

УДК 539.3

О. В. Белова, А. П. Дзюба, д-р техн. наук

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ КОНТУРА КВАДРАТНОГО ОТВЕРСТИЯ НА ПРОЧНОСТЬ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ОСЕВОМ РАСТЯЖЕНИИ

В статье обсуждаются результаты экспериментального исследования прочности цилиндрических оболочек, ослабленных двумя квадратными отверстиями, расположенными диаметрально в окружном направлении и симметрично относительно среднего поперечного сечения, при нагружении осевой растягивающей силой. Углы контуров отверстий повреждены прямолинейными разрезами. Исследуется влияние размера отверстия и длины трещины (разреза) на величину критической силы потери прочности оболочки.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, оболочка, квадратное отверстие, повреждения контура.

Введение. Одной из важнейших задач механики является исследование прочности и несущей способности оболочечных конструкций, широко используемых в аэрокосмической, судостроительной и других областях машиностроения и строительства под действием различных силовых нагрузок. Большинство таких оболочек имеют отверстия различной формы, размеров и размещения, наличие которых обусловлено как эксплуатационными или технологическими требованиями, так и повреждениями различной природы [1, 3]. Очевидно, что наличие таких отверстий приводит к снижению величины критической нагрузки несущей конструкции, необходимость прогнозирования которой является весьма важной с практической точки зрения проблемой.

Исследование несущей способности таких тонкостенных оболочечных элементов при наличии концентраторов напряжений в виде отверстий или разрезов [1–3, 6–8] приводит к существенной неоднородности напряжённо-деформированного состояния в области отверстия и, как следствие, нелинейности соответствующей математической модели [2, 6] и связано с необходимостью решения достаточно сложных математических задач.

Проблема прогнозирования остаточной несущей способности таких оболочек, ослабленных отверстиями, ещё более усложняется в случае появления в процессе эксплуатации дополнительных концентраторов напряжений в виде трещин (разрезов) контура отверстий оболочек. Одним из наиболее надёжных подходов к решению данной проблемы является экспериментальное моделирование поведения оболочек при наличии таких повреждений [4, 5, 9].

Описание эксперимента. В представленной статье объектом исследования является процесс разрушения (потери несущей способности) цилиндрической оболочки с двумя симметрично расположенными по длине и в окружном направлении оболочки квадратными $a \times a$ отверстиями, углы которых имеют прямолинейные разрезы длиной l в направлении линий диагоналей отверстия. Развёртка боковой поверхности исследуемой оболочки представлена на рис. 1.

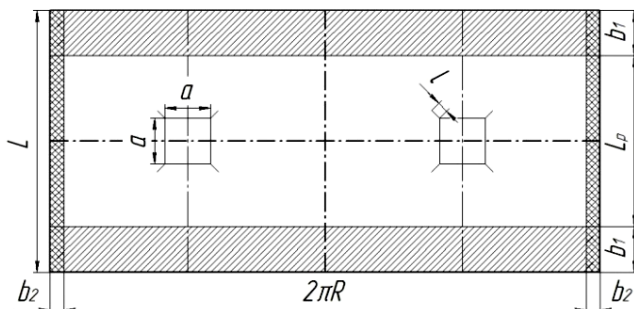
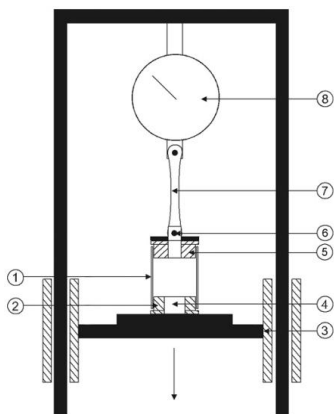


Рис. 1 – Развёртка боковой поверхности оболочки с разрезами углов контура двух квадратных отверстий

Здесь А и В – зоны приклея заготовки на торцы и шов цилиндрической оболочки шириной $b_1 = 20 \times 10^{-3} \text{ мм}$ и $b_2 = 6 \times 10^{-3} \text{ мм}$ соответственно. Внутренний радиус всех моделей был равен $R = 37,5 \times 10^{-3} \text{ мм}$, рабочая длина $L_p = 75 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Для передачи на оболочку продольного усилия на криволинейных кромках закреплялись стальные торцы, наличие которых обеспечивало условия жёсткого защемления.

Для изготовления оболочек использовалась специальная чертёжная бумага марки «В» ГОСТ 597-73, эффективность которой в качестве материала была неоднократно доказана многочисленными испытаниями. Впервые возможность использования подобного материала для исследования тонкостенных оболочек была показана Р. В. Роди и Е. Е. Лундквистом [11], позже – В. М. Чебановым [10], а системные исследования проведены Е. Ф. Прокопало [9]. Основные механические характеристики материала моделей оболочек были получены в результате специально проведенных экспериментальных измерений и имели следующие значения: модули упругости $E_x = 6,9 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $E_y = 3,45 \cdot 10^9 \text{ Па}$, коэффициенты Пуассона $\mu_x = 0,3$, $\mu_y = 0,15$ и пределы прочности $\sigma_{x,y} = 4,5 \cdot 10^9 \text{ Па}$, $\sigma_{y,x} = 3 \cdot 10^9 \text{ Па}$. Здесь индексы x и y соответствуют главным направлениям ортотропии бумаги. Толщина листа составляла $\delta = 0,23 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Более детальное описание технологии изготовления моделей и их механические характеристики приведены в [4, 5, 9].

Нагружение моделей оболочек осуществлялось при помощи испытательного пресса МР-0,5-1, схема которого изображена на рис. 2.



- 1 – испытуемая оболочка, 2 – нижний торец, 3 – подвижная платформа пресса,
4 – крепёжный винт для жесткого закрепления, 5 – верхний торец,
6 – подвижный крепёжный винт, 7 – подвес, 8 – динамометр.

Рис. 2 – Схема испытательной установки (пресс МР-0,5-1)

Испытуемая оболочка (1) нижним торцом (2) крепилась к подвижной платформе пресса (3) при помощи крепёжного винта (4) для жесткого закрепления, в то время как верхний торец (5) подвижным крепёжным винтом (6) соединялся с подвесом (7), обеспечивающим измерение критической нагрузки динамометром (8).

Для проведения испытаний каждая модель оболочки изготавливалась и испытывалась в двух экземплярах. При превышении заданной погрешности в значении критических нагрузок для двух идентичных оболочек изготавливались и испытывались дополнительные модели.

Оболочки имели квадратные отверстия следующих размеров: $a = \{0, 3, 5, 8, 10, 12, 15, 17, 20, 23, 26, 30, 35, 40\}$ мм и разрезы в углах контура длиной $l = \{0, 2, 5, 10\}$ мм. Сплошные оболочки представляли собой контрольную серию из восьми моделей.

Таким образом, всего было изготовлено и испытано 112 моделей. Для удобства проведения эксперимента и обработки результатов, кроме оболочек без отверстий, были сформированы 4 серии оболочек в соответствии с выбранными длинами разрезов для указанных выше размеров отверстий.

Анализ полученных результатов. Выводы. На рис. 3 представлены осреднённые экспериментальные значения относительной критической растягивающей силы $\tilde{P}_{кр}$ в зависимости от размера a квадратного отверстия. Здесь $\tilde{P}_{кр} = P_{кр} / P_{кр}^o$, где $P_{кр}$ и $P_{кр}^o$ – величины критической нагрузки для оболочки с отверстиями и для сплошной оболочки, соответственно.

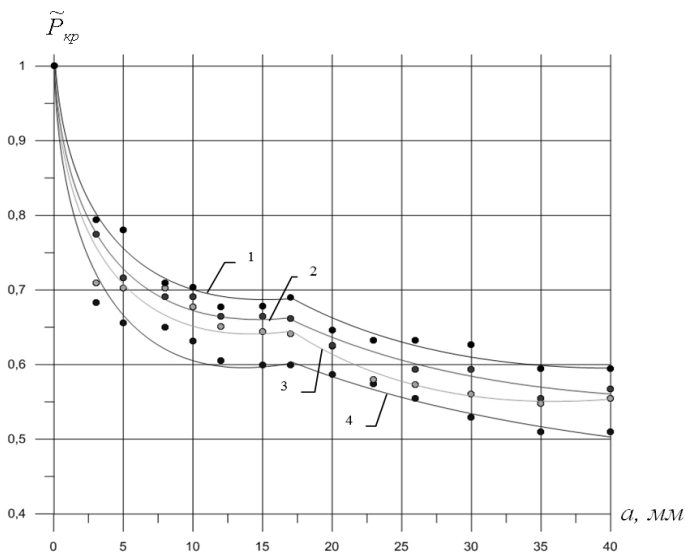


Рис. 3 – Зависимость относительной критической (разрушающей) нагрузки $\tilde{P}_{кр}$ от размера отверстий a для различных длин разрезов контура l

Изображенные на рис. 3 аппроксимирующие кривые были получены с использованием изложенного в [4] алгоритма квадратичной дискретно-непрерывной аппроксимации. Полученные таким образом линии 1, 2, 3, 4 на рис. 3 соответствуют различным значениям критической силы для оболочек с величиной прямолинейного разреза $l = \{0, 2, 5, 10\}$ мм в направлении диагоналей квадратного отверстия в зависимости от размера a его сторон.

С увеличением размера отверстия a и длины разреза l (линии 1–4, рис. 3) критическая нагрузка, как и следовало ожидать, уменьшается. Рассматривая полученные данные с точки зрения влияния размера a квадратных отверстий, следует отметить, что зависимость $\tilde{P}_{кр}(a)$ для каждой кривой является неравномерной. Характерным свойством каждой кривой является наличие точки излома в диапазоне $16 \leq a \leq 18$, где две аппроксимирующие линии стыкуются между собой.

Для оценки влияния размера отверстий и длины разрезов на несущую способность исследуемых оболочек, в табл. 1 приведены численные значения снижения критической силы $\Delta\tilde{P}_{кр}^l$ потери их прочности относительно $\tilde{P}_{кр}^0$ для сплошной оболочки, в зависимости от изменений размера отверстий a (табл. 1, а) на отдельных диапазонах, а также $\Delta\tilde{P}_{кр}^2$ – значения снижения критической силы в зависимости от изменений размера разрезов (табл. 1, б).

Таблица 1 – Данные о снижении критической нагрузки в зависимости от размера отверстия a и длины l повреждения контура

а)		б)			
$a, \text{мм}$	$\Delta \tilde{P}_{кр}^l$	$\Delta \tilde{P}_{кр}^2$			
от 0 до 5	25÷35 %	$\Delta l, \text{мм}$	2	5	10
от 5 до 10	5 %	$a, \text{мм}$	2	5	10
от 10 до 15	1÷2 %	5	4%	7%	14%
от 15 до 40	8÷10%	10	4 %	7%	14%
Всего:	38÷52%	15	4%	7%	13%
		40	6%	8%	15%

Полученные экспериментальные данные показывают (рис. 3), что наиболее существенное падение несущей способности происходит при наличии на оболочке отверстий наименьшего из исследуемых размеров. В частности, при $a=3\text{мм}$ снижение критической нагрузки $\Delta \tilde{P}_{кр}^l$ составляет от 25% (для оболочек без повреждений контуров, $l=0\text{мм}$) до 35% (для длины разреза $l=10\text{мм}$).

При увеличении же размеров отверстия в промежутке от $a=5\text{мм}$ до $a=10\text{мм}$ падение несущей способности оболочек замедляется и составляет около 5%. При изменении размеров отверстий в промежутке от $a=10\text{мм}$ до $a=15\text{мм}$ падение критической нагрузки фактически не происходит и находится в границах погрешности эксперимента (от 1% до 2% для наименьшей $l=0\text{мм}$ и наибольшей $l=10\text{мм}$ длин разреза, соответственно), то есть фактически не зависит от размера отверстия. Далее, в довольно широком диапазоне размеров отверстий, от $a=15\text{мм}$ до $a=40\text{мм}$ (точки, находящиеся правее излома кривых 1–4 на рис. 3), падение значений $\tilde{P}_{кр}$ для каждой кривой составляет 8–10% на всем рассматриваемом промежутке.

Что касается зависимости критической нагрузки от длины разрезов, то в табл. 1, б приведены значения $\Delta \tilde{P}_{кр}^2$ падения критической нагрузки для оболочек с разрезами $l=\{0, 2, 5, 10\}$ мм по сравнению с $\tilde{P}_{кр}$ для оболочек без разрезов $l=0\text{мм}$ для размеров отверстий от $a=5, 10, 15, 40\text{мм}$.

Из этих результатов следует, что при увеличении размера отверстия a разница между критической нагрузкой для оболочек с разрезами и оболочек без разрезов для выбранных различных значений длины l .

Обращает на себя внимание также то, что полученные для различных длин разрезов кривые 1–4 между собой качественно подобны, что позволяет использовать полученные данные для прогнозирования несущей способности оболочки для различных длин разрезов l .

Далее, на рис. 4–7 приведены картины разрушения (потери несущей способности) оболочек с различными размерами отверстий a и длинами разрезов l . Разрушение оболочек без повреждений контура происходит по ослабленному сечению, вдоль одной из горизонтальных сторон сечения (рис. 4).

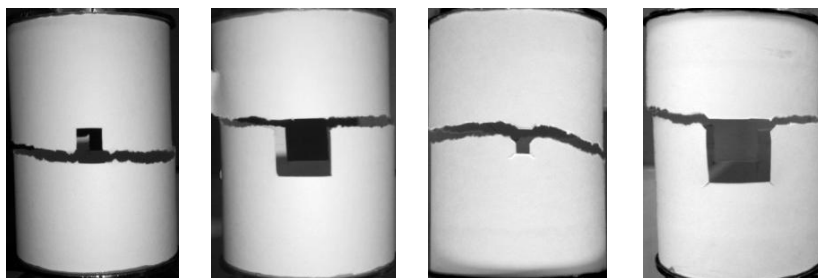


Рис. 4 – Оболочка без разрезов ($l = 0\text{ мм}$) после потери прочности:

а) $a = 10\text{ мм}$; б) $a = 20\text{ мм}$

Рис 5 – Оболочка с разрезом $l = 2\text{ мм}$ после потери прочности:

а) $a = 5\text{ мм}$; б) $a = 23\text{ мм}$

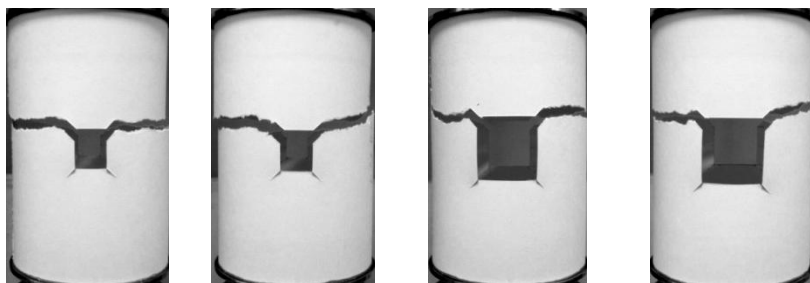


Рис. 6 – Оболочка с разрезами $l = 5\text{ мм}$ после потери прочности:

а) $a = 12\text{ мм}$; б) $a = 23\text{ мм}$

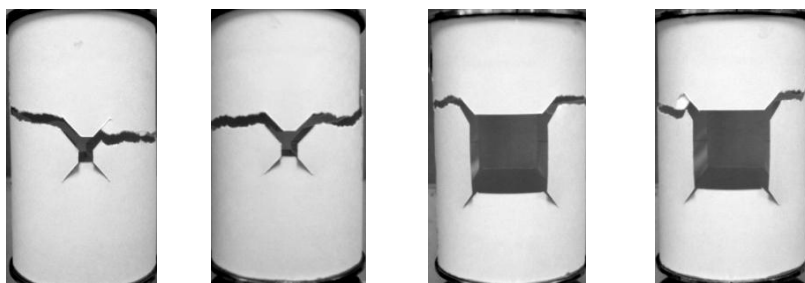


Рис. 7 – Оболочка с разрезами $l = 10\text{ мм}$ после потери прочности:

а) $a = 5\text{ мм}$; б) $a = 30\text{ мм}$

Картини потери несущей способности оболочек с разрезами длиной $l = 2, 5$ и 10 мм в углах контуров отверстий на всём промежутке изменения размеров a указывают на то, что инициатором разрушения является трещина (разрез) (рис. 5–7).

Выводы. Таким образом, можно сделать вывод о том, что наличие и величина прямолинейных разрезов длиной от $l=0\text{мм}$ до $l=10\text{мм}$ в направлении диагонали квадратного отверстия для рассмотренных в эксперименте размеров отверстия от $a=3\text{мм}$ до $a=40\text{мм}$ является инициатором (характерным образом) разрушения оболочки (рис. 3) и снижает её несущую способность с увеличением длины разреза l . Что касается величины отверстий a , то значение $\tilde{P}_{кр}$ резко снижается с появлением даже малого отверстия, далее наблюдается уменьшение влияния изменения размера a на величину критической нагрузки. После излома графика зависимости $\tilde{P}_{кр}(a)$ (рис. 3), увеличение размеров отверстий приводит к монотонному снижению значения критической нагрузки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Ашмарин Ю. А.** Устойчивость оболочек, ослабленных отверстиями (обзор) / Ю. А. Ашмарин, А. Н. Гузь // Прикл. механика. – 1973. – Т. IX, вып. 4. – С. 3–15.
2. **Гузь А. Н.** Концентрация напряжений около отверстий в тонких оболочках / А. Н. Гузь // Прикл. механика. – 1969. – Т. V, вып. 3. – С. 3–17.
3. **Гузь А. Н.** Разрушение и устойчивость тонких тел с вырезами при растяжении (обзор) / А. Н. Гузь, М. Ш. Дышель // Прикл. механика. – 1990. – Т. 26, № 11. – С. 3–24.
4. **Дзюба П. А.** Исследование и сплайн-регрессионный анализ устойчивости цилиндрических оболочек, ослабленных регулярно расположенными круговыми отверстиями / П. А. Дзюба, Е. Ф. Прокопало // Проблеми обчислювальної механіки і міцності конструкцій: зб. наук. праць. – Д. : Изд-во ДНУ, 2006. – Вып. 10. – С. 27–37.
5. **Дзюба П. А.** Міцність циліндричної оболонки, послабленої випадково розташованими прямолінійними розрізами, при розтязі осьюою силою / П. А. Дзюба, Е. Ф. Прокопало, О. О. Солонін // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла. – Д. : Ліра, 2009. – Вып. 10. – С. 97–108.
6. **Дышель М. М.** Исследование деформирования цилиндрической оболочки в окрестности разреза при растяжении / М. М. Дышель // Прикл. механика. – 1984. – Т. 20, № 3. – С. 108–110.
7. **Дышель М. М.** Растяжение цилиндрической оболочки с разрезом / М. М. Дышель // Прикл. механика. – 1984. – Вып. 18. – С. 63–65.
8. **Дышель М. М.** Устойчивость цилиндрической оболочки с трещиной при растяжении / М. М. Дышель // Прикл. механика. – 1989. – Т. 25, № 6. – С. 15–21.
9. **Прокопало Е. Ф.** Устойчивость цилиндрических оболочек, ослабленных случайно расположенными прямолинейными разрезами, при действии осевой сжимающей силы / П. А. Дзюба, Е. Ф. Прокопало // Методи розв'язування прикладних задач механіки деформівного твердого тіла: зб. наук. праць. – Д. : Ліра, 2008. – Вып. 9. – С. 167–178.
10. **Чебанов В. М.** Исследование устойчивости тонкостенных оболочек при помощи моделей из бумаги / В. М. Чебанов // Инженерный сборник. Институт механики АН СССР. – 1955. – Т. XXII. – С. 68–73.
11. **Rhode R. V.** Strength tests on paper cylinders in compression bending and shear / R. V. Rhode, E. E. Lundquist // NASA. Techn. Notc. – 1931. – № 370.

О. В. Белова, А. П. Дзюба, д-р техн. наук

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПОШКОДЖЕНЬ КУТІВ КОНТУРУ КВАДРАТНОГО ОТВОРУ НА МІЦНІСТЬ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ОБОЛОНКИ ПРИ ОСЬОВОМУ РОЗТЯЗІ

У статті обговорюються результати експериментального дослідження міцності циліндричних оболонок, послаблених двома квадратними отворами, діаметрально розташованими в окружному напрямку та симетрично відносно серединного поперечного перетину, при розтягуванні осьовою силою. Кути контурів отворів пошкоджені лінійними розрізами. Досліджується вплив розміру отвору на величину критичної сили втрати міцності оболонки.

Ключові слова: експериментальне дослідження, оболонка, квадратний отвір, пошкодження контуру.

O. V. Bielova, A. P. Dzyuba, Dr. Sci. (Tech.)

EXPERIMENTAL STUDY OF THE INFLUENCE OF BORDERS' CORNERS' DAMAGES OF RECTANGULAR OPENINGS ON CILINDRICAL SHELL STRENGTH UNDER AXIAL TENSION

Here are results of experimental research of strength of cylindrical shell, weakened by two square openings, arranged in circular direction and symmetrically related to the average cross section, loaded by axial tension. Borders' corners of openings are damaged by straight directed slits. Slits' and openings' size effects on the critical stress of destruction for damaged shells are shown.

Keywords: experimental research, shell, square opening, corners' damages.

The research on bearing capacity of thin-walled shell elements in the presence of stress raisers in the form of openings or slits [1–3, 6–8] shows significant heterogeneity of the stress-strain state near the opening and, as a consequence, the nonlinearity of the corresponding mathematical model [2, 6] and leads to rather complex mathematical problems.

The problem of predicting the residual load-bearing capacity of shells weakened by openings is even more complicated in the case of in-service additional stress raisers such as cracks (slits) coming from shell holes. One of the most reliable approaches to solving this problem is the experimental simulation of the behavior of membranes in the presence of such lesions [4, 5, 9].

Results of subcritical behavior and destruction process (loss of load-carrying capacity) experimental research for cylindrical shells (112 models tested) with two diametrically located in the circumferential direction and symmetrically relatively to middle cross-section of the shell of different sizes (14 values), which corners have damages as straight slits of different lengths (4 values) in the direction of diagonals of the square opening, under longitudinal tension, are obtained.

The results of experimental studies using the algorithm of discrete-

continuous quadratic approximation [4] were presented as plots of the critical load from the hole size a for shells with different cut length l . The impact of opening size a and of cuts length l on the critical load value is analyzed, pictures of the bearing capacity loss of shells with openings and slits of various sizes are discussed.

REFERENCES

1. **Ashmarin Y. A.** Stability of shells weakened by holes (review) / Y. A. Ashmarin, A. N. Guz // J. Appl. Mech. – 1973. – Vol. IX, is. 4. – P. 3–15.
2. **Guz A. N.** Stress concentration around holes in thin shells / A. N. Guz // J. Appl. Mech. – 1969. – Vol. V, is. 3. – P. 3–17.
3. **Guz A. N.** Destruction and stability of thin bodies with notches in tension (review) / A. N. Guz, M. Sh. Dyshel // J. Appl. Mech. – 1990. – Vol. 26, № 11. – P. 3–24.
4. **Dzyuba P. A.** Research and spline regression analysis of the stability of cylindrical shells weakened by regularly spaced circular openings / P. A. Dzyuba, E. F. Prokopalo // Problems of computational mechanics and strength of structures. – D. : Vyd-vo DNU, 2006. – Is. 10. – P. 27–37.
5. **Dzyuba P. A.** Strength cylindrical shell weakened randomly placed straight cuts, with tensional axial force / P. A. Dzyuba, E. F. Prokopalo, O. O. Solonin // Methods of solving applied problems of mechanics of deformable solids. – D. : Lyra, 2009. – Vol. 10. – P. 97–108.
6. **Dyshel M. M.** Study of deformation of a cylindrical shell in the vicinity of the cut tensile / M. M. Dyshel // J. Appl. Mech. – 1984. – T. 20, № 3. – P. 108–110.
7. **Dyshel M. M.** Stretching cylindrical shell with a cut / M. M. Dyshel // J. Appl. Mech. – 1984. – Vol. 18. – P. 63–65.
8. **Dyshel M. M.** Stability of a cylindrical shell with a crack in tension / M. M. Dyshel // J. Appl. Mech. – 1989. – Vol. 25, № 6. – P. 15–21.
9. **Prokopalo E. F.** Stability of cylindrical shells weakened accidentally located rectilinear cuts, under the action of axial compressive force / P. A. Dzyuba, E. F. Prokopalo // Methods of solving mechanics of deformable solids applied problems. – D. : Lyra, 2008 – Is. 9. – P. 167–178.
10. **Chebanov V. M.** Investigation of the thin-walled shells stability using models from paper / V. M. Chebanov // Engineering compilation. Institute of Mechanics USSR Academy of Sciences. – 1955. – Vol. XXII. – P. 68–73.
11. **Rhode R. V.** Strength tests on paper cylinders in compression bending and shear / R. V. Rhode, E. E. Lundquist // NASA. Techn. Notc. – 1931. – № 370.

*Днепропетровский национальный университет
им. Олеся Гончара,
Днепропетровск, Украина*

Поступила в редколлегию 15.03.2014