной оболочки от вероятности реализации нагрузки для $p_r^l=0,1$. Аналогично кривой 1 с уменьшением вероятности реализации воздействия допустимые значения критериев прочности возрастают, что определяется уменьшением запасов прочности, необходимых для удовлетворения целевого ориентира безопасности (1).

При годовой вероятности реализации воздействия, приближающейся к 10^{-6} , кривая 2 стремится к бесконечности. Смысл этого результата состоит в том, что в соответствии с (5) при $p_r^l=0,1$ целевой ориентир безопасности (1) выполняется для малых вероятностей реализации воздействия за счет надежности самой реакторной установки. При этом в соответствии с (2) допустимая условная вероятность повреждения защитной оболочки $p_a^r \rightarrow 1$, т.е. целевой ориентир (1), выполняется независимо от надежности защитной оболочки.

Значения ординат кривой 2 при всех рассмотренных внешних воздействиях больше единицы. Это означает, что при ПЗ и более редких внешних воздействиях на реакторные установки, для которых $p_r^l=0,1$, определяющими для защитной оболочки будут критерии прочности, установленные в строительных нормах и правилах. При внешних воздействиях с вероятностью реализации, большей, чем для ПЗ, определяющими будут критерии прочности, полученные на основе целевого ориентира (1).

Кривая 3 на рис. 3 показывает зависимость критериев прочности защитной оболочки от вероятности реализации нагрузки для $p_r^l=0,01$. Аналогично кривой 1 с уменьшением вероятности реализации воздействия допустимые значения критериев прочности возрастают, что определяется уменьшением запасов прочности, необходимых для удовлетворения целевого ориентира безопасности (1). Данная кривая стремится к бесконечности уже при годовой вероятности реализации воздействия, приближаю-

щейся к 10^{-5} . Это означает, что при таких вероятностях реализации воздействия при $p_r^l=0,1$ целевой ориентир безопасности (1) выполняется за счет надежности самой реакторной установки, независимо от надежности защитной оболочки.

Значения ординат кривой 3 при всех рассмотренных внешних воздействиях значительно больше единицы. Это означает, что даже при расчетах на внешние воздействия, имеющие большую годовую вероятность реализации, чем ПЗ, для защитных оболочек реакторных установок, для которых $p_r^l \geq 0,01$, определяющими, как правило, будут критерии прочности, установленные в строительных нормах и правилах.

По результатам работы можно сделать следующие выводы.

1. Критерии прочности защитной оболочки АС при внешних воздействиях, которые необходимо принимать для обеспечения соответствия целевому ориентиру безопасности по годовой вероятности большого аварийного выброса, зависят от годовой вероятности рассматриваемого воздействия и от вероятности отказа реакторной установки (аварии с нарушением целостности сосудов и трубопроводов) при этом воздействии. Критерии прочности защитной оболочки при внешних воздействиях должны приниматься с тем большими запасами, чем выше годовая вероятность реализации воздействия и чем больше вероятность отказа реакторной установки при этом воздействии.

2. Предложена процедура назначения критериев прочности (приведенных сопротивлений) и рассчитаны их численные значения для бетона при различных внешних воздействиях, предусмотренных НП-064-05 [2].

3. Показано, что при малых вероятностях реализации внешних воздействий и малых вероятностях отказа реакторной установки критерии прочности защитной оболочки, принятые на основе целевого ориентира безопасности по годовой вероятности большого аварийного выброса, оказываются менее консервативными, чем общестроительные критерии прочности. В этих случаях последние должны приниматься для расчета защитной оболочки при внешних воздействиях.

Список литературы

1. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. НП-001-15: утверждены приказом Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 17 декабря 2015 г. № 522.
2. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. НП-064-05: утверждены постановлением Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 20 декабря 2005 г. № 16.
3. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Нормы проектирования сейсмостойких атомных станций. НП-031-01: утверждены постановлением Госатомнадзора России от 19.10.2001 г. № 9.
4. СП 63.13330.2012. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.
5. Постановление Правительства РФ от 26.12.2014 № 1521 (ред. от 07.12.2016) «Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

References

1. Federal safety regulations in the field of the use of atomic energy. General safety provisions for nuclear power plants. NP-001-15, endorsed by the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service order № 522 of December 17, 2015.
2. Federal safety regulations in the field of the use of atomic energy. Consideration of natural and human-induced external impacts on nuclear facilities. NP-064-05, endorsed by the Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service order № 16 of December 20, 2005.
3. Federal safety regulations in the field of the use of atomic energy. Seismic design standards for nuclear power plants. NP-031-01, endorsed by Gosatomnadzor of Russia order № 9 of 19.10.2001.
4. SP 63.13330.2012. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. SNiP 52-01-2003, Revised.
5. RF Government resolution № 1521 of December 26, 2014 (edited from 07.12.2016) “Endorsement of the list of national standards and codes (parts of such standards and codes), mandatory application of which ensures compliance with the requirements of the Federal Law on the Technical Regulation on Safety of Buildings and Facilities”.

