

УДК 621.64

Удлер Е.М. – кандидат технических наук, профессор

E-mail: [udler@kgasu.ru](mailto:udler@kgasu.ru)

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

## СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА МЯГКИХ РЕЗЕРВУАРОВ С ЖИДКОСТЬЮ

### АННОТАЦИЯ

В статье описывается разработанная автором методика численного расчета формы мягких резервуаров с жидкостью. Реализованная по этой методике компьютерная программа позволяет по исходным размерам и высоте заполнения резервуара определять: внутренние усилия в материале, величину необходимого для заполнения резервуара избыточного давления, форму главных сечений и объем жидкости в резервуаре.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** мягкие емкости, эластичные резервуары, флекстанки, форма мягкой емкости, объем жидкости в резервуаре, алгоритм и программа автоматизированного расчета.

Udler E.M. – candidate of technical sciences, professor

Kazan State University of Architecture and Engineering

## NUMERICAL METHOD OF CALCULATION OF THE FLEXIBLE RESERVOIR FILLED WITH THE LIQUID

### ABSTRACT

The article contains the author's simple method of digital calculation of form flexible reservoir filled with the liquid. It is developed the computer's program to calculate the effort of tension in shell, the form of main crosses of tank, pressure and quality of the liquid in the reservoir.

**KEYWORDS:** flexitank, reservoir for liquid, volume, form of crosssection, algorithm, program, computer's calculation.

Мягкие резервуары и емкости, называемые иногда эластичными емкостями из мягких оболочек, широко используются для нужд МО и МЧС, предприятий ТЭК, нефтегазовой и химической промышленности, производственных и аграрных фирм. В них хранятся или транспортируются самые разные жидкости: вода, ГСМ, удобрения, трансформаторное масло, химические растворы, нефть. В литературе встречаются различные наименования таких резервуаров: нефтетанки, флекстанки, эластичные резервуары. В зависимости от использования они могут быть стационарными или мобильными – автомобильными, контейнерными, судовыми, плавающими, авиационными. Главными их достоинствами являются: транспортабельность, быстрота приведения в рабочее состояние, возможность многократного использования, долговечность, герметичность, экономичность и экологичность.



Рис. 1. Подушечные мягкие резервуары типа ПЭР фирмы «Политехника»

Мягкие резервуары большой вместимости чаще всего имеют подушечную форму. Примеры таких резервуаров приведены на рис. 1 и 2.



Рис. 2. Мягкий резервуар фирмы «Laboronne-CITAF»

Изготавливают резервуары из прорезиненных тканей или специальных многослойных пленочно-тканевых материалов. Так, фирма «Laboronne-CITAF» использует для своих резервуаров многослойный материал собственной разработки и изготовления, конструкция которого показана на рис. 3.



Рис. 3. Конструкция материала для мягких резервуаров фирмы «Laboronne-CITAF»

Широкому внедрению мягких резервуаров способствуют теоретические и экспериментальные исследования ряда научных и производственных организаций и фирм, в том числе: НИИРП [1], НПФ «Политехника» [2], французская фирма «Laboronne-CITAF» [3].

Эти исследования, в основном, посвящены технологическим вопросам изготовления и эксплуатации. Теоретические вопросы формообразования мягких водонаполненных оболочек исследовались учеными лаборатории мягких оболочек ДВВИМУ имени адмирала Г.И. Невельского [4]. Были получены приближенные решения уравнений, описывающих форму поперечного сечения осимметричных оболочек под гидростатической нагрузкой.

Для целей практического проектирования нами были разработаны методика, алгоритм и программа автоматизированного численного решения задачи определения формы резервуара. Методика расчета основана на дискретизации изогнутой линии поперечного сечения. Рассматривалась средняя по длине часть резервуара длиной в 1 метр, которая априори принималась цилиндрической формы.

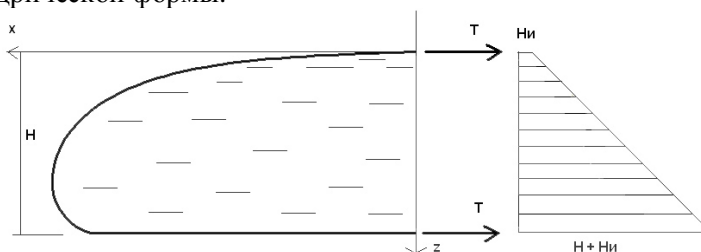


Рис. 4. Схема к определению внутренних усилий в материале резервуара

Для определения погонных поперечных усилий натяжения в материале резервуара под гидростатическим давлением была рассмотрена схема поперечного сечения цилиндрической оболочки, половина которого показана на рис. 4.

Известно, что нормальное гидростатическое давление на оболочку пропорционально высоте столба и плотности жидкости и выражается формулой (1), где  $p$  нормальное давление на оболочку на расстоянии  $z$  от поверхности при плотности жидкости равной,  $\gamma$ .

$$p = z * \gamma \tag{1}$$

При наличии избыточного давления форма эпюры гидростатического давления имеет вид трапеции. Для воды, плотность которой равна единице, значение давления в верхней части резервуара определяется избыточным давлением  $H_u$ , необходимым для его заполнения, а в нижней еще и высотой резервуара  $H+H_u$ .

Очевидно, что погонные (на единицу длины резервуара) поперечные внутренние усилия в оболочке  $T$  могут быть определены из условия равновесия проекций сил и нагрузок на ось  $X$  по формуле (2).

$$T = \frac{H^2 + 2HH_u}{4} \tag{2}$$

Таким образом, величина внутренних усилий в оболочке зависит от высоты резервуара с жидкостью и избыточного давления, необходимого для заполнения. При высоте, значительно меньшей ширины оболочки, избыточное давление мало по сравнению с высотой и практически может не учитываться при определении внутренних усилий.

С целью численного решения задачи сплошную изогнутую линию поперечного сечения оболочки моделируем шарнирно-стержневой системой, показанной на рис. 5. При этом длина стержней зависит от степени дискретизации и ширины заготовки резервуара и определяется формулой (3).

$$d = \frac{B}{n} \tag{3}$$

где  $B$  – полупериметр поперечного сечения оболочки,  $n$  – количество стержней.

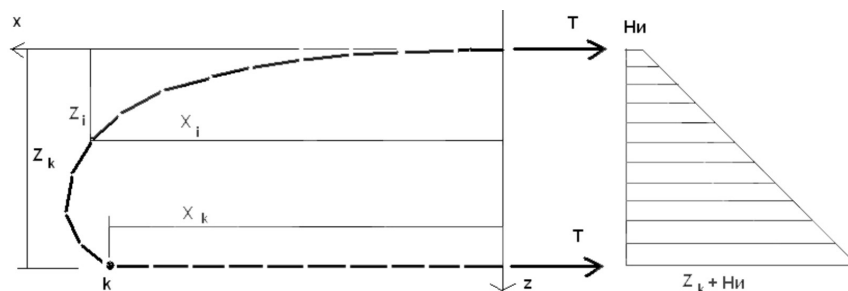


Рис. 5. Схема представления поперечного сечения гибкой оболочки в виде шарнирно-стержневой системы

Рассмотрим схему равновесия  $i$ -ого узла шарнирно-стержневой модели поперечного сечения оболочки с координатами  $X_i, Z_i$ , представленную на рис. 6.

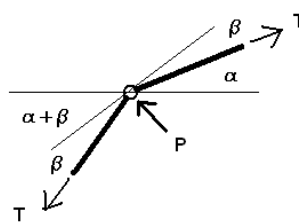


Рис. 6. Схема равновесия  $i$ -ого узла модели поперечного сечения оболочки

Из схемы видно, что приращение угла наклона стержней к оси  $X$  равно удвоенному углу между касательной в узле и стержнем. Это позволяет построить алгоритм определения формы стержневой модели оболочки.

Для нахождения угла  $\beta$  между стержнем и касательной принимаем нагрузку от давления воды в узле по величине ординаты  $z_i$  узла. Спроектировав все силы на нормаль в узле и учитывая зависимость (2), получим формулу (4) для определения искомого угла  $\beta_i$  в  $i$ -том узле:

$$\text{Sin} \beta_i = \frac{p}{2T} = \frac{2(Hu + z_i)}{H^2 + 2HH_u} \tag{4}$$

Для построения ломаной кривой поперечного сечения оболочки используем итерационный метод. Суть его заключается в многократном вычислении угла наклона первого

стержня  $\alpha_1$  в вершине оболочки и последовательного вычисления углов наклона остальных стержней по формуле (5) и координат узлов по формулам (6) и (7):

$$\alpha_i = \alpha_{i-1} + 2\beta_i \quad (5)$$

$$x_i = x_{i-1} + d \cdot \cos \alpha_i \quad (6)$$

$$z_i = z_{i-1} + d \cdot \sin \alpha_i \quad (7)$$

Граничными условиями являются заданные значения полупериметра оболочки  $B$  и высота резервуара  $H$ , представленные зависимостями (8) и (9), где  $x_k, z_k$  – координаты узла в точке перехода в основание,  $k$  – порядковый номер этого узла от вершины резервуара.

$$x_k + d * k = B \quad (8)$$

$$z_k = H \quad (9)$$

Ниже приводится алгоритм вычисления координат поперечного сечения цилиндрического резервуара, заполненного жидкостью:

НАЧАЛО

1. Ввести исходные данные:

$B$  – ширину заготовки,  $H$  – высоту заполненного резервуара,  $n$  – предполагаемое избыточное давление,  $p$  – количество узлов стержневой модели для расчета

2. Установить начальные значения расчетных параметров и управляющих переменных:

$$a_{\min} = 0, \quad a_{\max} = \pi/2, \quad k = 0, \quad x_k = 0, \quad z_k = 0$$

3. Вычислить первое приближение значения угла наклона первого стержня  $a_1 = (a_{\min} + a_{\max})/2$

4. Вычислить длину стержня по формуле  $d = B/n$

5. Вычислить длину образующей по формуле  $L = x_k + d \cdot k$

6. Если выполняются граничные условия (8) и (9), то перейти к пункту 11

7. Если длина образующей  $L$  меньше ширины  $B$ , то присвоить  $a_{\max} = a_1$ , иначе  $a_{\min} = a_1$

8. Вычислить новое значение угла наклона первого стержня  $a_1 = (a_{\min} + a_{\max})/2$

9. Вычислять координаты  $x_i, z_i$  узлов поперечного сечения по формулам (3), (4), (6) и (7) для значений  $i = 2 \div k$ , пока соблюдаются условия  $a_i \leq \pi$  и  $i \leq n$

10. Перейти к пункту 5

11. Вывести результаты расчета (координаты узлов поперечного сечения) на печать

КОНЕЦ

Этот алгоритм был реализован в разработанной автором программе для расчета резервуаров на ЭВМ.

Для проверки применимости методики, алгоритма и программы были проведены лабораторные исследования на моделях резервуаров из полиэтиленовых пленок. Один из образцов таких испытаний показан на фотографии (рис. 7).

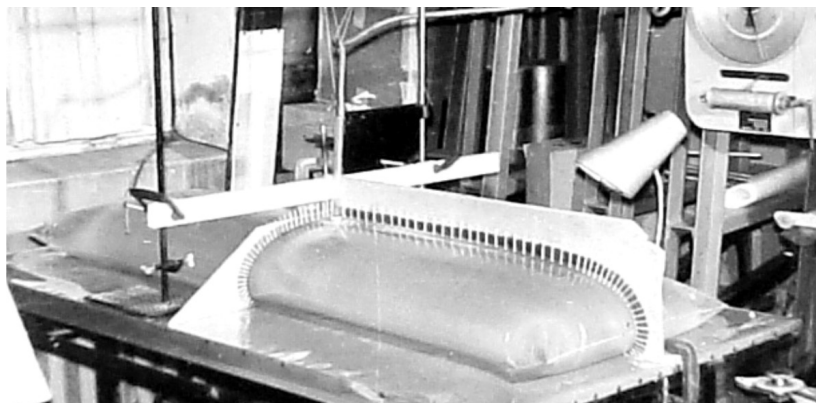


Рис. 7. Лабораторные исследования на моделях резервуаров из ПЭ пленок

Сравнения результатов расчетов и экспериментов на моделях приведены ниже в таблице.

Заметим, что в расчетах не учитывалась растяжимость материалов ввиду незначительных размеров моделей. При необходимости учет растяжимости материала оболочки в процессе вычисления координат точек поперечного сечения возможен по формулам (10) и (11):

$$x_i = x_{i-1} + d * \left(1 + \frac{T}{EF}\right) * \cos\alpha \quad (10)$$

$$z_i = z_{i-1} + d * \left(1 + \frac{T}{EF}\right) * \sin\alpha \quad (11)$$

Для расчета объема жидкости в резервуаре вычислялась площадь поперечного сечения резервуара методом суммирования площадей трапеций. Площадь  $i$ -ой трапеции вычислялась по формуле (12):

$$S_i = \frac{(x_i + x_{i+1}) * (z_{i+1} - z_i)}{2} \quad (12)$$

Как показывают расчеты и результаты экспериментов, объем воды в резервуаре может быть приближенно подсчитан по формуле (13), где:

$S_x$  – площадь поперечного сечения заполненного резервуара в плоскости XOZ,

$M$  – раскройная длина резервуара,  $B$  – раскройная ширина резервуара,

$B_x$  – расчетная ширина заполненного резервуара.

$$V_p = S_x * (M - B + B_x) \quad (13)$$

Таблица

Сравнения теоретических и экспериментальных данных

Образец	Ширина заготовки в мм	Длина заготовки в мм	Высота резервуара в мм	Избыточное давление в мм в/ст	Ширина по расчету	Объем воды по расчету в литрах	Объем воды по эксперименту в литрах	Расхождение
марка	B	L	H	Hн	Bх	Vр	Vэ	%%
МП-1	558	1674	55	0	533	44,09	45,00	2,1
			100	2	511	74,11	72,40	2,3
			170	22	474	109,00	105,50	3,2
			250	120	426	134,15	134,80	0,48
МП-2	557	836	56	0	531	22,00	21,40	2,70
			112	2	505	38,66	36,90	4,56
			168	21	474	50,77	48,60	4,28
			224	100	439	58,80	57,80	1,71
МП-3	556	557	280	300	404	62,86	65,00	3,40
			56	0	530	14,38	14,00	2,62
			112	2	504	24,85	23,10	7,00
			168	22	474	31,93	29,70	7,00
МП-4	556	549	224	100	438	35,90	35,20	2,00
			56	0	529	14,16	13,80	2,50
			112	2	504	24,46	23,00	6,00
			168	22	474	31,40	29,40	6,36
МП-5	780	839	224	100	438	35,24	34,90	1,00
			78	0	744	42,70	42,50	0,46
			156	2	707	73,51	67,00	8,85
			234	22	665	95,25	89,80	5,70
			312	96	617	108,26	107,80	0,43

Из приведенной таблицы видно, что среднее отклонение данных расчетов и экспериментов не превышает 4 %, что находится в пределах точности измерений геометрических параметров образцов.

Анализ результатов расчетов избыточного давления, необходимого для заполнения резервуаров Ни, показывает, что величина этого давления зависит от веса материала и степени заполнения резервуара, показателем которой является отношение высоты к ширине.

При малом заполнении избыточное давление практически равно весу единицы площади материала. Обычно вес материала оболочки не превышает 1-2 кг/кв.м, что аналогично давлению в 1-2 мм вод.ст. Поэтому можно предположить, что вес оболочки практически не влияет на форму резервуара и величину внутренних усилий.

Как показывают расчеты, величина избыточного давления влияет на степень заполнения, определяющую высоту резервуара.

Для наглядности, по результатам вычислений построен график зависимости относительной высоты резервуара от величины избыточного давления.

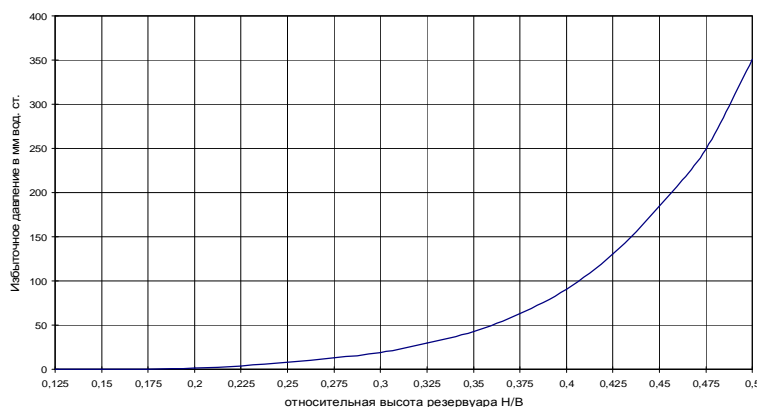


Рис. 8. Зависимость величины избыточного давления Ни (в мм вод.ст.) от величины отношения высоты подъема к начальной ширине резервуара Н/В

Он представлен на рис. 8 и показывает, какое избыточное давление нужно создать для достижения резервуаром той или иной высоты. Из графика следует, что это давление становится заметным при заполнении резервуара на высоту, превышающую 1/4 ширины.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Основные виды мягких оболочечных конструкций, разработанных научно-исследовательским институтом резиновой промышленности НИИРП. // Интернет-сайт НИИРП: [www.niirp.com/catalog1.php](http://www.niirp.com/catalog1.php).
2. Эластичные резервуары, гибкие емкости и вкладыши, мягкие баки и канистры, флекситанки контейнерные. Каталог продукции ООО НПФ Политехника. // Сайт НПФ «Политехника»: [www.flexico.ru/docs/buklet\\_politechnika.pdf](http://www.flexico.ru/docs/buklet_politechnika.pdf).
3. Сайт фирмы «Laboronne-CITAF»: [www.laboronne-citaf.fr](http://www.laboronne-citaf.fr).
4. Магула В.Э., Друзь Б.И., Кулагин В.Д., Милославская Е.П., Новоселов М.В. Судовые мягкие емкости. – Л.: Судостроение, 1966. – 288 с.

### REFERENCES

1. Catalogue of soft shell constructions, created by institute of science and research of rubber's industry NIIRP // [www.niirp.com/catalog1.php](http://www.niirp.com/catalog1.php).
2. Elastic reservoirs, flexible volumes, soft tanks, include's flexitanks. // Catalogue of products of LLC NPF «POLITEHNKA». // [www.flexico.ru/docs/buklet\\_politechnika.pdf](http://www.flexico.ru/docs/buklet_politechnika.pdf).
3. Site of «Laboronne-CITAF» // <http://www.laboronne-citaf.fr>.
4. Magula V.E., Druz B.I., Kulagin V.D., Miloslavskaya E.P., Novoselov M.V. Ship's flexitanks – L.: Shipbuilding, 1966. – 288 с.