УДК 621.039.536.2:693.55

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

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-90-96

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

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩЕЙ СТЕНКИ КОРПУСОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТИПА СОПРЯЖЕНИЯ ЕЕ С ТОРЦОВЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

NUMERICAL RESEARCH OF THE STRESSED STATE OF THE BEARING WALL OF HIGH PRESSURE SHELLS DEPENDING ON THE TYPE OF THE WALL'S CONNECTION WITH ABUTTING MEMBERS

Проведены расчеты напряженного состояния несущей стенки корпусов высокого давления при шпоночном и гладком сопряжениях их с торцовыми элементами. Кратко описан характер работы торцовых элементов под нагрузкой в зависимости от типа сопряжения конструктивных элементов. Численный расчет выполнен на программном комплексе ANSYS. Найдены опасные сечения для случаев сопряжения элементов без шпонок и для сопряжения на шпонках и выяснено, что сопряжение на шпонках более надежное.

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

The article presents the numerical study results of the stress state of the bearing wall of high pressure shell at the key type and the smooth type connection with the abutting members. There is given a brief description of the abutting members working under load, depending on the type of structural elements' connection. Numerical calculation was performed using the ANSYS software package. There have been detected and compared some dangerous sections for connection of members without keys and for connection elements on keys. It has been established that connection on keys is more reliable.

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

Рассматривается численный расчет напряженного состояния несущей силовой стенки в зависимости от типа ее сопряжения с торцовыми элементами корпусов высокого давления (КВД) [1–3]. В концевых участках КВД, как правило, размещаются бетонные или железобетонные торцовые элементы (днища), жестко или шарнирно (свободно) сопряженные с несущей силовой стенкой корпуса [4].

Заметим, что несущая силовая стенка цилиндрических корпусов в концевых или в торцовых

зонах корпуса по технологическим соображениям имеет усеченную конусную форму.

В настоящей работе в качестве исследуемого корпуса принят опытный образец КВД [1, 3] с шарнирным сопряжением торцовых элементов и несущей силовой стенки из тяжелого армоцемента (ТАЦ). Преимуществом шарнирного варианта сопряжения стенки и днища является отсутствие «всплесков» радиальных растягивающих напряжений в угловой зоне днища и верти-

кальных растягивающих напряжений в угловой зоне стенки в окрестностях ее перелома.

Тяжелый армоцемент — это дисперсно армированный железобетон с высоким (до 20 % по объему и более) содержанием арматуры малых диаметров (3–5 мм) [5–7].

Для численных расчетов сопряжения конструктивных элементов выполнены в двух вариантах: первый — бетонный торцовый элемент в виде толстой плиты, сопряженный с несущей стенкой по гладкой поверхности (на трении), второй — железобетонный торцовый элемент с приваренными шпонками, опирающийся на несущую стенку корпуса. В качестве шпоночных элементов могут использоваться арматурные стержни больших диаметров, жестко сваренные в металлическую опалубку днища.

Отметим, что при первом варианте сопряжения, выполненного по скользящей схеме, допускается возможное смещение плиты по вертикали. Торцовый элемент в этом случае работает наподобие пробки, находящейся в состоянии всестороннего сжатия.

Во втором случае, когда сопряжение производится с установкой специальных шпонок, доминирует изгибный характер работы торцовых

элементов, которые практически свободно оперты на конусную часть несущей стенки корпуса. В этом случае торцовый элемент — осесимметричная толстая плита — может рассматриваться как совокупность множества взаимопересекающихся коротких балок.

На рис. 1 представлен общий вид опытного образца КВД (в 1/3 натуральной величины) [1] со следующими геометрическими параметрами: толщина несущей стенки 0,88 м, высота торцовых элементов 1 м, большие и малые диаметры (D, d) 3 и 1 м соответственно. Концевые участки корпуса в виде усеченного конуса с углом образующей $\beta = 20^\circ$ приняты в соответствии с [4].

На рис. 2 представлена 1/4 часть расчетной схемы КВД при сопряжении на шпонках и без них.

На рис. 3 в расчетной схеме шпонки заменяются шарнирами.

На рис. 4 представлена расчетная схема для численного расчета концевых участков КВД на ANSYS. Для анализа напряженно-деформированного состояния концевых участков в расчетной схеме выделены три расчетных сечения: 1-1 — нижняя зона контакта элементов, 2-2 — угловая зона конуса, 3-3 — в центральной части стенки.

Рис. 1. Общий вид КВД (P_0 — внутреннее давление): а — сопряжение без шпонок, где 1 — несущая стенка из ТАЦ; 2 — бетонный торцовый элемент; 3 — контактная поверхность; б — сопряжение со шпонками, где 4 — железобетонный торцовый элемент; 5 — шпонки

Рис. 2. 1/4 часть расчетной схемы КВД: а — сопряжение без шпонок; б — сопряжение со шпонками

Рис. 3. Замена шпонок шарнирами: а — сопряжение без шпонок; б — сопряжение со шпонками

Рис. 4. Расчетная схема для численного расчета на ANSYS: а — сопряжение без шпонок; б — сопряжение со шпонками

Численный расчет выполнен в программном комплексе ANSYS на базе метода конечных элементов¹ [8–9]. В силу симметрии конструкции КВД в качестве расчетной схемы исследуемого элемента рассматривается его 1/4 часть. 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, $\nu = 0,1$ [1]. Упругие характеристики материала днища принимаются как для сплошного материала с изотропными свойствами. В соответствии с маркой бетона по СП 52-101-2003² имеем $E_b = 3,6 \cdot 10^4$ МПа, $G_b = 1,5 \cdot 10^4$ МПа, $\nu = 0,16$. Материал металлической опалубки — с расчетным сопротивлением (ГОСТ 27772-2015³) $R_s = 500$ МПа.

Моделирование шпоночного сопряжения днищ со стенками КВД осуществляется по конструктивной схеме, предложенной В. М. Бурцевым [10, 11], 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 направлении принимается в 35 раз меньше [1, 12]. На рис. 5 представлены расчетные модели КВД в двух вариантах: со шпонками и без таковых.

Результаты первого и второго вариантов численных расчетов по оценке влияния типа сопряжения днища и стенок на напряженное состояние несущей стенки корпуса приведены на рис. 6–13.

Анализ результатов расчетов радиальных напряжений, представленных на рис. 6 и 9, показывает, что в сечении 1-1 обнаруживается: при сопряжении без шпонок — напряжение сжатия, при сопряжении на шпонках — небольшое напряжение растяжения. В сечениях 2-2, 3-3 в обоих вариантах наблюдается напряжение сжатия.

На рис. 7 и 10 представлены результаты расчетов тангенциальных напряжений, в обоих вариантах в несущей стенке наблюдается напряжение растяжения. Опасными являются сече-

Рис. 5. Расчетные модели ¼ КВД в программе ANSYS: а — сопряжение без шпонок; б — сопряжение на шпонках

ние 1-1 для первого варианта, сечение 2-2 — для второго.

Анализ вертикальных напряжений, представленный на рис. 8 и 11, обнаруживает напряжение растяжения; опасными являются сечение 2-2 для

Рис. 6. Эпюра радиальных напряжений в несущей стенке в расчетных сечениях (1-1, 2-2, 3-3) при сопряжении без шпонок

Рис. 7. Эпюра тангенциальных напряжений в несущей стенке в расчетных сечениях (1-1, 2-2, 3-3) при сопряжении без шпонок

¹ Using ANSYS workbench for structural analysis // Engineering Analysis with ANSYS Software. 2018. Pp. 511–540.

² СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции без предварительного напряжения арматуры.

³ ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия (с поправками).

Рис. 8. Эпюра вертикальных напряжений в несущей стенке в расчетных сечениях (1-1, 2-2, 3-3) при сопряжении без шпонок

Рис. 11. Эпюра вертикальных напряжений в несущей стенке в расчетных сечениях (1-1, 2-2, 3-3) при сопряжении на шпонках

Рис. 9. Эпюра радиальных напряжений в несущей стенке в расчетных сечениях (1-1, 2-2, 3-3) при сопряжении на шпонках

Рис. 12. Сравнение тангенциальных напряжений в сечении 1-1

Рис. 10. Эпюра тангенциальных напряжений в несущей стенке в расчетных сечениях (1-1, 2-2, 3-3) при сопряжении на шпонках

Рис. 13. Сравнение тангенциальных напряжений в сечении 2-2

первого варианта и сечение 1-1 — для второго, то есть для сопряжения на шпонках.

На рис. 12, 13 представлено сравнение тангенциальных напряжений в опасных сечениях 1-1 и 2-2.

Численное значение тангенциальных напряжений в сечении 1-1 при первом варианте, когда сопряжение выполнено без шпонок, свободно, по скользящей схеме, больше на 78 %, чем в варианте сопряжения на шпонках (см. рис. 12).

Тангенциальные напряжения в сечении 2-2 при варианте без шпонок меньше на 43 %, чем в варианте сопряжения на шпонках (см. рис. 13).

Выводы

1. Использование сопряжения с устройством специальных шпонок более благоприятно сказывается на напряженном состоянии несущей стенки.

2. Установлено, что опасными сечениями являются 1-1 (нижняя зона контакта элементов) для сопряжения элементов без шпонок и 2-2 (угловая зона конуса) для сопряжения на шпонках. В случае усиления несущей стенки, например путем устройства бандажа, бандаж для первого варианта (сопряжения без шпонок) нужно устанавливать именно на уровне сечения 1-1, а во втором, без шпонок, — на уровне сечения 2-2.

3. Тип сопряжения конструктивных элементов корпусов высокого давления, в частности между несущей силовой стенкой и торцовыми элементами, заметно влияет на напряженное состояние несущей силовой стенки.

Библиографический список

1. Морозов В. И. Корпуса высокого давления для энергетических, строительных и специальных технологий. СПб.: СПбГАСУ, 2011. 394 с.
2. 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.
3. Morozov V. I., Opbul E. K., Phuc P. Van. Behaviour of axisymmetric thick plates resting against conical surface // *Magazine of Civil Engineering*. 2019. Vol. 86, № 2. Pp. 92–104.
4. Фан Ван Фук, Морозов В. И., Опбул Э. К. Прочность железобетонных торцовых элементов корпусов высокого давления // *Вестник гражданских инженеров*. 2019. № 4 (75). С. 29–37.
5. Шоршнев Г. Н., Берестнев В. М. К вопросу о расчете дисперсно армированного железобетона с высоким содержанием арматуры на раскрытие трещин при растяжении // *Совершенствование методов расчета и исследование новых типов железобетонных конструкций: межвуз. темат. сб. тр. № 1*. Л., 1973. С. 51–55.
6. Морозов В. И. Толстостенные сферические оболочки из ТАЦ в условиях полярно-симметричного температурного поля // *Совершенствование методов расчета и исследование новых типов железобетон-*

ных конструкций: межвуз. темат. сб. тр. СПб., 2005. С. 38–43.

7. Морозов В. И., Опбул Э. К., Фан Ван Фук. Напряженное состояние и прочность торцевых элементов, опертых по конической поверхности корпусов высокого давления // *Вестник гражданских инженеров*. 2018. № 4 (69). С. 28–35.

8. 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.

9. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. *Engineering Analysis with ANSYS Software*. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2018. 562 p.

10. Шоршнев Г. Н., Морозов В. И., Жуков В. И. Физико-механические свойства тяжелого армоцемента // *Бетон и железобетон*. 1984. № 10. С. 7–9.

11. Шоршнев Г. Н., Бурцев В. М. Исследование круглых бетонных плит большой высоты // *Совершенствование методов расчета и исследование новых типов железобетонных конструкций: межвуз. темат. сб. тр. № 2* (129). Л., 1977. С. 21–26.

12. Морозов В. И., Опбул Э. К., Фан Ван Фук. Особенности напряженно-деформированного состояния торцовых элементов в виде толстых конических плит корпусов высокого давления // *Вестник гражданских инженеров*. 2017. № 4 (63). С. 87–92.

References

1. Morozov V. I. *Korpusa vysokogo davleniya dlya ehnergeticheskikh, stroitel'nykh i spetsial'nykh tekhnologiy* [High-pressure shells for power industry, construction and special technologies]. St. Petersburg, SPbGASU Publ., 2011, 394 p.
2. Morozov V. I., Pucharenko Ju. V. Nuclear reactor shell of heavy ferrocement. *World Applied Sciences Journal (Problems of Architecture and Construction)*, 2013, vol. 23, no. 13, p. 31–36.
3. Morozov V. I., Opbul E. K., Phuc P. Van. Behaviour of axisymmetric thick plates resting against conical surface. *Magazine of Civil Engineering*, 2019, vol. 86, no. 2, pp. 92–104.
4. Phan Van Phuc, Morozov V. I., Opbul E. K. *Prochnost' zhelezobetonnykh tortsovykh ehlementov korpusov vysokogo davleniya* [Strength of reinforced concrete abutting members of high-pressure shells]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2019, no. 4 (75), pp. 29–37.
5. Shorshnev G. N., Berestnev V. M. *K voprosu o raschete dispersno armirovannogo zhelezobetona s vysokim soderzhaniem armatury na raskrytie treshchin pri rastyazhenii* [On the calculation of dispersed reinforced concrete with a high content of reinforcement for

cracking during tension]. *Trudy mezhvuz. temat. sb. no. 1 «Sovershenstvovanie metodov rascheta i issledovanie novykh tipov zhelezobetonnykh konstruktsiy»* [Coll. of Int. thematic works no. 1 "Improvement of calculation methods and research of new types of reinforced concrete structures"]. Leningrad, 1973, pp. 51–55.

6. Morozov V. I. *Tolstostennnye sfericheskie obolochki iz TATs v usloviyakh polyarno-simmetrichnogo temperaturnogo polya* [Thick-walled spherical shells from heavy ferrocement in the conditions of polar-symmetric temperature field]. *Trudy mezhvuz. temat. sb. tr. «Sovershenstvovanie metodov rascheta i issledovanie novykh tipov zhelezobetonnykh konstruktsiy»* [Proc. of the Int. thematic workshop "Improvement of methods of calculation and research of new types of reinforced concrete constructions"]. St. Petersburg, 2005, pp. 38–43.

7. Morozov V. I., Opbul E. K., Phan Van Phuc. *Napryazhennoe sostoyanie i prochnost' tortsevykh ehlementov, opertykh po konicheskoy poverkhnosti korpusov vysokogo davleniya* [Stressed state and strength of the abutting members supported on the conic shaped surface of high pressure shells]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2018, no. 4 (69), pp. 28–35.

8. 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.

9. Stolarski T., Nakasone Y., Yoshimoto S. *Engineering Analysis with ANSYS Software*. 2nd ed. Amsterdam, Elsevier Publ., 2018, 562 p.

10. Shorshnev G. N., Morozov V. I., Zhukov V. I. *Fiziko-mekhanicheskie svoystva tyazhelogo armotsementa* [Physico-mechanical properties of heavy ferrocement]. *Beton i zhelezobeton – Concrete and reinforced concrete*, 1984, no. 10, pp. 7–9.

11. Shorshnev T. N., Burtsev V. M. *Issledovanie kruglykh betonnykh plit bol'shoy vysoty* [Study of round concrete slabs of great height]. *Trudy mezhvuz. temat. sb. no. 2 (129) «Sovershenstvovanie metodov rascheta i issledovanie novykh tipov zhelezobetonnykh konstruktsiy»* [Coll. of Int. thematic works no. 2 "Improvement of calculation methods and research of new types of reinforced concrete structures"]. Leningrad, 1977, pp. 21–26.

12. Morozov V. I., Opbul E. K., Phan Van Phuc. *Osobennosti napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya tortsevykh ehlementov v vide tolstykh konicheskikh plit korpusov vysokogo davleniya* [Features of the stress-strain state of the abutting members in the form of thick conical plates of high pressure shells]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 4 (63), pp. 87–92.