

Расчет тонких упругих оболочек

УДК 624.04:539.3

DOI: 10.22363/1815-5235-2017-6-10-15

РАСЧЕТ СИСТЕМЫ ИЗ ДВУХ ЗАМКНУТЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ОПОРОЙ

К.Ф. ШАГИВАЛЛЕЕВ, канд. техн. наук, доц.*

Е.К. СУРНИНА, канд. техн. наук, доц.*

С.В. ВАСИЛЬЦОВ, канд. техн. наук, ГИП**

А.А. ПШЕНОВ, инженер***

* Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.,

** ООО «Нефтегазинжиниринг»,

*** ООО «Экспресс-проект»

Рабочий адрес: 410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77

Рабочий тел. (8-452) 99-89-56. E-mail: Vasiltsov_Sergei@mail.ru

Рассмотрена пространственная система из двух замкнутых цилиндрических оболочек, имеющих на одном конце жесткое закрепление а на другом- свободный конец. Оболочки расположены на некотором расстоянии друг от друга и соединены между собой одной промежуточной связью. Одна из оболочек находится под действием нагрузки, сосредоточенной в кольцевом направлении и равномерно распределенной вдоль одной образующей. Для расчета пространственной системы используется метод сил. Таким образом, расчет пространственной системы сведен к расчету отдельных замкнутых цилиндрических оболочек. Из условия равенства радиальных перемещений в месте контакта оболочек было определено реактивное давление в промежуточной связи. Исследуется, как изменяется величина реактивного давления в связи в зависимости от местоположения промежуточной связи и геометрических параметров оболочек. Зная величину реактивного давления можно определить напряженно-деформированное состояние каждой оболочки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: оболочка, система из двух оболочек, геометрические параметры, статическая нагрузка, метод сил, перемещение, тригонометрический ряд.

Пространственные системы из замкнутых цилиндрических оболочек находят широкое применение в современной технике. Различные условия нагружения и эксплуатации замкнутых цилиндрических оболочек создают определенные трудности при расчете подобных систем. Поэтому проблема создания точных и эффективных методов расчета пространственных систем, доступных инженеру □ проектировщику, продолжает сохранять свою актуальность.

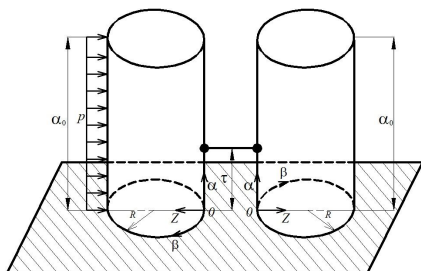


Рис.1

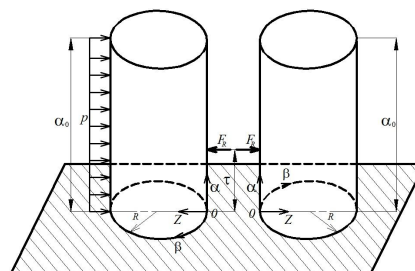


Рис.2

Рассмотрена пространственная система из двух замкнутых цилиндрических оболочек, имеющих на одном конце жесткое закрепление, а на другом – свободный конец. Оболочки расположены на некотором расстоянии друг от друга и соединены между собой одной промежуточной (жесткой) связью. Одна из оболочек находится под действием нагрузки p , сосредоточенной в кольцевом направлении и равномерно распределенной вдоль одной образующей (рис. 1). Для каждой оболочки принята своя система координат (рис. 1).

Для расчета пространственной системы применим метод сил. Основную систему выберем, разрезая горизонтальный стержень, заменяя его действием реактивной силы F_R (рис. 2). Таким образом, расчет пространственной системы сведен к расчету отдельных замкнутых цилиндрических оболочек.

Неизвестную реактивную силу F_R находим из условия сопряжения оболочек. В точке контакта оболочек радиальные перемещения оболочек равны.

В качестве примера рассмотрена пространственная система из двух замкнутых цилиндрических оболочек с одинаковыми геометрическими параметрами: длина оболочек $L = 30$ м, радиус $R = 3$ м, $\alpha_0 = L/R = 10$, толщина стенки $h = 0,16$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Одна из оболочек нагружена радиальной нагрузкой p , сосредоточенной в кольцевом направлении и равномерно распределенной вдоль образующей $\beta = \pi$.

Используя аналитические выражения для определения перемещений, усилий и моментов при действии различных радиальных нагрузок, приведенные в работе [1], был выполнен расчет пространственной системы.

Были определены радиальные перемещения в первой и второй оболочках в точке контакта оболочек. Рассмотрим случай, когда промежуточная связь находится на свободном конце [2].

Радиальные перемещения в первой оболочке (в точке контакта оболочек) от действия нагрузки p : $w_{1p}(\alpha_0; 0) = -4578,6 p / E$.

Радиальные перемещения в первой оболочке (в точке контакта оболочек) от действия неизвестной сосредоточенной силы F_R :

$$w_{1F_R}(\alpha_0; 0) = 5445,1622 \frac{F_R}{E R}.$$

Радиальные перемещения во второй оболочке (в точке контакта оболочек) от действия неизвестной сосредоточенной силы F_R :

$$w_{2F_R}(\alpha_0; 0) = 5445,1622 \frac{F_R}{E R}.$$

При определении радиальных перемещений в оболочках от действия внешней нагрузки p , сосредоточенной в кольцевом направлении и равномерно распределенной вдоль образующей, и неизвестной реактивной силы F_R нагрузки раскладывались в тригонометрические ряды по переменной β и удерживалось от внешней нагрузки 100 членов ряда, от действия сосредоточенной силы – 300 членов тригонометрического ряда.

Из условия, что в точке контакта оболочек радиальные перемещения оболочек равны, была определена неизвестная реактивная сила F_R :

$$\begin{aligned} w_{1F} + w_{1F_R} &= -w_{2F_R}; \\ -4578,6 \frac{p}{E} + 5445,1622 \frac{F_R}{E R} &= -5445,1622 \frac{F_R}{E R}, \end{aligned} \quad (1)$$

тогда

$$F_R = 0,420428 p R. \quad (2)$$

Было проведено исследование, как изменяется величина реактивного давления при изменении координаты расположения промежуточной связи (12 точек). Результаты расчета приведены в таблице 1.

Значения, приведенные в табл. 1, необходимо умножить на $10^{-4} p R$.

Рассмотрим, как изменяется величина реактивного давления при изменении геометрических параметров одной из оболочек.

Параметры первой оболочки: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_1 = 3$ м, $\alpha_0 = L/R_1 = 10$, толщина стенки $h_1 = 0,16$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Параметры второй оболочки: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_2 = 6$ м, $\alpha_0 = L/R_2 = 5$, толщина стенки $h_2 = 0,24$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (рис. 3, 4).

Таблица 1

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
106	486	1060	1844	2875	4070	5361	6407	7010	7029	6381	4205

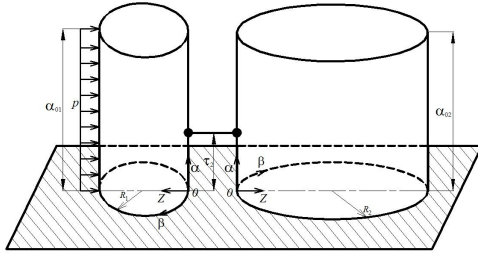


Рис.3

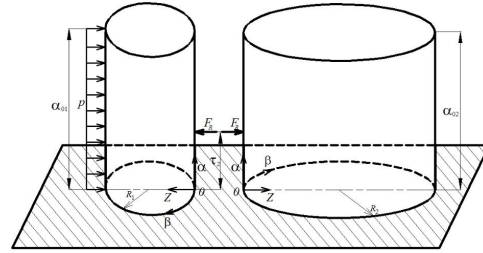


Рис.4

Результаты расчета приведены в таблице 2.

Таблица 2

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
128	592	1300	2276	3562	5034	6628	7898	8630	8665	7889	5188
64	296	650	1137	1781	2517	3314	3949	4315	4332	3945	2593

Значения, приведенные в табл. 2, необходимо умножить в третьей строке на $10^{-4}pR_1$, в четвертой строке на $10^{-4}pR_2$.

Другой пример: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_1 = 6$ м, $\alpha_0 = L/R_1 = 5$, толщина стенки $h_1 = 0,24$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Параметры второй оболочки: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_2 = 3$ м, $\alpha_0 = L/R_2 = 10$, толщина стенки $h_2 = 0,16$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (рис. 5, 6).

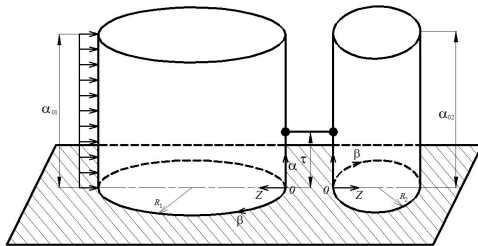


Рис.5

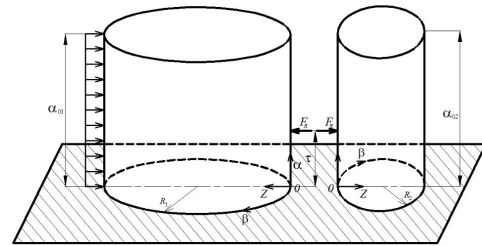


Рис.6

Таблица 3

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
337	828	1397	1991	2553	3017	3437	3667	3694	3492	3042	1936
674	1655	2794	3983	5107	6035	6874	7333	7388	6984	6083	3871

Результаты расчета приведены в таблице 3.

Значения, приведенные в табл. 3, необходимо умножить в третьей строке на $-10^{-4}pR_1$, в четвертой строке на $-10^{-4}pR_2$.

Теперь рассмотрим случай, когда изменены геометрические параметры обеих оболочек: длина оболочек $L = 30$ м, радиус $R = 6$ м, $\alpha_0 = L/R = 5$, толщина стенки $h = 0,24$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (рис.7, 8).

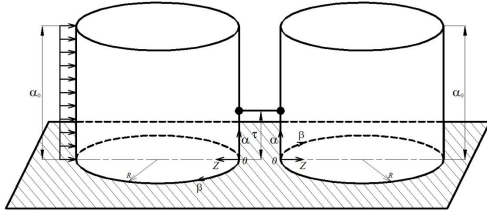


Рис.7

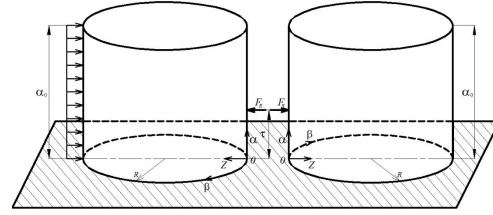


Рис.8

Результаты расчета приведены в таблице 4.

Таблица 4

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
427	1058	1805	2600	3355	3953	4501	4778	4804	4551	3983	2526

Значения, приведенные в табл. 4, необходимо умножить на $-10^{-4}pR$.

Исследуем, как изменяется величина реактивного давления в промежуточной связи, если жесткость второй оболочки равна бесконечности (рис.9, 10).

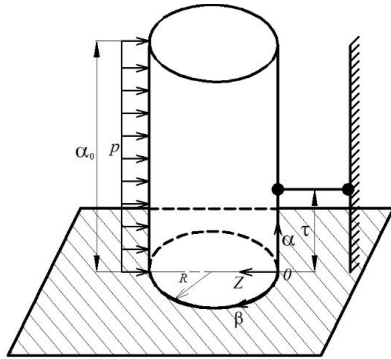


Рис.9

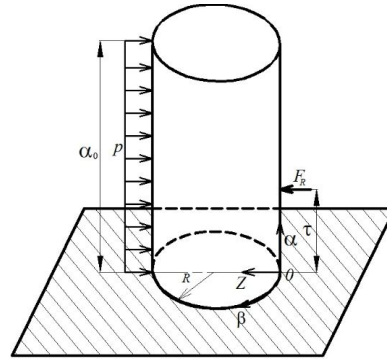


Рис.10

Сначала рассмотрим оболочку со следующими параметрами: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_1 = 3$ м, $\alpha_0 = L/R_1 = 10$, толщина стенки $h_1 = 0,16$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$. Результаты расчета приведены в таблице 5.

Таблица 5

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
212	972	2120	3688	5751	8141	10722	12815	14021	14058	12761	8410

Значения, приведенные в табл. 5, необходимо умножить на $10^{-4}pR$.

Изменим параметры оболочки: длина оболочки $L = 30$ м, радиус $R_2 = 6$ м, $\alpha_0 = L/R_2 = 5$, толщина стенки $h_2 = 0,24$ м, коэффициент Пуассона $\nu = 0,2$ (рис.11,12).

Результаты расчета приведены в таблице 6. Значения, приведенные в табл. 6, необходимо умножить на $10^{-4}pR$.

Зная F_R , можно, используя выражения, приведенные в работе [1], определить напряженно деформируемое состояние в каждой оболочке.

Используя предлагаемый подход, можно рассчитать пространственную систему, состоящую из любого количества замкнутых цилиндрических оболочек,

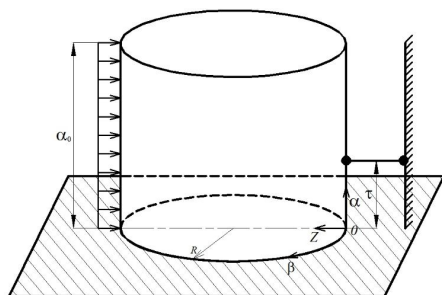


Рис. 11

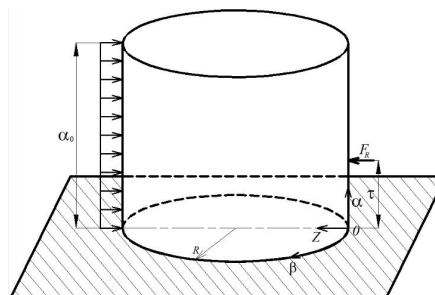


Рис. 12

Таблица 6

Местоположение промежуточной опоры τ											
$\frac{\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{6}$	$\frac{\alpha_0}{4}$	$\frac{\alpha_0}{3}$	$\frac{5\alpha_0}{12}$	$\frac{\alpha_0}{2}$	$\frac{7\alpha_0}{12}$	$\frac{2\alpha_0}{3}$	$\frac{3\alpha_0}{4}$	$\frac{5\alpha_0}{6}$	$\frac{11\alpha_0}{12}$	α_0
853	2115	3611	5200	6710	7906	9001	9539	9608	9102	7967	5051

при действии различных нагрузок, при разных геометрических параметрах оболочек. Результаты работы могут быть использованы инженерами - проектировщиками, научными работниками, аспирантами и студентами.

© Шагивалеев К.Ф., Сурнина Е.К., Васильцов С.В., Пшенов А.А. 2017

С п и с о к л и т е р а т у р ы

1. Шагивалеев К.Ф. Расчет замкнутой цилиндрической оболочки на локальные и сосредоточенные нагрузки // Саратов: Сарат. гос. техн. ун-т, 2011. 316 с.

2. Шагивалеев К. Ф. Расчет системы из двух замкнутых цилиндрических оболочек / К.Ф. Шагивалеев, Е.К. Сурнина, А.А. Пшенов // III Международная научно - практическая конференция «Ресурсоэнергоэффективные технологии в строительном комплексе»: сб. научн. трудов, том 2. – Саратов. гос. техн. ун-т. – Саратов, 2015. – С. 41—45.

Поступила в редакцию 3 июня 2017 г. Прошла рецензирование 3 сентября 2017 г.

Принята к публикации 18 октября 2017 г.

Об авторах:

ШАГИВАЛЕЕВ КАМИЛЬ ФАТЫХОВИЧ, кандидат технических наук, доцент. Окончил Саратовский политехнический институт в 1965 г. Окончил аспирантуру в Саратовском государственном техническом университете (1968), защитил кандидатскую диссертацию (1970), в 1976 г. присвоено ученое звание доцента. С 1968 г. и по настоящее время работает в Саратовском государственном техническом университете имени Ю.А. Гагарина на кафедре "Теория сооружений и строительных конструкций". Научное направление: расчет отдельных замкнутых цилиндрических оболочек при действии различных нагрузок и пространственных систем, в состав которых входят замкнутые цилиндрические оболочки. По результатам работы опубликовано 5 монографий, более 100 статей.

СУРНИНА ЕЛЕНА КАМИЛЕВНА, кандидат технических наук, доцент. Окончила Саратовский государственный университет в 1992 и Саратовский государственный технический университет в 2005 г. Защитила кандидатскую диссертацию (1996), в 2006 г. присвоено ученое звание доцента. В настоящее время работает в должности доцента в Саратовском государственном техническом университете имени Ю.А. Гагарина на кафедре "Транспортное строительство". Научное направление: расчет как отдельных замкнутых цилиндрических оболочек при действии различных нагрузок так и пространственных систем, в состав которых входят замкнутые цилиндрические оболочки. По результатам работы опубликовано 1 монография, 43 статьи.

ВАСИЛЬЦОВ СЕРГЕЙ ВИКТОРОВИЧ, кандидат технических наук. В 2009 г. окончил Саратовский государственный технический университет по специальности «Промышленное и гражданское строительство», присвоена квалификация «инженер». Окончил магистратуру того же университета по направлению «Строительство» (2011), а в 2016 г. защитил кандидатскую диссертацию. В настоящее время работает в должности главного инженера проектов в ООО «Нефтегазинжиниринг», Саратов. Научное направление: расчет как отдельных замкнутых цилиндрических оболочек при действии различных нагрузок, так и пространственных систем, в состав которых входят цилиндрические оболочки, а также расчет замкнутых круговых колец при действии различных нагрузок. По результатам работы опубликовано 23 статьи.

ПШЕНОВ АНТОН АНДРЕЕВИЧ, магистр. В 2014 г. окончил Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, присвоена квалификация «бакалавр», в 2016 г. окончил магистратуру того же университета по направлению «Строительство». В настоящее время работает в должности инженера в ООО «Экспресс-проект». Научное направление: расчет цилиндрических оболочек на действие различных нагрузок, а также пространственных систем, в состав которых входят замкнутые цилиндрические оболочки. По результатам работы опубликовано 6 статей.

Для цитирования:

Шагивалеев К.Ф., Сурнина Е.К., Васильцов С.В., Пшенов А.А. Расчет системы из двух замкнутых цилиндрических оболочек с промежуточной опорой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2017. – № 6. – С. 10—15. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-10-15.

References

1. Shagivaleev, K.F. (2011). *Calculation of the Closed Cylindrical Cover on the Local and Concentrated Loads*. Saratov: Sarat. State Technical. Univ. 316 p.
2. Shagivaleev, K. F., Surnina, E.K., Pshenov, A.A. (2015). Calculation of a system of two closed cylindrical shells. *III International Scientific and Practical Conference "Resource Energy-Efficient Technologies in the Building Complex"*: Proc. of scientific works, Vol. 2, Sarat. State. Tech. Univ., Saratov, 2015. 41—45.

CALCULATION OF THE SYSTEM OF TWO CLOSED CYLINDRICAL SHELLS WITH INTERMEDIATE SUPPORT

K.F. SHAGIVALEEV*, E.K. SURNINA*, S.V. VASILTSOV**, A.A. PSHENOV***

* The Saratov State Technical University of Gagarin Yu.A.

** LLC «Neftegasengineering», *** LLC «Express project»,

Address: 77, Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation

Tel.: (8452) 99-89-56; E-mail: Vasiltsov_Sergei@mail.ru

A spatial system of two closed cylindrical shells is considered, having rigid fixation at one end and a free end at the other. Shells are located at some distance from each other and are interconnected by one intermediate link. One of the shells is under the action of a load, concentrated in the annular direction and uniformly distributed along one generatrix. To calculate the spatial system, the force method is used. Thus, the calculation of the spatial system is reduced to the calculation of individual closed cylindrical shells. From the condition of equality of radial displacements at the point of contact of the shells, the reactive pressure in the intermediate bond was determined. The magnitude of the reactive pressure in the bond varies depending on the location of the intermediate bond and the geometric parameters of the shells. Knowing the magnitude of the reactive pressure, one can determine the stress-strain state of each shell.

Keywords: shell, system from two shells, geometric parameters, static load, method of forces, displacements, trigonometric series.

Article history: Received: June 3, 2017. Revised: September 3, 2017. Accepted: October 18, 2017.

About the authors: SHAGIVALEEV KAMIL FATYKHOVICH, PhD, Associate Professor. graduated from the Saratov Polytechnic Institute (1965), defended his thesis (1970). From 1968, he works at Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A. on the chair "Theory of Structures and Building Structures". His scientific interests: the calculation of cylindrical shells and spatial systems designed from closed cylindrical shells. 5 monographs and 100 articles have been published by him.

SURNINA ELENA KAMELEVNA, PhD, Associate Professor, graduated from Saratov State University (1992) and Saratov State Technical University (2005), defended her thesis (1996). She is an assistant professor at Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A. The scientific direction is the calculation of cylindrical shells and spatial systems made of closed cylindrical shells. According to the results of her work, she published 1 monograph, 43 articles.

VASILTSOV SERGEY VIKTOROVICH, PhD, graduated from the Saratov State Technical University (2011), defended his thesis (2016). He works as a Chief Project Engineer at LLC "Neftegazinzhiniring", Saratov. His scientific directions: the calculation of cylindrical shells and shell spatial systems, and the calculation of closed circular rings under the action of various loads. 23 articles were published.

PSHENOV ANTON ANDREEVICH graduated from the Saratov State Technical University named after Gagarin Yu.A. (2016). He works as an engineer in LLC Express-project. The scientific direction is the calculation of closed cylindrical shells and shell spatial systems. 6 articles were published by him.

For citation: Shagivaleev K.F., Surnina E.K., Vasiltsov S.V., Pshenov A.A. (2017) Calculation of the system of two closed cylindrical shells with intermediate support. *Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings*. No 6. 10—15. Doi: 10.22363/1815-5235-2017-6-10-15.