

УДК 624.074.43

Л.В. Гапонова, С.С. Гребенчук, Н.О. Псурцева, О.А. Калмиков,  
І.М. Демьяненко

Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

## ОСОБЛИВОСТІ МОДЕЛЮВАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОРТРЕТУ КОНСТРУКЦІЇ

*Представлена постановка і реалізація завдання раціоналізації конструктивних параметрів залізобетонних оболонок. В якості критерію для даної задачі приймається енергетичний принцип, згідно з яким вважається, що з усієї безлічі можливих значень шуканих параметрів системи з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх і внутрішніх зв'язків, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягне нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів.*

**Ключові слова:** *напружено-деформований стан, математичне моделювання, раціоналізація конструктивних параметрів, залізобетонна анізотропна оболонка.*

### Постановка проблеми

Покриття будівель і споруд сприймають значні навантаження, які спричиняють високий рівень напружено-деформованого стану (НДС) системи. Саме тому доцільно розглядати такі види покриття, які могли б сприймати, рівномірно розподіляти й передавати ці навантаження на опори. Для виконання цієї мети найбільше підходять оболонки різної гауссової кривизни, виконані із залізобетону.

Проте пошук раціональних конструкцій оболонок, які сприймають зазначені види навантажень, становить собою досить актуальну, але логічно незавершену проблему.

Крім того, оскільки залізобетон є доволі важким матеріалом, доцільно дослідити способи його полегшення. Одним із таких способів є замонолічування всередину конструкції вкладишів-пустотоутворювачів із пінополістиролу, які водночас формують ребра жорсткості оболонок. Водночас, надаючи ребрам жорсткості певної геометрії (за рахунок змінювання форми вкладишів), можна забезпечити найбільш прийнятний розподіл зусиль, який являє собою задану несучу здатність при обмеженому використанні матеріалу.

Резюмуючи перераховане, можна констатувати, що побудова методології формування внутрішньої геометрії з подальшою експериментальною верифікацією є своєчасною й необхідною для практики будівництва проблемою. Її вирішення дозволить підвищити ступінь надійності подібних систем, їх довговічність, а також за рахунок раціоналізації їхніх конструктивних параметрів реалізувати мінімізацію витрат матеріалів.

Основні методи розрахунку залізобетонних елементів конструкцій згідно з основними положеннями деформаційної моделі, запропонованої до проекту будівельних норм України.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Дослідженнями залізобетонних оболонок займалися такі вчені, як А.Я. Барашиков, В.М. Бондаренко, О.І. Вайнберг, Ю.О. Клімов, Г.А. Молодченко, М.В. Савіцький, Л.І. Стороженко, Г.К. Хайдуков, А.А. Гвоздев, В.В. Шугаєв, А.Л. Шагін, В.С. Шмуклер.

Чисельними дослідженнями напружено-деформованого стану залізобетону з використанням розрахункових моделей займалися у своїх роботах В.М. Бондаренко, О.І. Вайнберг, Г.А. Молодченко, М.В. Савіцький, Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій, С. А. Гапченко, А. А. Гвоздев, В. Н. Байков, О.Л. Шагін.

Незважаючи на чисельні роботи у даному напрямку на сьогодні нажалі відсутні роботи нелінійного чисельного дослідження двопоясних анізотропних оболонок з ребрами в різних напрямках. В наведених літературних джерелах створені теорії і наведені інженерні методи розрахунків оболонок [1, 2].

Поняття "раціональна конструкція" вдалося дещо конкретизувати і трансформувати за допомогою цікавих ідей і досліджень Г.В. Василькова і В.С. Шмуклера [3, 4].

Моделювання напружено-деформованого стану, геометричних параметрів з урахуванням енергетичних принципів анізотропних оболонок, розглянуті у роботах [5, 6, 7, 8, 9]

**Мета** є раціоналізація параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонок.

**Задачі дослідження:** дослідити принципово новий тип конструкції, що має задану зовнішню й розрахункову внутрішню геометрію; математично змоделювати процес деформування конструктивно-анізотропної оболонки за різних типів зовнішніх і внутрішніх впливів.

### Основний матеріал

В.С. Шмуклер у своїй роботі [10] відзначив, «що для регульованих систем з постійним об'ємом матеріалу, числом зовнішніх і внутрішніх зв'язків (зовнішні параметри) під дією статичного зовнішнього навантаження - власної ваги, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягає нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів:

$$U = \inf_{\alpha} U(\alpha^k), \quad k = 1, 2, \dots, \infty, \quad (1)$$

де  $U$  – ПЕД;  $k$  – номер варіанта порівняння;  $\alpha \in M$ ;

$M$  – безліч допустимих значень зовнішніх геометричних параметрів.

Реалізація підходу передбачає побудову взаємозв'язку між величиною енергії деформації системи і однієї або групи геометричних параметрів. Постановка подібної задачі в численному вигляді можлива при застосуванні обчислювальних програмних комплексів, однак, операція передбачає побудову значної кількості моделей, що в певній мірі ускладнює процес.

Представлена постановка і реалізація завдання раціоналізації конструктивних параметрів запропонованих залізобетонних оболонок. В якості критерію для даної задачі приймається енергетичний принцип, згідно з яким вважається, що з усієї безлічі можливих значень шуканих параметрів системи з постійним об'ємом матеріалу, потенційна енергія деформації (ПЕД) після перебудови досягне нижньої межі на раціональному поєднанні величин геометричних параметрів, що описують систему.

У розгляд вводиться вектор керуючих параметрів даної системи:

$$\{x\}^T = \{H, B, V, R, L, l, q, \delta, \Delta, h\} \quad (2)$$

де  $H$  – стріла підйому;  $B$  – довжина оболонки;  $V$  – об'єм матеріалу;  $R$  – радіус кривизни;  $L$  – проліт оболонки;  $l$  – крок ребер;  $q$  – зовнішнє навантаження;  $\delta$  – товщина обшивок;  $\Delta$  – товщина ребер;  $h$  – висота перерізу оболонки.

При цьому параметри  $H, B, R, L, q$  – позиціонуються як зовнішні, а параметри  $l, \delta, \Delta, h$  – як внутрішні.

В якості змінних параметрів прийнято крок внутрішніх ребер оболонки  $l$  (рис. 1). Решта атрибутів розрахункової моделі задані по аналогії з прийнятими раніше за винятком товщини обшивки  $\delta$ , яка в даному випадку прийнята рівною 50 мм, і стріли підйому  $H$ , прийнятої 3,8 м. Сталість обсягу матеріалу, в даному випадку, забезпечувалося шляхом підбору відповідного значення товщини ребер  $\Delta$ . Результати розрахунку наведені на графіку (рис.2).

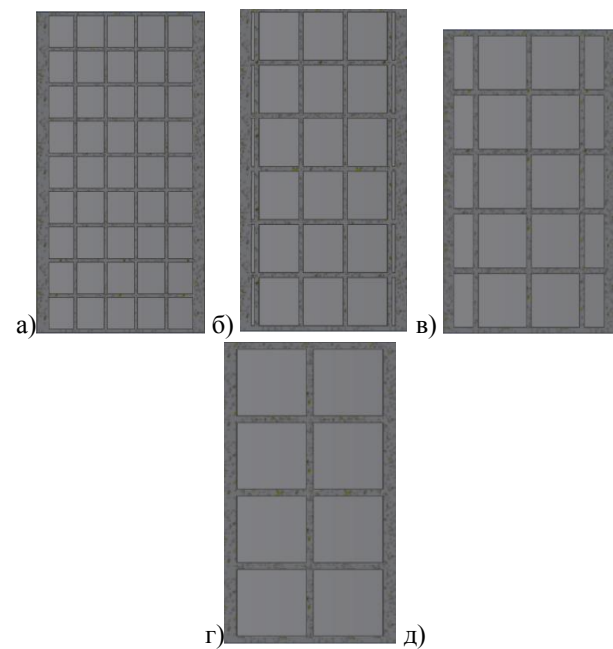


Рис. 1. Варіювання сіткою ребер. Крок ребер. а) 1000 мм; б) 1500 мм; в) 2000 мм; г) 2500 мм;

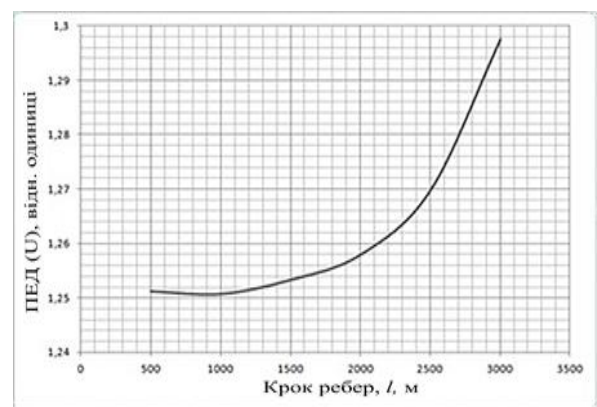


Рис. 2. Графік залежності енергії  $U$  деформації від кроку ребер

Як видно з графіка, при величині кроку ребер близькою до  $l \approx 1000$  мм ПЕД досягає нижньої межі. Таким чином, запропонований підхід відкриває можливість визначення раціональних параметрів залізобетонних елементів, що мають складну зовнішню і внутрішню геометрію.

Наведений аналіз розширено завдяки вивченню розподілу щільності енергії деформації (внутрішній параметр). В даному випадку, критерієм буде залежність

$$e \rightarrow \text{const}, \quad (3)$$

де  $e$  - щільність потенційної енергії деформації (ЩПЕД).

Вирівнювання поля ПЕД (ПК «Ліра») реалізовано за рахунок надання вкладишам-пустотоутворювачам складної форми. В цьому разі, сітка ребер не є ортогональною. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 м наведені на рис.3-7.

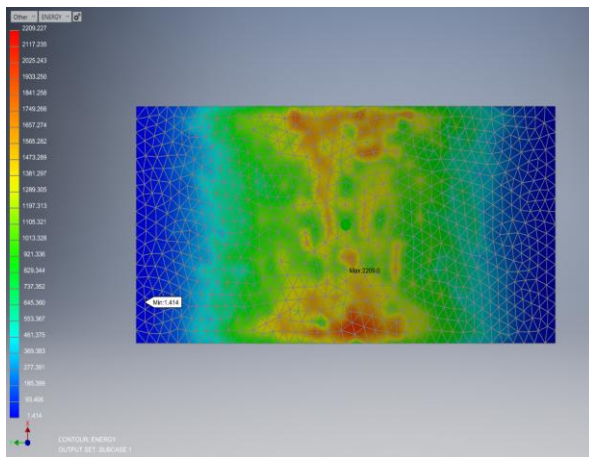


Рис. 3. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2250 мм шагом ребер 500 мм і товщиною ребра 50 мм.

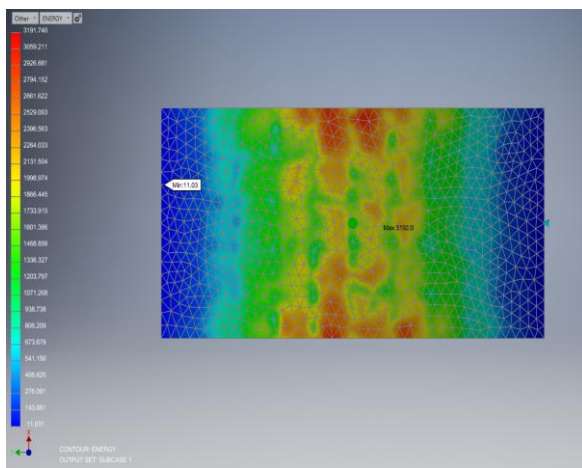


Рис. 4. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2250 мм шагом ребер 2000 мм і товщиною ребра 166,9 мм.

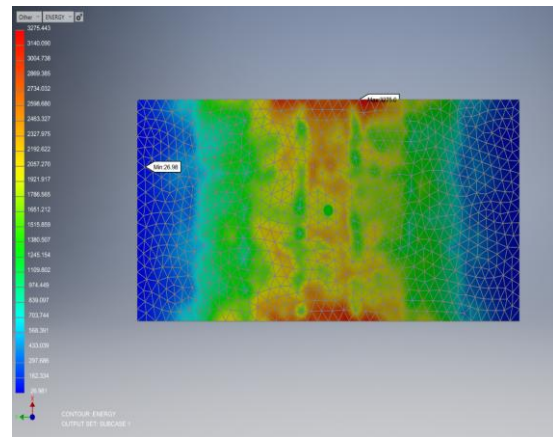


Рис. 5. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2250 мм шагом ребер 2000 мм і товщиною ребра 241,1 мм.

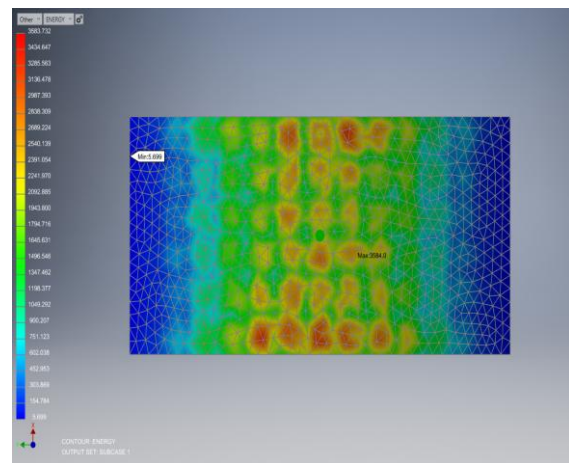


Рис. 6. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2250 мм шагом ребер 1500 мм і товщиною ребра 137,7 мм.

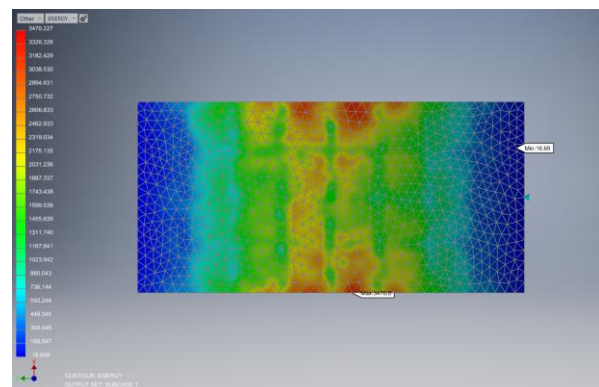


Рис. 7. Поле щільності потенційної енергії залежно від шагу ребер оболонки прогоном 9000 мм с висотою стріли 2250 мм шагом ребер 2500 мм і товщиною ребра 207,3 мм.



## Висновки

В роботі виконані чисельні дослідження двопоясних анізотропних оболонок з ребрами в різних напрямках. Визначено взаємозв'язок раціональних параметрів у конструктивно-анізотропної оболонки між ПЕД системи зовнішніх і внутрішніх раціональних параметрів: при величині кроку ребер близькою до  $l \approx 1000$  мм ПЕД досягає нижньої межі.

Застосовано енергетичний критерій, що до раціоналізації зовнішніх конструктивних параметрів залізобетонних конструктивно-анізотропних оболонок. За результатами дослідження визначено, що (для розглянутих конкретних умов) при  $H \approx 3,8$  м потенційна енергія деформації досягає нижньої межі. Отримані результати верифіковані шляхом аналізу частот власних коливань системи для всіх значень  $H$  та оцінки максимальної несучої здатності ( $q_{max}$ ) оболонки.

## Література

1. Баженов, В. А. Нелинейное деформирование и устойчивость упругих неоднородных оболочек при термосиловых нагрузках [Текст] / В.А. Баженов, Н.А. Соловей // Прикладная механика. – 2009. – Т. 45. – №. 9. – С. 3-40.
2. Лехницкий, С.Г. Теория упругости анизотропного тела [Текст] / С.Г. Лехницкий. - М.: Наука, 1977. -416 с.
3. Городецкий, А. С. Информационные технологии расчета и проектирования строительных конструкций. [Текст] / А. С. Городецкий, В. С. Шмуклер, А. В. Бондарев. - Харьков: НТУ «ХПИ», 2003. - 889 с.
4. Шмуклер, В.С. Исследование работы пологих железобетонных оболочек. [Текст]: дис. канд. техн. наук / Шмуклер В.С. - Киев. 1977. - 188 с.
5. Babaev, V. N., Shmukler, V.S., Feirushah, S.H., Gaponova, L.V., Grebenchuk, S.S., Kalmikov, O.A. (2016) Analysis of Stress-Strain State of Spherical Roof Shell. 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016; April 12-14, 2016. Kurdistan: Salahaddin University-Erbil, Iraq, 42-49.
6. Kalmykov, O.A., Gaponova, L.V., Reznik, P.A. and Grebenchuk, S.S. (2017) Study of fire-resistance of reinforced concrete slab of a new type. 6 th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017" (Transbud-2017) 10 July 2017.
7. Kalmykov, O.A., Gaponova, L.V., Reznik, P.A. and Grebenchuk, S.S. (2017) Use of information technologies for energetic portrait construction of cylindrical reinforced concrete shells. 6 th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017" (Transbud-2017) 10 July 2017.
8. Гапонова, Л.В. Экспериментально-теоретичне дослідження напружено - деформованого стану сферичної оболонки покриття [Текст] / Л.В. Гапонова, О.А. Калмиков, С.С. Гребенчук // Збірник наукових праць

Українського державного університету залізничного транспорту. – 2015. – Вип.157. – С.102-113.

9. Гапонова, Л.В. Напряженно-деформируемое состояние цилиндрической оболочки [Текст] / Л.В. Гапонова, О.А. Калмиков, С.С. Гребенчук // Коммунальное хозяйство городов. – 2016. – Вып. 126. – С 9-18.

10. Шмуклер, В. С. Новые энергетические принципы рационализации конструкций [Текст] / В. С. Шмуклер // Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту. - 2017. - Вип. 167. - С. 54-69.

## References

1. Bazhenov, V.A., Solovei, N.A. (2009) Nonlinear deformation and stability of elastic inhomogeneous shells under thermal loadings. *Applied Mechanics*, 45(9), 3-40.
2. Lehnitsky, SG (1977) Theory of elasticity of an anisotropic body. *Moscow: Nauka*, 416.
3. Gorodetsky, A.S., Shmukler, V.S., Bondarev, A.V. (2003) *Information technology of calculation and design of building structures*. Kharkov: NTU "KhPI", 889.
4. Schmuckler, V.S. (1977) Study of the work of gently sloping reinforced concrete shells. *diss. cand. tech. Sciences*. Kiev, 188.
5. Babaev, V. N., Shmukler, V.S., Feirushah, S.H., Gaponova, L.V., Grebenchuk, S.S., Kalmikov, O.A. (2016) Analysis of Stress-Strain State of Spherical Roof Shell. 1 st International Conference on Engineering and Innovative Technology, SU-ICEIT 2016; April 12-14, 2016. Kurdistan: Salahaddin University-Erbil, Iraq, 42-49.
6. Kalmykov, O.A., Gaponova, L.V., Reznik, P.A. and Grebenchuk, S.S. (2017) Study of fire-resistance of reinforced concrete slab of a new type. 6 th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017" (Transbud-2017) 10 July 2017.
7. Kalmykov, O.A., Gaponova, L.V., Reznik, P.A. and Grebenchuk, S.S. (2017) Use of information technologies for energetic portrait construction of cylindrical reinforced concrete shells. 6 th International Scientific Conference "Reliability and Durability of Railway Transport Engineering Structures and Buildings MATEC Web Conf. Volume 116, 2017" (Transbud-2017) 10 July 2017.
8. Gaponova, L.V., Kalmikov, O.A., Grebenchuk, S.S. (2015) Experimental-theoretician of the imprinted spun-shaped deformation of a spherical shell of pokrtyta. *Zbirnik naukovykh praat of the Ukrainian state university to the hall of transport*, 157, 102-113.
9. Gaponova, L.V., Kalmikov, O.A., Grebenchuk, S.S. (2016) Stress-deformable state of a cylindrical shell *Communal economy of cities*, 126, 9-18.
10. Shmukler, V.S. (2017) New Energy Principles for the Rationalization of Structures . *Zbirnik Naukovykh Prats of the Ukrainian State University to the Hall of Transportation*, 167, 54-69.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.С. Шмуклер, Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова, Україна

**Автор:** ГАПОНОВА Людмила Вікторівна  
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри  
будівельних конструкцій  
Харківський національний університет міського  
господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – garplyudmila@gmail.com  
ID ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6038-2624>

**Автор:** ГРЕБЕНЧУК Сергій Сергійович  
гол. інженер  
ООО «Будівельник», м. Харків  
E-mail – a.mania0502@icloud.com

**Автор:** ПСУРЦЕВА Ніна Олексіївна  
кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри  
будівельних конструкцій  
Харківський національний університет міського  
господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – nina\_psurtsseva1@ukr.net

**Автор:** КАЛМИКОВ Олег Олександрович  
кандидат технічних наук, доцент кафедри  
будівельних конструкцій  
Харківський національний університет міського  
господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – olegkalmikov010@gmail.com

**Автор:** ДЕМЬЯНЕНКО Іван Миколайович  
студент 5 курсу  
Харківський національний університет міського  
господарства імені О.М. Бекетова  
E-mail – olegkalmikov010@gmail.com

## FEATURES OF MODELING OF ENERGY PORTRAIT OF CONSTRUCTION

L. Gaponova, S. Grebenchuk, N. Psurtseva, O. Kalmykov, I. Demyanenko

O.M. Beketov National University of Urban Economics in Kharkiv, Ukraine

*Presentation and realization of the task of rationalization of structural parameters of reinforced concrete shells is presented. As a criterion for this task an energy principle is adopted, according to which it is assumed that from the whole set of possible values of the desired parameters of the system with a constant volume of material, the number of external and internal connections, the potential energy of deformation (DER) after the perestroika will reach the lower limit on a rational combination of values of geometric parameters.*

*The energy principle is taken as a criterion for this task, according to which it is believed that out of numerous possible values of the searched parameters of the system with the constant amount of material, number of external and internal connections, the strain potential energy (SPE) after the reconstruction will reach the lower limit on the rational connection of the geometrical parameters describing the system, i.e.:*

$$U = \inf_{\alpha} U \alpha^k, \quad k = 1, 2, \dots, \infty$$

*where  $k$  – is the comparison variant number;  $\alpha$  -  $M$ ,  $M$  – geometrical parameters tolerance range.*

*In this case, the approach realization presupposes the construction of interconnection between the system energy deformation value and one or group of the geometrical parameters. The suggested procedure allows automatic establishment of the connection between the system SPE and any geometrical parameters which describes it.*

*Autodesk software bunch was taken as an instrumentarium for the solution of the task set. The key role here belongs to the script recorded in the Dynamo visual programming, which allows automatic formation of the shell geometry through specifying all necessary parameters of  $\{x\}$ .*

*The determined interconnection of the rational parameters of the constructive anisotropic shell between SPE of the system of internal and external rational parameters: with ribs step value of about  $l \approx 1000$  mm SPE reaches the lower limit. The obtained results of the external parameters are verified through the analysis of the frequencies of the systems natural vibration frequencies for all values of rise  $H$  and maximum shell bearing capacity ( $q_{max}$ ). It was determined that for the conditions at the camber of arch  $H \approx 3,8$  m SPE reaches the lower limit.*

**Keywords:** *stress-deformed state, mathematical modeling, rationalization of structural parameters, reinforced concrete anisotropic shell.*