

МИНИСТЕРСТВО ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ СССР  
ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ  
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ М.И.КАЛИНИНА

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ СОВЕТ К И14.07.02

На правах рукописи

КАТАН ЛЮДМИЛА ИГОРЕВНА

УДК 624.074.4

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДКРЕПЛЕН-  
НОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ОПИРАНИИ НА УПРУГИЕ ЛОЖМЕНТЫ  
ПРОИЗВОЛЬНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

01.02.03 - строительная механика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание ученой степени кандидата  
технических наук

Днепропетровск - 1983



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

6657a

Вопросы исследования напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций, контактирующих с ложементами, занимают важное место в комплексе задач, решаемых при создании тонкостенных конструкций современной техники. В настоящее время главное направление конструкторской мысли характеризуется стремлением к максимальному снижению материалоемкости и стоимости проектируемых конструкций при одновременном повышении их прочностных показателей. Это неразрывно связано с совершенствованием теории и дальнейшей разработкой методов прочностного расчета.

При эксплуатации тонкостенных оболочечных конструкций возникают случаи нагружения их элементов локальными нагрузками, являющимися результатом контактного взаимодействия с ложементами произвольной протяженности. Одной из основных задач оценки прочности проектируемых конструкций является определение напряженно-деформированного состояния их элементов при учете этого взаимодействия. Недостаточное знание истинного характера распределения нагрузки в области контакта приводит к неправильной оценке напряженного состояния конструкции, что, в конечном итоге, влияет на ее весовое совершенство. В связи с этим, теоретико-экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния оболочечной конструкции при учете контактного взаимодействия с ложементами произвольной протяженности следует признать актуальными.

В данной работе проведено исследование контактного взаимодействия и напряженно-деформированного состояния ортотропной цилиндрической оболочки, подкрепленной по торцам кольцами и сферически-

ми днцами, испытывающей произвольное радиальное нагружение при опирании на упругие ложементы произвольных размеров.

Цель работы:

- разработка методики расчета контактного давления и напряженно-деформированного состояния подкрепленной цилиндрической оболочки при опирании на двусторонние или односторонние упругие ложементы произвольной протяженности;

- составление эффективного алгоритма и программы расчета;

- анализ распределения контактного давления и напряженно-деформированного состояния в оболочке для широкого диапазона жесткостных и геометрических параметров конструкции с помощью разработанной программы;

- проведение экспериментальных исследований деформированного состояния подкрепленных цилиндрических оболочек при взаимодействии с упругими ложементами произвольной протяженности и сравнение теоретических результатов с экспериментальными данными.

Научная новизна. В работе предложена методика, позволяющая исследовать влияние конечных размеров ложемента (длины, угла охвата), его месторасположения, коэффициента жесткости, а также условий на торцах оболочки на ее напряженно-деформированное состояние и распределение контактного давления. Получены разрешающие системы алгебраических уравнений контактной задачи для подкрепленной цилиндрической оболочки при опирании ее на двусторонние или односторонние упругие ложементы произвольной протяженности. С помощью специально спроектированных и изготовленных упругих ложементах проведены экспериментальные исследования влияния длины, угла охвата и месторасположения ложементах на деформиро-

важное составное оболочек.

Достоверность и обоснованность теоретических исследований подтверждены путем сравнения с полученными в работе экспериментальными данными и имеющимися в литературе теоретическими разработками других авторов.

Практическая ценность результатов исследований состоит в разработке эффективного алгоритма и программы расчета контактного давления и напряженно-деформированного состояния цилиндрической конструкции, испытывающей произвольное радиальное нагружение при опирании на упругие ложементы произвольной протяженности. Программа расчета составлена на языке Алгол-ГДР. Предложенная методика и программа расчета внедрены в практику проектирования конструкторских бюро. Годовой экономический эффект от внедрения составил 162, 56 тыс.руб.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы были доложены и обсуждены на конференции молодых ученых (МАИ, 1977), IV Всесоюзной конференции по статике и динамике пространственных конструкций (Киев, 1978), Всесоюзной школе и конференции молодых ученых "Механика деформируемого твердого тела" (Куйбышев, 1978), межотраслевом семинаре по методам расчета и проектирования анизотропных конструкций (Тернополь, 1978), межотраслевом научно-техническом семинаре "Опыт и перспективы разработки несущей конструкции современной техники" (Ивано-Франковск, 1980), II Всесоюзной конференции "Смешанные задачи механики деформируемого тела" (Днепропетровск, 1981), I Всесоюзной научно-технической конференции "Прочность, жесткость и технологичность изделий из композиционных материалов" (Каменец-Подольский, 1982), семинарах Института технической механики АН УССР в 1975-1981 г.г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 6 работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из предисловия, введения, четырех глав, заключения, списка литературы (108 наименований) и приложения. Общий объем диссертации 154 стр., в том числе 93 стр. машинописного текста, 29 рисунков, 5 таблиц, приложение на 28 стр.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении сформулирована основная цель работы, обоснована ее актуальность. Приведен обзор работ советских и зарубежных авторов, посвященных исследованию напряженно-деформированного состояния оболочечных конструкций при опирании на ложементы. Рассмотрены исследования, в которых распределение контактных нагрузок считается заранее известным, и работы, в которых эти нагрузки определяются из решения контактных задач. Установлено, что вопрос исследования напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки при опирании ее на ложементы произвольной протяженности недостаточно полно изучен. Отмечено ограниченное количество экспериментальных исследований по затронутой проблеме.

В первой главе дана постановка задачи о напряженно-деформированном состоянии подкрепленной цилиндрической оболочки, испытывающей произвольное радиальное нагружение  $p(r, \varphi)$  и лежащей на упругих ложементах произвольной длины и угла охвата (рис. I).

Приведены основные уравнения и зависимости для определения напряженно-деформированного состояния ортотропной цилиндрической

оболочки при действии произвольной радиальной нагрузки.

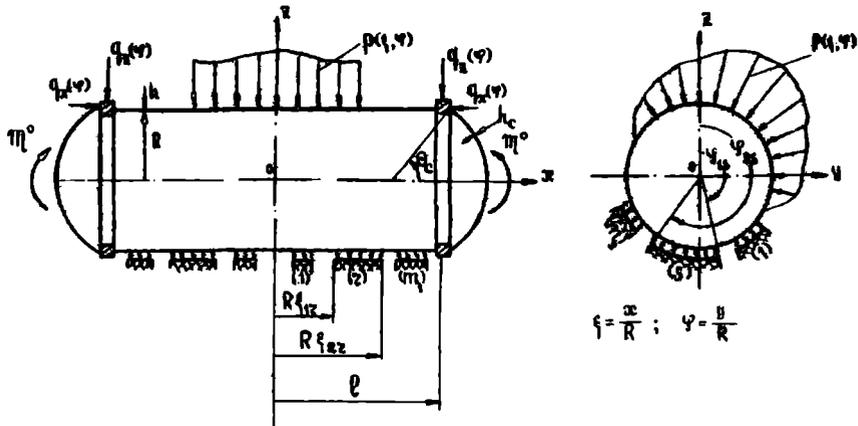


Рис. I.

Для решения используется метод тригонометрических рядов. Сходимость рядов оценивается путем численного эксперимента. Для улучшения сходимости медленно сходящихся рядов применяется нелинейное преобразование Шенкса.

Деформированное состояние оболочки описывается уравнениями обобщенного основного напряженного состояния с добавлением составляющих от простого краевого эффекта и поперечного изгиба балки-оболочки

$$L_n w_n(\xi) = q_n(\xi), \quad (1)$$

где  $w_n(\xi)$ ,  $q_n(\xi)$  – коэффициенты разложения радиального перемещения и радиальной нагрузки в ряд Фурье по окружной координате ;  $L_n$  – дифференциальный оператор, имеющий следующий вид:

$$L_0 = \frac{D_1}{R^2} \frac{d^4}{d\xi^4} + \frac{E_1 h}{R^2}; \quad L_1 = \frac{E_1 h}{R^2} \frac{d^4}{d\xi^4}$$

$$L_n = \frac{E_1 h}{R^2 n^4} \frac{d^4}{d\xi^4} + \frac{D_2}{R^2} (n^2 - 1)^2, \quad (n = 2, 3, \dots), \quad (2)$$

где  $D_i = \frac{E_i h^3}{12(1-\nu_i^2)}$ , ( $i = 1, 2$ );  $E_i, \nu_i$  - модули упругости и коэффициенты Пуассона материала цилиндрической оболочки в продольном ( $i = 1$ ) и поперечном ( $i = 2$ ) направлениях. Общие решения уравнений (1) представляются в виде

$$W_n(\xi) = \sum_{i=1}^4 C_{in} f_{in}(\xi) + \sum_{m=0}^{\infty} W_{mn}^c \cos \lambda_m \xi + \sum_{m=1}^{\infty} W_{mn}^s \sin \lambda_m \xi, \quad (3)$$

где

$$W_{mn}^c = \begin{cases} \frac{R^4}{D_1(4\beta_0^4 + \lambda_m^4)} Q_{mn}^c, & m = 0, 1, \dots; \\ \frac{1}{E_2 h R^2} \left(\frac{l}{m\pi}\right)^4 Q_{mn}^c, & m = 1, 2, \dots; \\ \frac{R^2 n^4}{E_2 h (4\beta_n^4 + \lambda_m^4)} Q_{mn}^c, & m = 0, 1, \dots; \end{cases} \quad (4)$$

$$\lambda_m = \frac{m\pi R}{l}; \quad 4\beta_0^4 = \frac{E_2 h R^2}{D_1}; \quad 4\beta_n^4 = \frac{D_2 n^4 (n^2 - 1)^2}{E_2 h R^2}, \quad n = 2, 3, \dots,$$

$f_{in}(\xi)$  - гипертригонометрические (при  $n = 0, 2, \dots$ ) и степенные (при  $n = 1$ ) функции;  $Q_{mn}^c, Q_{mn}^s$  - коэффициенты разложения  $Q_n(\xi)$  в тригонометрический ряд по  $\xi$

Пространственная деформация подкрепляющих торцевых колец описывается уравнениями теории изгиба круговых стержней. Деформированное состояние сферических оболочек при действии самоуравновешенных нагрузок описывается уравнениями безмоментной теории.

Постоянные интегрирования  $C_{in}$  определяются из условий сопряжения цилиндрической оболочки, торцевых колец и сферических дисков (для  $n = 0, 2, \dots$ ), а также условий равновесия оболочки как балки пологого сечения (для  $n = 1$ ). Если граничные условия и нагружение оболочки симметричны относительно ее середины, то искомые постоянные имеют вид:

$$C_{in} = \lambda_{in} + \sum_{m=1}^{\infty} (-1)^m \lambda_{imn} W_{mn}^c;$$

$$C_{2n} = \lambda_{2n} + \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \lambda_{2m} w_{mn} \quad n = 0, 2, \dots; \quad (5)$$

$$C_{21} = \frac{\eta^2}{2\pi R h E_1} + \frac{1}{2} \left( \frac{RR}{l} \right)^2 \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m m^2 w_{m1},$$

где  $\lambda_{2n}, \lambda_{21}$  - коэффициенты, учитывающие вид нагружения колец;  
 $\lambda_{22m}, \lambda_{21m}$  - коэффициенты, учитывающие упругость цилиндрической, сферической оболочек и деформацию торцевых колец в плоскости и из нее.

Используя известные зависимости внутренних усилий в оболочке от радиального перемещения, с помощью соотношений (3), (5) получены выражения для компонентов напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки при произвольном радиальном нагружении с учетом упругости подкрепляющих ее торцевых колец и прилегающих к ним сферических днщ.

Во второй главе получено решение контактной задачи для подкрепленной ортотропной цилиндрической оболочки при опирании ее на упругие ложементы произвольной протяженности в продольном и поперечном направлениях. Для ложементов принимается модель упругого основания винклеровского типа, реакция которого записывается в виде:

для основания с двусторонними связями

$$p_{zs}(\xi, \varphi) = -c_{zs} w(\xi, \varphi); \quad (6)$$

для основания с односторонними связями

$$p_{zs}(\xi, \varphi) = -c_{zs} \frac{w(\xi, \varphi) + |w(\xi, \varphi)|}{2} \quad (7)$$

Здесь  $c_{zs}$  - коэффициент жесткости  $s$ -го участка  $\tau$ -го ложемента;  $\tau = 1, \dots, m_1$ ,  $s = 1, \dots, m_2$

Радиальное перемещение оболочки представляется следующим образом

$$W(\xi, \varphi) = \sum_{k=0}^{\infty} \left[ \sum_{l_n} \bar{c}_{l_n} f_{l_n}(\xi) + \sum_{m_n} \bar{w}_{m_n} \cos \lambda_{m_n} \xi \right] \cos k \varphi + \\ + \sum_{k=1}^{\infty} \left[ \sum_{l_n} \bar{c}_{l_n} f_{l_n}(\xi) + \sum_{m_n} \bar{w}_{m_n} \cos \lambda_{m_n} \xi \right] \sin k \varphi. \quad (8)$$

Из условия равновесия рассматриваемой конструкции следует, что суммарная радиальная нагрузка вне области контакта оболочки с элементами равна внешней нагрузке

$$q(\xi, \varphi) = p(\xi, \varphi), \quad (9)$$

а в области контакта

$$q(\xi, \varphi) = p(\xi, \varphi) + p_{\tau s}(\xi, \varphi). \quad (10)$$

В результате умножения каждого из этих соотношений на  $\cos k \varphi \cos \frac{i k \xi}{r} \xi$  и  $\sin k \varphi \cos \frac{i k \xi}{r} \xi$ , интегрирования по всей поверхности оболочки, получены выражения для коэффициентов разложения суммарной нагрузки:

$$q_{tk} = \bar{p}_{tk} + \sum_{\tau=1}^{m_1} \sum_{s=1}^{m_2} c_{\tau s} \int_{\xi_0}^{\xi_1} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} p_{\tau s}(\xi, \varphi) \cos k \varphi \cos \frac{i k \xi}{r} \xi d\xi d\varphi, \quad k, t = 0, 1, \dots; \quad (11)$$

$$\bar{q}_{tk} = \bar{p}_{tk} + \sum_{\tau=1}^{m_1} \sum_{s=1}^{m_2} c_{\tau s} \int_{\xi_0}^{\xi_1} \int_{\varphi_0}^{\varphi_1} p_{\tau s}(\xi, \varphi) \sin k \varphi \cos \frac{i k \xi}{r} \xi d\xi d\varphi, \quad t = 0, 1, \dots; \\ k = 1, 2, \dots$$

После подстановки в эти соотношения выражений для реакций элементов  $p_{\tau s}(\xi, \varphi)$  в виде (6), (7) с учетом (5), (8) и полученных в гл. I связей между коэффициентами разложения произвольной радиальной нагрузки  $q(\xi, \varphi)$  и радиального перемещения оболочки  $W(\xi, \varphi)$  типа (4) получена бесконечная система алгебраических уравнений относительно искомых коэффициентов  $\bar{c}_{l_n}$  и  $\bar{w}_{m_n}$  радиального перемещения оболочки  $W_{mn}$  и  $\bar{W}_{mn}$ . Для двустороннего основания эта система является линейной и имеет

вид:

$$[a_{mnk}^{(1)}] \{w_{mn}\} + [\bar{a}_{mnk}^{(1)}] \{\bar{w}_{mn}\} = \{p_{tk}\}, \quad m, n, t, k = 0, 1, \dots; \quad (I2)$$

$$[a_{mnk}^{(2)}] \{w_{mn}\} + [\bar{a}_{mnk}^{(2)}] \{\bar{w}_{mn}\} = \{\bar{p}_{tk}\}, \quad \begin{matrix} m, n, t = 0, 1, \dots; \\ k = 1, 2, \dots \end{matrix}$$

где  $[a_{mnk}^{(i)}]$ ,  $[\bar{a}_{mnk}^{(i)}]$  ( $i = 1, 2$ ) – квадратные матрицы податливости, элементы которых зависят от жесткостных и геометрических параметров оболочки и упругих ложементов;

$\{w_{mn}\}$ ,  $\{\bar{w}_{mn}\}$  – матрицы-столбцы искомых величин;

$\{p_{tk}\}$ ,  $\{\bar{p}_{tk}\}$  – матрицы-столбцы коэффициентов разложения внешней нагрузки в тригонометрический ряд. Для одностороннего основания эта система является нелинейной и принимает вид:

$$[a_{mnk}^{(1)}] \{w_{mn}\} + [\bar{a}_{mnk}^{(1)}] \{\bar{w}_{mn}\} = \{p_{tk}\} - \{b_{tk}\}, \quad m, n, t, k = 0, 1, \dots; \quad (I3)$$

$$[a_{mnk}^{(2)}] \{w_{mn}\} + [\bar{a}_{mnk}^{(2)}] \{\bar{w}_{mn}\} = \{\bar{p}_{tk}\} - \{\bar{b}_{tk}\}, \quad \begin{matrix} m, n, t = 0, 1, \dots; \\ k = 1, 2, \dots \end{matrix}$$

где  $\{b_{tk}\}$ ,  $\{\bar{b}_{tk}\}$  – матрицы-столбцы коэффициентов разложения дополнительной реактивной нагрузки, возникающей за счет односторонней связи оболочки и ложементов.

Коэффициенты матриц  $[a_{mnk}^{(i)}]$ ,  $[\bar{a}_{mnk}^{(i)}]$  ( $i = 1, 2$ ) этой системы отличаются от соответствующих коэффициентов системы (I2) множителем  $1/2$  при коэффициенте жесткости ложемента  $C_{ts}$ . Для решения системы (I3) применяется метод последовательных приближений. На каждом шаге решается бесконечная система линейных алгебраических уравнений. Для получения решения этой системы, также как и системы (I2), используется метод редукции.

Полученное решение систем уравнений (I2), (I3) позволяет определить радиальное перемещение оболочки, контактное давление

и компоненты напряженно-деформированного состояния.

Для численной реализации представленной методики расчета контактного давления и напряженно-деформированного состояния подкрепленной цилиндрической оболочки, испытывающей произвольное радиальное нагружение при опирании на двусторонние или односторонние упругие ложементы произвольной протяженности, разработан алгоритм расчета. На языке Алгол-ГДР составлена программа расчета, реализованная на ЭЦМ типа БЭСМ-6 с использованием мониторной системы "Дубна".

В программе для решения редуцированных систем уравнений применяется модифицированный метод оптимальных исключений, для улучшения сходимости медленно сходящихся рядов используется нелинейное преобразование Шенкса. Это позволяет увеличить точность счета, экономно использовать ресурсы ЭЦМ.

В третьей главе с помощью разработанной программы проведены конкретные расчеты с целью исследования влияния различных жесткостных и геометрических параметров (длины, угла охвата, месторасположения, коэффициента жесткости) упругих ложементов, а также условий на торцах оболочки на распределение контактного давления и ее напряженно-деформированное состояние.

Рассмотрена цилиндрическая оболочка ( $\frac{h}{R} = 10^{-2}$ ;  $\frac{l}{R} = 2$ ;  $R = 0,1$  м), подкрепленная по торцам кольцами прямоугольного поперечного сечения  $S = H = 8 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$ , лежащая на симметрично расположенных двусторонних упругих ложементах ( $m_1 = m_2 = 1$ ;  $c_1 = 8 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$ ). Оболочка нагружена сосредоточенными на краях силами  $Q_z(\varphi) = 8,6 \cdot 10^5 \frac{\text{Н}}{\text{м}}$  распределенными равномерно в кольцевом направлении на участке  $-\frac{\pi}{12} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{12}$ .

Анализ результатов расчета показал, что на распределение контактного давления существенное влияние оказывает местораспо-

ложение ложементов и в меньшей степени его длина. Установлено, что для упругого ложементов, расположенного посередине оболочки (центральный ложемент), распределение контактного давления близко к равномерному в продольном направлении, если длина его не больше радиуса оболочки. С приближением ложементов к торцу оболочки (две опоры) протяженность опорного основания, для которого контактное давление вдоль оболочки распределяется равномерно, меньше радиуса, и тем меньше, чем дальше отстоит ложемент от середины оболочки.

На уровень напряженно-деформированного состояния оболочки, как и на распределение контактного давления, более существенное влияние оказывают месторасположение и угол охвата ложементов, чем его длина. На рис. 2 представлены графики зависимости максимального значения кольцевого напряжения в оболочке  $\sigma_{\theta}$  от относительной длины ложементов  $\Delta l = \frac{\Delta l}{R}$  при фиксированном угле охвата ( $\varphi_{\text{н}} = \frac{2}{3} \pi$   $\varphi_{\text{к}} = \pi$ ). На рис. 3 дана зависимость  $\sigma_{\theta}$  от угла охвата ложементов постоянной длины  $\Delta l = R$ . Сплошные линии соответствуют опиранию на центральный ложемент ( $\varphi_{\text{н}} = 0$ ), пунктирные - на два ложементов ( $\varphi_{\text{н}} > 0$ ).

Сравнение результатов расчета кольцевых напряжений в оболочке, контактирующей с ложементов различной жесткости, с имеющимися в литературе теоретическими решениями, показало, что учет контактного взаимодействия оболочки с упругими ложементов может привести к значительному завышению или занижению уровня напряженного состояния. Поэтому при оценке прочности оболочки, взаимодействующей с упругими ложементов, следует учитывать ее совместное деформирование с ложементов.

Для рассматриваемой конструкции проведены расчеты контактного давления и напряженного состояния при различных значениях

высоты поперечного сечения подкрепляющих торцевых колец ( $H = (I + I_0)h$ ). Показано, что с увеличением жесткости торцевых колец ( $H > 7h$ ) величины максимального кольцевого напряжения и контактного давления уменьшаются и асимптотически приближаются к соответствующим значениям с абсолютно жесткими торцами.

На основании разработанной методики и программы расчета исследовано контактное давление и напряженное состояние стеклопластиковых баков тракторных опрыскивателей семейства ОН-400 при опирании их на односторонние упругие ложементы. Анализ полученных результатов по оценке нагруженности и прочности баков позволял дать рекомендации по совершенствованию конструкций.

В четвертой главе приведено описание экспериментальных исследований деформированного состояния модельных оболочек при взаимодействии с произвольно расположенными упругими ложементами различной длины и угла охвата и дан анализ их результатов.

Испытания проводились на цилиндрических оболочках из АМГ-6 ( $\frac{h}{R} = 1,3 \cdot 10^{-2}$ ;  $\frac{l}{R} = 2,2$ ;  $R = 93$  мм), подкрепленных по краям кольцами прямоугольного поперечного сечения  $b \cdot H = 8 \cdot 15$  мм<sup>2</sup>, и оболочках из стеклопластика со сферическими днищами на торцах ( $\frac{h}{R} = 1,8 \cdot 10^{-2}$ ;  $\frac{l}{R} = 2,1$ ;  $R = 170$  мм;  $\theta_c = 30^\circ$ ;  $\frac{h_c}{R} = 3 \cdot 10^{-2}$ ). Нагружение оболочек осуществлялось с помощью специально спроектированных и изготовленных упругих ложементов различной длины и угла охвата. На оболочках из АМГ-6 с помощью проволочных тензодатчиков проводились замеры кольцевых деформаций, а на оболочках из стеклопластика с помощью специальных

измерительных колец проводились замеры радиальных перемещений оболочки в диаметрально противоположных точках поперечного сечения. Результаты испытаний нанесены на рис.4,5 значками  $\Delta$ ,  $\square$ ,  $\circ$ ,  $\bullet$ . На рис.4 значками  $\Delta$ ,  $\circ$  отмечены экспериментальные значения кольцевых деформаций  $\epsilon_a$ , зафиксированные при нагружении оболочки из АМГ-6 в сечении  $x = 50$  мм центральным ложементам с углом охвата  $\Delta\psi = 120^\circ$  и длиной  $\Delta l = 100, 200$  мм соответственно. Результаты численного расчета, соответствующие этим случаям нагружения, представлены кривыми 1,2. Значками  $\square$  и кривой 3 отмечены экспериментальные и теоретические значения  $\epsilon_a$  в том же сечении при нагружении оболочки двумя ложементами того же угла охвата и длиной 100 мм, отстоящими от середины оболочки на расстоянии 50 мм.

На рис.5 значками  $\circ$  и кривой 1 нанесены экспериментальные и расчетные значения изменения диаметра оболочки из стеклопластика  $\Delta W$  в точке  $(0, \sqrt{x})$  при нагружении её центральным ложементам длиной  $\Delta l = 100$  мм и углом охвата  $\Delta\psi = 60^\circ, 120^\circ, 160^\circ$ . Значками  $\bullet$  и кривой 2 отмечены значения  $\Delta W$  в той же точке при нагружении оболочки ложементам длиной 50, 100, 200 мм при фиксированном угле охвата ( $60^\circ$ ).

Результаты проведенных испытаний подтвердили теоретические выводы о преимущественном влиянии месторасположения и угла охвата ложемента на деформированное состояние оболочки (рис.4,5). Сравнение результатов расчета с полученными экспериментальными данными показало их удовлетворительное совпадение. Максимальное отличие теоретических и экспериментальных результатов  $\sim 15-25\%$ .

В приложении приведены программа расчета контактного давления и напряженно-деформированного состояния оболочки при опирании на произвольные упругие ложемента, а также документы, подтверждающие практическую ценность работы.

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Получены зависимости для определения компонентов напряженно-деформированного состояния ортотропной цилиндрической оболочки при произвольном радиальном нагружении с учетом упругости подкрепляющих ее торцевых колец и прилегающих к ним сферических дниц.

2. Решена контактная задача для подкрепленной цилиндрической оболочки при опирании ее на упругие ложементы произвольной протяженности с двусторонними или односторонними связями. Решение представлено в матричном виде. Получены выражения для определения компонентов напряженно-деформированного состояния оболочки с учетом контактного взаимодействия ее с ложементами.

3. Разработана методика и эффективный алгоритм расчета контактного давления и напряженно-деформированного состояния подкрепленной ортотропной цилиндрической оболочки, испытывающей произвольное радиальное нагружение и лежащей на двусторонних или односторонних упругих ложементах конечных размеров. Создана программа расчета на языке Алгол-ГДР, реализованная на ЭЦМ типа БЭСМ-6.

4. На конкретном примере исследовано влияние различных жесткостных и геометрических параметров конструкции на распределение контактного давления и напряженно-деформированное состояние оболочки. В частности показано:

- на распределение контактного давления и напряженно-деформированное состояние оболочки месторасположение и угол охвата ложемента оказывают более существенное влияние, чем его длина;

- при оценке прочности цилиндрической оболочки, контактирующей с упругими ложементами произвольной протяженности, необходимо учитывать ее совместное деформирование с ложементами.

5. С помощью специально спроектированных и изготовленных упругих элементов проведены экспериментальные исследования влияния длины, угла охвата, а также месторасположения упругих элементов на деформированное состояние испытываемых оболочек. Результаты проведенных испытаний подтвердили теоретический вывод о преимущественном влиянии месторасположения и угла охвата элемента на деформированное состояние оболочки.

6. Разработанная методика и реализованный программой алгоритм расчета внедрены в инженерную практику ряда конструкторских бюро. Проведен общий анализ напряженного состояния баков тракторных опрыскивателей семейства ОН-400 при опирании на произвольные упругие элементы. Даны рекомендации по совершенствованию этих конструкций. Годовой экономический эффект от внедрения составил 162,56 тыс.руб.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Катан Л.И., Макеев Е.М. О контактном взаимодействии упруго-сопряженных балок при поперечном изгибе.- В кн.: Прочность, надежность конструкций. Киев: Наук. думка, 1978, с.61-68.
2. Катан Л.И. Контактная задача для цилиндрической оболочки и прямоугольного в плане упругого основания.- В кн.: Механика деформированного твердого тела: Тез. докл. Куйбышев: Изд-во Куйбыш.ун-та, 1978, с. 97-98.
3. Катан Л.И., Макеев Е.М. Контактная задача при цилиндрической

66574 а

оболочки, лежащей на круговых опорах произвольной протяженности.- Прикл. механика, 1979, т.15, вып.3, с.46-52.

4. Катан Л.И., Макеев Е.М. Контактное взаимодействие цилиндрической емкости с односторонними упругими опорами.- В кн.: Прочность и надежность сложных систем. Киев: Наук. думка, 1979, с.64-73.
5. Гайдученко А.П., Катан Л.И., Макеев Е.М. К исследованию напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки при нагружении через круговые упругие ложементы.- В кн.: Прочность и надежность технических устройств. Киев: Наук. думка, 1981, с.16-21.
6. Катан Л.И. Исследование напряженно-деформированного состояния ортотропной цилиндрической оболочки при поперечном нагружении и учете контактного взаимодействия с опорным основанием.- В кн.: Смешанные задачи механики деформируемого тела. II Всесоюзная научная конференция (г. Днепропетровск, 15-18 сентября 1981 г.): Тез. докл. Днепропетровск: Изд-во Днепропет. ун-та; 1981, с.109.

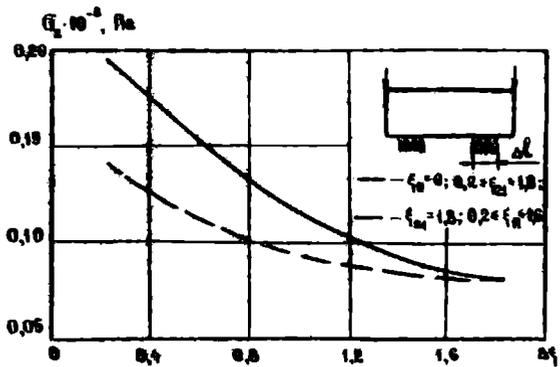


Рис. 2.

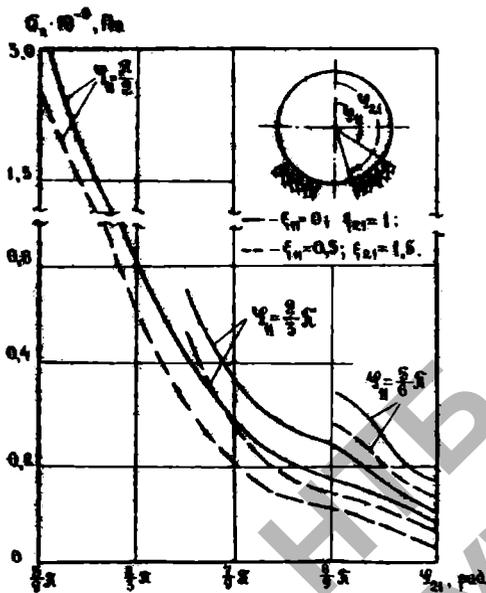


Рис. 3.

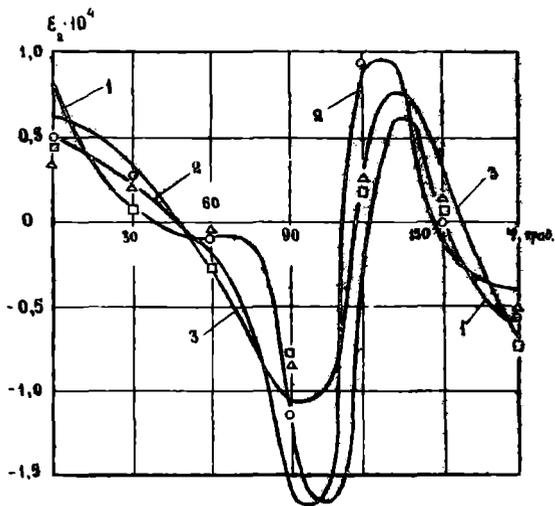


Рис. 4.

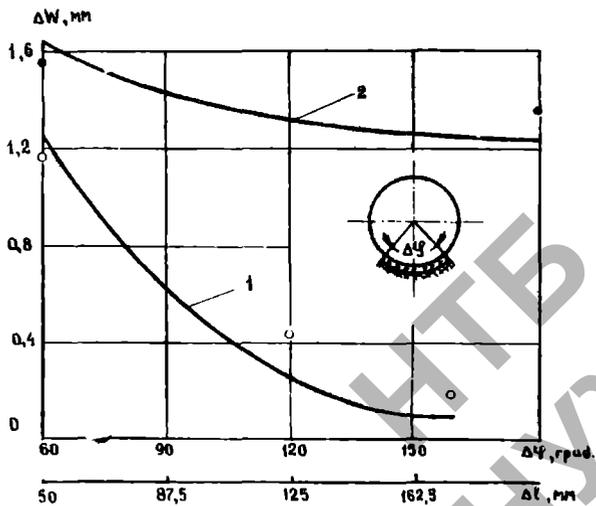


Рис. 5.

Катан Людмила Игоревна

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ПОДРЕЗАННОЙ  
ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ ПРИ ОПИРАНИИ НА УПРУГИЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПРОИЗ-  
ВОЛЬНОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ

01.02.03 - строительная механика

Подписано к печати 06.01.83. БТ 60004. Формат 60 x 84/16.

Бумага для множительных аппаратов. Ротапринт. Усл. печ. л. 1.2.

Уч.-изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ № 656 . Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДИИТа. 320629, ГСП, Днепропетровск,  
10, ул. Акад. В.А. Лазаряна, 2.

НТБ  
ДНУЖТ