

Г 52

Библ.

Отт. кад. стр. мех.

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

В.И.С.

На правах рукописи

Гладкий Александр Васильевич

УДК 539.3

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЖЕСТКОПЛАСТИЧЕСКИХ
ОБОЛОЧЕЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ЛОКАЛЬНОМ НАГРУЖЕНИИ

Специальность 01.02.03 - Строительная механика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

НТБ
ДНУЖТ

Днепропетровск - 1969

Работа выполнена в Институте технической механики АН УССР

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор В.С.Гудрамович

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор В.П.Ильин

кандидат технических наук,
доцент А.А.Брызна

Ведущая организация - Калининский ордена Трудового Красного
Знамени политехнический институт

Защита состоится "22" декабря 1989г. в 15 часов
на заседании Специализированного совета К И4.07.02
Днепропетровского института инженеров железнодорожного
транспорта /320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул.акад.В.А.Лазаряна, 2, ДИИТ/.

8693en

Днепропетровска.

Поверните книгу не позднее указанного термина.

НКО

НТБ
ДНУЖТ

Киево-Святошинська друк.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Вопросы прочности и надёжности относятся к числу проблемных, которые играют решающую роль при создании современных конструкций в различных отраслях современного машиностроения: авиационной и космической технике, судостроении, химическом и энергетическом машиностроении, в промышленном и гражданском строительстве. В особенности это относится к тонкостенным конструкциям типа оболочек, сочетающих малый вес с высоким уровнем несущей способности.

При эксплуатации тонкостенных оболочечных конструкций возникают случаи нагружения их элементов локальными усилиями. Такие нагрузки являются результатом контактного взаимодействия элементов конструкций с различного рода жёсткими и упругими телами: опорными устройствами при опирании различных емкостей, в местах крепления конструкций, в результате контактного взаимодействия с различными подкрепляющими элементами (рёбрами жёсткости, накладками). Локальное нагружение может возникнуть при действии внешней среды.

Возрастающие требования к снижению массогабаритных характеристик тонкостенных конструкций, применение новых материалов приводят к необходимости использования различных нелинейных теорий расчёта. Учёт физической и геометрической нелинейности позволяет наиболее точно описать реальное поведение конструкций при различных случаях эксплуатации, определить реальные запасы прочности.

Задача исследования локально нагруженных оболочек является одной из наиболее актуальных в прикладной механике. Исследования по механике оболочек под действием локальных нагрузок представлены в многочисленных работах. Однако этот раздел теории оболочек требует дальнейшего развития и уточнения. Особенно это касается определения несущей способности локально нагруженных оболочек с учётом физической и геометрической нелинейности. Экспериментальные исследования несущей способности локально нагруженных оболочек занимают особое место, однако таких исследований недостаточно. Проведение их представляет существенный интерес.

Целью работы является создание эффективной методики численного определения несущей способности гладких и подкреплённых оболочек при нагружении равномерным и неравномерным внешним давлением по площадке, прямоугольной в плане, опорным устройством в виде жёсткого ложементa, при комбинированном нагружении осевой силой, изгибающим моментом и локальными поперечными нагрузками; разработка алгоритма и вычислительной программы для реализации методики; проведение экспериментальных исследований несущей способности оболочек при указанных видах нагружения; внедрение полученных результатов в производство.

Научная новизна работы.

В диссертационной работе на основе кинематического принципа теории предельного равновесия разработаны методики расчёта несущей способности гладких и подкреплённых штампоутами тонкостенных цилиндрических оболочек (однородных и неоднородных – железобетонных), нагруженных жёстким штампом-ложементом, равномерным и неравномерным внешним давлением, распределённым по части поверхности, комбинированной нагрузкой осевой силой, изгибающим моментом и локальными поперечными нагрузками.

Полученные в работе функциональные зависимости для определения предельных нагрузок использованы для получения численных решений с применением методов математического программирования.

Разработаны методика и алгоритм определения несущей способности оболочек с учётом пластических деформаций в области больших прогибов.

Получены экспериментальные данные о несущей способности и формах разрушения гладких и подкреплённых цилиндрических оболочек, нагруженных через жёсткий штамп-ложемент и через бандаж.

Практическая ценность.

Разработаны эффективная методика, алгоритм и программы расчёта на ЭВМ (на алгоритмическом языке АЛГОЛ-ГДР), позволяющие определять несущую способность гладких и подкреплённых (однородных и железобетонных) цилиндрических оболочек, нагруженных жёстким штампом-ложементом, равномерным и неравномерным внешним давлением по площадке, прямоугольной в пла-

не, комбинированной нагрузкой. При их использовании решён ряд практических задач. Результаты расчётов рассматриваемых задач приведены в виде таблиц, рисунков и графиков, удобных для практического применения.

Использование результатов расчёта несущей способности конструкций позволяет выявить дополнительные резервы прочности, снизить материалоемкость конструкций за счёт уменьшения их толщины.

Достоверность полученных результатов подтверждается согласованием теоретических результатов и экспериментальных данных, полученных автором и другими исследователями.

Внедрение результатов.

Результаты диссертационной работы внедрены в расчётную практику конструкторских бюро, экономический эффект составляет 90 тыс.руб.

Апробация работы.

Основные результаты исследований докладывались на V Всесоюзной конференции по статике и динамике пространственных конструкций (Киев, 1985г.), VI Всесоюзной конференции "Экспериментальные исследования инженерных сооружений" (Новополоцк, 1986г.). Гагаринских научных чтениях по космонавтике и авиации (Москва, 1986г.), Всесоюзном научно-техническом совещании "Состояние и перспективы развития эмалированного оборудования, его производство и эксплуатация" (Полтава, 1987г.), Всесоюзном совещании-семинаре "Актуальные проблемы механики оболочек" (Казань, 1988г.), III Всесоюзной конференции "Современные проблемы строительной механики и прочности летательных аппаратов" (Казань, 1988г.).

Публикации.

Основные результаты диссертации опубликованы в пяти печатных работах.

Объём работы.

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы (115 наименований), приложения и содержит 142 страницы машинописного текста, 7 таблиц и 39 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель работы, её научная новизна и практическая ценность, дана постановка рассмотренных задач.

Первая глава посвящена обзору современного состояния исследований по несущей способности оболочек с учётом физической и геометрической нелинейностей, дан анализ методов расчёта тонкостенных конструкций и особенности их развития в связи с применением ЭВМ.

Основные достижения в расчёте локально нагруженных оболочек связаны с работами В.З.Власова, А.Л.Гольденвейзера, В.М.Даревского, В.И.Моссаковского, В.В.Новожилова, Ю.Н.Работнова, В.И.Фосдосьева, К.Ф.Черных, Г.Н.Чернышева и др.

Значительное влияние на развитие теории пластичности оказали работы А.А.Гвоздева, Д.Д.Ивлева, А.А.Илькшина, А.Ю.Ишлинского, В.В.Соколовского, С.А.Христиановича, С.М.Фейнберга, Д.Друккера, В.Койтера, В.Прагера, Р.Хилла.

Особый интерес для инженерных расчётов представляет определение несущей способности конструкций. Здесь с большим успехом применяется теория предельного равновесия. Современное её состояние и её приложения в практике расчётов связано с работами А.А.Гвоздева, В.С.Гудрамовича, М.И.Ерхова, М.Ш.Микеладзе, А.М.Проценко, А.Р.Ржаницына, А.А.Чираса, Г.Казинчи, О.Нилла, В.Прагера, Ф.Ходжа и др.

Как правило, многочисленные задачи предельного анализа рассматриваются в геометрически линейной постановке. В последнее время используются геометрически нелинейные соотношения, что уточняет подход к определению предельных нагрузок тонкостенных систем. Такие задачи рассматривались в работах М.И.Ерхова, Я.П.Леллепа, И.А.Монахова, А.М.Проценко, В.Р.Терровере, Г.К.Хайдукова, Ф.Г.Ходжа и др.

Анализ рассмотренных работ показал недостаточность разработки методов решения задач несущей способности конструкций для обширного класса локальных нагрузок. Так, мало иссле-

дована несущая способность оболочек при неосесимметричных нагрузках, распределённых по разным законам на части поверхности, и оболочек, нагруженных одновременно несколькими силовыми факторами, а также с учётом ряда особенностей такого нагружения, в частности, геометрической нелинейности системы; недостаточно экспериментальных исследований несущей способности тонкостенных оболочечных конструкций при локальных нагружениях.

Выполненный обзор позволил сделать аргументированные выводы об актуальности темы и сформулировать основные цели работы.

Вторая глава посвящена разработке методики и алгоритма расчёта жесткопластических цилиндрических оболочек при локальных нагрузках различного вида.

Исследуется несущая способность цилиндрических гладких и подкреплённых центральным шпангоутом оболочек при нагружении жёстким штампом-ложементом. Для определения верхней границы предельной силы использована кинематическая теорема теории предельного равновесия, согласно которой из всех кинематически возможных полей скоростей перемещений истинным будет то, которое сообщает минимальное значение параметру нагрузки, определяемому из энергетического уравнения

$$A - \int_{\Pi} D d\Pi = 0 \quad (I)$$

где A – скорость изменения работы внешних сил, D – скорость диссипации внутренней энергии оболочки, Π – поверхность деформирования.

Поле скоростей перемещений можно предложить из физических соображений, в частности, из наблюдений форм разрушения оболочек при экспериментальных исследованиях. Деформируемая поверхность представляет собой участки поверхности оболочки, ограниченные линиями сосредоточенных деформаций (рис. I).

Поле скоростей перемещений для задачи определения предельной нагрузки, передаваемой через ложемент, имеет вид

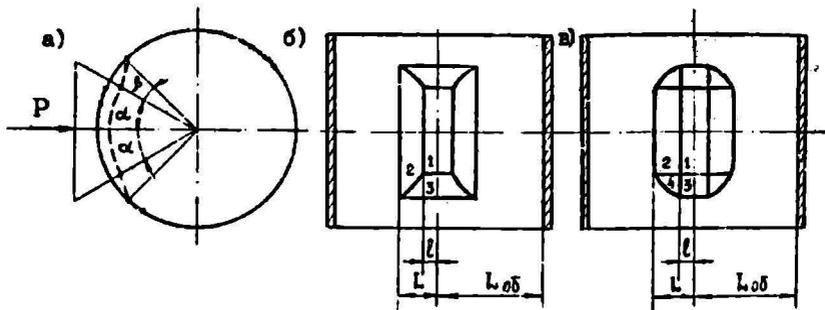


Рис. I

$$\begin{aligned}
 w_1 &= \Delta & \theta_1^{(1)} &= \theta_2^{(1)} = 0 \\
 w_2 &= \Delta \frac{L-x}{L-l} & \theta_1^{(2)} &= \frac{\Delta}{L-l}, \quad \theta_2^{(2)} = 0 \\
 w_3 &= \Delta \frac{\sin(\alpha+\beta-\varphi)}{\sin\beta}, & \theta_1^{(3)} &= 0, \quad \theta_2^{(3)} = \frac{\Delta}{R \sin\beta} \\
 w_4 &= \Delta \left[\frac{\sin(\alpha+\beta-\varphi)}{\sin\beta} - \frac{x-l}{L-l} \right], & \theta_1^{(4)} &= \theta_1^{(2)}, \quad \theta_2^{(4)} = \theta_2^{(3)}, \quad u_i = v_i = 0,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где U_i ; V_i ; W_i - скорости перемещений точки срединной поверхности; $\theta_1^{(i)}$, $\theta_2^{(i)}$ - скорости углов поворота по образующей и направляющей; i - номер участка; R - радиус; x , φ - координаты; 2α - угол охвата штампа; $2l$ - его ширина (для подкреплённых оболочек - ширина шпангсута); штамп опускается со скоростью Δ . Произвольно меняя значения параметров, получаем кинематически возможные поля скоростей перемещений.

Постулируя мгновенный переход всей толщины оболочки в пластическое состояние, принимая условие текучести Мизеса и используя ассоциированный закон течения, находим выражение для

скорости диссипации внутренней энергии оболочки

$$D = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s h \left[\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_1 \dot{\epsilon}_2 + \dot{\epsilon}_2^2 + \frac{1}{4} \dot{\epsilon}_{12}^2 + \frac{h^2}{12} (\dot{\alpha}_1^2 + \dot{\alpha}_1 \dot{\alpha}_2 + \dot{\alpha}_2^2 + \frac{1}{4} \dot{\alpha}_{12}^2) \right]^{1/2} \quad (3)$$

где σ_s - предел текучести оболочки; h - её толщина; $\dot{\epsilon}_1, \dot{\epsilon}_2, \dot{\epsilon}_{12}, \dot{\alpha}_1, \dot{\alpha}_2, \dot{\alpha}_{12}$ - скорости деформаций и кривизн, определяемые по известным зависимостям линейной теории оболочек.

Скорость диссипации внутренней энергии состоит из скоростей диссипаций на пластических шарнирах (сосредоточенных деформациях) и скоростей деформаций по поверхности оболочки между шарнирами. Для подкреплённых оболочек учитывается и скорость диссипации внутренней энергии шпангоута.

Подсчитав скорости диссипации внутренней энергии и изменения работы внешних сил ($A = P\Delta$), из энергетического уравнения определяем функционал, минимум которого даёт величину предельной нагрузки

$$P = \min_n \left\{ \int D d\Pi / A \right\} = P(l, \beta) \quad (4)$$

Рассматривались также другие поля скоростей перемещений и строились соответствующие им функционалы.

В результате минимизации функционалов по параметрам разрушения получены в зависимости от формы разрушения различные выражения l для предельной нагрузки, характеризующей носущую способность. В результате конкретных расчётов выбирается выражение предельной нагрузки, дающее минимальное значение. Так для $\alpha \geq 60^\circ$ и $R/h = 46$ и формы разрушения, показанной на рис.1, б, формула для определения предельной нагрузки имеет вид

$$\begin{aligned} \bar{P} = & \frac{4}{3} \left[\frac{\sin \alpha + \sin(\alpha + \beta)}{\bar{l} + \bar{l}} + \bar{l} \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} \right] + \frac{4}{3} \bar{H}^2 \bar{l} \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} + \\ & + \frac{8}{\sqrt{3}} \bar{h} \left\{ \bar{l} \left[\sin^2 \alpha + \frac{\cos^2 \alpha}{12 \bar{h}^2 \sin^2 \beta} \right]^{1/2} + \int_{\alpha}^{\alpha + \beta} \left[(\operatorname{tg} \varphi \cos \alpha \frac{\sin(\alpha + \beta - \varphi)}{\sin \beta})^2 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{1}{12 \bar{h}^2} \left(\frac{\cos^2 \varphi}{(\bar{l} - \bar{l})^2} + \frac{\cos \varphi}{(\bar{l} - \bar{l})} \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} + \frac{\cos^2 \alpha}{\sin^2 \beta} \right) \right]^{1/2} \left[1 + \left(\frac{\bar{l} - \bar{l}}{\sin \beta} \frac{\cos(\alpha + \beta)}{\cos^2 \varphi} \right)^2 \right]^{1/2} d\varphi \right. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(1 + \frac{1}{12 \bar{H}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \left[\bar{L} \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} (1 - \cos \beta) - \frac{1}{2} (\bar{L} - \bar{l}) \left(\frac{\cos \alpha}{\sin \beta}\right)^2 (\beta - \frac{1}{2} \sin 2\beta) \right] + \\
 & + \bar{H} \bar{l} \left[\sin^2 \beta + \frac{1}{12} \left(\frac{\bar{H} \cos \alpha}{\bar{h} \sin \beta}\right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} + \left(1 + \frac{\bar{H}^2}{12 \bar{h}^2}\right)^{\frac{1}{2}} \bar{H} \bar{l} \frac{\cos \alpha}{\sin \beta} (1 - \cos \beta) \Big\}, \quad (5)
 \end{aligned}$$

где $\bar{P} = \frac{P}{\sigma_s h^2}$, $\bar{L} = \frac{L}{R}$, $\bar{l} = \frac{l}{R}$, $\bar{h} = \frac{R}{h}$, $\bar{H} = \frac{H}{h}$,
 H - высота шпангоута.

В результате расчёта на ЭВМ получено: при $s/R = 5/92$,
 $\alpha = 60^\circ$, $R/h = 46$, $\sigma_s = 160$ МПа, $H = 0$ $\bar{P} = 51,03$.

Аналогичным образом рассматривались задачи определения несущей способности цилиндрических оболочек при нагружении внешним равномерным и неравномерным (вдоль координаты φ распределённым по закону косинуса) давлением по площадке, прямоугольной в плане (рис.2). Рассматривались схемы разрушения и соответствующие им поля скоростей перемещений для разных углов нагружения Ψ . Так для $30^\circ < \Psi < 75^\circ$ схемы разрушения имели вид, показанный на рис.3. Для этих схем строились функционалы параметров предельных нагрузок для равномерного

$$q_1 = \int_{\Omega} D d\Omega / \int_{\Omega} w d\Omega = q_1(\alpha, \beta, l, L) \quad (6)$$

и неравномерного давлений

$$q_2 = \int_{\Omega} D d\Omega / \int_{\Omega} \cos\left(\frac{x}{2\Psi} \varphi\right) w d\Omega = q_2(\alpha, \beta, l, L). \quad (7)$$

Построенные функционалы (4 - вида (4), 6 - вида (6), (7)) определяют нелинейную зависимость параметров нагружения от параметров α , β , l , L .

Далее решалась задача математического программирования - определения минимума функционалов при соответствующих ограничениях на параметры, вытекающих из условий конкретной схемы разрушения. При минимизации использовались методы прямого поиска, случайного спуска и другие.

Представлены номограммы для расчёта несущей способности оболочек при указанных видах нагружения.

НТБ
ДНУЖТ

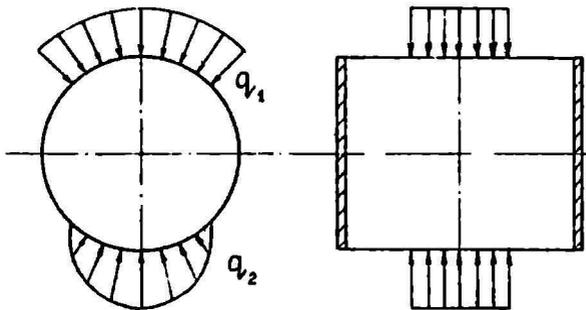


Рис. 2

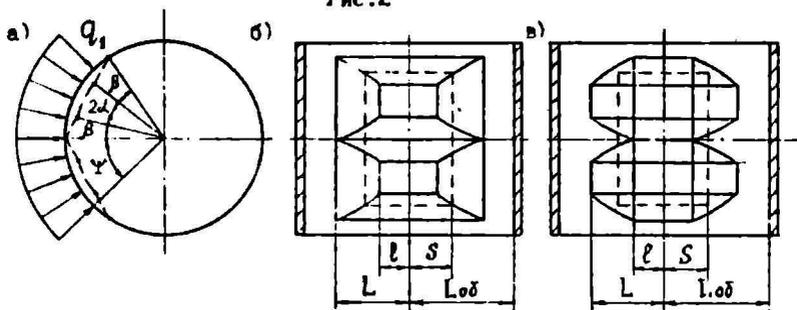


Рис. 3

Проведен учёт геометрической нелинейности при определении несущей способности локально нагруженных оболочек, что позволяет более точно определить прочностные ресурсы конструкций. Определение больших прогибов и соответствующей им предельной нагрузки основано на шаговом использовании кинематического метода теории предельного равновесия. Используется теория среднего изгиба оболочек (учитывающая прогибы порядка толщины), т.е. в выражениях связи деформаций и перемещений, кроме линейных удерживаются нелинейные члены, а для изменения кривизн используются выражения линейной теории оболочек. В этом случае функции скоростей диссипаций внутренней энергии зависят не

только от параметров схемы разрушения, но и характерного перемещения Δ

Принимая на первом шаге расчёта $\Delta = 0$, имеем задачу определения предельной нагрузки при геометрически линейной постановке. В дальнейшем, на каждом шаге выбирая достаточно малым по сравнению с толщиной оболочки приращение характерного перемещения Δ , определяем величину предельной нагрузки при заданном остаточном прогибе, решая при этом каждый раз задачу математического программирования. Такой подход позволяет проследить изменение зоны пластических деформаций при изменении нагрузки. В табл. I приведены расчётные и экспериментальные значения предельной нагрузки при заданных остаточных перемещениях для оболочки радиусом 91,5 мм при нагружении ложементом ($2l = 10$ мм, $\psi = 45^\circ$).

Таблица I

	Δ , мм	l , мм	β , град	P	
				расч., кг	эксп., кг
$h = 1.0$ мм	0	14.66	5.22	453	510
	0.2	15.19	5.36	485	562
	0.4	16.49	6.11	516	591
	0.6	17.82	6.97	528	625
	0.8	19.02	7.72	545	645
	1.0	20.18	8.45	563	655
$h = 2.0$ мм	0	18.41	7.16	1311	1300
	0.4	19.19	7.45	1354	1425
	0.8	21.07	8.59	1407	1530
	1.2	22.95	9.70	1453	1580
	1.6	24.70	10.61	1507	1620
	2.0	25.93	11.25	1542	1630

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям несущей способности модельных цилиндрических оболочек при локальном нагружении жёстким штампом-ложементом и бандалом, моделирующем действие равномерного давления по площадке, призматической в плане.

НТБ
ДНУЖТ

Испытывались гладкие и подкрепленные средним шпангоутом цилиндрические оболочки, выточенные из труб, материал которых — сплав АМг-6М.

Нагружение через ложемент осуществлялось на испытательной машине ЦД-10. Края оболочек были жестко заземлены специально разработанным приспособлением.

Оболочки нагружались в среднем сечении ложементами с различными углами охвата 2Ψ ($\Psi = 15^\circ + 75^\circ$). Для подкрепленных оболочек нагрузка прикладывалась к шпангоуту. При испытаниях снимались диаграммы "нагрузка-прогиб" под нагружающим устройством. Нагружение осуществлялось до момента падения нагрузки или большого роста перемещений.

Обнаружен разный характер деформирования оболочек в зависимости от их толщины и размеров нагружающего устройства.

Нагружение равномерной распределенной по части поверхности нагрузки осуществлялось через гибкую стальную ленту на специальной установке (разработанной в ИТМ АН УССР). При испытаниях снимались диаграммы "нагрузка-перемещение": давление в гидроцилиндрах установки, по которому определялось давление на оболочку, — радиальные перемещения оболочки при $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 75^\circ$. Также применялся метод неразрушающего контроля с использованием датчика акустической эмиссии ИАС-3, позволяющий определить момент роста больших изменений в форме оболочки. Это имеет смысл, когда невозможно поставить точно измерители перемещений (ИИТ) в местах наибольших радиальных перемещений.

Получены различные формы деформирования в зависимости от угла нагружения.

На рис. 4,5 представлены результаты некоторых экспериментальных данных и теоретических расчетов: рис. 4 — нагружение гладких и подкрепленных оболочек ($2l = 10$ мм, сечение шпангоута 10×4.5 мм²), рис. 5 — нагружение оболочек через бандаж. Расхождение теории и эксперимента составляет не более 20%, что объясняется тем, что диаграмма материала АМг-6М имеет значительный разброс предела текучести (при расчетах принималось $\sigma_s = 160$ МПа).

Таким образом результаты эксперимента и теоретических расчетов удовлетворительно согласуются между собой. Это поз-

НТБ
ДНУЖТ

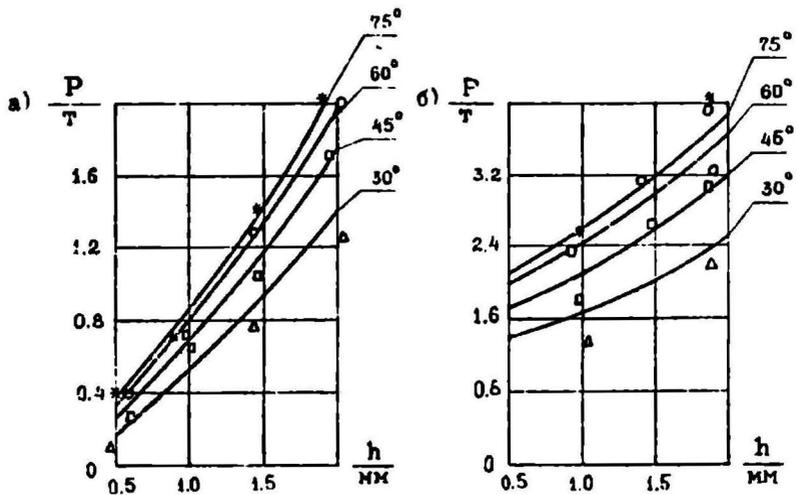


Рис. 4

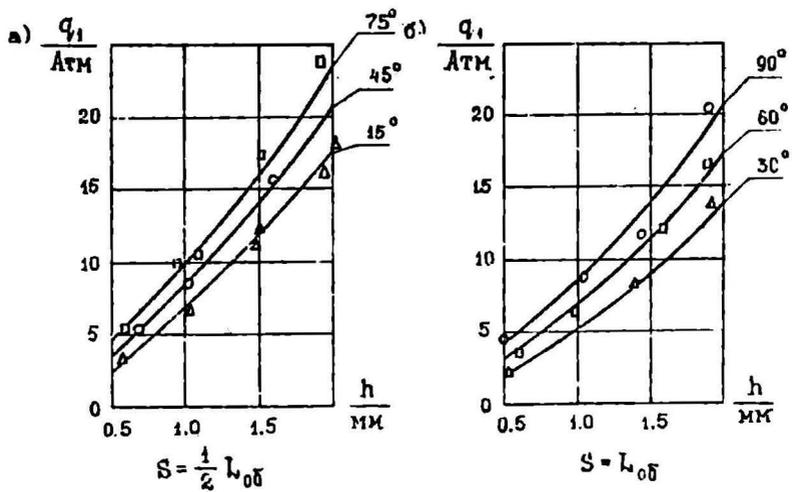


Рис. 5

воляет распространить разработанные методики для расчёта реальных конструкций.

В четвёртой главе представлены результаты исследований несущей способности некоторых реальных конструкций по методикам, разработанным выше.

Рассмотрена задача определения несущей способности цилиндрических ёмкостей при опирании на роликовые опоры. Эта задача сводилась к задаче нагружения оболочки через ложемент при условии, что один из параметров (α) стремится к нулю. Получены соответствующие функционалы.

Также рассмотрена задача нагружения оболочки внешним давлением по всей длине и с углом охвата 2ψ . При этом упрощается задача математического программирования - функционалы предельных нагрузок зависят от трёх переменных.

Разработанные методики применялись к расчёту несущей способности фрагментов башенных сооружений (типа труба в трубе) при локальном и комбинированном нагружении. При подсчёте скорости диссипации учитывалось, что арматура работает на сжатие и растяжение, а бетон - только на сжатие. При локальном нагружении (передаче усилий через закладные детали) рассматривались схемы разрушения, предложенные выше (рис.1). При комбинированном нагружении осевой силой (вес вышележащих фрагментов), изгибающим моментом (ветровая нагрузка) и локальными силами рассмотрены другие схемы разрушения (рис.6). Получены соответствующие функционалы предельного изгибающего момента при заданных весе и локальных усилиях.

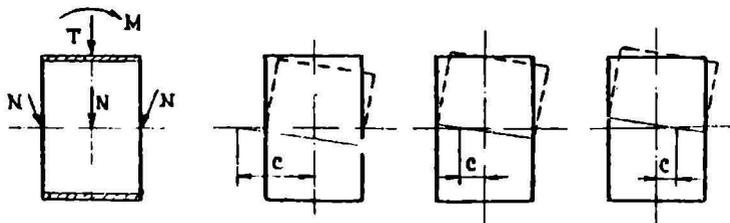


Рис.6

Результаты расчёта удовлетворительно совпадают с экспериментальными данными, полученными при испытаниях моделей фрагментов башенных сооружений, выполненных в Донецком Промстройинициате Госстроя СССР (табл.2).

Таблица 2

R, мм	h, мм	σ_s , МПа		T, кН	N, кН	M, кНм	
		бетон	арматура			эксперим.	расчёт
243.5	14.4	18.69	50	80	0	50.4	50.5
242.3	13.8	22.07	50	80	0	56.8	54.2
239.5	14.2	22.97	50	80	1.6	52.0	54.8
241.5	14.3	30.44	50	80	1.6	70.0	63.5
241.0	14.4	32.01	50	80	2.5	74.6	71.4

В заключении сформулированы выводы диссертационной работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе теории предельного равновесия разработаны методики и алгоритмы расчёта несущей способности жёсткопластических оболочечных конструкций при существенно неоднородном напряжённом состоянии, вызванном локальным характером нагружения (действие жёсткого штампа-дожелемента, равномерного и рас-пределённого по косинусоидальному закону внешнего давления по площадке, прямоугольной в плане).

2. С применением аппарата математического программирования создан программный расчёт на алгоритмическом языке АЛГОЛ-ГДР, позволяющий определить несущую способность оболочечных конструкций при локальных нагружениях.

3. Созданные на основе разработанных методик программы расчёта реализованы на ЭВМ. Получены зависимости величин нагрузок, характеризующих несущую способность гладких и подкреплённых цилиндрических оболочек, от геометрических параметров этих оболочек и параметров зон локального нагружения.

4. На основе шагвого метода с использованием кинематического принципа теории предельного равновесия проведён учёт геометрической нелинейности при умеренно больших прогибах в задачах несущей способности цилиндрических оболочек.

5. Приведены результаты обширного цикла экспериментальных исследований несущей способности цилиндрических оболочек при различных видах локального нагружения (нагружение жёстким штампом-ложементом и бандажом) при различных параметрах испытываемых оболочек и нагружающих систем.

Проведено 169 испытаний на 89 оболочках (на ряде оболочек проведено по 2 испытания). Обнаружен различный характер деформирования в зависимости от параметров конструкции и нагружающих систем. Сравнение результатов расчёта несущей способности оболочек с экспериментальными данными даёт удовлетворительное совпадение.

6. Приведены результаты исследований несущей способности фрагментов башенных сооружений при локальном поперечном нагружении и комбинированном нагружении осевой силой, изгибающим моментом и локальными нагрузками. Экспериментальные данные подтверждают результаты расчёта.

7. Подтверждена целесообразность и эффективность использования теории предельного равновесия с применением математического программирования для решения цикла задач по определению несущей способности тонкостенных систем при неоднородных нагружённых состояниях, вызванных локальными нагружениями.

8. Разработанные и реализованные программы расчёта несущей способности внедрены в промышленность и использованы при расчётах конструкций.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Герасимов В.П., Гладкий А.В., Телегина И.И. Предельное равновесие жёсткопластических цилиндрических оболочек при локальном нагружении // Пластичность и устойчивость в механике деформированного твёрдого тела. - Калинин: КГУ, 1984. - С.33-38.

2. Гудрамович В.С., Герасимов В.П., Гладкий А.В. Методы расчёта несущей способности железобетонных башенных сооружений при локальном и комбинированном нагружении // Тез. докл. V Всесоюз. конференции по статике и динамике пространственных конструкций. - Киев: Киев. инж.-строит. ин-т. 1965. - С.66.

3. Гайдученко А.П., Герасимов В.П., Гладкий А.В., Яценко А.Ф. Экспериментальное исследование несущей способности моделей цилиндрических элементов конструкций при локальном нагружении // Тез. докл. VI Всес. конф. "Экспериментальные исследования инженерных сооружений". - Новополоцк: Новополоцк. политех. ин-т, 1986. - С.13.

4. Герасимов В.П., Гладкий А.В. Несущая способность оболочечных элементов конструкций при локальном нагружении // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. - М.: Наука. - 1987. С.162.

5. Герасимов В.П., Гладкий А.В. Несущая способность жесткопластических цилиндрических оболочек при локальном нагружении // Нагруженность и надёжность механических систем: Сб. научн. трудов. - Киев: Наукова думка. - 1987. -С.48-54.

6. Владимирский В.В., Гладкий А.В., Катан Л.И. Напряжённо-деформированное состояние и несущая способность в рубашках сборников стальных эмалированных при установке их на вращающиеся роликовые опоры // Тез. докл. Всес. науч.-техн. совещания "Состояние и перспективы развития эмалированного оборудования, его производство и эксплуатация". - М.: ЦНТИХИМНЕФТЕМАШ. - 1987 - С.24.

7. Герасимов В.П., Гладкий А.В. Программа расчёта несущей способности башенных сооружений при комбинированном нагружении. - Государственный фонд алгоритмов и программ, № 50860000941.

8. Герасимов В.П., Гладкий А.В. Несущая способность цилиндрических элементов конструкций летательных аппаратов при распределённом нагружении на части поверхности // Тез. докл. III Всес. конф. "Современные проблемы механики и прочности летательных аппаратов". - Казань: Казан. авиац. ин-т., 1988. - С.34.

9. Гудрамович В.С., Герасимов В.П., Гладкий А.В. Большие прогибы цилиндрических оболочек при локальном поперечном нагружении // Тез. докл. III Всес. совещания-семинара молодых учёных "Актуальные проблемы механики оболочек. - Казань: ИСКИ, 1988. С.59.

НТБ
ДНУЖТ

Гладкий Александр Васильевич

**Несущая способность жёсткопластических оболочечных конструкций
при локальном нагружении**

01.02.03 - Строительная механика

Подписано к печати 04.11.89 БТ 70284. Формат 60х84 1/16.
Бумага для множительных аппаратов. Ротапринт. Усл.печ.л. 1,05.
Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 1304. Бесплатно.

Участок оперативной полиграфии ДИИТа
320700, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. Акад. В.А.Лазаряна, 2.

Сканировала Юнаковская В. В.

НТБ
ДУЖТ