

УДК 621.039.536.2:693.55

© В. И. Морозов, д-р техн. наук, профессор,
чл.-корр. РААСН
© Э. К. Опбул, канд. техн. наук, зав. лабораторией
© Фан Ван Фук, аспирант
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: phucprodhv@gmail.com

DOI 10.23968/1999-5571-2017-14-4-87-92

© V. I. Morozov, Dr. Sci. Tech., Professor
© Eh. K. Opbul, PhD in Sci. Tech., laboratory head
© Phan Van Phuc, post-graduate student
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: phucprodhv@gmail.com

ОСОБЕННОСТИ НАПРЯЖЕНИИ-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ТОРЦОВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ВИДЕ ТОЛСТЫХ КОНИЧЕСКИХ ПЛИТ КОРПУСОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

FEATURES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF THE ABUTTING MEMBERS IN THE FORM OF THICK CONICAL PLATES OF HIGH PRESSURE SHELLS

Проведено численное исследование напряженно-деформированного состояния силовой части корпусов высокого давления при различных сопряжениях стенок и днищ под действием внешней нагрузки в виде внутреннего давления. Торцевая часть корпуса высокого давления состоит из бетонной пробки и силовой стенки из тяжелого армоцемента.

Ключевые слова: корпус высокого давления, торцевой элемент, пробка, днище, стенка, радиальные напряжения, тангенциальные напряжения, вертикальные напряжения, внутреннее давление, шпонка, контактный слой, трение.

The article presents the results of a numerical investigation of the stress-strain state of the mechanical parts of high pressure shells with various interfaces of walls and bottoms under the influence of external stress in the form of internal pressure. The abutting part of the high pressure shell consists of a concrete plug and a support strut of heavy ferrocement.

Keywords: high pressure shell, abutting member, plug, bottom, wall, radial stresses, tangential stresses, vertical stresses, internal pressure, connector, contact layer, friction.

В силу симметрии конструкции корпуса высокого давления (КВД) в качестве расчетной схемы исследуемого элемента рассматриваем 1/4 часть КВД в плоском напряженном состоянии, которая шарнирно сопряжена с отсеченными частями корпуса (рис. 1) [1–4].

Численный расчет выполнен на программном комплексе «ANSYS» на базе МКЭ для двух вариантов сопряжения контактной поверхности «пробка – стенка» [8, 10]:

- В первом варианте расчета контактный слой выполнен с устройством шпонок и без шпонок со сравнительно небольшим трением ($f = 0,15$) и при общем угле образующей $\alpha = 20^\circ$.

- Во втором варианте расчета контактный слой выполнен только на трении с коэффициентом $f = 0,7$, угол α принят равным $10, 15, 20, 25^\circ$.

Ранее были разработаны и исследованы КВД различного назначения с применением дисперсно-армированного железобетона с высоким (до 20 % по объему и более) содержанием арматуры малых диаметров — тяжелого армоцемента (ТАЦ) [1, 7–9]. Другой принципиальной особенностью предложенных конструкций КВД является применение торцевых элементов в виде толстых конических плит, выполненных из обычного железобетона и свободно опирающихся на коническое сужение силового слоя КВД.

Применение подобной конструкции соединения днищ со стенкой КВД обусловлено стремлением снизить концентрацию напряжений в угловой зоне и изгибную составляющую в днищах и стенке КВД [1].

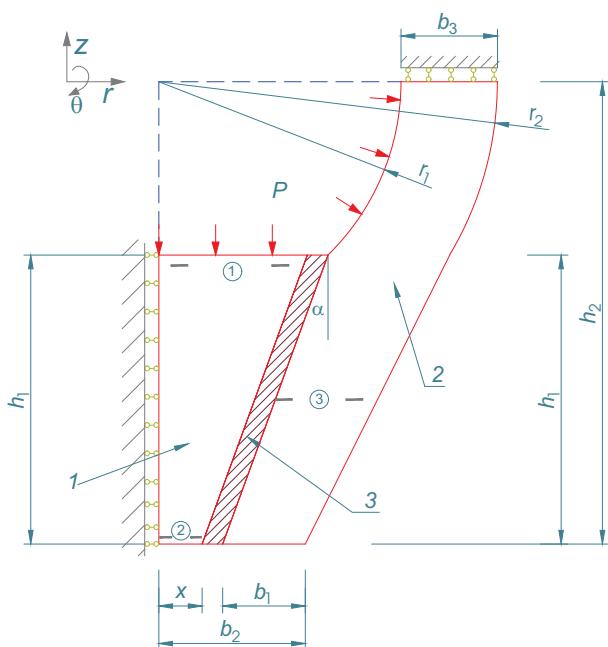
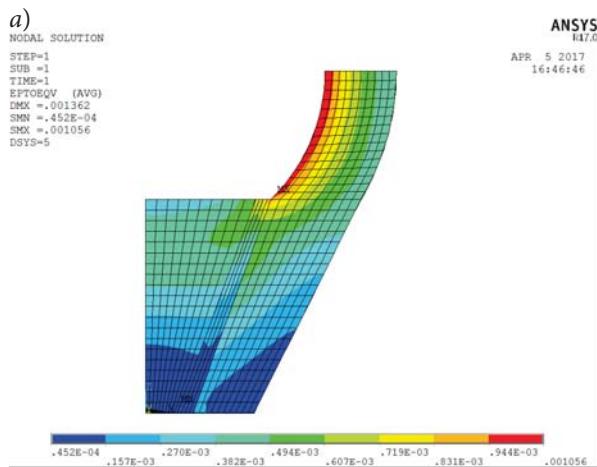


Рис. 1. Расчетная схема КВД сферической формы:
① ② ③ — номера сечений; 1 — торцовый элемент
(пробка); 2 — стенка из ТАЦ; 3 — контактная зона

Геометрические размеры ($h_1, h_2, b_1, b_2, b_3, r_1, r_2$, см. рис. 1) [1, 3, 7] и свойства материалов для численного расчета приняты согласно [1]. ТАЦ рассматривается как сплошной ортотропный материал: $E_r = 44\ 800$ МПа, $E_z = 52\ 000$ МПа, $E_\theta = 59\ 800$ МПа, $G_{rz} = 18\ 300$ МПа, $\nu = 0,1$. Упругие характеристики материала днища принимаются как для сплошного материала с изотропными свойствами. В соответствии маркой бетона имеем: $E_b = 3,5 \cdot 10^4$ МПа, $G_b = 1,5 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0,16$ [8].



Моделирование шпоночного сопряжения днищ со стенками КВД осуществляется по конструктивной схеме, предложенной В. М. Бурцевым [1], с введением специального ортотропного слоя конечной толщины, расположенного в днище. Модуль упругости этого слоя в вертикальном направлении равен модулю упругости материала днища, а в радиальном и тангенциальном направлениях принимается в 35 раз меньше [1, 5, 6, 8].

Результаты первого варианта численных расчетов, направленных на оценку влияния типа сопряжения днища и стенок на НДС торцовых участков корпуса, приведены в табл. 1–3 и на рис. 3–5.

На рис. 2 показаны возможные перемещения торцового элемента в зависимости от типа сопряжения.

Результаты расчетов второго варианта исследования приведены в табл. 4–6 и на рис. 6–8.

Выводы по результатам *первого варианта численных расчетов* (см. рис. 3–5 и табл. 1–3):

- Для случая, когда контактная зона выполнена с устройством шпонок в сечении № 2 в торцовом элементе, появляется растяжение (см. рис. 4), и в то же время в варианте без шпонок на сравнительно небольшом трении обнаруживается сжатым весь объем днища.

- В варианте со шпонками торцовый элемент под действием внешней нагрузки деформируется как свободно опертая толстая плита, для которой характерны появление сжатой и растянутой

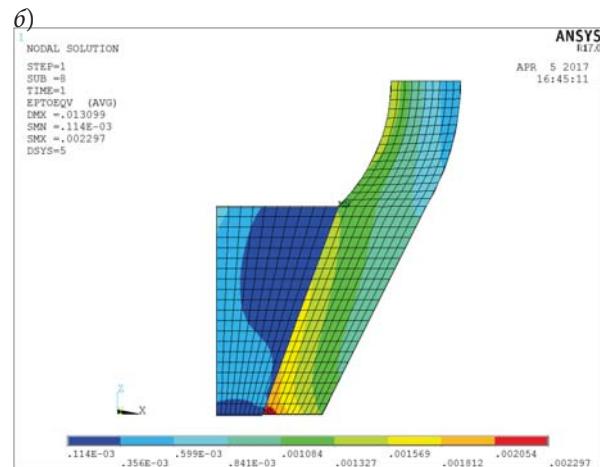


Рис. 2. Общий вид деформирования концевого участка КВД: а — сопряжение со шпонками;
б — сопряжение с трением

зон. При этом в варианте без шпонок с возможным смещением торцовый элемент работает как «сжатая пробка».

- Вариант без шпонок (с трением) обнаруживает величину тангенциальных напряжений в силовой стенке (сечение № 3, см. рис. 5) в 5,5 раза больше, чем в варианте со шпонками.

По результатам **второго варианта численных расчетов** (см. рис. 6–8 и табл. 4–6) можно

заметить, что чем больше угол наклона α , тем величина радиальных и тангенциальных напряжений в трех расчетных сечениях меньше.

По результатам численных расчетов торцового участка КВД установлено, что на НДС торцового элемента (пробки) влияет не только выбранный тип сопряжения, но и также коэффициент трения f на контактной зоне и угол наклона α .

Таблица 1

Результаты расчетов радиальных напряжений, МПа, в сечении № 1 с $\alpha = 20^\circ$

| Расстояние, м | 0,0 | 0,12 | 0,25 | 0,37 | 0,49 | 0,61 | 0,74 | 0,86 | 0,98 | 1,11 | 1,23 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| С трением | -38,32 | -36,31 | -33,90 | -31,92 | -30,30 | -28,93 | -27,73 | -26,63 | -25,33 | -22,77 | -21,44 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,11 | 0,22 | 0,32 | 0,43 | 0,54 | 0,65 | 0,76 | 0,86 | 0,97 | 1,08 |
| Со шпонками | -10,64 | -10,52 | -10,32 | -10,06 | -9,67 | -9,11 | -8,30 | -7,04 | -5,03 | 0,21 | -1,18 |

Таблица 2

Результаты расчетов радиальных напряжений, МПа, в сечении № 2 с $\alpha = 20^\circ$

| Расстояние, м | 0,00 | 0,05 | 0,09 | 0,14 | 0,19 | 0,23 | 0,28 | 0,32 | 0,37 | 0,42 | 0,46 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| С трением | -7,15 | -7,05 | -6,95 | -6,94 | -7,00 | -7,18 | -7,50 | -8,06 | -9,06 | -10,95 | -11,58 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,03 | 0,06 | 0,09 | 0,13 | 0,16 | 0,19 | 0,22 | 0,25 | 0,28 | 0,31 |
| Со шпонками | 2,02 | 2,01 | 1,98 | 1,94 | 1,88 | 1,82 | 1,73 | 1,63 | 1,52 | 1,40 | 1,17 |

Таблица 3

Результаты расчетов тангенциальных напряжений, МПа, в сечении № 3 с $\alpha = 20^\circ$

| Расстояние, м | 0,00 | 0,07 | 0,15 | 0,22 | 0,30 | 0,37 | 0,45 | 0,52 | 0,59 | 0,67 | 0,74 |
|---------------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| С трением | -13,82 | 81,37 | 77,85 | 74,74 | 72,00 | 69,56 | 67,38 | 65,43 | 63,68 | 62,09 | 60,20 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,07 | 0,15 | 0,22 | 0,29 | 0,36 | 0,44 | 0,51 | 0,58 | 0,66 | 0,73 |
| Со шпонками | 8,02 | 14,66 | 13,64 | 12,79 | 12,07 | 11,43 | 10,87 | 10,36 | 9,89 | 9,45 | 9,09 |

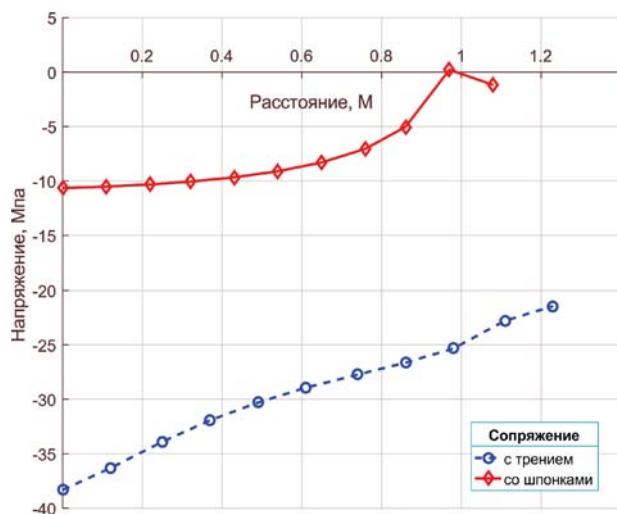


Рис. 3. Радиальные напряжения в сечении № 1
($\alpha = 20^\circ, f = 0,15$)

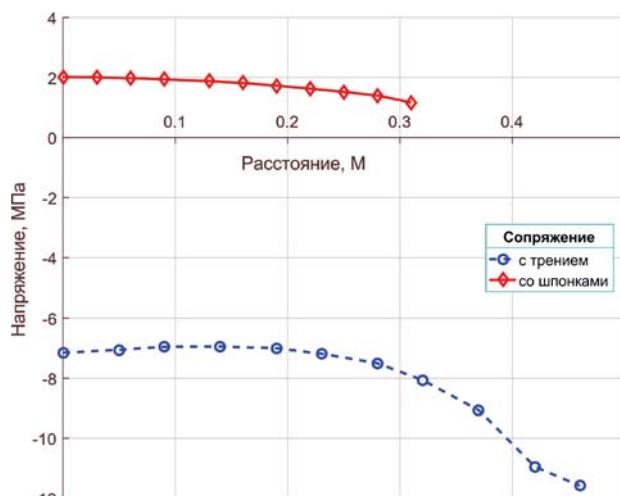


Рис. 4. Радиальные напряжения в сечении № 2
($\alpha = 20^\circ, f = 0,15$)

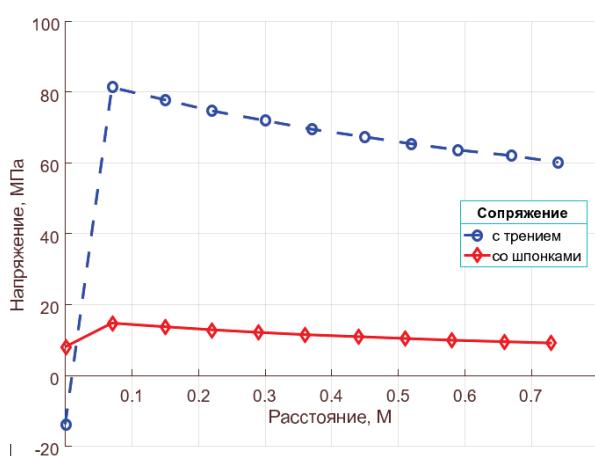


Рис. 5. Тангенциальные напряжения в сечении № 3
($\alpha = 20^\circ$, $f = 0,15$)

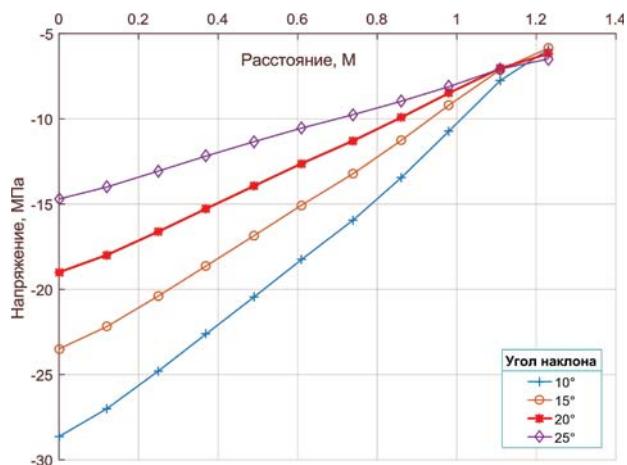


Рис. 6. Радиальные напряжения в сечении № 1
с трением ($f = 0,7$)

Таблица 4

Результаты расчетов радиальных напряжений, МПа, в сечении № 1 с трением

| Расстояние, м | 0,00 | 0,12 | 0,25 | 0,37 | 0,49 | 0,61 | 0,74 | 0,86 | 0,98 | 1,11 | 1,23 |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|-------|
| При $\alpha = 10^\circ$ | -28,64 | -27,01 | -24,79 | -22,62 | -20,46 | -18,25 | -15,93 | -13,46 | -10,73 | -7,74 | -5,93 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,12 | 0,25 | 0,37 | 0,49 | 0,61 | 0,74 | 0,86 | 0,98 | 1,11 | 1,23 |
| При $\alpha = 15^\circ$ | -23,50 | -22,19 | -20,39 | -18,63 | -16,86 | -15,06 | -13,21 | -11,27 | -9,20 | -7,11 | -5,86 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,12 | 0,25 | 0,37 | 0,49 | 0,61 | 0,74 | 0,86 | 0,98 | 1,11 | 1,23 |
| При $\alpha = 20^\circ$ | -19,00 | -17,99 | -16,61 | -15,27 | -13,94 | -12,62 | -11,28 | -9,92 | -8,49 | -7,03 | -6,18 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,12 | 0,25 | 0,37 | 0,49 | 0,61 | 0,74 | 0,86 | 0,98 | 1,11 | 1,23 |
| При $\alpha = 25^\circ$ | -14,70 | -14,00 | -13,06 | -12,18 | -11,34 | -10,54 | -9,75 | -8,97 | -8,11 | -7,07 | -6,49 |

Таблица 5

Результаты расчетов радиальных напряжений, МПа, в сечении № 2 с трением

| Расстояние, м | 0,00 | 0,09 | 0,17 | 0,26 | 0,34 | 0,43 | 0,52 | 0,60 | 0,69 | 0,77 | 0,86 |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|-------|
| При $\alpha = 10^\circ$ | 8,32 | 7,86 | 7,19 | 6,49 | 5,75 | 4,95 | 4,07 | 3,05 | 1,69 | -1,09 | -2,43 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,09 | 0,17 | 0,26 | 0,34 | 0,43 | 0,52 | 0,60 | 0,69 | 0,77 | 0,86 |
| При $\alpha = 15^\circ$ | 8,03 | 7,67 | 7,12 | 6,52 | 5,88 | 5,16 | 4,32 | 3,31 | 1,92 | -0,50 | -1,64 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,09 | 0,17 | 0,26 | 0,34 | 0,43 | 0,52 | 0,60 | 0,69 | 0,77 | 0,86 |
| При $\alpha = 20^\circ$ | 7,26 | 7,00 | 6,58 | 6,10 | 5,54 | 4,88 | 4,10 | 3,11 | 1,78 | -0,15 | -1,05 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,09 | 0,17 | 0,26 | 0,34 | 0,43 | 0,52 | 0,60 | 0,69 | 0,77 | 0,86 |
| При $\alpha = 25^\circ$ | 5,35 | 5,21 | 4,94 | 4,58 | 4,12 | 3,56 | 2,87 | 2,03 | 1,00 | -0,24 | -0,82 |

Таблица 6

Результаты расчетов тангенциальных напряжений, МПа, в сечении № 3 с трением

| Расстояние, м | 0,00 | 0,07 | 0,15 | 0,22 | 0,30 | 0,37 | 0,45 | 0,52 | 0,59 | 0,67 | 0,74 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| При $\alpha = 10^\circ$ | -8,39 | 54,75 | 52,44 | 50,35 | 48,45 | 46,71 | 45,11 | 43,63 | 42,25 | 40,97 | 40,01 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,07 | 0,15 | 0,22 | 0,30 | 0,37 | 0,45 | 0,52 | 0,59 | 0,67 | 0,74 |
| При $\alpha = 15^\circ$ | -7,17 | 50,92 | 48,79 | 46,86 | 45,12 | 43,52 | 42,06 | 40,71 | 39,46 | 38,29 | 37,34 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,07 | 0,15 | 0,22 | 0,30 | 0,37 | 0,45 | 0,52 | 0,59 | 0,67 | 0,74 |
| При $\alpha = 20^\circ$ | -6,08 | 47,72 | 45,76 | 44,01 | 42,42 | 40,99 | 39,67 | 38,46 | 37,34 | 36,30 | 35,36 |
| Расстояние, м | 0,00 | 0,07 | 0,15 | 0,22 | 0,30 | 0,37 | 0,45 | 0,52 | 0,59 | 0,67 | 0,74 |
| При $\alpha = 25^\circ$ | -5,23 | 45,10 | 43,33 | 41,75 | 40,34 | 39,08 | 37,93 | 36,88 | 35,91 | 35,02 | 34,07 |

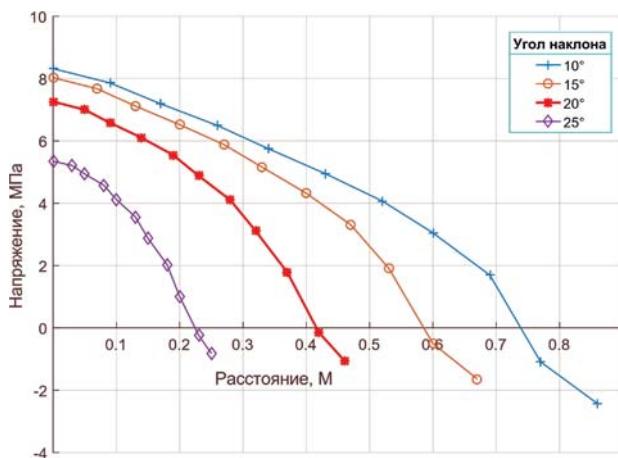


Рис. 7. Радиальные напряжения в сечении № 2 с трением ($f = 0,7$)

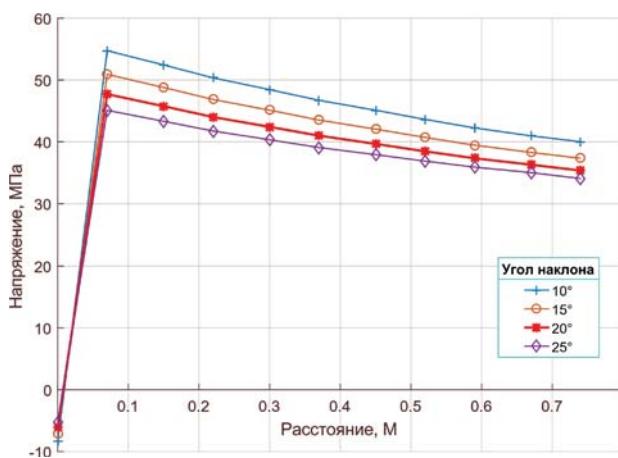


Рис. 8. Тангенциальные напряжения в сечении № 3 с трением ($f = 0,7$)

Библиографический список

- Морозов В. И. Корпуса высокого давления из тяжелого армоцемента для энергетических и строительных технологий: дис. ... д-ра техн. наук. СПб., 1994.
- Шоршинев Г. Н., Морозов В. И., Жуков В. И. Физико-механические свойства тяжелого армоцемента // Бетон и железобетон. 1985. № 10. С. 7–9.
- Шоршинев Г. Н., Морозов В. И. Сосуды высокого давления из тяжелого армоцемента для энергетических технологий // Изв. вузов. Строительство. 1993. № 10. С. 3–5.
- Шоршинев Г. Н., Морозов В. И. Развитие расчетно-теоретических исследований напряженно-деформированного состояния корпусов высокого давления из тяжелого армоцемента // Изв. вузов. Строительство. 2000. № 5. С. 144–148.

5. Способ изготовления оболочек высокого давления из предварительно напряженного железобетона: Пат. Н1434801. ФРГ. Кл. 37.

6. Ашикинази Е. К., Ганов Э. В. Анизотропия конструкционных материалов: справочник. Л.: Машиностроение, 1972. 216 с.

7. Морозов В. И., Михайловский А. С., Бурцев В. М. Напряженно-деформированное состояние корпуса высокого давления из тяжелого армоцемента с коническими торцевыми элементами // Строительные конструкции зданий и сооружений / Алтайский политехнический институт им. И. И. Ползунова. Барнаул, 1989. С. 71–76.

8. Морозов В. И., Манин С. В. Напряженно-деформированное состояние высокого давления из дисперсно-армированного железобетона // Вестник гражданских инженеров. 2004. № 1 (1). С. 61–64.

9. Морозов В. И. Корпуса высокого давления для энергетических, строительных и специальных технологий. СПб.: СПбГАСУ, 2011. 394 с.

10. Юй Хуэй. Напряженно-деформированное состояние корпуса сферической формы из тяжелого армоцемента при внутреннем нагреве и высоком давлении: дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2013.

References

1. Morozov V. I. Korpusa vysokogo davleniya iz tyazhelogo armotsementa dlya ehnergeticheskikh i stroitel'nykh tekhnologiy. Diss. dokt. tekhn. nauk [High pressure shells from heavy ferrocement for power and construction technologies. Dr. Sci. Tech. diss.]. Saint Petersburg, 1994.
2. Shorshnev G. N., Morozov V. I., Zhukov V. I. Fiziko-mekhanicheskie svoystva tyazhelogo armotsementa [Physic and mechanical properties of heavy ferrocement]. Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete, 1985, no. 10, pp. 7–9.
3. Shorshnev G. N., Morozov V. I. Sosudy vysokogo davleniya iz tyazhelogo armotsementa dlya ehnergeticheskikh tekhnologiy [High pressure vessels from heavy ferrocement for power technologies]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo – Bulletin of higher education institutions. Construction, 1993, no. 10, pp. 3–5.
4. Shorshnev G. N., Morozov V. I. Razvitiye raschetno-teoreticheskikh issledovanii napryazheno-deformirovannogo sostoyaniya korpusov vysokogo davleniya iz tyazhelogo armotsementa [Development of calculation and theory research of the intense deformed condition of high pressure shells from the heavy ferrocement]. Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo – Bulletin of higher education institutions. Construction, 2000, no. 5, pp. 144–148.
5. Sposob izgotovleniya obolochek vysokogo davleniya iz predvaritel'no napryazhennogo zhelezobetona. Pat.

No. 1434801. FRG. Kl. 37. [Production technique of high pressure shells from pre-stressed reinforced concrete]. Patent no. 1434801. FRG. Kl. 37].

6. Ashkinazi E. K., Ganov Eh. V. *Anizotropiya konstruktsionnykh materialov. Spravochnik* [Anisotropy of constructional materials. Reference book]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972, 216 p.

7. Morozov V. I., Mikhaylovskiy A. S., Burtsev V. M. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie korpusa vysokogo davleniya iz tyazhelogo armotsamenta s konicheskimi tortsevymi ehlementami* [The intense deformed condition of the high pressure shell from heavy ferrocement with conic face elements]. Stroitel'nye konstruktsii zdaniy i sooruzheniy [Building design of buildings and structures]. Polzunov Altai State Technical University (AltSTU) Publ., Barnaul, 1989, pp. 71–76.

8. Morozov V. I., Manin S. V. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie vysokogo davleniya iz dispersno-armirovannogo zhelezobetona* [The intense deformed condition of high pressure shell from the disperse reinforced concrete]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2004, no. 1 (1), pp. 61–64.

9. Morozov V. I. *Korpusa vysokogo davleniya dlya ehnergeticheskikh, stroitel'nykh i spetsial'nykh tekhnologiy* [High pressure shells for power, construction and special technologies]. St. Petersburg, SPSUACE Publ., 2011, 394p.

10. Yuy Khuehy. *Napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie korpusa sfericheskoy formy iz tyazhelogo armotsamenta pri vnutrennem nagreve i vysokom davlenii. Diss.kand. tekhn. nauk* [The intense deformed condition of the spherical shaped shell from heavy ferrocement at internal heating and high pressure. PhD in Sci. Tech. diss.]. St. Petersburg, 2013.