

$$P1 = x1 * v = 0.019 * 2.571 = 0.049$$

Частота використання стратегії СКГ- 63/100

$$P2 = x2 * v = 0 * 2.571 = 0$$

Частота використання стратегії БК-1000

$$P3 = x3 * v = 0.37 * 2.571 = 0.951$$

Визначимо оптимальний склад вантажопідйомних механізмів. БК-1000 – провідний, КТА-28 – допоміжний. Розподіл між ними затверджених економічних та технологічних показників такий:

$$\text{БК1000} = 251\,243 * 0,951 = 239\,652 \text{ грн}; 701 * 0,951 = 666,65 \text{ маш.-год.}$$

$$\text{КТА28} = 251\,243 * 0,049 = 11\,591 \text{ грн}; 701 * 0,049 = 32,246 \text{ маш.-год.}$$

Висновок. Таким чином, розглянута у статті методика визначення оптимального техніко-економічного складу вантажопідйомних механізмів дозволяє будівельним підприємствам із великою часткою упевненості виконувати планування своєї господарської діяльності. Запропонована методика також може бути використана службою Замовника при виконанні аналізу проектної документації об'єкта будівництва щодо можливості внесення змін із метою зменшення вартості будівництва.

ВИКОРИСТАНА ЛІТЕРАТУРА

1. **Крушевский А. В.** Теория игр / А. В. Крушевский. – К. : Вища школа, 1977. – 216 с.
2. **Кутковский В. Я.** Дослідження операцій : навч. посіб. / В. Я. Кутковский. – Миколаїв : Вид-во МДГУ ім. Петра Могили, 2003. – 260 с.
3. **Асаул А. Н.** Управление затратами в строительстве / А. Н. Асаул, Е. Г. Никольская. – СПб; СПбГАСУ; М. : Издательство АСВ. – 2007. – 299 с.
4. **Горностаева Ж. В.** Теория игр как один из методов разработки оптимальной стратегии развития предприятия строительного комплекса / Ж. В. Горностаева, А. С. Якубенко. – Россия: Южно-Рос. гос. ун-т экономики и сервиса.
5. **Оуэн Г.** Теория игр / Г. Оуэн. – М. : Мир, 1971. – 230 с.
6. **Ушацкий С. А., Шейко Ю. П.** Організація будівництва / С. А. Ушацкий, Ю. П. Шейко. – К. : Кондор, 2007. – 521 с.
7. **Лубенец Г. К.** Подготовка производства и оперативное управление строительством / Г. К. Лубенец. – К. : Будівельник, 1976.– 731 с.

УДК 629.4:629.12

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ ГЕРМЕТИЗАЦИИ ТРУБОПРОВОДОВ ТРАНСПОРТИРОВКИ И ЕМКОСТЕЙ ХРАНЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ СИТУАЦИЯХ

А. С. Чаплыгин, соиск.

Ключевые слова: *экстремальная ситуация, разгерметизация, пневматическая подушка, метод конечных элементов*

Введение. Как следует из статистических данных, значительная часть экстремальных ситуаций возникает по причине нарушения герметизации специального технологического оборудования, такого как: емкости, трубопроводы, компрессорные установки и т. п. в результате их повреждений или вследствие износа. Опасность здесь заключается в том, что в указанном оборудовании хранения или транспортировки различных жидкостей, которые при своей материальной ценности очень часто являются весьма токсичными продуктами, пожаро- и взрывоопасными. Например, аммиак, хлор, нефть и нефтепродукты и др.

Безопасность и эффективность ведения специальных аварийно-восстановительных работ при разгерметизации трубопроводов и емкостей транспортировки и хранения агрессивных сред в жидком состоянии, в том числе пожаро- и взрывоопасных материалов в жидком состоянии, во многом зависит от выполняемых спецподразделениями операций с использованием тех или иных технических средств. К числу наиболее распространенных и часто применяемых на ранних стадиях возникновения и развития подобных экстремальных ситуаций следует отнести технические средства малой механизации. К их числу относятся бандажи и пневмопластыри

(пневморезервуары ППл), которые изготавливают из химически стойкой армированной резины.

Анализ публикаций. Проведенный анализ литературных источников [1; 2] показывает, что в результате аварийных ситуаций обрушения зданий и сооружений происходит разгерметизация технологического оборудования, в котором находится жидкость под давлением. Ликвидации указанных последствий до настоящего времени не уделяется должного внимания с точки зрения безопасности и эффективности проведения работ.

Цель статьи. Целью проведенных исследований является установление закономерностей и определение граничных условий применения пневмоподушек и пневмопластырей для ликвидации аварийных последствий при разгерметизации емкостей и трубопроводов, в которых находятся агрессивные жидкости под давлением.

Материалы и методы. Применение методов моделирования и статистической обработки при возникновении напряжения в оболочках, связанных с герметизацией технологического оборудования.

Результаты и их обсуждение. При проведении исследований возникли напряженные состояния с применением пневмопластырей и пневмоподушек. Рассмотрим сначала одну половину оболочки ППл, считая, что в силу конструктивных особенностей (защемление по контуру вспомогательной шарнирной рамкой) перемещения по ее внешнему контуру отсутствуют.

Выделим на поверхности этой половины элементарный участок $dxdy$ (рис. 1) и учтем, что давление внутри резервуара q действует как поперечная, равномерно распределенная нагрузка, подобно объемным силам веса при изгибе пластин. Причем, на обе половины ППл – одинаково.

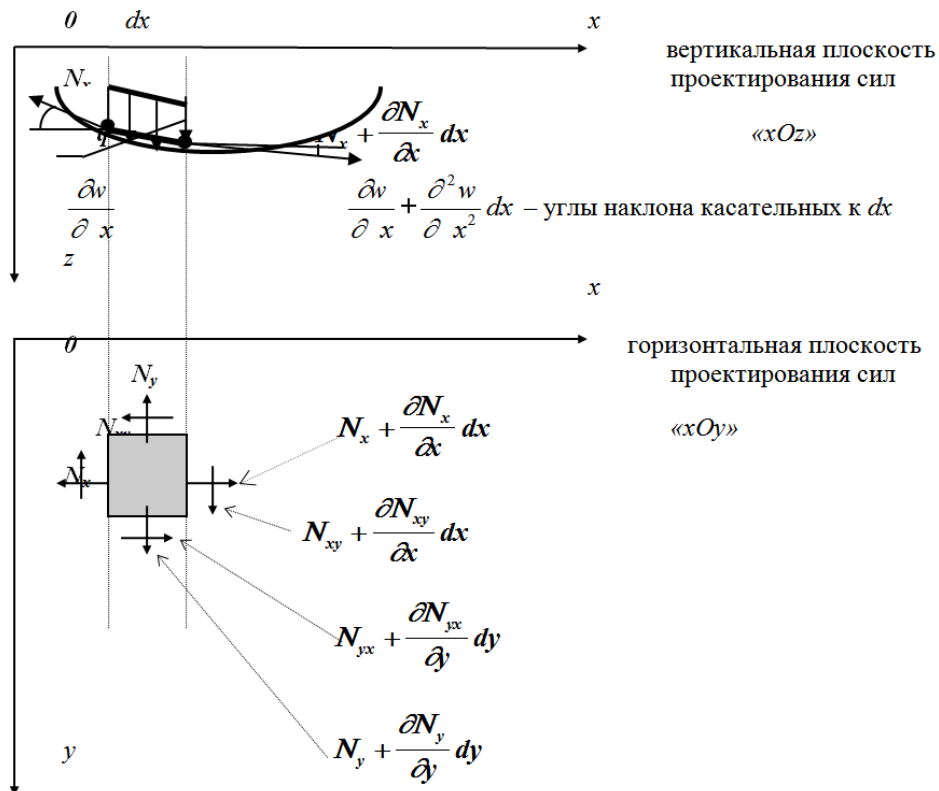


Рис. 1. Напряженно-деформированное состояние (НДС) плоского элемента $dxdy$ под действием сил давления p изнутри гибкой оболочки ППл

В общем виде дифференциальные уравнения равновесия выделенного элемента $dxdy$ запишутся с проектированием всех действующих сил на координатные оси Ox и Oy [3; 4]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{yx}}{\partial y} + X &= 0 \\ \frac{\partial N_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial N_y}{\partial y} + Y &= 0 \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где X и Y – в наиболее общем случае компоненты объёмных сил (если они имеются), приходящиеся на единицу площади срединной плоскости ППл. Для ее изогнутой поверхности дифференциальное уравнение погибов w запишется:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{1}{D} \left(q + N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + N_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2N_{xy} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} - X \frac{\partial w}{\partial x} - Y \frac{\partial w}{\partial y} \right). \quad (2)$$

Здесь $D = \frac{E \cdot h^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость,

где E – модуль упругости 1-го рода; $q(x, y)$ – единичная поперечная нагрузка; h – толщина пластины; ν – коэффициент Пуассона.

Вместе с граничными условиями (края «мембраны» защемлены шарнирной рамкой по периметру прямоугольника $A_1 \times B_1$) это уравнение будет определять прогибы свободной половины ППл в каждой точке в пределах прямоугольного контура рамки, по которому пневморезервуар ППл прижимается к аварийному объекту.

Ввиду того, что одна половина ППл при работе не встречает сопротивления, ее срединная плоскость будет отклоняться на величины w , значительно превышающие ее толщину h . Для определения перемещений и установления величины максимального отклонения центральной точки C необходимо руководствоваться уравнениями больших прогибов, где силы N_x , N_y и N_{xy} будут зависеть как от внешних сил, так и от сил, возникающих в срединной поверхности под действием поперечной нагрузки q . Следовательно, эти силы будут функциями координат x и y .

Полагая, что объёмные силы в плоскости xOy отсутствуют, наши уравнения равновесия на основании (1) запишутся:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial N_x}{\partial x} + \frac{\partial N_{, -}}{\partial -} &= 0 \\ \frac{\partial N_{, -}}{\partial x} + \frac{\partial N_{-}}{\partial -} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Третье недостающее уравнение, необходимое для определения всех трех сил, получается из условия совместности деформаций срединной поверхности пластины (половины оболочки) при ее прогибе.

Соответствующие компоненты деформации срединной поверхности с учетом больших прогибов будут:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \\ \gamma_{, -} &= \frac{\partial \zeta}{\partial -} + \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Взяв от этих выражений вторые производные и скомбинировав получившиеся соотношения, нетрудно показать, что условие совместности деформаций запишется:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial -^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_{, -}}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \gamma_{, -}}{\partial x \partial -} = \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}. \quad (5)$$

Заменив зависимости для деформаций выражениями через те же силы по закону Гука, получим третье уравнение относительно искомых N_x , N_y и N_{xy} :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{hE} (N_x - \nu N_y) \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{hE} (N_y - \nu N_x) \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{hG} N_{xy} \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

введем в рассмотрение функцию напряжений φ . Очевидно, уравнения (3.4) тождественно удовлетворяются, если положить

$$N_x = h \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2}, \quad N_y = h \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2}, \quad N_{xy} = -h \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}, \quad (7)$$

где φ – функция, зависящая от x и y .

Если эти выражения для сил подставить в уравнения (6), то компоненты деформации запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} - \nu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \right), \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} - \nu \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \right), \\ \gamma_{xy} &= -\frac{2(1+\nu)}{E} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Подставив (8) в условие совместности деформаций (5), получим следующее уравнение:

$$\frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 \varphi}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 \varphi}{\partial y^4} = E \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right]. \quad (9)$$

Последнее уравнение содержит две неизвестные функции (w , φ). Чтобы получить систему уравнений для их определения, надо найти еще одно уравнение.

Если в (2) силы N_x , N_y и N_{xy} заменить согласно (7), то получим недостающее второе уравнение:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{h}{D} \left(q + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + 2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right). \quad (10)$$

То есть получена система двух уравнений в частных производных, нелинейных относительно двух функций φ и w , которые носят имя их составителя – уравнений Кармана.

Уравнения (9) и (10) совместно с граничными условиями являются основными уравнениями при решении задач об изгибе пластин, когда их прогибы не малы. Из этой системы и находятся две искомые функции φ и w :

Определив функцию напряжений φ , получим выражения для сил N_x , N_y и N_{xy} , следовательно, знаем деформации растяжения в срединной поверхности для половины оболочки ППл. Имея зависимость для функции w , определяющей изогнутую поверхность пластинки, находим изгибающие моменты, а значит – напряжения изгиба и касательные напряжения, пользуясь теми же формулами, что и в случае пластинки с малым прогибом.

Вместе с этим, для решения задачи необходимо определить и граничные условия для всех сторон прямоугольного контура пневморезервуара

$$\left. \begin{aligned} w=0; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial x^2}=0; \quad \text{для} \quad x=0; \quad x=A_1 \\ w=0; \quad \frac{\partial^2 w}{\partial y^2}=0; \quad \text{для} \quad y=0; \quad y=B_1 \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Таким образом, исследование больших прогибов пневмооболочек сводится к решению двух нелинейных дифференциальных уравнений (9) и (10) с граничными условиями (11). В общем виде их решения не получены, однако известны приближенные методы решения, а также частные случаи, например, для конкретного случая пневморезервуара ППл квадратной формы, которыми оснащены подразделения пожарной охраны.

Численное решение данной задачи нами выполнялось методом конечных элементов (МКЭ), с привлечением компьютерного математического аппарата ANSYS.

На рисунке 2 (по данным расчетов МКЭ) схематично представлена поверхность прогибов свободной половины пневморезервуара ППл с заземленными по контуру (периметр квадрата $A_1 \times A_1$) краями в предкритическом состоянии максимального прогиба его центральной точки C , когда дальнейшее увеличение давления в пневморезервуаре ППл может привести к его разрушению. Реальные отклонения H определялись при помощи специально приспособленного для измерений стенда, где точка C всегда соприкасалась с подвижной («следящей») ограничительной плоскостью $OГР$.

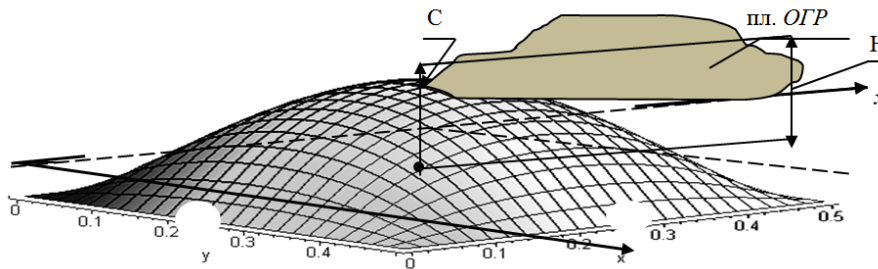


Рис. 2. Графическая интерпретация результатов решения искомых уравнений для АСП-10 при $q = 0,4$ МПа

В таблице приведены расчетные данные смещений H центральной точки C (стрелы прогиба) рассматриваемой половины оболочки пневморезервуара с заземленными краями и величин напряжений растяжений σ_p вблизи нее в зависимости от подаваемого вовнутрь пневморезервуара воздуха под давлением q . Так что в смысле дальнейшего экспериментального подтверждения исследований появляется возможность сопоставить расчетные и экспериментальные данные по оценке предельных состояний имеющихся в наличии ПП и ППЛ, в частности АСП-10.

Таблица

Зависимости для координаты смещения m . C и напряжений растяжения в центральной части АСП-10 от давления внутри пневмооболочки

Типоразмер	$A_1 = B_1 = 0,5\text{м}; (h = 0,01\text{м}, E = 12 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}, [\sigma_{\text{в}}] = 45 \text{ МПа})$							
	Давление воздуха q , (МПа $\times 10^{-2}$)							
АСП-10	5	10	15	20	25	30	35	40
$H, \text{м}$	0,09	0,124	0,142	0,157	0,168	0,173	0,174	0,174
$\sigma_p, \text{МПа}$	23,32	32,12	36,79	40,67	43,52	44,82	45,1	45,1

Выводы. На основе проведенных исследований определены с помощью компьютерного математического аппарата ANSYS численные значения изменения давления воздуха в центральной части пневмоподушки в зависимости от смещения и возникновения напряжений, что является важным в определении граничных условий их применения.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. **Голендер В. А.** Работоспособность аварийно-спасательного комплекса, включающего в себя аварийно-спасательные подушки, выполненные из многослойных композиционных материалов / В. А. Голендер, Н. В. Долгополова, Р. В. Ковалюх // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация последствий : Мат. междунар. конф. – Харьков : 2000. – С. 314 – 318.
2. **Шупіков А. М.** Нестационарні коливання і оптимізація багат шарових пластин та оболонок : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук : спец. 05.02.09 «Динаміка та міцність машин» А. М. Шупіков / Х. : Харк. держ. політехн. ун-т., 1999. – 36 с.
3. **Smetankina N. V.** A noncanonically-shape laminated plate subjected to impact loading. Theory and experiment / N. V. Smetankina, A. N. Shupikov, S. Yu. Sotrikhin, V. G. Yareschenko // Trans. ASME. – Journal of Applied Mechanics. – 2008. – V. 75, N 5. – P. 051004-1–051004-9.
4. **Shupikov A. N.** A noncanonically shape laminated plate subjected to impact loading: Theory and experiment / A. N. Shupikov, N. V. Smetankina, S. Yu. Sotrikhin, V. G. Yareschenko // Trans. ASME. – Journal of Applied Mechanics. – 2008. – V. 75, N 5. – P. 051004-1–051004-9.