УДК 621.039.536.2:693.55

© В. И. Морозов, д-р техн. наук, профессор
 © Э. К. Опбул, канд. техн. наук, зав. лабораторией
 © В. М. Попов, канд. техн. наук, доцент
 (Санкт-Петербургский государственный
 архитектурно-строительный университет,
 Санкт-Петербург, Россия)
 © А. Н. Петров, д-р техн. наук, профессор
 (Петрозаводский государственный университет,
 г. Петрозаводск, Россия)
 © Фан Ван Фук, канд. техн. наук
 (Университет Винь (ВУНИ), г. Винь, Вьетнам)
 E-mail: vimorozov51@yandex.ru, fduecnufce@mail.ru,
 popov_vladimir_m@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2020-17-6-61-69

© V. I. Morozov, Dr. Sci. Tech., Professor
 © Eh. K. Opbul, PhD in Sci. Tech., laboratory head
 © V. M. Popov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
 (Saint Petersburg State University
 of Architecture and Civil Engineering,
 St. Petersburg, Russia)
 © A. N. Petrov, Dr. Sci. Tech., Professor
 (Petrozavodsk State University,
 Petrozavodsk, Russia)
 © Phan Van Phuc, PhD in Sci. Tech.
 (Vinh University (VUNI), Vinh, Vietnam)
 E-mail: vimorozov51@yandex.ru, fduecnufce@mail.ru,
 popov_vladimir_m@mail.ru

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТОЛСТЫХ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ, ОПЕРТЫХ ПО НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ

STRESS STATE OF THICK AXISYMMETRIC REINFORCED CONCRETE SLABS SUPPORTED ON AN INCLINED SURFACE

Рассмотрено развитие методов расчета напряженного состояния осесимметричных конусообразных толстых плит, свободно опертых по наклонной поверхности на несущие стенки корпуса, формирующих таким образом торцовые элементы сосуда давления. На плиту действует внутреннее давление в виде равномерно распределенной статической нагрузки. Методика исследований в данной работе построена на базе аналитического и численного способов расчета с учетом специфики поведения бетона в условиях трехосного сжатия. С использованием основных положений теории пластичности, принятых в форме критерия прочности Баландина, получено решение задачи по определению предельного давления. Полученные результаты в аналитическом и численном методах могут быть использованы при проектировании подобных конструкций на стадии эскизного проекта. При этом сравнительный анализ результатов расчетов показал адекватность предлагаемых методов.

Ключевые слова: корпус высокого давления, торцовый элемент, толстая плита, несущая стенка, радиальные напряжения, тангенциальные напряжения, вертикальные напряжения, внутреннее давление, равномерно распределенная нагрузка, шпонка, контактный слой.

The article considers the development of methods for calculating the stress state of axisymmetric cone-shaped thick slabs simply supported on an inclined surface on the bearing walls of the shell, thus forming the end elements of the pressure vessel. The internal pressure acts on the slab in the form of a uniformly distributed static load. The research methodology in this paper is based on analytical and numerical methods of calculation, taking into account the specific behavior of concrete under conditions of triaxial compression. Using the basic provisions of the theory of plasticity behavior adopted in the form of the strength criterion of P. Balandin, there has been obtained a solution to the problem of determining the pressure capability. The results obtained in analytical and numerical methods can be used at projecting similar structures at the schematic design stage. Herewith, a comparative analysis of the calculation results has shown the adequacy of the proposed methods.

Keywords: high-pressure shell, end element, thick slab, load-bearing wall, radial stresses, tangential stresses, vertical stresses, internal pressure, uniformly distributed load, key, contact layer.

Введение

В мире существуют корпуса высокого давления двух разновидностей: металлические [1–3] и железобетонные предварительно напряженные [4–7].

Основными недостатками данных корпусов являются ограниченные геометрические размеры, опасность хрупкого разрушения [8, 9], достаточно сложная технология возведения [10, 11].

В настоящей статье рассматривается конструкция толстой осесимметричной железобетонной плиты в виде усеченного конуса. Как правило, толстые плиты могут располагаться в концевых участках корпусов высокого давления [12, 13].

Корпус высокого давления (КВД), представленный на рис. 1, включает в себя силовые стенки из тяжелого армированного бетона [12, 13], торцовые элементы типа пробок, смещение которых исключено с помощью специальных шпонок. В качестве шпонок могут быть использованы арматурные стержни больших диаметров.

Основные задачи, которые решены в настоящей статье, связаны с исследованием напряженного состояния железобетонных днищ и крышек, которые наподобие пробок обеспечивают герметичность цилиндрического либо сферического сосудов. Кроме того, определяется предельное давление на торцовые элементы, которые закреплены от смещения относительно стенок с устройством на контактной зоне специальных шпонок. При решении задач используется аналитический метод на базе классической теории пластичности бетона. Задействован программный комплекс Mathcad 15, с помощью которого решается задача в аналитической постановке.

Приводятся также численные исследования, выполненные с использованием ANSYS WorkBench¹ [14–15].

1. Формирование расчетной схемы

На рис. 1 демонстрируется схема КВД, а на рис. 2 — схема трещинообразования торцового элемента под нагрузкой, в котором просматриваются контуры *сжатого сферического свода*.

По показаниям глубинных и поверхностных датчиков, расположенных в местах сопряжения днища и стенок, при наличии внутреннего давления стенки отрываются от днищ, кроме того, ранее в исследованиях [12, 13] был установлен изгибный характер работы торцовых элементов, который впоследствии был подтвержден теоретическими результатами.

Теоретическая постановка задачи базируется на предпосылках, естественно вытекающих из характера традиционного деформирования изгибаемых элементов, в том числе на гипотезе плоских сечений, формирования трещин по главным растягивающим напряжениям и других.

На рис. 3 показана расчетная схема нормального сечения.

Опытным путем [16, 17] установлено формирование двух опасных сечений: вблизи опор на

¹ Using ANSYS workbench for structural analysis // Engineering Analysis with ANSYS Software. 2018. Pp. 511–540. DOI:10.1016/B978-0-08-102164-4.10000-7.

Рис. 1. Корпус высокого давления: а — модель корпуса; б — конструктивная схема, где 1 — силовая стенка из тяжелого армированного бетона; 2 — торцовый элемент из железобетона; 3 — шпонки; 4 — металлическая опалубка; P_0 — внутреннее давление; β — угол наклона несущей стенки из тяжелого армированного бетона

Рис. 2. Схема трещинообразования торцевого элемента и формирование сжатого сферического свода:
3 — шпонки; 4 — металлическая опалубка; 5 — бетон; 6 — связь, ограничивающая перемещения по вертикали;
 P_0 — внутреннее давление

Рис. 3. Расчетная схема нормального сечения толстого железобетонного элемента:
 M — изгибающий момент от внешней нагрузки; N', N — суммарные внутренние усилия, соответственно в сжатой и растянутой зонах; 4 — металлическая опалубка; 5 — бетон; 6 — связь, ограничивающая перемещения по вертикали

срез (сечение 1-1) и по оси симметрии — на изгиб (сечение 2-2) (см. рис. 2).

2. Аналитический метод определения предельной нагрузки в опасных сечениях

Рассмотрим расчетное сечение 1-1 (см. рис. 2).

На приопорных участках, там, где доминируют в основном перерезывающие силы, и с учетом [18, 19] условие равновесия запишется в виде

$$Q = R_{bw}h + R_{sw}A_{sw1}. \quad (1)$$

Общеизвестно, что $Q = \frac{P_0 d}{2}$, тогда предельная нагрузка равняется

$$P_0 = \frac{2(R_{bw}h + R_{sw}\mu_1 h)}{d}, \quad (2)$$

где R_{bw}, R_{sw} — расчетные сопротивления бетона и арматуры на срез.

Рассмотрим сечение 2-2 (см. рис. 2).

В предельных значениях нагрузки, на оси симметрии элемента и когда напряжения в нормальном сечении достигают прочности бетона при трехосном сжатии (R_b''), условие равновесия запишется в следующем виде:

$$N - N' = 0, \quad (3)$$

где N, N' — усилия в растянутой и сжатой зонах.

Используя признак подобия треугольников, по эпюре деформаций, представленной на рис. 3, определяем крайние деформации в арматуре (металлической опалубке):

$$\mu_s = \frac{\epsilon_b''(h-x)}{x}, \quad (4)$$

где ϵ_b'' — максимальные деформации бетона при трехосном сжатии; ϵ_s — деформации в растянутой арматуре.

При известном проценте армирования μ_2 может быть определен приведенный модуль упругости по формуле

$$E_{red} = \mu_2 E_s. \quad (5)$$

По расчетной схеме, представленной на рис. 3, усилия в нормальном сечении равны:

$$N = \frac{1}{2} \mu_s E_{red} (h-x) = \frac{1}{2} \mu_s m_2 E_s (h-x); \quad (6)$$

$$N' = \frac{1}{2} R_b''' x. \quad (7)$$

Определяем внутренний M_I и внешний M_{II} моменты по формулам

$$M_I = \frac{1}{3} R_b''' x h. \quad (8)$$

$$M_{II} = \frac{1}{8} P_0 d^2. \quad (9)$$

В результате общего решения формул (3), (6) и (7) получаем следующую зависимость:

$$\frac{h-x}{x} = \sqrt{\frac{R_b'''}{\varepsilon_b''' E_{red}}} = A, \quad (10)$$

откуда

$$R_b''' = A^2 \varepsilon_b''' E_{red}, \quad (11)$$

где A — искомый параметр.

Из формулы (10) выразим

$$x = \frac{h}{A+1}; \quad (12)$$

приравняем полученные формулы (8) и (9):

$$\frac{1}{3} \varepsilon_b''' E_{red} A^2 h^2 = \frac{1}{8} P_0 d^2. \quad (13)$$

Тогда на основе общего решения формул (10) и (13) **предельная нагрузка** с неизвестным параметром A равна:

$$P_0 = \frac{8}{3} \frac{\mu_b''' E_{red} A^2 h^2}{(A+1)d^2}, \quad (14)$$

где параметр A вычисляется при помощи общезвестного критерия прочности Баландина.

3. Аналитический метод определения напряженного состояния и прочности железобетонных торцовых элементов (критерий прочности Баландина)

Запишем критерий прочности Баландина [16, 20] в виде

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - (\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1) - (R_b - R_{bt})(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) = R_b R_{bt}. \quad (15)$$

Когда формируется сжатый сферический свод, имеем условие $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_r$; $\sigma_3 = \sigma_z$, и тогда критерий по формуле (15) преобразуется в следующий вид:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 - (R_b - R_{bt})(2\sigma_1 + \sigma_3) = R_b R_{bt}. \quad (16)$$

После принятия следующих условных обозначений: $M = R_b - R_{bt}$, $N = R_b R_{bt}$, формула (16) запишется в виде

$$\sigma_r = \sigma_z + M + \sqrt{M^2 + M\sigma_z + N}. \quad (17)$$

С учетом граничных условий (при $z = h$) $\sigma_z = P_0$ и $\sigma_r = \sigma_0 = R_b'''$ уравнение (17) представим в виде

$$R_b''' = P_0 + M + \sqrt{M^2 + MP_0 + N}. \quad (18)$$

В результате общего решения формул (11), (14) и (18) получаем формулу (19) для определения параметра A с использованием программного пакета Mathcad:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{16} (\varepsilon_b''' E_{red})^2 d^4 A^2 (A+1) + \frac{4}{9} (\varepsilon_b''' E_{red})^2 h^4 A^4 - \\ & - \frac{1}{3} (\varepsilon_b''' E_{red})^2 d^2 h^2 A^4 (A+1) - \frac{1}{8} \varepsilon_b''' E_{red} d^4 M A (A+1) - \\ & - \frac{1}{6} \varepsilon_b''' E_{red} d^2 h^2 M A^2 (A+1) - \\ & - \frac{1}{16} N d^4 (A+1)^2 = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Таким образом, по зависимости (14) при исском параметре A определяется величина P_0 для железобетонных торцовых элементов.

4. Практический расчет железобетонных торцовых элементов

Исходные данные:

- Для бетона В40: $R_b = 29$ МПа; $R_{bt} = 2,1$ МПа.
- По [16, 20] при двухосном сжатии для бетона В40: $R_b'' = (1,4 \dots 1,8) R_b = (40,6 \dots 52,2)$ МПа или $R_b''' = 42$ МПа.
- Относительная деформация бетона на сжатие $\varepsilon_b''' = 0,0035$.
- Арматура А500: прочность на растяжение и на срез соответственно $R_s = 500$ МПа, $R_{sw} = 500$ МПа; модули упругости материалов: $E_b = 36\,000$ МПа и $E_s = 2 \cdot 10^5$ МПа.
- Наклонная поверхность конуса под углом $\beta = 20^\circ$.
- В соответствии с нормами стран Европы^{2,3,4} процент армирования принят равным $\mu_s = 4\%$.

² BS EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings. British Standards Institution. 2004. DOI:[Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC].

³ ACI committee 318. Building code requirements for structural plain concrete (ACI 318.1-83) and commentary // International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete. 1985. Vol. 7 (1). P. 60. DOI:10.1016/0262-5075(85)90032-6.

⁴ BSI 8110-1:1997. Structural use of concrete. Part 1: Code of practice for design and construction ICS 91.080.40.22005.

- Геометрические размеры элемента:
 $d = 2000$ мм и $h = 1000$ мм.

Полученные численные результаты расчета:

- параметр $A = 1,908$;
- предельная нагрузка железобетонных торцовых элементов $P_0 = 23,37$ МПа;
- высота сжатой зоны $x = 344$ мм;
- тангенциальное и радиальное напряжения при $z = h$: $\sigma_\theta = \sigma_r = 87,86$ МПа.

На рис. 4 представлен результат аналитического расчета напряженного состояния.

Рис. 4. Эпюра радиальных напряжений в сечении 2-2

5. Численный расчет торцовых элементов

Для численного расчета железобетонных торцовых элементов на программном комплексе ANSYS были приняты те же исходные данные (классы бетона и арматуры, угол наклона конуса, геометрические размеры элемента, процент армирования), что были в аналитическом способе, а в качестве внешней нагрузки принята аналитически вычисленная $P_0 = 23,37$ МПа, приложенная в виде равномерно распределенной нагрузки.

В качестве расчетного критерия прочности бетона принимается критерий Друкера–Прагера, прочностные свойства бетона при многоосном сжатии принимаются согласно источникам⁵ [21–24].

С учетом осесимметричных свойств конструкции торцовых элементов результаты расчетов (изополя напряжений, таблицы и графики) представлены в виде четверти 3D-модели.

На рис. 5, а, б представлены исходные расчетные схемы с использованием цилиндрической системы координат.

⁵ Using ANSYS workbench for structural analysis // Engineering Analysis with ANSYS Software. 2018. Pp. 511–540. DOI:10.1016/B978-0-08-102164-4.10000-7.

На рис. 6 представлена разбивка железобетонного торцового элемента на конечные элементы, где прямая от точки 1 до точки 2 является опасным сечением.

На рис. 7 представлены изополя радиальных и тангенциальных напряжений.

На рис. 8 представлены изополя вертикальных и касательных напряжений.

Рис. 5. Четвертная модель расчетной схемы железобетонных торцовых элементов: а — общий вид; б — граничные условия для численного расчета; А — нагружаемая поверхность; В — плоскость, где отсутствуют перемещения в кольцевом направлении; С — отсутствуют перемещения в вертикальном направлении

Рис. 6. Разбивка торцовых элементов на конечные элементы

В табл. 1 и 2 и на рис. 9 численно представлены полученные радиальные и вертикальные напряжения.

Выводы

На основе общеизвестной теории пластичности бетона и железобетона в условиях трехосного сжатия (критерий прочности Баландина), в том числе с использованием численных методов, получена адекватная методика расчета толстых осесимметричных плит, где количественные показатели, полученные аналитическим и численным методами, достаточно близки, что свидетельствует об адекватности полученных результатов.

Рис. 7. Изополя радиальных (а) и тангенциальных (б) напряжений

Рис. 8. Изополя вертикальных (а) и касательных (б) напряжений

Таблица 1

Радиальные и вертикальные напряжения в зависимости от расстояния между опасными сечениями 1-2 на оси симметрии

Расстояние 1-2, мм	[A] Радиальное напряжение, МПа	[B] вертикальное напряжение, МПа
0	1,43	0,00
100	1,43	-0,05
200	1,43	-0,16
300	1,42	-0,39
400	1,40	-0,78
500	1,36	-1,39
600	1,30	-2,62
700	1,16	-5,16
800	-7,78	-10,51
900	-37,15	-19,21
1000	-67,82	-23,71

Таблица 2

Радиальные напряжения в зависимости от расстояния между опасными сечениями 1-2 на оси симметрии

Расстояние 1-2, мм	Радиальные напряжения, МПа	
	ANSYS	Аналитический метод
0	1,43	0
100	1,43	0
200	1,43	0
300	1,42	0
400	1,40	0
500	1,36	0
600	1,30	0
700	1,16	0
800	-7,78	-
900	-37,15	-
1000	-67,82	-87,86

Рис. 9. График радиальных и вертикальных напряжений при нагрузке 23,37 МПа

Библиографический список

1. Sauzay M. Mechanical behavior of structural materials for Generation IV reactors // Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors. 2016. Pp. 191–252. DOI 10.1016/B978-0-08-100906-2.00006-9.
2. Muroga T. Refractory metals as core materials for Generation IV nuclear reactors // Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors. 2016. Pp. 415–440. DOI 10.1016/B978-0-08-100906-2.00011-2.
3. Toribio J., Vergara D., Lorenzo M. Hydrogen embrittlement of the pressure vessel structural materials

in a WWER-440 nuclear power plant // Energy Procedia. 2017. Vol. 131. Pp. 379–385. DOI 10.1016/j.egypro.2017.09.464.

4. Hsuan-Teh Hu, Jun-Xu Lin. Ultimate analysis of PWR prestressed concrete containment under long-term prestressing loss // Annals of Nuclear Energy. 2016. Vol. 87. Pp. 500–510. URL: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.10.005>.

5. Karlsson B. I., Sozen M. A. Prestressed concrete deep slabs with openings. Nuclear Engineering and Design. 1973. Vol. 25 (2). Pp. 290–330. DOI 10.15554/pcij.05011977.64.79.

6. Tavakkoli I., Kianoush M. R., Abrishami H., Han X. Finite element modelling of a nuclear containment structure subjected to high internal pressure // *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2017. Vol. 153. Pp. 59–69. DOI 10.1016/j.ijpvp.2017.05.004.
7. Young-Sun Choun, Hyung-Kui Park. Containment performance evaluation of prestressed concrete containment vessels with fiber reinforcement // *Nuclear Engineering and Technology*. 2015. Vol. 47 (7). Pp. 884–894. URL: <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.07.003>.
8. Li C., Shu G., Xu B., Liu W. The resistivity calculation method of reactor pressure vessel steels after ion irradiation // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2019. Vol. 451. Pp. 38–41. DOI 10.1016/j.nimb.2019.04.056.
9. Narkunas E., Poskas G., Smaizys A. Impact of shield elements on the WWER-440 reactor pressure vessel activation // *Annals of Nuclear Energy*. 2019. Vol. 130. Pp. 394–401. DOI:10.1016/j.anucene.2019.03.008.
10. Barros J. A. O., Taheri M., Salehian H., Mendes P. J. D. A design model for fibre reinforced concrete beams pre-stressed with steel and FRP bars // *Composite Structures*. 2012. Vol. 94 (8). Pp. 2494–2512. DOI 10.1016/j.compstruct.2012.03.007.
11. Rashid Y. R. Ultimate strength analysis of prestressed concrete pressure vessels // *Nuclear Engineering and Design*. 1968. Vol. 7 (4). Pp. 334–344. DOI 10.1016/0029-5493(68)90066-6.
12. Morozov V. I., Pucharenko Ju. V. Nuclear Reactor Shell of Heavy Ferrocement // *World Applied Sciences Journal*. 2013. Vol. 23, № 13 (Problems of Architecture and Construction). Pp. 31–36. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90007. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.388.7032&rep=rep1&type=pdf>
13. Морозов В. И. Корпуса высокого давления для энергетических, строительных и специальных технологий. СПб.: СПбГАСУ, 2011. 394 с.
14. Swanson J. A. John Swanson and ANSYS — An engineering success story // *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 2015. Pp. 3–4.
15. Hui-Huang Lee. Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18. Theory, Applications, Case Studies. SDC Publications, 2018. 612 p.
16. Морозов В. И., Михайловский А. С., Бурцев В. П. Напряженно-деформированное состояние корпуса высокого давления из тяжелого армоцемента с коническими торцовыми элементами // *Строительные конструкции зданий и сооружений: межвуз. сб. № 5*. Барнаул, 1989. С. 71–77.
17. Chen C.-C., Lin K.-T., Chen Y.-J. Behavior and shear strength of steel shape reinforced concrete deep beams // *Engineering Structures*. 2018. Vol. 175. Pp. 425–435. DOI 10.1016/j.engstruct.2018.08.045.
18. Sousa-Coutinho J. Properties of hardened concrete // *ICE Manual of Construction Materials* (Forde M. (ed.)). London: Thomas Telford, 2009. Pp. 153–167. DOI 10.1680/mocm.35973.0153.
19. Bompa D. V., Elghazouli A. Y. Structural performance of RC flat slabs connected to steel columns with shear heads // *Engineering Structures*. 2016. Vol. 117. Pp. 161–183. DOI 10.1016/j.engstruct.2016.03.022.
20. Генуев Г. А., Киссюк В. Н., Тюпин Г. А. Теория пластичности бетона и железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 316 с.
21. Moss D. R., Basic M. M. Pressure Vessel Design Manual. 4th ed. Elsevier, 2013. 832 p.
22. Bao J. Q., Long X., Tan K. H., Lee C. K. A new generalized Drucker–Prager flow rule for concrete under compression // *Engineering Structures*. 2013. Vol. 56. Pp. 2076–2082. DOI 10.1016/j.engstruct.2013.08.025.
23. Öztekin E., Pul S., Hüssem M. Experimental determination of Drucker–Prager yield criterion parameters for normal and high strength concretes under triaxial compression // *Construction and Building Materials*. 2016. Vol. 112. Pp. 725–732. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.127.
24. Yu T., Teng J. G., Wong Y. L., Dong S. L. Finite element modeling of confined concrete-I: Drucker–Prager type plasticity model // *Engineering Structures*. 2010. Vol. 32(3). Pp. 665–679. DOI 10.1016/j.engstruct.2009.11.014.

References

1. Sauzay M. Mechanical behavior of structural materials for Generation IV reactors. *Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors*, 2016, pp. 191–252. DOI 10.1016/B978-0-08-100906-2.00006-9.
2. Muroga T. Refractory metals as core materials for Generation IV nuclear reactors. *Structural Materials for Generation IV Nuclear Reactors*, 2016, pp. 415–440. DOI 10.1016/B978-0-08-100906-2.00011-2.
3. Toribio J., Vergara D., Lorenzo M. Hydrogen embrittlement of the pressure vessel structural materials in a WWER-440 nuclear power plant. *Energy Procedia*, 2017, vol. 131, pp. 379–385. DOI 10.1016/j.egypro.2017.09.464.
4. Hsuan-Teh Hu, Jun-Xu Lin. Ultimate analysis of PWR prestressed concrete containment under long-term prestressing loss. *Annals of Nuclear Energy*, 2016, vol. 87, pp. 500–510. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.10.005>.
5. Karlsson B. I., Sozen M. A. Prestressed concrete deep slabs with openings. *Nuclear Engineering and Design*. 1973, vol. 25 (2), pp. 290–330. DOI 10.15554/pcij.05011977.64.79.

6. Tavakkoli I., Kianoush M. R., Abrishami H., Han X. Finite element modelling of a nuclear containment structure subjected to high internal pressure. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 2017, vol. 153, pp. 59–69. DOI 10.1016/j.ijpvp.2017.05.004.
7. Young-SunChoun, Hyung-KuiPark. Containment performance evaluation of prestressed concrete containment vessels with fiber reinforcement. *Nuclear Engineering and Technology*, 2015, vol. 47 (7), pp. 884–894. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.net.2015.07.003>.
8. Li C., Shu G., Xu B., Liu W. The resistivity calculation method of reactor pressure vessel steels after ion irradiation. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2019, vol. 451, pp. 38–41. DOI 10.1016/j.nimb.2019.04.056.
9. Narkunas E., Poskas G., Smaizys A. Impact of shield elements on the WWER-440 reactor pressure vessel activation. *Annals of Nuclear Energy*, 2019, vol. 130, pp. 394–401. DOI 10.1016/j.anucene.2019.03.008.
10. Barros J. A. O., Taheri M., Salehian H., Mendes P. J. D. A design model for fibre reinforced concrete beams pre-stressed with steel and FRP bars. *Composite Structures*, 2012, vol. 94 (8), pp. 2494–2512. DOI 10.1016/j.compstruct.2012.03.007.
11. Rashid Y. R. Ultimate strength analysis of prestressed concrete pressure vessels. *Nuclear Engineering and Design*, 1968, vol. 7 (4), pp. 334–344. DOI 10.1016/0029-5493(68)90066-6.
12. Morozov V. I., Pucharenko Ju. V. Nuclear reactor shell of heavy ferrocement. *World Applied Sciences Journal*, 2013, vol. 23, no. 13 (Problems of Architecture and Construction), pp. 31–36. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2013.23.pac.90007. Available at: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.388.7032&rep=rep1&type=pdf>
13. Morozov V. I. *Korpusa vysokogo davleniya dlya energeticheskikh, stroitel'nykh i spetsial'nykh tekhnologiy* [High-pressure shells for energy, construction, and special technologies]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2011, 394 p.
14. Swanson J. A. *John Swanson and ANSYS — An engineering success story*. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Publ., 2015, pp. 3–4.
15. Huei-Huang Lee. *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 18. Theory, Applications, Case Studies*. SDC Publ., 2018, 612 p.
16. Morozov V. I., Mikhaylovskiy A. S., Burtsev V. P. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie korpusa vysokogo davleniya iz tyazhelogo armotsementa s konicheskimi tortsovyimi elementami* [Stress-strain state of a high-pressure shell made of heavy reinforced cement with conical end elements]. *Trudy mezhvuz. conf. no. 5 «Stroitel'nye konstruksii zdaniy i sooruzheniy»* [Proceedings of inter-higher-school conf. no. 5 “Construction designs of buildings and structures”]. Barnaul, 1989, pp. 71–77.
17. Chen C.-C., Lin K.-T., Chen Y.-J. Behavior and shear strength of steel shape reinforced concrete deep beams. *Engineering Structures*, 2018, vol. 175, pp. 425–435. DOI 10.1016/j.engstruct.2018.08.045.
18. Sousa-Coutinho J. *Properties of hardened concrete. ICE Manual of Construction Materials (Forde M. (ed.))*. London: Thomas Telford Publ., 2009, pp. 153–167. DOI 10.1680/mocm.35973.0153.
19. Bompa D. V., Elghazouli A. Y. Structural performance of RC flat slabs connected to steel columns with shear heads. *Engineering Structures*, 2016, vol. 117, pp. 161–183. DOI 10.1016/j.engstruct.2016.03.022.
20. Geniev G. A., Kissyuk V. N., Tyupin G. A. *Teoriya plastichnosti betona i zhelezobetona* [Theory of plasticity of concrete and reinforced concrete]. Moscow, Stroyizdat Publ., 1974, 316 p.
21. Moss D. R., Basic M. M. *Pressure vessel design manual*. 4thed. Elsevier Publ., 2013, 832 p.
22. Bao J. Q., Long X., Tan K. H., Lee C. K. A new generalized Drucker–Prager flow rule for concrete under compression. *Engineering Structures*, 2013, vol. 56, pp. 2076–2082. DOI 10.1016/j.engstruct.2013.08.025.
23. Öztekin E., Pul S., Hüssem M. Experimental determination of Drucker–Prager yield criterion parameters for normal and high strength concretes under triaxial compression. *Construction and Building Materials*, 2016, vol. 112, pp. 725–732. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.02.127.
24. Yu T., Teng J. G., Wong Y. L., Dong S. L. Finite element modeling of confined concrete-I: Drucker–Prager type plasticity model. *Engineering Structures*, 2010, vol. 32(3), pp. 665–679. DOI 10.1016/j.engstruct.2009.11.014.