



ОПТИМИЗАЦИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОБОЛОЧЕК OPTIMIZATION OF REINFORCED CONCRETE SHELLS

DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-6-651-663
УДК 624.04+624.15+621.039.58+699.841

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ / RESEARCH ARTICLE

Оптимизации проектных решений защитных конструкций сооружений атомных станций

А.Е. Саргсян

АО «Атомэнергопроект», Москва, Российская Федерация
✉ akop_sargsyan@mail.ru

История статьи

Поступила в редакцию: 23 сентября 2021 г.
Доработана: 18 ноября 2021 г.
Принята к публикации: 21 ноября 2021 г.

Для цитирования

Саргсян А.Е. Оптимизации проектных решений защитных конструкций сооружений атомных станций // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 6. С. 651–663. <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-6-651-663>

Аннотация. Изложены концепции для оптимизации конструктивных решений защитных конструкций атомных станций. Задача таких оптимизаций для обеспечения ядерной и радиационной безопасности АС в различных режимах эксплуатации, в том числе и при экстремальных воздействиях, является актуальной в настоящее время. Представлены современные отечественные и международные достижения по рассматриваемой тематике, а также современные требования, методы по расчету и проектированию сооружений атомных станций, позволяющие обеспечить их безопасную эксплуатацию при соударении с летящими предметами. Полученные результаты подтверждают широкие возможности совершенствования конструктивных решений защитных оболочек реакторных отделений атомных станций при реализации инновационных материалов, позволяющих существенно экономить материальные ресурсы при одновременном повышении надежности и безопасности эксплуатации сооружений АС.

Ключевые слова: защитные конструкции, атомные станции, реакторное отделение, экстремальные воздействия, локальные ударные нагрузки, высокопрочный порошокбетон, сталефибробетон, прочность конструктивных элементов, безопасность

Optimization of design solutions of protective structures of erections of nuclear power stations

Akop E. Sargsyan

JSC "Atomenergoproekt," Moscow, Russian Federation
✉ akop_sargsyan@mail.ru

Article history

Received: September 23, 2021
Revised: November 18, 2021
Accepted: November 21, 2021

Abstract. The ideas of optimization of constructive solutions of protective erections of nuclear power stations are presented. A problem of such optimization for the securing of nuclear and radiation safety for different regime of nuclear power stations exploitation, including extreme action, is very topical at present time.

Саргсян Акоп Егишевич, доктор технических наук, профессор, академик МАИ при ООН, главный технический эксперт, АО «Атомэнергопроект», Российская Федерация, 105005, Москва, ул. Бакунинская, д. 7, стр. 1; ORCID: 0000-0002-4158-452X, eLIBRARY AuthorID: 731808; akop_sargsyan@mail.ru
Akop E. Sargsyan, Doctor of Technical Sciences, Professor, Academician of the International Academy of Informatization of the United Nations, chief technical expert, JSC "Atomenergoproekt", 7 Bakuninskaya St, bldg 1, Moscow, 105005, Russian Federation; ORCID: 0000-0002-4158-452X, eLIBRARY AuthorID: 731808; akop_sargsyan@mail.ru

© Саргсян А.Е., 2021



This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

For citation

Sargsyan A.E. Optimization of design solutions of protective structures of erections of nuclear power stations. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. 2021;17(6):651–663. (In Russ.) <http://doi.org/10.22363/1815-5235-2021-17-6-651-663>

Modern home and international achievements on the considered subjects are demonstrated and modern demands, analysis methods, and problems of design of erections of nuclear power stations that give an opportunity to assure their safety exploitation under collision of flying objects are given as well. The results confirm wide opportunities of improvement of the constructive solutions of protective shells of reactor sections of nuclear power stations with the application of innovative materials that give the prospects to economize the material resources considerably and to raise the reliability and safety of exploitation of erections of nuclear power stations simultaneously.

Keywords: protective structures, nuclear power station, reactor section, extreme actions, local impact load, powder concrete of high-strength, steel-fiber concrete, strength of constructive element, safety

Введение

Объекты ядерной энергетики и прежде всего атомные станции (АС) относятся к наиболее сложным и потенциально опасным инженерным сооружениям. Поэтому задача по разработке оптимизированных проектных решений для обеспечения их ядерной и радиационной безопасности, в том числе при экстремальных воздействиях, является чрезвычайно актуальной.

Особое место среди сооружений, подверженных воздействию интенсивных динамических нагрузок: от осколков технологического оборудования, при аварийных режимах; воздействий предметов, образующихся при природных явлениях, таких как ураган, смерч и т. д.; случайного удара падающих предметов, в частности летательных аппаратов и их частей, занимают сооружения энергетического назначения, к которым предъявляются особенно высокие требования в отношении надежности и безопасности при аварийных режимах и стихийных бедствиях.

Системно изложены современные отечественные и международные достижения по рассматриваемой тематике, а также современные требования, методы по расчету и проектированию сооружений атомных станций, позволяющие обеспечить их безопасную эксплуатацию при соударении с летящими предметами.

В общем объеме задач современного строительства важное место отводится разработке методов расчета сооружений при динамических воздействиях.

В соответствии с рекомендациями международного агентства по атомной энергетике (МАГАТЭ)¹ установлены жесткие требования относительно вероятности тяжелого повреждения активной зоны ядерного реактора, которая не должна превышать 1×10^{-5} на реактор в год. Вероятность выхода радиоактивных веществ за пределы герметичной оболочки не должна превышать 1×10^{-7} 1/год. Радиационное воздействие АС на население и окружающую среду не должно превышать 1 % дозы, получаемой от источников естественной радиации.

Воздействия от падения самолета определяются из числа возможных наиболее неблагоприятных событий редкой повторяемости 1×10^{-7} 1/год².

Расчетные параметры экстремальных нагрузок и воздействий природного происхождения, то есть температура, снег, ураган, смерч определяются повторяемостью один раз за 10 000 лет³.

Оценка локальной прочности наружной железобетонной защитной оболочки из бетона различных типов при падении самолета

В настоящее время в реакторных отделениях атомных станций реализуются двойные защитные оболочки. При этом функционально определяющим воздействием для установления технических параметров наружной защитной оболочки современных сооружений атомных станций являются нагрузки от падающего самолета.

¹ Руководство по безопасности № 50-SG-D5 (Rev. 1). Учет внешних событий, вызванных деятельностью человека, при проектировании атомных электростанций. Вена: МАГАТЭ, 1997; Руководство по безопасности № 50-SG-S11B. Учет тропических циклонов в основах проекта атомных электростанций. Вена: МАГАТЭ, 1986; Руководство по безопасности № 50-SG-S11A. Учет экстремальных метеорологических явлений при выборе площадок АЭС (без учета тропических циклонов). Вена: МАГАТЭ, 1983.

² ПИН АЭ-5.6. Нормы строительного проектирования АС с реакторами различного типа. М., 1999.

³ НП-064-05. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2006; ПНАЭ Г-10-007-89. Нормы проектирования железобетонных конструкций, локализирующих систем безопасности атомных станций. М., 1991.

По экспериментально обоснованной методике [1] выполняется оценка прочности купола защитной оболочки, изготовленной из бетона марки В30, высокопрочного порошкового бетона и сталефибробетона, при падении военного самолета типа «Фантом», рекомендованного МАГАТЭ⁴.

Площадь приложения нагрузки при наружной поверхности оболочки равна 14 м².

Максимальное значение силы соударения равно $P_{\max} = 11 \times 10^4$ кН.

Расчетные прочностные характеристики высокопрочного порошкового бетона и сталефибробетона, полученные по результатам испытаний [1], обобщены в табл. 1.

Таблица 1

Расчетные характеристики различных типов бетона

Расчетные показатели	Материал		
	Бетон обычный марки В30	Высокопрочный порошковый бетон	Сталефибробетон
Кубиковая прочность, МПа	–	139,0	157,4
Призменная прочность на сжатие, МПа	17,0	130,6	149,7
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	1,15	11,97	20,80
Прочность на осевое растяжение, МПа	–	4,97	7,00
Начальный модуль деформации при сжатии, МПа	32 500	44 700	45 700
Среднее значение предельной деформации при сжатии	200×10^{-5}	327×10^{-5}	384×10^{-5}

Table 1

Design characteristics of various types of concrete

Design values	Material		
	Standard concrete of grade В30	High-strength powder concrete	Steel fibre reinforced concrete
Cube strength, MPa	–	139.0	157.4
Prism strength, MPa	17.0	130.6	149.7
Tensile strength in bending, MPa	1.15	11.97	20.80
Axial tension strength, MPa	–	4.97	7.00
Initial modulus of deformation, MPa	32 500	44 700	45 700
Average value of ultimate compression strain	200×10^{-5}	327×10^{-5}	384×10^{-5}

Оценка прочности защитной оболочки из обычного бетона

Исходные данные:

– начальный модуль деформации бетона марки В30 $E_b = 32\,500$ МПа;

– расчетные сопротивления бетона марки В30: $R_b = 17$ МПа; $R_{bt} = 1,15$ МПа;

– модуль упругости арматуры $E_s = 2 \times 10^5$ МПа;

– $n = \frac{E_s}{E_b} = 6,15$;

– расчетные значения сопротивления арматуры класса А500: $R_s = 435$ МПа; $R_{sw} = 300$ МПа; $R_{sc} = 400$ МПа;

– радиус кривизны оболочки $R = 26$ м;

– толщина оболочки: $h = 0,6$ м;

⁴ НП-064-05. Учет внешних воздействий природного и техногенного происхождения на объекты использования атомной энергии. М.: Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, 2005.

– толщина защитного слоя $a = a' = 0,05$ м;

– коэффициент армирования $\mu_s = \mu_{s'} = \frac{5 \pi d_s^2}{4A} = 5,6 \times 10^{-3}$;

– площадь поперечного сечения конструкции единичной ширины $A = bh_0 = 1 \text{ м} \times 0,55 \text{ м} = 0,55 \text{ м}^2$;

– номинальный диаметр стержней продольной и поперечной арматуры соответственно: $d_s = 28$ мм;

$d_{sw} = 25$ мм;

– $u_{x1} = 0,4$ м и $u_{x2} = 0,4$ м – шаг хомутов по меридиональным и по кольцевым направлениям;

– $R_{sw} = 300$ МПа – расчетное сопротивление поперечной арматуры; d_x – диаметр сечения поперечной арматуры;

– $A_{sw} = \pi d_{sw}^2 / 4 = 490 \text{ мм}^2$ – площадь сечения поперечной арматуры.

Далее последовательно определим:

$$\sigma^{(1)} = \frac{0,1\sigma_3 + \sigma_3}{2} = -1,1R_b = -18,7 \text{ МПа};$$

$$\tau^{(1)} = \frac{0,1\sigma_3 - \sigma_3}{2} = 0,9R_b = 15,3 \text{ МПа};$$

$$\tau_b^{(2)} = \tau = \sqrt{R_b R_{bt}} = 4,42 \text{ МПа};$$

$$\sigma_c^{(2)} = R_{bt} = 1,15 \text{ МПа}; \quad \tau_c^{(2)} = 0; \quad \sigma_c^{(2)} = 0,8625 \text{ МПа}; \quad \tau^{(2)} = 3,315 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{s'} = nR_b = 104,55 \text{ МПа};$$

$$A_s = A_{s'} = 5 \frac{\pi d_s^2}{4} = 0,00308 \text{ м}^2;$$

$$M = \frac{1}{2} R_b b h_0 \left(h_0 - \frac{1}{3} \bar{x}_0 \right) + n R_b (h - a') A_{s'} = \frac{1}{2} \times 17\,000 \times 1 \times 0,55 \left(0,55 - \frac{0,149}{3} \right) + 6,15 \times 17\,000 \times 0,55 \times 0,00308 = 2516 \text{ кН} \times \text{м};$$

$$L_1 = \frac{M}{0,8 R_b b h_0^2} - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} = \frac{2516}{0,8 \times 17\,000 \times 1 \times 0,55^2} - \frac{104\,550}{17\,000} \times 0,00513 = 0,58;$$

$$\sigma_{\phi\phi} = \frac{P_{1\max}}{8h_0} \sqrt{3(1-\nu^2)} = \frac{11 \times 10^4}{8 \times 0,55} \sqrt{3(1-0,3^2)} = 41\,307 \text{ кПа};$$

$$\begin{aligned} \frac{\bar{x}_0}{h_0} = & - \left(n\mu_s - \frac{\sigma_{\phi\phi}}{R_b} \mu_s \right) + \sqrt{\left(n\mu_s - \frac{\sigma_{\phi\phi}}{R_b} \mu_s \right)^2 + 2n\mu_s} = - \left(6,15 \times 0,00513 - \frac{41\,307}{17\,000} \times 0,00513 \right) + \\ & + \sqrt{\left(6,15 \times 0,00513 - \frac{41\,307}{17\,000} \times 0,00513 \right)^2 + 2 \times 6,15 \times 0,00513} = 0,271; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\frac{x_0}{h_0} = \frac{0,5n\mu_s + L_1^2 - \left(\frac{\sigma_{\text{фф}}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} \right)}{0,5n\mu_a + L_1 - \left(\frac{\sigma_{\text{фф}}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} \right)} = \frac{0,01722 + 0,3364 + 0,02083}{0,01722 + 0,58 + 0,02083} = 0,606;$$

$$\frac{x}{h_0} = 2L_1 - \frac{x_0}{h_0} = 1,16 - 0,606 = 0,554; \quad (2)$$

$$\frac{x_1}{h_0} = \frac{0,9\mu_s R_s - n\mu_{s'} R_b - \frac{3}{4} \frac{x}{h_0} (\sqrt{R_b R_{bt}} \operatorname{tg} \alpha_2 - R_{bt})}{1,1R_b - \frac{3}{4} (\sqrt{R_b R_{bt}} \operatorname{tg} \alpha_2 - R_{bt})} = \frac{2192,4 - 585,48 - 2704,2}{18700 - 4881,23} = -0,0794 < 0 = 0.$$

Установим несущую способность защитной оболочки:

$$\Theta_0 = \arcsin \left(\frac{d}{2R + h} \right) = \arcsin \left(\frac{4,223}{2 \times 26 + 0,6} \right) = 2^\circ 50';$$

$$\Theta_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \arcsin \left[\sin(\alpha_1 + \Theta_0) \frac{R + \frac{h}{2}}{R + \frac{h}{2} - x_1} \right] = 90^\circ - 45^\circ - 42^\circ 10' = 2^\circ 50';$$

$$\Theta_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_2 - \arcsin \left[\sin(\alpha_2 + \Theta_1) \frac{R + \frac{h}{2} - x_1}{R + \frac{h}{2} - x} \right] = 90^\circ - 60^\circ - 25^\circ 50' = 4^\circ 10';$$

$$AB = \left(R + \frac{h}{2} - x_1 \right) \frac{\sin(\Theta_1 - \Theta_0)}{\sin(\alpha_1 - \Theta_0)} = (26,3 - 0) \frac{\sin(2^\circ 50' - 2^\circ 50')}{\sin(45^\circ - 2^\circ 50')} = 0,0 \text{ м};$$

$$BC = \left(R + \frac{h}{2} - x \right) \frac{\sin(\Theta_2 - \Theta_1)}{\sin(\alpha_2 - \Theta_1)} = (26,3 - 0,554 \times 0,55) \frac{\sin 1^\circ 20'}{\sin 57^\circ 10'} = 0,73 \text{ м};$$

$$S_1 = \pi AB (d + AB \sin \alpha_1) = 0;$$

$$S_2 = \pi BC (d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + BC \operatorname{tg} \alpha_2) = 3,14 \times 0,73 (4,223 + 0 + 0,73 \times 1,732) = 12,578 \text{ м}^2;$$

$$N_x = \frac{1}{u_{x1} u_{x2}} \left\{ \pi (h_0 - x) \operatorname{tg} \alpha_2 [d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + (h_0 - x) \operatorname{tg} \alpha_2] + \sum_{i=1}^2 S_i \sin \alpha_i \right\} =$$

$$= \frac{1}{0,4 \times 0,4} \left\{ 3,14 \times 0,2453 \times 1,732 [4,223 + 0 + 0,2453 \times 1,732] + 12,578 \times 0,866 \right\} = \frac{16,8}{0,16} = 105.$$

$$P_x = 0,8 N_x A_{sw} R_{sw} = 0,8 \times 105 \times 490 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^5 = 4116 \text{ кН}.$$

Модуль вектора внешней нагрузки $P_{\text{раз}}$, при которой конструкция по изложенной схеме полностью исчерпывает несущую способность, запишем в виде

$$P_{\text{раз}} = \sum_{i=1}^2 \left(\tau^{(i)} \cos \alpha_i + \sigma^{(i)} \sin \alpha_i \right) S_i + P_x = \left(3,315 \times 10^3 \times 0,5 + 0,8625 \times 10^3 \times 0,866 \right) 12,578 + 4116 = \\ = 30243 + 4116 = 34\,359 \text{ кН} < 110\,000 \text{ кН}.$$

Следовательно, в данном случае при падении самолета на защитную оболочку произойдет пробивание. Максимальное значение внешней силы в 3,2 раза превышает несущую способность защитной оболочки.

Выполним проверку прочности защитной оболочки при $h = 1,2$ м, то есть увеличив толщину в 2 раза. Толщина наружной защитной оболочки $h = 1,2$ м соответствует проекту АС с ВВЭР-1200.

Определим те расчетные параметры, которые претерпевают изменения:

$$M = \frac{1}{2} R_b b h_0 \left(h_0 - \frac{1}{3} \bar{x}_0 \right) + n R_b (h - a') A_s' = \frac{1}{2} \times 17\,000 \times 1 \times 1,15 \left(1,15 - \frac{0,261}{3} \right) + \\ + 6,15 \times 17\,000 \times 1,15 \times 0,00308 = 10\,761 \text{ кН} \times \text{м};$$

$$L_1 = \frac{M}{0,8 R_b b h_0^2} - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} = \frac{10\,761}{0,8 \times 17\,000 \times 1 \times 1,15^2} - \frac{104\,550}{17\,000} \times 0,00513 = 0,567;$$

$$\sigma_{\text{фп}} = \frac{P_{1\text{max}}}{8h_0} \sqrt{3(1-\nu^2)} = \frac{11 \times 10^4}{8 \times 1,15} \sqrt{3(1-0,3^2)} = 19\,756 \text{ кПа};$$

$$\frac{\bar{x}_0}{h_0} = - \left(n \mu_s - \frac{\sigma_{\text{фп}}}{R_b} \mu_s \right) + \sqrt{\left(n \mu_s - \frac{\sigma_{\text{фп}}}{R_b} \mu_s \right)^2 + 2n \mu_s} = - \left(6,15 \times 0,00513 - \frac{19\,756}{17\,000} \times 0,00513 \right) + \\ + \sqrt{\left(6,15 \times 0,00513 - \frac{19\,756}{17\,000} \times 0,00513 \right)^2 + 2 \times 6,15 \times 0,00513} = 0,227;$$

$$\frac{x_0}{h_0} = \frac{0,5n \mu_s + L_1^2 - \left(\frac{\sigma_{\text{фп}}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} \right)}{0,5n \mu_s + L_1 - \left(\frac{\sigma_{\text{фп}}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} \right)} = \frac{0,01722 + 0,32 + 0,02793}{0,01722 + 0,567 + 0,02793} = 0,476;$$

$$\frac{x}{h_0} = 2L_1 - \frac{x_0}{h_0} = 1,134 - 0,476 = 0,658;$$

$$\frac{x_1}{h_0} = \frac{0,9 \mu_s R_s - n \mu_{s'} R_b - \frac{3}{4} \frac{x}{h_0} \left(\sqrt{R_b R_{bt}} \operatorname{tg} \alpha_2 - R_{bt} \right)}{1,1 R_b - \frac{3}{4} \left(\sqrt{R_b R_{bt}} \operatorname{tg} \alpha_2 - R_{bt} \right)} = \frac{2192,4 - 585,48 - 3212}{18700 - 4881,23} = -0,116 < 0 = 0.$$

Вычислим несущую способность защитной оболочки:

$$\Theta_0 = \arcsin\left(\frac{d}{2R+h}\right) = \arcsin\left(\frac{4,223}{2 \times 26 + 1,2}\right) = 4^\circ 33';$$

$$\Theta_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \arccos\left[\sin(\alpha_1 + \Theta_0) \frac{R + \frac{h}{2}}{R + \frac{h}{2} - x_1}\right] = 90^\circ - 45^\circ - 40^\circ 27' = 4^\circ 33';$$

$$\Theta_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_2 - \arccos\left[\sin(\alpha_2 + \Theta_1) \frac{R + \frac{h}{2} - x_1}{R + \frac{h}{2} - x}\right] = 90^\circ - 60^\circ - 21^\circ 28' = 8^\circ 32';$$

$$AB = \left(R + \frac{h}{2} - x_1\right) \frac{\sin(\Theta_1 - \Theta_0)}{\sin(\alpha_1 - \Theta_0)} = (26,3 - 0) \frac{\sin(2^\circ 50' - 2^\circ 50')}{\sin(45^\circ - 2^\circ 50')} = 0,0 \text{ м};$$

$$BC = \left(R + \frac{h}{2} - x\right) \frac{\sin(\Theta_2 - \Theta_1)}{\sin(\alpha_2 - \Theta_1)} = (26,6 - 0,658 \times 1,15) \frac{\sin 3^\circ 59'}{\sin 55^\circ 27'} = 2,19 \text{ м};$$

$$S_1 = \pi AB (d + AB \sin \alpha_1) = 0;$$

$$S_2 = \pi BC (d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + BC \operatorname{tg} \alpha_2) = 3,14 \times 2,19 (4,223 + 0 + 2,19 \times 1,732) = 55,12 \text{ м}^2;$$

$$N_x = \frac{1}{u_{x1} u_{x2}} \left\{ \pi (h_0 - x) \operatorname{tg} \alpha_2 [d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + (h_0 - x) \operatorname{tg} \alpha_2] + \sum_{i=1}^2 S_i \sin \alpha_i \right\} =$$

$$= \frac{1}{0,4 \times 0,4} \left\{ 3,14 \times 0,3933 \times 1,732 [4,223 + 0 + 0,3933 \times 1,732] + 55,12 \times 0,866 \right\} = \frac{58,22}{0,16} = 364.$$

$$P_{sw} = 0,8 N_x A_{sw} R_{sw} = 0,8 \times 364 \times 490 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^5 = 42 \ 806 \text{ кН}.$$

Модуль вектора внешней нагрузки $P_{\text{раз}}$, при которой конструкция по изложенной схеме полностью исчерпывает несущую способность:

$$P_{\text{раз}} = \sum_{i=1}^2 \left(\tau^{(i)} \cos \alpha_i + \sigma^{(i)} \sin \alpha_i \right) S_i + P_{sw} = \left(3,315 \times 10^3 \times 0,5 + 0,8625 \times 10^3 \times 0,866 \right) 55,12 + 42 \ 806 =$$

$$= 132 \ 532 + 42 \ 806 = 175 \ 338 \text{ кН} \gg 110 \ 000 \text{ кН}.$$

Следовательно, в данном случае при падении самолета прочность защитной оболочки на пробивание обеспечена. Несущая способность защитной оболочки в 1,59 раза превышает максимальное значение внешней силы соударения.

Оценка прочности защитной оболочки из высокопрочного порошкового бетона

Исходные данные [1]:

– начальный модуль деформации бетона $E_b = 44\,700$ МПа;

– расчетные сопротивления бетона марки В30: $R_b = 130$ МПа; $R_{bt} = 11,97$ МПа;

– модуль упругости арматуры $E_s = 2 \times 10^5$ МПа;

– $n = \frac{E_s}{E_b} = 4,47$;

– расчетные значения сопротивления арматуры класса А500: $R_s = 435$ МПа; $R_{sw} = 300$ МПа; $R_{sc} = 400$ МПа;

– радиус кривизны оболочки $R = 26$ м;

– толщина оболочки: $h = 0,6$ м;

– толщина защитного слоя $a = a' = 0,05$ м;

– коэффициент армирования $\mu_s = \mu_{s'} = \frac{5 \frac{\pi d_s^2}{4}}{A} = 5,6 \times 10^{-3}$;

– площадь поперечного сечения конструкции единичной ширины $A = bh_0 = 1 \text{ м} \times 0,55 \text{ м} = 0,55 \text{ м}^2$;

– номинальный диаметр стержней продольной и поперечной арматуры соответственно: $d_s = 28$ мм;

$d_{sw} = 25$ мм;

– $u_{x1} = 0,4$ м и $u_{x2} = 0,4$ м – шаг хомутов по меридиональным и по кольцевым направлениям;

– $R_{sw} = 300$ МПа – расчетное сопротивление поперечной арматуры; $d_x = 25$ мм – диаметр сечения

поперечной арматуры;

– $A_{sw} = \pi d_{sw}^2 / 4 = 490 \text{ мм}^2$ – площадь сечения поперечной арматуры.

$$\sigma^{(1)} = \frac{0,1\sigma_3 + \sigma_3}{2} = -1,1R_b = -143 \text{ МПа};$$

$$\tau^{(1)} = \frac{0,1\sigma_3 - \sigma_3}{2} = 0,9R_b = 117 \text{ МПа};$$

$$\tau_b^{(2)} = \tau = \sqrt{R_b R_{bt}} = 39,45 \text{ МПа};$$

$$\sigma_c^{(2)} = R_{bt} = 11,97 \text{ МПа}; \quad \tau_c^{(2)} = 0; \quad \sigma^{(2)} = 8,9775 \text{ МПа}; \quad \tau^{(2)} = 29,5875 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{s'} = nR_b = 583,78 \text{ МПа};$$

$$A_s = A_{s'} = 5 \frac{\pi d_s^2}{4} = 0,00308 \text{ м}^2;$$

$$M = \frac{1}{2} R_b b h_0 \left(h_0 - \frac{1}{3} \bar{x}_0 \right) + n R_b (h - a') A_{s'} = \frac{1}{2} \times 130\,600 \times 1 \times 0,55 \left(0,55 - \frac{0,1939 \times 0,55}{3} \right) + 4,47 \times 130\,600 \times 0,55 \times 0,00308 = 19\,465 \text{ кН} \times \text{м};$$

$$L_1 = \frac{M}{0,8 R_b b h_0^2} - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} = \frac{19\,465}{0,8 \times 130\,600 \times 1 \times 0,55^2} - \frac{583\,780}{130\,600} \times 0,00513 = 0,593;$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{P_{1\max}}{8h_0} \sqrt{3(1-\nu^2)} = \frac{11 \times 10^4}{8 \times 0,55} \sqrt{3(1-0,3^2)} = 41\,307 \text{ кПа};$$

$$\frac{\bar{x}_0}{h_0} = - \left(n\mu_s - \frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{R_b} \mu_s \right) + \sqrt{\left(n\mu_s - \frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{R_b} \mu_s \right)^2 + 2n\mu_s} = - \left(4,47 \times 0,00513 - \frac{41307}{130600} \times 0,00513 \right) +$$

$$+ \sqrt{\left(4,47 \times 0,00513 - \frac{41307}{130\,600} \times 0,00513 \right)^2 + 2 \times 4,47 \times 0,00513} = -0,0213 + 0,2152 = 0,1939;$$

$$\frac{x_0}{h_0} = \frac{0,5n\mu_s + L_1^2 - \left(\frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_{a'}}{R_b} \mu_{s'} \right)}{0,5n\mu_a + L_1 - \left(\frac{\sigma_{\varphi\varphi}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} \right)} = \frac{0,012516 + 0,3517 + 0,02337}{0,01722 + 0,593 + 0,02337} = 0,612;$$

$$\frac{x}{h_0} = 2L_1 - \frac{x_0}{h_0} = 1,186 - 0,612 = 0,574;$$

$$\frac{x_1}{h_0} = \frac{0,9\mu_s R_s - n\mu_{s'} R_b - \frac{3}{4} \frac{x}{h_0} \left(\sqrt{R_b R_{bt}} \operatorname{tg} \alpha_2 - R_{bt} \right)}{1,1R_b - \frac{3}{4} \left(\sqrt{R_b R_{bt}} \operatorname{tg} \alpha_2 - R_{bt} \right)} = \frac{2192,4 - 3254,16 - 24260}{143000 - 42265} = -0,25137 < 0 = 0.$$

Определим несущую способность защитной оболочки:

$$\Theta_0 = \arcsin \left(\frac{d}{2R+h} \right) = \arcsin \left(\frac{4,223}{2 \times 26 + 0,6} \right) = 2^\circ 50';$$

$$\Theta_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \arccos \left[\sin(\alpha_1 + \Theta_0) \frac{R + \frac{h}{2}}{R + \frac{h}{2} - x_1} \right] = 90^\circ - 45^\circ - 42^\circ 10' = 2^\circ 50';$$

$$\Theta_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_2 - \arccos \left[\sin(\alpha_2 + \Theta_1) \frac{R + \frac{h}{2} - x_1}{R + \frac{h}{2} - x} \right] = 90^\circ - 60^\circ - 25^\circ 50' = 4^\circ 10';$$

$$AB = \left(R + \frac{h}{2} - x_1 \right) \frac{\sin(\Theta_1 - \Theta_0)}{\sin(\alpha_1 - \Theta_0)} = (26,3 - 0) \frac{\sin(2^\circ 50' - 2^\circ 50')}{\sin(45^\circ - 2^\circ 50')} = 0,0 \text{ м};$$

$$BC = \left(R + \frac{h}{2} - x \right) \frac{\sin(\Theta_2 - \Theta_1)}{\sin(\alpha_2 - \Theta_1)} = (26,3 - 0,574 \times 0,55) \frac{\sin 1^\circ 20'}{\sin 57^\circ 10'} = 0,718 \text{ м};$$

$$S_1 = \pi AB(d + AB \sin \alpha_1) = 0;$$

$$S_2 = \pi BC(d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + BC \operatorname{tg} \alpha_2) = 3,14 \times 0,73(4,223 + 0 + 0,718 \times 1,732) = 12,5295 \text{ м}^2;$$

$$N_x = \frac{1}{u_{x1} u_{x2}} \left\{ \pi(h_0 - x) \operatorname{tg} \alpha_2 [d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + (h_0 - x) \operatorname{tg} \alpha_2] + \sum_{i=1}^2 S_i \sin \alpha_i \right\} =$$

$$= \frac{1}{0,4 \times 0,4} \left\{ 3,14 \times 0,2453 \times 1,732 [4,223 + 0 + 0,2453 \times 1,732] + 12,578 \times 0,866 \right\} = \frac{16,8}{0,16} = 105.$$

$$P_x = 0,8 N_x A_{sw} R_{sw} = 0,8 \times 105 \times 490 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^5 = 12\,348 \text{ кН}.$$

Модуль вектора внешней нагрузки $P_{\text{раз}}$, при которой конструкция по изложенной схеме полностью исчерпывает несущую способность, определим по формуле

$$P_{\text{раз}} = \sum_{i=1}^2 (\tau^{(i)} \cos \alpha_i + \sigma^{(i)} \sin \alpha_i) S_i + P_x = (29,59 \times 10^3 \times 0,5 + 8,9775 \times 10^3 \times 0,866) 12,5295 +$$

$$+ 4116 = 282\,785 + 12\,348 = 295\,133 \text{ кН} \gg 110\,000 \text{ кН}.$$

Следовательно, в данном случае при падении самолета на защитную оболочку прочность конструкции на пробивание с большим запасом обеспечена: в 2,68 раза.

Оценка прочности защитной оболочки из сталефибробетона

Исходные данные [1; 2]:

– начальный модуль деформации бетона $E_b = 45\,700 \text{ МПа}$;

– расчетные сопротивления сталефибробетона: $R_b = 149,7 \text{ МПа}$; $R_{bt} = 20,80 \text{ МПа}$;

– модуль упругости арматуры $E_s = 2 \times 10^5 \text{ МПа}$;

– $n = \frac{E_s}{E_b} = 4,376$;

– расчетные значения арматуры класса А500: $R_s = 435 \text{ МПа}$; $R_{sw} = 300 \text{ МПа}$; $R_{sc} = 400 \text{ МПа}$;

– радиус кривизны оболочки $R = 26 \text{ м}$;

– толщина оболочки: $h = 0,6 \text{ м}$;

– толщина защитного слоя $a = a' = 0,05 \text{ м}$;

– коэффициент армирования $\mu_s = \mu_{s'} = \frac{5 \pi d_s^2}{4A} = 5,6 \times 10^{-3}$;

– площадь поперечного сечения конструкции единичной ширины $A = bh_0 = 1 \text{ м} \times 0,55 \text{ м} = 0,55 \text{ м}^2$;

– номинальный диаметр стержней продольной и поперечной арматуры соответственно: $d_s = 28 \text{ мм}$;

$d_{sw} = 25 \text{ мм}$;

– $u_{x1} = 0,4 \text{ м}$ и $u_{x2} = 0,4 \text{ м}$ – шаг хомутов по меридиональным и по кольцевым направлениям;

– $R_{sw} = 300 \text{ МПа}$ – расчетное сопротивление поперечной арматуры; $d_x = 25 \text{ мм}$ – диаметр сечения поперечной арматуры;

– $A_{sw} = \pi d_{sw}^2 / 4 = 490 \text{ мм}^2$ – площадь сечения поперечной арматуры.

Далее последовательно определяется

$$\sigma^{(1)} = \frac{0,1\sigma_3 + \sigma_3}{2} = -1,1R_b = -164,67 \text{ МПа};$$

$$\tau^{(1)} = \frac{0,1\sigma_3 - \sigma_3}{2} = 0,9R_b = 134,73 \text{ МПа};$$

$$\tau_b^{(2)} = \tau = \sqrt{R_b R_{bt}} = 55,8 \text{ МПа};$$

$$\sigma_c^{(2)} = R_{bt} = 20,8 \text{ МПа}; \quad \tau_c^{(2)} = 0; \quad \sigma^{(2)} = 15,6 \text{ МПа}; \quad \tau^{(2)} = 41,85 \text{ МПа};$$

$$\sigma_{s'} = nR_b = 655,09 \text{ МПа};$$

$$A_s = A_{s'} = 5 \frac{\pi d_s^2}{4} = 0,00308 \text{ м}^2;$$

$$\sigma_{\text{фф}} = \frac{P_{1\text{max}}}{8h_0} \sqrt{3(1-\nu^2)} = \frac{11 \times 10^4}{8 \times 0,55} \sqrt{3(1-0,3^2)} = 41\,307 \text{ кПа};$$

$$\begin{aligned} \frac{\bar{x}_0}{h_0} = & - \left(n\mu_s - \frac{\sigma_{\text{фф}}}{R_b} \mu_s \right) + \sqrt{\left(n\mu_s - \frac{\sigma_{\text{фф}}}{R_b} \mu_s \right)^2 + 2n\mu_s} = - \left(4,376 \times 0,0056 - \frac{41\,307}{149\,700} \times 0,0056 \right) + \\ & + \sqrt{\left(4,376 \times 0,0056 - \frac{41\,307}{149\,700} \times 0,0056 \right)^2 + 2 \times 4,376 \times 0,0056} = -0,023 + 0,2226 = 0,1996; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} M = & \frac{1}{2} R_b b h_0 \left(h_0 - \frac{1}{3} \bar{x}_0 \right) + n R_b (h - a') A_{s'} = \frac{1}{2} \times 149\,700 \times 1 \times 0,55 \left(0,55 - \frac{0,1996 \times 0,55}{3} \right) + \\ & + 4,376 \times 149\,700 \times 0,55 \times 0,00308 = 22\,245 \text{ кН} \times \text{м}; \end{aligned}$$

$$L_1 = \frac{M}{0,8 R_b b h_0^2} - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} = \frac{22\,245}{0,8 \times 149\,700 \times 1 \times 0,55^2} - \frac{655\,090}{149\,700} 0,0056 = 0,59;$$

$$\frac{x_0}{h_0} = \frac{0,5n\mu_s + L_1^2 - \left(\frac{\sigma_{\text{фф}}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} \right)}{0,5n\mu_s + L_1 - \left(\frac{\sigma_{\text{фф}}}{R_b} \mu_s - \frac{\sigma_{s'}}{R_b} \mu_{s'} \right)} = \frac{0,0122528 + 0,34756 + 0,02296}{0,0122528 + 0,59 + 0,02296} = 0,612;$$

$$\frac{x}{h_0} = 2L_1 - \frac{x_0}{h_0} = 1,18 - 0,612 = 0,568;$$

$$\frac{x_1}{h_0} = \frac{0,9\mu_s R_s - n\mu_{s'} R_b - \frac{3}{4} \frac{x}{h_0} \left(\sqrt{R_b R_{bt}} \operatorname{tg} \alpha_2 - R_{bt} \right)}{1,1R_b - \frac{3}{4} \left(\sqrt{R_b R_{bt}} \operatorname{tg} \alpha_2 - R_{bt} \right)} = \frac{2192,4 - 3668,5 - 32311}{164\,670 - 43\,082} = -0,27788 < 0 = 0.$$

Установим несущую способность защитной оболочки:

$$\Theta_0 = \arcsin\left(\frac{d}{2R+h}\right) = \arcsin\left(\frac{4,223}{2 \times 26 + 0,6}\right) = 2^\circ 50';$$

$$\Theta_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha_1 - \arccos\left[\sin(\alpha_1 + \Theta_0) \frac{R + \frac{h}{2}}{R + \frac{h}{2} - x_1}\right] = 90^\circ - 45^\circ - 42^\circ 10' = 2^\circ 50';$$

$$\Theta_2 = \frac{\pi}{2} - \alpha_2 - \arccos\left[\sin(\alpha_2 + \Theta_1) \frac{R + \frac{h}{2} - x_1}{R + \frac{h}{2} - x}\right] = 90^\circ - 60^\circ - 25^\circ 50' = 4^\circ 10';$$

$$AB = \left(R + \frac{h}{2} - x_1\right) \frac{\sin(\Theta_1 - \Theta_0)}{\sin(\alpha_1 - \Theta_0)} = (26,3 - 0) \frac{\sin(2^\circ 50' - 2^\circ 50')}{\sin(45^\circ - 2^\circ 50')} = 0,0 \text{ м};$$

$$BC = \left(R + \frac{h}{2} - x\right) \frac{\sin(\Theta_2 - \Theta_1)}{\sin(\alpha_2 - \Theta_1)} = (26,3 - 0,568 \times 0,55) \frac{\sin 1^\circ 20'}{\sin 57^\circ 10'} = 0,7178 \text{ м};$$

$$S_1 = \pi AB(d + AB \sin \alpha_1) = 0;$$

$$S_2 = \pi BC(d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + BC \operatorname{tg} \alpha_2) = 3,14 \times 0,7178(4,223 + 0 + 0,7178 \times 1,732) = 12,32 \text{ м}^2;$$

$$N_x = \frac{1}{u_{x1} u_{x2}} \left\{ \pi (h_0 - x) \operatorname{tg} \alpha_2 [d + 2x_1 \operatorname{tg} \alpha_1 + (h_0 - x) \operatorname{tg} \alpha_2] + \sum_{i=1}^2 S_i \sin \alpha_i \right\} =$$

$$= \frac{1}{0,4 \times 0,4} \left\{ 3,14 \times 0,2376 \times 1,732 [4,223 + 0 + 0,2376 \times 1,732] + 12,32 \times 0,866 \right\} = \frac{16,658}{0,16} = 104.$$

$$P_x = 0,8 N_x A_{sw} R_{sw} = 0,8 \times 104 \times 490 \times 10^{-6} \times 3 \times 10^5 = 12\,230 \text{ кН}.$$

Модуль вектора внешней нагрузки $P_{\text{раз}}$, при которой конструкция по изложенной схеме полностью исчерпывает несущую способность:

$$P_{\text{раз}} = \sum_{i=1}^2 (\tau^{(i)} \cos \alpha_i + \sigma^{(i)} \sin \alpha_i) S_i + P_x = (41,85 \times 10^3 \times 0,5 + 15,6 \times 10^3 \times 0,866) 12,32 +$$

$$+ 4116 = 424\,234 + 12\,230 = 436\,464 \text{ кН} \gg 110\,000 \text{ кН}.$$

Следовательно, в данном случае при падении самолета на защитную оболочку прочность конструкции на пробивание с большим запасом обеспечена: в 3,97 раза.

В табл. 2 обобщены результаты расчетов прочности защитной оболочки из различных материалов при падении самолета типа «Фантом».

Таблица 2

Обобщение результатов расчетов локальной прочности купольной части защитной оболочки из различных материалов при падении самолета типа «Фантом»

Толщина стенки оболочки, h , м	Материал	Максимальное значение силы соударения, 10^5 кН	Несущая способность, P_{1max} , 10^5 кН
0,6	Бетон марки В30	1,1	0,34359
1,2	Бетон марки В30	1,1	1,75338
0,6	Высокопрочный порошок бетон	1,1	2,951332
0,6	Сталефибробетон	1,1	4,36464

Table 2

Summary of the results of calculations of the local strength of the dome part of the protective shell made of various materials during the fall of a "Phantom" aircraft

Shell plate thickness, h , м	Material	Maximum value of projectile force, 10^5 KN	Capacity, P_{1max} , 10^5 KN
0.6	Concrete of grade B30	1.1	0.34359
1.2	Concrete of grade B30	1.1	1.75338
0.6	High-strength powder concrete	1.1	2.951332
0.6	Steel fibre reinforced concrete	1.1	4.36464

Представленные в табл. 2 результаты расчетов показывают, что прочность оболочки, изготовленной из бетона марки В30 с толщиной $h = 0,6$ м, является недостаточной. Во всех других рассматриваемых случаях условие прочности оболочки выполняется с большим запасом.

При этом, как показывают результаты расчетов, при идентичных исходных данных в случае замены обычного бетона класса В30 на высокопрочный порошок бетон прочность защитной оболочки возрастает в $\frac{2,951332}{0,34359} = 8,59$ раза.

Представленные в табл. 2 результаты расчетов подтверждают, что при идентичных исходных данных в случае замены обычного бетона класса В30 на сталефибробетон прочность защитной оболочки возрастает в $\frac{4,36464}{0,34359} = 12,7$ раза.

Заключение

Представленные результаты расчетов подтверждают широкие возможности совершенствования конструктивных решений защитных оболочек путем реализации инновационных материалов, позволяющих существенно экономить материальные ресурсы при одновременном повышении надежности и безопасности сооружений в атомной энергетике.

Список литературы

1. Саргсян А.Е. Динамика и сейсмостойкость сооружений атомных станций. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2013. 550 с.
2. Саргсян А.Е. Оценка прочности защитных конструкций сооружений атомных станций при соударении с летящим телом. М.: Леопарт, 2021. 130 с.

References

1. Sargsyan A.E. *Dynamics and seismic resistance of nuclear power plant structures*. Sarov: RFNC-VNIIEF Publ.; 2013. (In Russ.)
2. Sargsyan A.E. *Assessment of the strength of protective structures of nuclear power plant structures in a collision with a flying body*. Moscow: Leopard Publ.; 2021. (In Russ.)