

**Івченко Юлія Володимирівна**

*кандидат технічних наук, доцент кафедри металевих, дерев'яних і пластмасових конструкцій, ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»*

**Ивченко Юлия Владимировна**

*кандидат технических наук, доцент кафедры металлических, деревянных и пластмассовых конструкций, ГВУЗ «Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры»*

**Ivchenko Julia V.**

*Ph. D., Associate Professor, Department of Steel, Wood and Plastic Structures, SHEE «Prydneprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture»*

## ПРОБЛЕМА СТІЙКОСТІ ВЕРТИКАЛЬНИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ РЕЗЕРВУАРІВ ПРИ ЗОВНІШНЬОМУ ТИСКУ

## ПРОБЛЕМА УСТОЙЧИВОСТИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ ПРИ ВНЕШНЕМ ДАВЛЕНИИ

## PROBLEM OF STABILITY OF VERTICAL CYLINDRICAL TANKS AT EXTERNAL PRESSURE

**Анотація.** Розглядається стійкість сталевих резервуарів при дії зовнішнього тиску вітрового типу та поведінка їх у критичній і закритичній стадії. Для отримання надійної оцінки стійкості сталевих резервуарів при зовнішньому тиску рекомендується проведення нелінійного розрахунку. Даються рекомендації щодо урахування навантаження вітрового типу в інженерній оцінці стійкості резервуарів.

**Ключові слова:** сталевий резервуар, зовнішній тиск, циліндрична оболонка, стійкість, критичне навантаження.

**Аннотация.** Рассматривается устойчивость стальных резервуаров при действии внешнего давления ветрового типа и поведение их в критической и закритической стадии. Для получения надежной оценки устойчивости стальных резервуаров при внешнем давлении рекомендуется проведение нелинейного расчета. Даются рекомендации по учету нагрузки ветрового типа в инженерной оценке устойчивости резервуаров.

**Ключевые слова:** стальной резервуар, внешнее давление, цилиндрическая оболочка, устойчивость, критическая нагрузка.

**Summary.** Stability of steel tanks at external wind pressure and its buckling and post-buckling behavior is examined. For the reliable estimation of stability of steel tanks at external pressure the nonlinear analysis is required. Recommendations for taking into account wind type load in the stability estimate of steel tanks are given.

**Key words:** steel tank, external pressure, cylindrical shell, stability, critical load.

**Постановка задачі.** В настоящей работе рассматриваются резервуары, используемые для хранения нефти и нефтепродуктов, однако результаты, полученные в работе, могут быть использованы при расчете любых конструкций, относящихся к классу тонкостенных цилиндрических оболочек. Основным несущим элементом стальных вертикальных резервуаров (РВС) является цилиндрическая стенка, которая

представляет собой весьма тонкостенную оболочку. Геометрические параметры резервуаров различного объема находятся в пределах  $l/r = 0,6 \div 2,5$ ;  $r/t = 500 \div 3800$  ( $l$ ,  $r$ ,  $t$  — длина, радиус и толщина цилиндрической стенки), а безразмерный параметр Батдорфа  $Z = (l^2/r \cdot t) \cdot \sqrt{1 - \mu^2} = 900 \div 6500$ . Высокая степень тонкостенности цилиндрической стенки, минусовые допуски металлопроката, особенности

технологии изготовления и монтажа, обуславливающие несовершенства геометрической формы, условия эксплуатации нефтерезервуаров (сжимающие нагрузки, коррозия) являются причиной того, что на практике случаи потери устойчивости стенки, особенно местной потери устойчивости верхних наиболее тонких поясов, встречаются довольно часто. Из этого следует, что проблема устойчивости этих сооружений является весьма актуальной.

**Анализ состояния вопроса.** Согласно нормам проектирования [4, 6] оценка устойчивости РВС выполняется с учетом совместного действия сжимающих напряжений продольного и кольцевого направлений. Продольные напряжения обусловлены нагрузками от собственного веса поясов цилиндрической стенки, конструкций кровли и устанавливаемого на ней оборудования, а также от снега и вакуума. Кольцевые напряжения обусловлены действием внешнего давления от ветра и того же вакуума. Анализ расчетов устойчивости, выполненных для резервуаров, эксплуатируемых в климатических условиях Украины, показывает, что доля в нормативном условии устойчивости от напряжений кольцевого направления составляет 65–85% в зависимости от района строительства и объема резервуаров, а для резервуаров с плавающей кровлей – 95%. Т. е., во всех таких случаях внешнее давление имеет определяющее значение.

В расчетах устойчивости РВС [4, 6] вакуум учитывается как равномерное внешнее давление. Ветровая нагрузка на сооружения цилиндрической формы имеет вид неравномерно распределенного по периметру оболочки знакопеременного давления и равномерно распределенной нагрузки на покрытие [3], рис. 1. При расчете на устойчивость учитывается только давление на цилиндрическую стенку резервуара без учета разгружающей нагрузки на покрытие. При этом неравномерное ветровое давление на стенку заменяется равномерным давлением с одинаковым для резерву-

аров всех объемов коэффициентом приведения, равным 0,5 [6].

В нормах проектирования ряда стран [7] выполняется аналогичная операция замены ветровой нагрузки равномерным внешним давлением, но коэффициент приведения при этом определяется в зависимости от целого ряда факторов (геометрические параметры цилиндрической стенки, условия закрепления торцов стенки и др.).

Анализ работ, посвященных исследованию устойчивости нефтерезервуаров ([5, 8]) и цилиндрических оболочек при неравномерном внешнем давлении ([1, 2]) позволяет сделать вывод о том, что общие закономерности характера деформирования и устойчивости цилиндрических оболочек при действии неравномерного внешнего давления хорошо изучены. Вместе с тем, действующие нормативные рекомендации по учету ветровой нагрузки в инженерных оценках устойчивости стальных резервуаров требуют существенного уточнения.

**Цель работы.** Исследование поведения РВС при внешнем давлении ветрового типа с дальнейшей разработкой рекомендаций к нормативным оценкам устойчивости.

**Содержание исследований.** Исследования проводились с использованием МКЭ. В качестве расчетной схемы принята гладкая цилиндрическая оболочка идеальной геометрической формы. Рассматривалось два варианта граничных условий (ГУ): шарнирное опирание и жесткое защемление обоих торцов оболочки. Геометрические параметры рассматриваемых оболочек:  $r/t = 500 \div 3000$ ,  $Z = 1000 \div 3000$ . Для построения численных моделей оболочек использовались оболочечные конечные элементы, учитывающие геометрическую и физическую нелинейность.

На рис. 2, 3 приведены формы потери устойчивости оболочек, полученные из бифуркационной задачи, и деформированные схемы оболочек, полученные

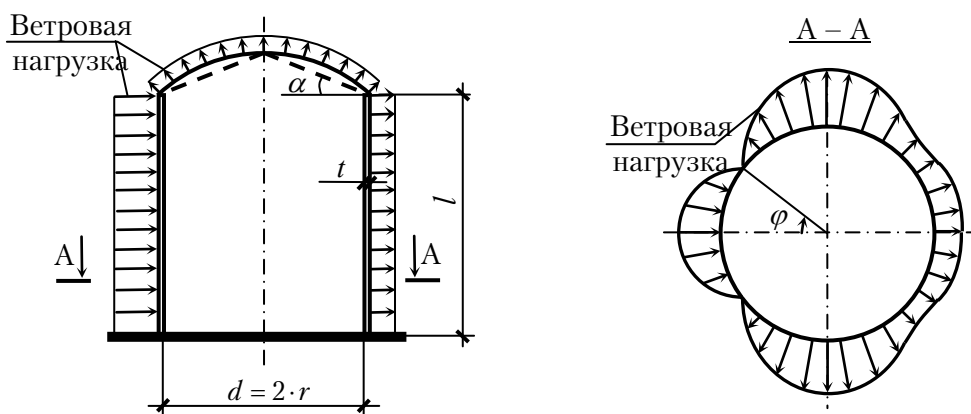


Рис. 1. Схема действия ветровой нагрузки на РВС

нелинейным расчетом. Сопоставление результатов, приведенных на рис. 2, 3, показывает, что и бифуркационный и нелинейный расчеты дают похожие картины деформирования конкретной оболочки с практически одинаковым количеством волн выпучивания. Волнообразование распространяется в зоне действия активного сжимающего давления, и амплитуды волн выпучивания постепенно уменьшаются от центральной части участка активного давления к его краям. Получено, что при рассматриваемых вариантах ГУ для одной и той же оболочки длины волн выпучивания весьма близки. При этом для защемленных оболочек длина волны всегда меньше, чем для шарнирно опертых оболочек, как и в случае действия равномерного внешнего давления [1, 2].

В результате нелинейного расчета получены графики зависимости «нагрузка  $q_w$  — прогиб  $f$ », см. рис. 2, 3. Графики приведены для ряда характерных точек на поверхности оболочек, расположение которых показано на деформированных схемах, рис. 2, 3.

Зависимости прогибов всех выпучин и вмятин от величины ветрового давления имеют две ярко выраженные экстремальные точки.

Эти точки можно рассматривать как верхнее  $q_{cr,w}^o$  и нижнее  $q_{cr,w}^u$  предельные значения ветрового давления. Отношение  $q_{cr,w}^u / q_{cr,w}^o$  при шарнирном закреплении торцов оболочек составляет  $0,58 \div 0,65$ , а при жестком закреплении —  $0,81 \div 0,87$ . Меньшие значения соответствуют более тонкостенным оболочкам.

Величина прогибов, т.е. отклонений поверхности оболочки от формы правильного цилиндра, при верхней предельной нагрузке для всех вариантов ГУ составляет: для вмятин  $f^- = (1,03 \div 2,6) \cdot t$ ; для выпучин  $f^+ = (0,93 \div 2,3) \cdot t$ .

При нижней предельной нагрузке величины прогибов получены такими:

- вариант № 1 ГУ —  $f^- = (14 \div 26) \cdot t$ ;  $f^+ = (12 \div 23) \cdot t$ ;
- вариант № 2 ГУ —  $f^- = (6 \div 11) \cdot t$ ;  $f^+ = (5 \div 10) \cdot t$ .

Из полученных данных видно, что шарнирно опертые оболочки более деформативны, чем защемленные оболочки.

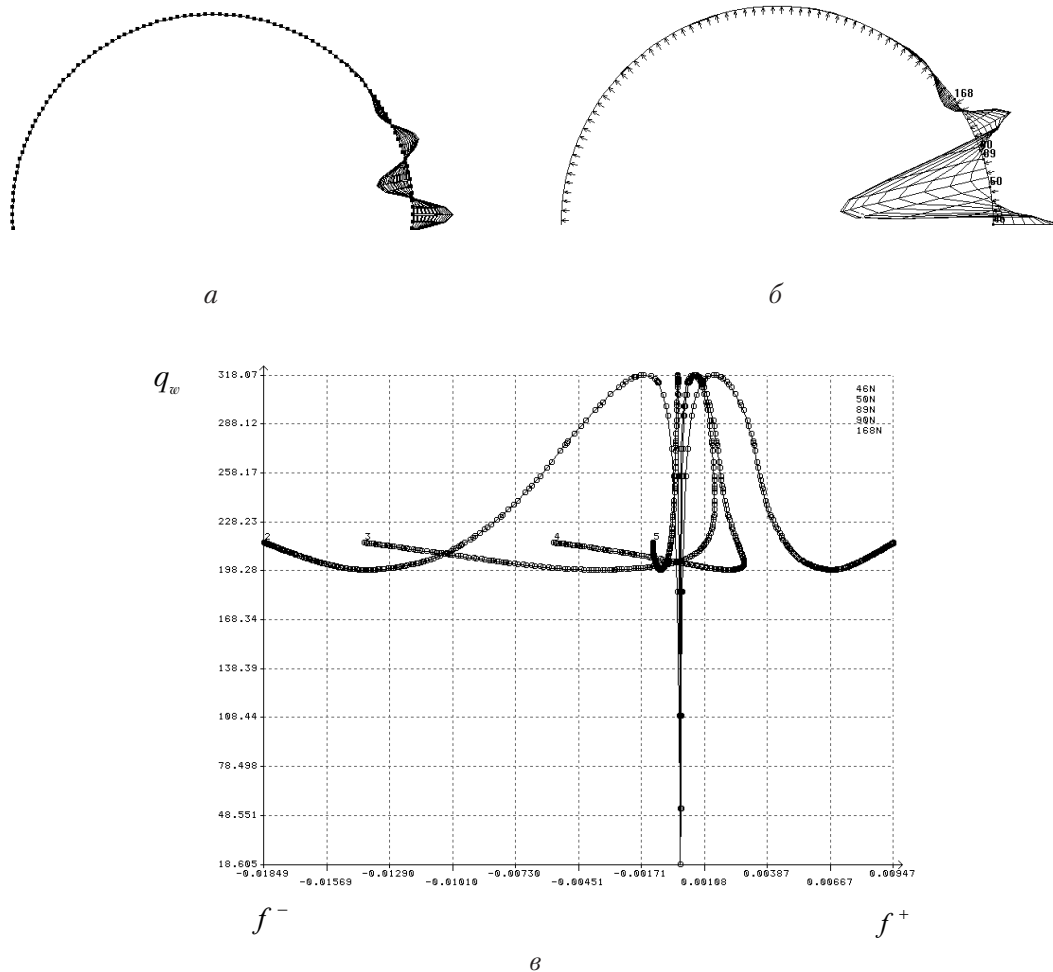


Рис. 2. Оболочка с  $r/t = 1500$ ,  $Z = 1000$ : а) форма потери устойчивости; б) деформированная схема; в) график « $q_w - f$ »

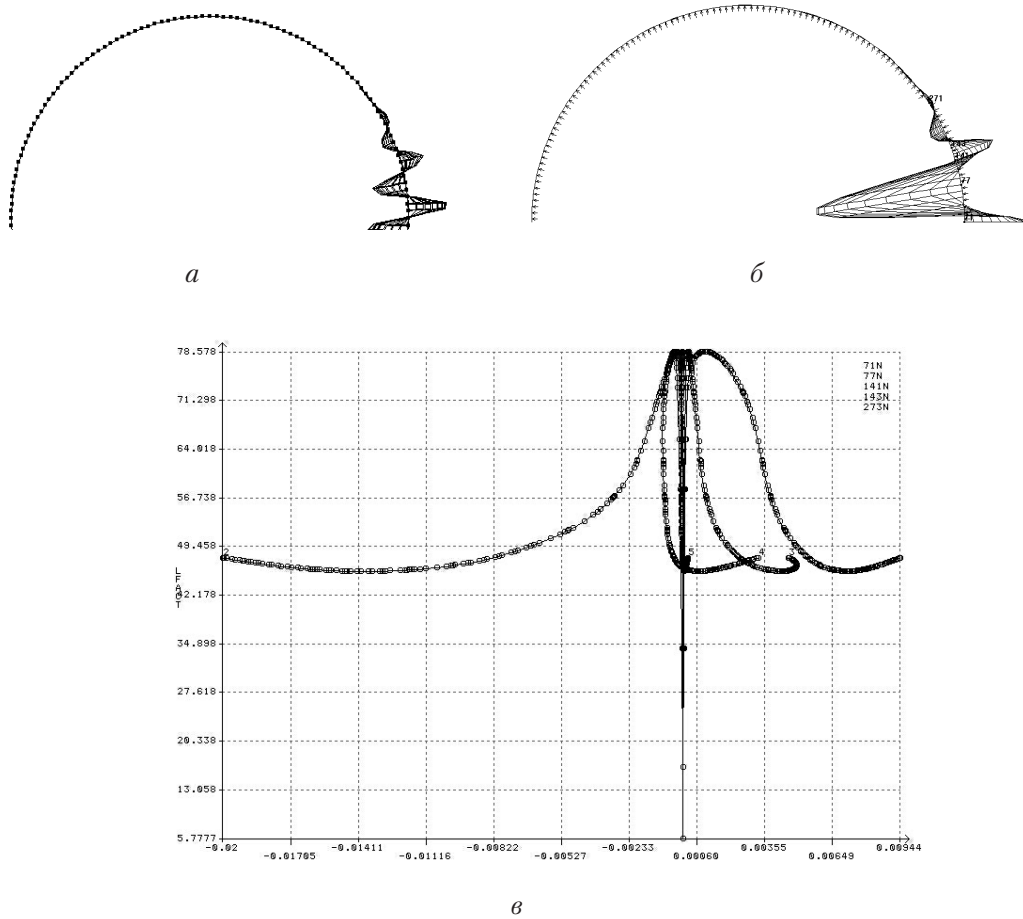


Рис. 3. Оболочка с  $r/t = 3000$ ,  $Z = 1000$ : а) форма потери устойчивости; б) деформированная схема; в) график « $q_w - f$ »

Как ранее отмечалось, приведенные графики построены для характерных точек на поверхности оболочки: 1 и 2 – для наибольших выпучины и вмятины; 3, 4, 5 – для ряда других точек. Графики 1 и 2 показывают, что характер деформирования в местах максимальных выпучины и вмятины принципиально не изменяется, и это имеет место для всех рассматриваемых оболочек и вариантов ГУ. Кривые 3, 4, 5 имеют другой характер. Так, для оболочки с  $r/t = 1500$ ,  $Z = 1000$ , рис. 2, в, кривая 3 сначала показывает развитие выпучины, а затем происходит перестройка поверхности оболочки во вмятину. Указанный факт можно объяснить интенсивным ростом прогибов в зоне действия максимальной амплитуды давления, а также перестройками формы оболочки в процессе деформирования. Согласно [1] перестройка напряженно-деформированного состояния в процессе нагружения указывает на неприменимость линейной модели для расчета. Таким образом, для получения надежной оценки устойчивости РВС при нагрузке ветрового типа требуется проведение нелинейного расчета.

Несколько другое поведение при рассматриваемой нагрузке имеет место у оболочек с  $r/t = 500$ , см. рис. 4.

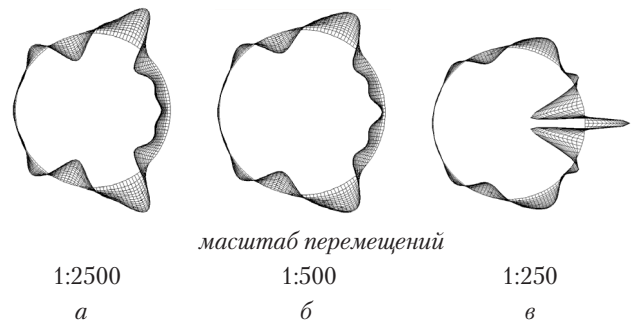


Рис. 4. Деформированные схемы оболочки с  $r/t = 500$ ,  $Z = 1000$  при нагрузке: а)  $q_w = 0,33 \cdot q_{cr,w}^a$ ; б)  $q_w = 0,66 \cdot q_{cr,w}^a$ ; в)  $q_w = q_{cr,w}^a$

Деформирование таких оболочек так же, как и для остальных оболочек, сопровождается развитием волнообразных прогибов по периметру. Однако при этом существенные прогибы имеют место не только в зоне действия сжимающего давления, что хорошо отображается при проведении нелинейного расчета.

В табл. 1 приведены значения критического ветрового давления  $q_{cr,w}$ , полученного из бифуркационной задачи, и предельные значения ветровой нагрузки  $q_{cr,w}^a$ ,  $q_{cr,w}^H$ .

Таблица 1

Критические значения нагрузки  $q_{cr,w}$ ,  $q_{cr,w}^o$ ,  $q_{cr,w}^n$ , кПа

Граничные условия	Z	r/t								
		500			1500			3000		
		$q_{cr,w}$	$q_{cr,w}^o$	$q_{cr,w}^n$	$q_{cr,w}$	$q_{cr,w}^o$	$q_{cr,w}^n$	$q_{cr,w}$	$q_{cr,w}^o$	$q_{cr,w}^n$
Вариант 1	1000	33,71	32,66	19,6	3,44	3,18	1,98	0,81	0,78	0,46
	2000	24,58	23,36	14,1	2,46	2,24	1,44	0,58	0,55	0,32
	3000	20,48	18,89	11,3	2,03	1,86	1,22	0,48	0,44	0,27
Вариант 2	1000	46,28	43,7	26,2	4,82	4,57	3,84	1,13	1,10	0,96
	2000	34,36	33,48	20,1	3,48	3,24	2,74	0,83	0,81	0,66
	3000	28,94	28,28	16,9	2,88	2,66	2,27	0,68	0,65	0,54

Сопоставление полученных данных показывает, что во всех случаях бифуркационная нагрузка  $q_{cr,w}$  оказывается несколько выше верхней предельной нагрузки  $q_{cr,w}^o$ , но это превышение весьма незначительно — до 10%. Соотношение нижней и верхней предельных нагрузок для рассматриваемых оболочек находится в пределах  $q_{cr,w}^n / q_{cr,w}^o = 0,6 \div 0,9$ .

Таким образом, значение коэффициента приведения давления ветрового типа к равномерному давлению можно получить из выражения:

$$\gamma_w = \frac{q_{cr2}}{q_{cr,w}}$$

где  $q_{cr2}$  — критическая нагрузка в случае действия на цилиндрическую оболочку равномерного внешнего давления;

$q_{cr,w}$  — критическое значение давления ветрового типа.

Величина  $q_{cr2}$  определяется по известной формуле Мизеса-Папковича [2]. При оценке устойчивости РВС  $q_{cr2}$  определяется с введением понижающего коэффициента 0,6, что в результате дает нижнюю границу всех известных экспериментальных данных. По аналогии с критическим равномерным давлением,  $q_{cr,w}$  принималось равным наименьшему из всех характерных значений неравномерного давления для рассматриваемой оболочки. Ранее показано, что такому условию во всех случаях удовлетворяет нижнее предельное значение ветровой нагрузки  $q_{cr,w}^n$ , определяемое решением нелинейной задачи деформирования.

Таблица 2

Значения коэффициента  $\gamma_w$ 

Граничные условия	Z	r/t		
		500	1500	3000
Вариант 1	1000	0,768	0,861	0,926
	2000	0,741	0,821	0,919
	3000	0,749	0,777	0,889
Вариант 2	1000	0,809	0,636	0,631
	2000	0,745	0,624	0,654
	3000	0,724	0,611	0,644

**Выводы.** 1. Выполненный анализ особенностей деформированного состояния оболочек при нагрузке ветрового типа показал, что для рассматриваемых оболочек имеют место перестройки формы в процессе деформирования, что указывает на принципиальную неприменимость линейной модели для расчета. Для получения надежной оценки устойчивости стальных резервуаров при внешнем давлении требуется проведение нелинейного расчета.

2. В качестве критического давления ветрового типа принимается наименьшее из всех характерных значений неравномерного давления для рассматриваемой оболочки, т.е. нижнее предельное значение  $q_{cr,w}^n$ , определяемое решением нелинейной задачи деформирования.

3. Анализ полученных результатов показывает, что нормативная оценка устойчивости РВС [4, 6] имеет ряд недостатков. Значение коэффициента приведения ветровой нагрузки к равномерному давлению  $\gamma_w$  изменяется в зависимости от геометрических параметров и условий закрепления оболочек. Принятие в нормах  $\gamma_w = 0,5$  приводит к тому, что запас устойчивости оболочек с различными геометрическими параметрами и условиями закрепления оказывается различным, а также указанные запасы во многих случаях являются недостаточными. Определение  $\gamma_w$  по табл. 2 позволяет устранить указанные недостатки.

**Литература**

1. Андреев Л. В. Устойчивость оболочек при неосесимметричной деформации / Андреев Л. В., Ободан Н. И., Лебедев А. Г. — М.: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. — 207 с.
2. Вольмир А. С. Устойчивость деформируемых систем / Вольмир А. С. — М.: Наука, 1967. — 984 с.
3. Государственные строительные нормы Украины. Система обеспечения надежности и безопасности строительных объектов. Нагрузки и воздействия. Нормы проектирования: ДБН В.1.2-2:2006. — К.: Минстрой Украины, 2006. — 78 с.
4. Державні будівельні норми України. Сталеві конструкції. Норми проектування: ДБН В.2.6-198:2014. — К.: Мінірегіон України, 2014. — 199 с.
5. Крысько В. А. Устойчивость замкнутых цилиндрических оболочек при неравномерном внешнем давлении / В. А. Крысько, Н. Е. Савельева // Изв. ВУЗов. Сер. Строительство. — 2005. — № 3. — С. 24–32.
6. Резервуари вертикальні сталеві для зберігання нафти і нафтопродуктів з тиском насичених парів не вище 93,3 кПа. Відомчі будівельні норми України: ВБН В.2.2-58.2-94. — Офіц. вид. — К.: Держкомнафтогаз, 1994. — 98 с.
7. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1–6: General Rules: Supplementary Rules for Shell Structures: CEN/TC250/SC3/PT4. — Brussels: Centr. Secr., 1999. — 83 p.
8. Godoy L. A. Buckling of aboveground storage tanks with conical roof / Godoy L. A., Mendes-Degro J. C. // Third International Conference on Thin-Walled Structures. — Elsevier Science Ltd. — 2001. — P. 661–668.

**References**

1. Andreev L. V. Ustojchy'vost' obolochek pry' neosesymmetry'chnoj deformacy'y' / Andreev L. V., Obodan N. Y., Lebedev A. G. — М.: Gl. red. fy'z.-mat. ly't., 1988. — 207 s.
2. Vol'my'r A. S. Ustojchy'vost' deformaty'ruemyx sy'stem / Vol'my'r A. S. — М.: Nauka, 1967. — 984 s.
3. Gosudarstvennyye stroy'tel'nyye normy' Ukray'ny. Sy'stema obespecheny'ya nadezhnosti' y' bezopasnosti' stroy'tel'nyx ob'ektov. Nagruzky' y' vozdejstvy'ya. Normy' proekty'rovany'ya: DBN V.1.2-2:2006. — К.: My'nstroj Ukray'ny, 2006. — 78 s.
4. Derzhavni budivel'ni normy' Ukrayiny'. Stalevi konstrukciyi. Normy' proektuvannya: DBN V.2.6-198:2014. — К.: Minregion Ukrayiny', 2014. — 199 s.
5. Кры'ско В. А. Устойчивость замкнутых цилиндрических оболочек при неравномерном внешнем давлении / В. А. Кры'ско, Н. Е. Савельева // Y'zv. VUZov. Ser. Stroy'tel'stvo. — 2005. — #3. — S. 24–32.
6. Rezervuary' verty'kal'ni stalevi dlya zberigannya nafty' i naftoproduktiv z ty'skom nasy'cheny'x pariv ne vy'shhe 93,3 kPa. Vidomchi budivel'ni normy' Ukrayiny': VBN V.2.2-58.2-94. — Ofic. vy'd. — К.: Derzhkomnaftogaz, 1994. — 98 s.
7. Eurocode 3. Design of steel structures. Part 1–6: General Rules: Supplementary Rules for Shell Structures: CEN/TC250/SC3/PT4. — Brussels: Centr. Secr., 1999. — 83 p.
8. Godoy L. A. Buckling of aboveground storage tanks with conical roof / Godoy L. A., Mendes-Degro J. C. // Third International Conference on Thin-Walled Structures. — Elsevier Science Ltd. — 2001. — P. 661–668.