

УДК 539.3

ОПТИМИЗАЦИЯ ФОРМЫ И СТРУКТУРЫ КОНСТРУКЦИИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОГО РЕЗЕРВУАРА БОЛЬШОЙ ВМЕСТИМОСТИ

На основе оптимизации формы и структуры оболочечной конструкции предложена новая конструктивная схема вертикального цилиндрического резервуара. Рассмотрена внутренняя задача оптимального проектирования комбинированной оболочечной системы при локальном варьировании кривизны тонколистовой оболочки и структурного изменения вертикальных ребер-стоек каркаса конструкции цилиндрического резервуара.

New constructional form of vertical cylindrical tank was proposed on base optimization form and structure of shell construction. Inside task of optimum design of combined shell system for local verification of sheet-shell curvature and of structural change of vertical pillar of framework construction of cylindrical tank.

Ключевые слова: цилиндрический резервуар, нелинейное деформирование, вариационные методы, тонкие оболочки.

В условиях необходимости хранения значительных запасов нефти возникает потребность в строительстве сверхбольших емкостей для нефтепродуктов.

Новая конструктивная схема цилиндрического резервуара нетрадиционной конструкции, предложенная в [1–3], позволяет унифицировать проектирование вертикальных резервуаров повышенной вместимости от 100 до 300 тыс. м³.

Рассматривается унифицированная конструкция цилиндрического резервуара повышенной емкости при формоизменении стенки с учетом развития упруго-пластических деформаций и устойчивости вертикальных элементов каркаса при максимальных вертикальных нагрузках. Формоизменение вертикальной стенки резервуара за счет дополнительной кривизны приводит к изменению общей формы боковой поверхности, т.е. переходу к сферотороидальной комбинированной поверхности. Такое преобразование позволяет снизить кольцевые усилия в оболочке и концентрацию напряжений в закруглениях резервуара (зона перехода от вертикальной стенки к горизонтальному днищу). Однако увеличение кривизны боковой поверхности резервуара увеличивает критические напряжения от локального продольного изгиба в вертикальных элементах каркаса конструкции резервуара. Параметры изменения кривизны боковой поверхности следует увязывать с условиями обеспечения устойчивости элементов каркаса вертикальной стенки резервуара. Таким образом, к изложенным проблемам уточненного расчета рассматриваемой комбинированной конструкции прибавляется проблема оптимального формоизменения боковой поверхности и структурного изменения конструкции ребер-стоек резервуара. При оптимизации осуществ-



В.К. Цыхановский

главный научный сотрудник
ООО «Украинский институт
стальных конструкций
имени В.Н. Шимановского»,
д.т.н., профессор



С.М. Талах

доцент кафедры реконструкции
аэропортов и автодорог
Национального авиационного
университета,
к.т.н.



А.И. Кордун

руководитель группы ОНТР
ООО «Украинский институт
стальных конструкций
имени В.Н. Шимановского»,
аспирант

ляется оптимальный выбор густоты сетки конечноэлементной модели по вертикальной стенке и закруглениям резервуара, тем самым проводится исследование внутренней сходимости результатов решения дискретной модели конструкции.

Дискретная модель конструкции цилиндрического резервуара построена на основе метода конечных элементов [1, 2, 4]. Для получения разрешающих уравнений метода конечных элементов (МКЭ) сформулирован вариационный принцип виртуальной работы в приращениях на основе нелинейной теории упругости и пластичности [1, 2, 4]:

$$\int_V (\hat{\sigma}' + \hat{C}_4 \cdot \hat{\gamma}) \cdot \delta \hat{\gamma} dV + \int_V \rho \ddot{u} \cdot \delta \ddot{u} dV - \int_V \bar{p} \cdot \delta \ddot{u} dV - \int_S \bar{q} \cdot \delta \ddot{u} dS = 0, \quad (1)$$

где $\hat{\sigma}'$ – второй тензор начальных (накопленных) напряжений Пиола-Кирхгоффа; $\hat{\gamma}$ – тензор приращений конечных деформаций Коши-Грина, обусловленный возмущением равновесной конфигурации C' (в произвольный момент времени) и переходом её в конфигурацию $C^{t+\Delta t}$; \ddot{u}, \ddot{u} – векторы приращений перемещений и ускорений; \bar{q}, \bar{p} – обобщенные векторы удельных объемных и поверхностных сил, действующих на тело и отнесенных к конфигурации C' .

Рассматриваемая конструкция вертикального цилиндрического резервуара имеет достаточно сложную форму и конфигурацию, топологию и структуру комбинированной механической системы, включает конструктивные элементы с различными физико-механическими характеристиками. Таким образом, конструкция представляет собой оболочечную конструкцию сложной формы с существенной физической неоднородностью. В [1] приведена разработанная дискретная модель рассматриваемой конструкции резервуара, для которой решена задача оптимального проектирования по оптимизации формы и структуры с вертикальной наружной стенкой.

Описание геометрии ограничивающих поверхностей оболочки осуществляется на основе аналитических методов с использованием набора канонических уравнений, представленных в глобальной системе координат [1]. Рассматриваемый вариант комбинированной оболочечной системы отличается прежде всего описанием геометрии основного цилиндрического фрагмента (рис. 1). Поверхность стенки резервуара предлагается описывать поверхностью тора (фрагмент F_3), сопряженной со сферической поверхностью покрытия (фрагмент F_1) и поверхностью круглой плиты днища (фрагмент F_5) с помощью верхнего (фрагмент F_2) и нижнего (фрагмент F_4) кольцевых четвертьторовых поверхностей.

На рис. 1 представлена плоская геометрическая схема в радиальном сечении резервуара с учетом осевой симметрии. Эта схема отличается от схемы в [1] построением фрагмента геометрии F_3 , описывающего каноническую поверхность части тора (дуги, опирающейся на угол 2α), для чего необходимо вычислить следующие параметры (см. рис. 1):

1) из $\Delta C_3 C_0 C_2$ имеем уравнение

$$(R_0^3 - f - r_2)^2 + \left(\frac{l'}{2}\right)^2 = (R_0^3 - r_2)^2; \quad (2)$$

$$l' = H - r_2 - r_4, \quad (2)$$

которое решаем относительно R_0^3

$$R_0^3 = \frac{f^2 + \frac{1}{4}l'^2 + 2r_2 f}{2f}, \quad (3)$$

где f – стрела прогиба в центре вертикальной стенки резервуара; r_2 – радиус верхнего четвертьтора; l' – высота вертикальной стенки резервуара;

2) координаты точки C_3 вспомогательной системы координат фрагмента F_3 (см. рис. 1)

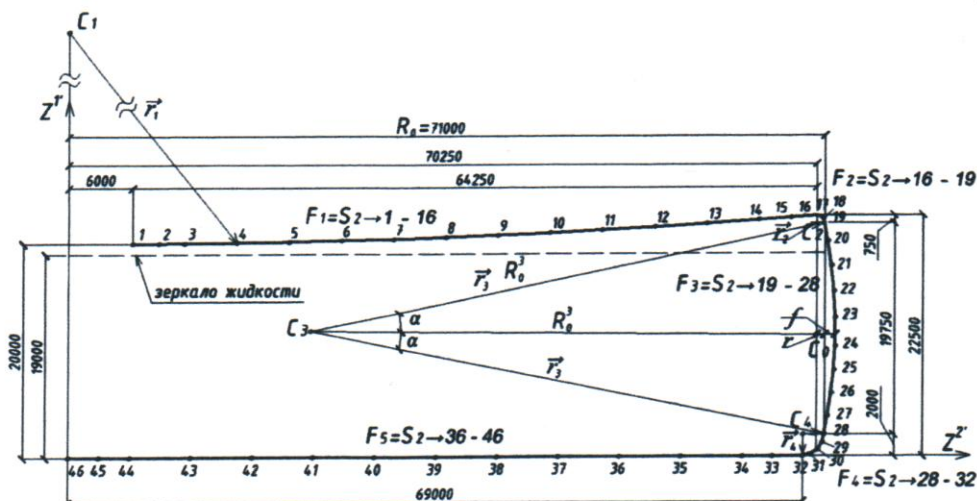


Рис. 1. Система координат для описания геометрии поверхностей F_1, F_2, F_3, F_4, F_5

определяются по формулам (в глобальной системе координат $Z^1 0 Z^{2'}$, $Z^{2'}$ – линия координат в произвольном осевом радиальном сечении):

$$Z_{C_3}^{1'} = r_4 + \frac{l'}{2} = r_4 + \frac{1}{2}(H - r_2 - r_4); \quad (4)$$

$$Z_{C_3}^{2'} = R_0 + f - R_0^3, \quad (5)$$

где r_4 – радиус нижнего четвертьтора; R_0 – внешний радиус резервуара (по срединной поверхности цилиндрической оболочки) по вертикальной касательной тором (верхнего и нижнего);

3) угол α – створ торовой дуги боковой стенки резервуара, определяется также из $\Delta C_3 C_0 C_2$:

$$\alpha = \arctg \frac{l'}{2(R_0^3 - f - r_2)}. \quad (6)$$

При определении объема считается чистый объем резервуара (для цилиндра) исходя из отметки зеркала максимального уровня наполнения нефтепродуктом, равного $H_0 = 19,0$ м. Таким образом, объем резервуара составляет: $V = H_0 \pi R_0^2 = 19\pi \cdot 71,0^2 \approx 300 \cdot 10^3$ м³.

С учетом необходимости некоторого сгущения сетки на фрагменте F_3 и сопряженного с ним фрагмента F_4 сеточная область конечноэлементной модели имеет следующие размеры – $M1 \times M2 \times M3$, $M1 = 2$, $M2 = 46$, $M3 = 50$. Конфигурация каркаса и сеточная область в круговом направлении не изменились (см. пространственную расчетную схему в [1]), число узлов КЭ модели составляет: $NUX = M1 \times M2 \times M3 = 2 \times 46 \times 50 = 4600$, а число уравнений системы разрешающих уравнений составляет: $K = 3 \times NUX = 3 \times 4600 = 13800$.

Таким образом, расчетная схема предусматривает формирование системы нелинейных уравнений большого порядка – 13800 уравнений, решение которой осуществляется по специальному алгоритму, приведенному в [1, 4], на основе комбинации методов продолжения по параметру возмущения (в данной реализации – по параметру нагружения), Ньютона-Канторовича, регуляризации и других методов нелинейного программирования [5, 6].

Решение системы нелинейных уравнений рассматриваемой задачи осуществляется за 150 шагов при продолжении по параметру возмущения, т.е. по обобщающему вектору параметров (интенсивности) всех видов воздействий на конструкцию (гидростатическое давление, внутреннее и внешнее давление, сила тяжести и др.).

На каждом шаге нагружения решается система нелинейных уравнений относительно приращений перемещений с накопленными (начальными) напряжениями на каждом шаге продолжения с использованием интегрального закона состояния [8] (по методу Ньютона-Канторовича [4] в комбинации с методом Ньютона при изменении области развития пластических деформаций внутри шага).

Численный расчет рассматриваемой конструкции вертикального цилиндрического резервуара осуществляется при различных комбинациях внешних воздействий:

- объемного и поверхностного воздействия сил тяжести и снегового нагружения;
- суммарного максимального нагружения от ветрового потока и гидростатического давления;
- суммарного объемного и поверхностного воздействия с учетом ветрового давления, но без учета гидростатического внутреннего давления.

Описание всех видов нагружений и их формулирование приведено в [1]. В этой работе учитывается характер изменения величин внешних воздействий, которые связаны с изменением геометрических параметров.

Результаты решения задачи определения напряженно-деформированного состояния представлены массивами дискретной модели по перемещениям, изгибающим погонным моментам и погонным внутренним усилиям, мембранным и изгибным напряжениям.

В соответствии с математической моделью задачи [1] главным критерием качества (функцией цели) является функция главных напряжений

$$f(b, u) \equiv \sigma(b, u) \rightarrow \min. \quad (7)$$

Рассматриваемая задача является уточнением аналогичной задачи [1], поэтому в качестве вектора перемещений проектирования принят вектор

$$\{b\} = \{b_1, b_2\}, \quad (8)$$

где $b_1 = f$ – стрела бокового провиса вертикальной стенки резервуара; b_2 – жесткость вертикальной стойки, имеет два значения; $b_2^{(1)} = 0$ – дополнительная стойка-колонна отсутствует; $b_2^{(2)} = \infty$ – в месте стойки-колонны накладывается жесткая вертикальная связь.

Параметрическими ограничениями на компоненты b_1 вектора $\{b\}$ приняты пределы:

$$0,1 \leq b_1 \leq 3,0 \text{ м.} \quad (9)$$

Последовательно выполняя этапы алгоритма по Хуку-Дживсу [1], определяем успешные изменения переменной проектирования b_1 , которые снижают наибольшее значение целевой функции (7), и в конечном результате определяем оптимальный вектор переменных проектирования $\{b\}^*$:

$$b_1^* = 2,0 \text{ м; } b_2^* = \infty. \quad (10)$$

По численным результатам напряженно-деформированного состояния, сведенным в таблицы 1–4, построены эпюры изгибающих моментов и продольных сил в ребрах-стойках рассматриваемого резервуара, которые приведены на рис. 2. По этим эпюрам удобно провести сравнительный анализ изменения внутренних усилий в ребрах-стойках комбинированной оболочечной конструкции резервуара большой вместимости в зависимости от изменения кривизны вертикальной стенки ($b_1 = 2,0 \text{ м}$) и введением внутренних колонн ($b_2 = \infty$). Начальная эпюра 1, которую можно принять за базовую, изменяется в большую сторону при увеличении кривизны стенки посредством изменения параметра f при отсутствии колонн ($b_2 = 0$). Следует отметить, что качественный характер эпюр не изменяется.

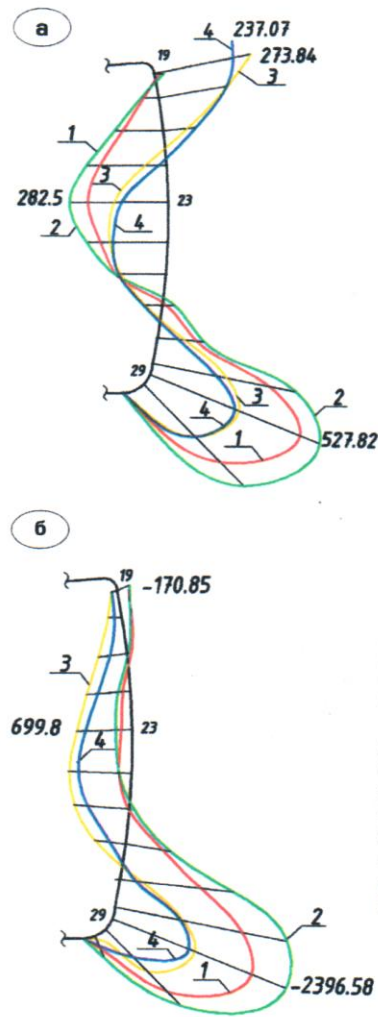


Рис. 2.
Эпюры внутренних усилий в ребрах-стойках цилиндрического резервуара:
а – эпюра изгибающих моментов, т·м;
б – эпюра продольных сил, т;
1 – при $f = 0,1 \text{ м}$;
2 – при $f = 2,0 \text{ м}$ без внутренних колонн;
3 – при $f = 1,0 \text{ м}$ при наличии внутренних колонн;
4 – при $f = 2,0 \text{ м}$ при наличии внутренних колонн

Изгибающие моменты и продольные силы в ребрах-стойках резервуара в радиальном сечении пл. OZ^1Z^3 при $f = 0,1 \text{ м}$ ($b_N = 101,8 \text{ см}$)

Таблица 1

№ с.к. Is 3	№ с.к. Is 2	№ узлов КЭ-мод.	Погонные усилия		Общие усилия в сечении	
			M_N^{22} , кг·см/см	N_N^{22} , кг/см	$M_N^{22} \cdot b_N$, т·м	N_N^{22} , т
25	19	2245	-13664,0	-1386,8	-13,9	-141,17
	20	2247	36748,0	-1226,4	37,4	-124,84
	21	2249	$1,0703 \cdot 10^5$	-521,51	108,95	-53,08
	22	2251	$1,8372 \cdot 10^5$	469,45	187,02	47,79
	23	2253	$2,1433 \cdot 10^5$	1090,3	218,8	110,99
	24	2255	$1,6604 \cdot 10^5$	1628,0	169,02	165,73
	25	2257	$1,0467 \cdot 10^5$	60,833	106,55	6,19
	26	2259	-5605,7	-3748,3	-5,70	-381,57
	27	2261	$-1,9971 \cdot 10^5$	-10784,0	-203,30	-1097,8
	28	2263	$-3,2582 \cdot 10^5$	-15513,0	-331,68	-1579,22
	29	2265	$-4,4003 \cdot 10^5$	-19961,0	-447,95	-2032,02
	30	2267	$-3,3357 \cdot 10^5$	-10914,0	-339,57	-1111,04
31	2269	-69728,0	-2043,30	-70,98	-208,0	

Таблица 2

Изгибающие моменты и продольные силы в ребрах-стойках резервуара
в радиальном сечении пл. OZ^1Z^3 при $f = 2,0$ м ($b_N = 101,8$ см)

№ с.к. Is 3	№ с.к. Is 2	№ узлов КЭ-мод.	Погонные усилия		Общие усилия в сечении	
			M_N^{22} , кг·см/см	N_N^{22} , кг/см	$M_N^{22} \cdot b_N$, т·м	N_N^{22} , т
25	19	2245	-39686,0	-1678,3	-40,40	-170,85
	20	2247	40570,0	-1120,8	41,30	-114,1
	21	2249	$1,3632 \cdot 10^5$	-59,22	138,77	-6,02
	22	2251	$2,3164 \cdot 10^5$	921,49	235,81	93,81
	23	2253	$2,775 \cdot 10^5$	1213,7	282,50	123,55
	24	2255	$2,135 \cdot 10^5$	1588,6	217,34	161,72
	25	2257	$1,0662 \cdot 10^5$	-264,12	108,54	-26,89
	26	2259	-48156,0	-5644,5	-49,02	-574,61
	27	2261	$-3,0498 \cdot 10^5$	-15280,0	-310,47	-1555,5
	28	2263	$-3,9573 \cdot 10^5$	-21686,0	-402,85	-2207,63
	29	2265	$-5,1849 \cdot 10^5$	-23542,0	-527,82	-2396,58
	30	2267	$-4,1311 \cdot 10^5$	-13147,0	-420,55	-1338,36
31	2269	-97521,0	-2882,1	-99,28	-293,39	

Таблица 3

Изгибающие моменты и продольные силы (максимальные) в ребрах-стойках резервуара
в сечении пл. OZ^1Z^3 при $f = 1,0$ м и наложенных связях в виде колонн ($b_N = 101,8$ см)

№ с.к. Is 3	№ с.к. Is 2	№ узлов КЭ-мод.	Погонные усилия		Общие усилия в сечении	
			M_N^{22} , кг·см/см	N_N^{22} , кг/см	$M_N^{22} \cdot b_N$, т·м	N_N^{22} , т
25	19	2245	$-2,69 \cdot 10^5$	833,18	-273,84	84,82
	20	2247	$-1,885 \cdot 10^5$	1907,8	-191,89	194,21
	21	2249	-68860,0	3640,7	-70,10	370,62
	22	2251	63415,0	5540,1	64,56	563,98
	23	2253	$1,5249 \cdot 10^5$	6874,3	155,23	699,80
	24	2255	$1,6187 \cdot 10^5$	7814,0	164,78	795,47
	25	2257	$1,3816 \cdot 10^5$	6857,7	140,65	698,11
	26	2259	55771,0	3612,7	56,77	367,77
	27	2261	$-1,1081 \cdot 10^5$	-2841,4	-112,80	-289,25
	28	2263	$-2,0861 \cdot 10^5$	-8314,9	-212,36	-846,46
	29	2265	$-2,6294 \cdot 10^5$	-10239,0	-267,67	-1042,33
	30	2267	$-1,9481 \cdot 10^5$	-5800,9	-198,32	-590,53
	31	2269	-52242,0	-1136,1	-53,18	-0,12
	32	2271	-1,6172	707,53	-0,002	71,72

Изгибающие моменты и продольные силы (максимальные) в ребрах-стойках резервуара в сечении пл. OZ^1Z^3 при $f = 2,0$ м и наложенных связях в виде колонн ($b_N = 101,8$ см)

№ с.к. Is 3	№ с.к. Is 2	№ узлов КЭ-мод.	Погонные усилия		Общие усилия в сечении	
			M_N^{22} , кг·см/см	N_N^{22} , кг/см	$M_N^{22} \cdot b_N$, т·м	N_N^{22} , т
25	19	2245	$-2,3288 \cdot 10^5$	766,46	-237,07	78,03
	20	2247	$-2,1082 \cdot 10^5$	871,14	-214,61	88,68
	21	2249	$-1,0765 \cdot 10^5$	2303,1	-109,59	234,46
	22	2251	26511,0	4213,3	26,99	428,91
	23	2253	$1,31 \cdot 10^5$	5759,2	133,36	586,29
	24	2255	$1,5382 \cdot 10^5$	7099,0	156,59	722,68
	25	2257	$1,425 \cdot 10^5$	6492,2	145,07	660,31
	26	2259	69760,0	3530,9	71,02	359,45
	27	2261	-88651,0	-2735,6	-90,25	-278,48
	28	2263	$-1,8184 \cdot 10^5$	-8166,8	-185,11	-831,38
	29	2265	$-2,5536 \cdot 10^5$	-10205,0	-259,96	-1038,87
	30	2267	$-2,0875 \cdot 10^5$	-6017,8	-212,51	-612,61
	31	2269	-60665,0	-1298,4	-61,76	-132,18
32	2271	-2,2908	750,12	-0,002	76,36	

По результатам расчета с учетом внутренних колонн ($b_2 = \infty$) можно наблюдать резкое уменьшение (больше чем в два раза) максимальных изгибающих моментов и продольных сил:

- максимальные изгибающие моменты (см. рис. 2) на эпюре 4 (стрела провиса $f = 2,0$ м) составляет $M_{2265}^{22} = -259,96$ тс·м (см. табл. 4) и по сравнению с эпюрой 2 меньше в $527,82/259,93 = 2,03$ раза;
- максимальные продольные силы (см. рис. 2) на эпюре 4 составляют $N_{2265}^{22} = -1038,87$ тс и по сравнению с усилием на эпюре 2 меньше в $527,82/259,93 = 2,3$ раза.

Выводы. В результате выполненных численно-аналитических исследований приходим к следующему заключению:

1. Целесообразно использовать конструкцию ограждающей вертикальной стенки цилиндрического резервуара большой вместимости двойкой кривизны.

2. В качестве оптимальной принимать кривизну вертикальной стенки с радиусом кривизны (см. формулу (3)) $R_0^3 = 235,45$ м и стрелой провиса $f = 2,0$ м.

3. При использовании криволинейной формы по высоте вертикальной стенки цилиндрического резервуара обязательно включение в конструкцию внутренних опорных колонн на всю высоту резервуара с последующим расчетом на устойчивость при максимальных усилиях. Максимальные усилия определяются при численном расчете, когда наличие внутренних колонн моделируемых наложенными вертикальными связями на узловых точках с сеточными координатами $-S_2 = 16$, $S_3 = 1+4k$, где $k = 0, 1, \dots, 12$. Для уменьшения расчетной длины колонн применяются связи между колоннами и ребром-стойкой, которые также учитываются в конечноэлементной модели.

- [1] Шимановский А.В. Оптимизация комбинированных пространственных систем / А.В. Шимановский, В.К. Цыхановский, С.М. Талах – К.: Изд-во «Сталь», 2012. – 462 с.
- [2] Цыхановский В.К. Розрахунок на міцність великопрогонових залізобетонних оболонок із зовнішнім листовим армуванням методом скінчених елементів / В.К. Цыхановський, О.І. Кордун // Зб. наук. праць УкрНДІпроектсталько-струкція ім. В. М. Шимановського. – К.: Сталь, 2010 – Вип. 5. – С. 262–269.
- [3] Цыхановский В.К. Влияние кривизны вертикальной стенки цилиндрического резервуара на напряженно-деформированное состояние ограждающей конструкции / В.К. Цыхановский, С.М. Талах, А.И. Кордун // Зб. наук. праць Укрінсталькон ім. В.М. Шимановського. – К.: Сталь, 2012 – Вип. 10. – С. 146–156.
- [4] Баженов В.А. Метод скінчених елементів у задачах нелінійного деформування тонких та м'яких оболонок / Баженов В.А., Цыхановський В.К., Кислоокій В.М. – К.: КНУБА, 2000. – 386 с.
- [5] Ортега Дж. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений с многими неизвестными / Дж. Ортега, В. Рейнболт. – М.: Мир, 1975. – 558 с.
- [6] Лурье А.И. Нелинейная теория упругости / Лурье А.И. – М.: Наука, 1980. – 512 с.
- [7] Цыхановский В.К. Влияние формы окончаний цилиндрической оболочки на развитие нелинейно-упругих и упруго-пластических деформаций / В.К. Цыхановский, С.М. Талах, А.И. Кордун // Зб. наук. праць Укрінсталькон імені В.М. Шимановського. – К.: Сталь, 2011 – Вип. 8. – С. 43–59.
- [8] Цыхановский В.К. Интегральный закон состояния нелинейно-упругих мягких оболочек / В.К. Цыхановский // Рукопись деп. в УкрНИИТИ от 16.06.81, № 2832. – К.: 1981 – 50 с.

Надійшла 19.10.2012 р.