ДНЕПРОПЕТРОВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА им. М.И.КАЛИНИНА

На правах рукописи

ЦАДИКОВА Елена Цаликовна

# РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ОТВЕРСТИЯМИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

05.23.17 - Строительная механика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Днепропетровск - 1991

Работа выполнена в Днепропетровском ордена Трудового Красного Знамени государственном университете имени 300-летия воссоединения Украины с Россией.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Мельников Ю.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Биргер И.А.

кандидат технических наук, профессор Конашенко С.И.

Ведущая организация: Харьковский авиационный институт

Защита состоится "25" декабря 1991 г. в "16[00]" часов на заседании специализированного совета Д 114.07.02 в Днепропетровском институте инженеров железнодорожного транспорта по адресу: 320629, ГСП, Днепропетровск, 10, ул. Лазаряна, 2, ДИИТ.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "22" ноября 1991 г.

Ученый секретарь
специализированного совета,
канд. техн.наук, доцент Татарчук В.В.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Цилиндрические оболочки с отверстиями являются одними из наиболее распространенных элементов конструкций в машиностроении, промышленном и гражданском строительстве, поэтому исследования, связанные с определением напряжений вблизи отверстий, изучение влияния геометрических параметров оболочки на концентрацию напряжений являются актуальными задачами теории тонких оболочек.

Большой вклад в развитие методов расчета оболочек с отверстиями внесли советские ученые А.И. Лурье, Г.Н. Савин, Э.И. Григолюк, Л.А. Фильштинский, А.Н. Гузь и их последователи. К числу эффективных численных методов расчета оболочек с отверстиями относятся методы потенциала и, в частности, метод граничных интегральных уравнений. Теоретическая основа этих методов изложена в монографиях В.Д. Купрадзе и С.Г. Михлина. Вопросам численной реализации и практического использования методов потенциала для пластин и оболочек с отверстиями посвящены работы Д.В. Вайнберга, А.Л.Синявского, С.П. Гавели, Ю.В. Верюжского, И. Сандерса, Е. Хансена.

Известные методы расчета оболочек с отверстиями (метод рядов Фурье, метод возмущения формы границы) накладывают целый ряд ограничений на геометрические параметры оболочки, в то время как метод потенциала свободен от большинства из них, что позволяет рассматривать практически важные задачи при достаточно широком диапазоне параметров конструкций.

Цель работы состоит в следующем:

1) построение матрицы Грина для цилиндрической оболочки;

2) изучение предельных свойств потенциалов с ядрами, содержащими степенные особенности;

3) построение эффективной схемы численной реализации метода граничных интегральных уравнений и создание на основе разработанного алгоритма программы расчета цилиндрических оболочек с отверстиями;

4) исследование напряженно-деформированного состояния конечной или бесконечной цилиндрической оболочки с немалыми отверстиями, находящейся под действием внешней нагрузки;

5) решение ряда прикладных задач исследуемого класса.

Научная новизна. В диссертационной работе получил дальнейшее развитие метод граничных интегральных уравнений применительно к расчету цилиндрических оболочек с немалыми отверстиями.

Для цилиндрических оболочек в аналитическом виде построена матрица Грина, которая используется в качестве ядра потенциального представления решения. Получена система граничных интегральных уравнений на контурах отверстий. Исследованы предельные свойства потенциалов с особенностями в ядрах и предложена методика их вычисления. Разработан алгоритм и осуществлена программная реализация метода граничных интегральных уравнений для расчета цилиндрических оболочек с отверстиями.

Решены практически важные задачи о напряженно-деформированном состоянии цилиндрической оболочки с отверстиями, на контуре которых заданы статические или геометрические граничные условия.

Исследовано влияние торцов на концентрацию напряжений в окрестности отверстия.

Достоверность основных научных положений диссертации и содержащихся в ней выводов подтверждается корректностью постановки задачи, строгостью математических выкладок, поэтапным тестированием разработанной программы, соответствием полученных результатов физическим представлениям и хорошим совпадением с результатами других исследователей (при наличии аналогичных исследований).

Практическая ценность. Результаты диссертационной работы могут найти практическое применение в научно-исследовательских и проектных организациях, выполняющих расчеты напряженно-деформированного состояния элементов конструкций, которые представляют собой цилиндрические оболочки с отверстиями.

Полученные в диссертационной работе результаты были использованы в инженерной практике ЦНИИпроектстальконструкция (г. Москва).

Основные положения работы, методика построения граничных интегральных уравнений для оболочек с отверстиями, а также численные результаты могут быть использованы при чтении спецкурсов и выполнении дипломных и курсовых работ.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на Всесоюзной школе и конференции молодых ученых по механике (Куйбышев, 1978), П Республиканской конференции "Вычислительная математика в современном научно-техническом прогрессе" (Киев, 1978), IУ научной конференции молодых ученых механико-математического факультета и НИИ механики Горьковского госуниверситета (Горький, 1981), Ш Республиканской конференции "Вычислительная математика в научно-технической прогрессе" (Канев, 1982), Всесоюзном совещании-семинаре "Численные методы расчета пластин и оболочек" (Тбилиси, 1984), Ш Всесоюзном симпозиуме "Метод дискретных особенностей в задачах математической физики и его роль в развитии численного эксперимента на ЭВМ" (Харьков, 1987), XIУ Всесоюзной конференции по теории пластин и оболочек (Тбилиси, 1987), научных конференциях, посвященных итогам научно-исследовательской работы Днепропетровского госуниверситета за 1978-1983 гг., 1986-1987 гг.

Публикации. Основные результаты диссертации опубликованы в двенадцати печатных работах.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы, приложений. Объем работы - 128 страниц, 14 таблиц, 36 рисунков. Список литературы включает 128 наименований. В приложении 1 приведены таблицы предельных значений потенциалов, содержащих особенности; в приложении 2 помещены особые решения характеристик напряженно-деформированного состояния для $k$ -ой гармоники.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен аналитический обзор методов расчета цилиндрических оболочек с отверстиями, а также обзор исследований методами потенциала задач теории оболочек; обоснована актуальность работы, сформулирована цель исследования, дана краткая аннотация глав работы.

В первой главе рассматривается один из вариантов метода потенциала, основанный на применении формулы Грина в задачах теории оболочек. Задача формулируется следующим образом: определить напряженно-деформированное состояние (НДС) тонкой цилиндрической оболочки с немалыми отверстиями. Контур отверстия - произвольная гладкая кривая. Характерный геометрический параметр оболочки

$$\beta_o = \frac{\sqrt[4]{3(1-\nu^2)}}{2}\frac{r_o}{\sqrt{Rh}},$$

меняется в диапазоне $0 \le \beta_o \le 3.5$

Здесь $r_o$ - параметр, характеризующий размеры отверстия; $R$ и $h$ - радиус и толщина оболочки соответственно $\nu$ - коэффициент Пуассона ее материала.

Для оболочек конечной длины на торцах выполняются либо условия жесткого защемления, либо шарнирного опирания, либо свободного края. Для бесконечных оболочек предполагается выполнение условий затухания НДС на бесконечности. На контуре отверстия могут задаваться как геометрические, так и силовые факторы. В работе используются уравнения технической теории тонких оболочек В.З.Власова.

В результате применения обобщенной формулы Грина, выражающей собой теорему о взаимности работ, получена зависимость компонентов НДС цилиндрической оболочки $N_n$ $S_n$ $Q_n^*$ , $M_n$ , $\bar U$ нагруженной заданной нагрузкой $\bar F_I$ , от усилий, моментов и перемещений $\tilde N_n$ $\tilde S_n$ , $\tilde Q_n^*$ $\tilde M_n$ $\bar V$ , вызванных действием сосредоточенной силы $\bar F_{II}$ , приложенной в точке области $S$

$$\iint\limits_S (\bar V, \bar F_I)\,ds - \int\limits_\ell \Big(V_n N_n + V_\tau S_n + V_3 Q_n^* + \frac{\partial V_3}{\partial n}\,\frac{1}{R} M_n\Big)\,d\ell = \qquad \text{(I)}$$

$$= \iint\limits_S (\bar U, \bar F_{II})\,ds - \int\limits_\ell \Big(U_n \tilde N_n + U_\tau \tilde S_n + U_3 \tilde Q_n^* + \frac{\partial U_3}{\partial n}\,\frac{1}{R} \tilde M_n\Big)\,d\ell ,$$

где $S$ - срединная поверхность оболочки; $\ell$ - граница области $S$ ; $n$ $\tau$ - соответственно нормаль и касательная к контуру $\ell$

Усилия $N_n$ и $S_n$ представляются в виде суммы трех компонент, каждая из которых зависит соответственно от $U_n$ , $U_\tau$ , $U_3$

$$N_n = N_{n1}(U_n) + N_{n2}(U_\tau) + N_{n3}(U_3),$$

$$S_n = S_{n1}(U_n) + S_{n2}(U_\tau) + S_{n3}(U),$$

и вводятся обозначения

$$\Gamma \bar V = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial n} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_n \\ V_\tau \\ V_3 \end{pmatrix}, \qquad T\bar U = \begin{pmatrix} N_{n1} & N_{n2} & N_{n3} \\ S_{n1} & S_{n2} & S_{n3} \\ 0 & 0 & Q_n^* \\ 0 & 0 & M_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_n \\ U_\tau \\ U_3 \end{pmatrix},$$

Тогда компоненты перемещений искомого напряженного состояния с учетом формулы (I) записываются в виде:

$$\bar{U}=\int_{\ell}(\Gamma\bar{U},T\bar{V})d\ell+\iint_{S}(\bar{V},\bar{F}_{I})ds-\int_{\ell}(\Gamma\bar{V},T\bar{U})d\ell. \tag{2}$$

Для построения потенциальных представлений и сведения исходной краевой задачи к системе интегральных уравнений возникает необходимость решения задачи о поведении оболочки под действием сосредоточенных сил. Приведен краткий обзор соответствующих исследований. Значительный вклад в исследование поведения тонких оболочек, находящихся под действием сосредоточенных нагрузок, внесли такие ученые, как Г. Рейснер, С. Юань, В.М. Даревский, Э.И. Григолюк, В.М. Толкачев, Г.Н. Чернышев, И. Сандерс.

Имеющиеся в литературе выражения для матриц Грина в двойных тригонометрических рядах ввиду громоздкости и отсутствия выделенной особой части использовать в качестве ядра потенциального представления затруднительно. Поэтому далее в работе предлагается новый вариант построения матрицы Грина для цилиндрической оболочки конечной длины с произвольными граничными условиями на торцах и для бесконечной цилиндрической оболочки, у которой компоненты НДС на бесконечности стремятся к нулю.

Матрица Грина $G(\alpha,\xi,\beta,\eta)$ является решением следующей краевой задачи

$$\begin{aligned}&L\left(\frac{\partial}{\partial\alpha},\frac{\partial}{\partial\beta}\right)\bar{G}_i(\alpha,\xi,\beta,\eta)=\bar{F}_i(\alpha,\xi,\beta,\eta),\quad(\alpha,\xi,\beta,\eta\in S),\\&B_m\bar{G}_i(\alpha,\xi,\beta,\eta)=0,\quad(\alpha,\xi,\beta,\eta\in\ell_T),\\&\qquad(m=\overline{1,4})\end{aligned} \tag{3}$$

где $L\left(\frac{\partial}{\partial\alpha},\frac{\partial}{\partial\beta}\right)$ - дифференциальный оператор системы уравнений равновесия цилиндрической оболочки;

$$\bar{F}_i(\alpha,\xi,\beta,\eta) = \{F_{ij}(\alpha,\xi,\beta,\eta)\} = \left\{\delta(\alpha-\xi,\beta-\eta)\,\delta_{ij}\times\frac{1-\nu^2}{Eh}\right\} -$$
$$(i,j=1,2,3)$$

– вектор поверхностной нагрузки; $\delta(\alpha-\xi,\beta-\eta)$ – дельта-функция Дирака; $\delta_{ij}$ . – символ Кронекера; $B_m$ – оператор краевых условий; $\alpha,\beta,\xi,\eta$ – соответственно текущие $(\alpha,\beta)$ и фиксированные $(\xi,\eta)$ координаты вдоль образующей $(\alpha,\xi)$ и направляющей $(\beta,\eta)$ $\ell_T$ – торцы оболочки.

С использованием периодичности цилиндрической оболочки по окружной координате матрица Грина строится в рядах Фурье по этой координате. Коэффициенты ряда получены в аналитической виде при решении соответствующих краевых задач для обыкновенных дифференциальных уравнений.

Сходимость полученных рядов улучшается методом выделения особенности. Для этого элементы матрицы Грина представляются в виде суммы особого и "дополнительного" решений. Особое решение получено из уравнения (3), в котором сохранены производные лишь высшего порядка, а "дополнительное" решение является разностью полного и особого решений. Особое решение строится в рядах Фурье, коэффициенты которого имеют аналитический вид. Эти ряды удается просуммировать, причем главная часть полученный выражений совпадает с известными формулами Г.Н. Чернышева. Таким образом, решение, содержащее особенность, получено в аналитическом вид , удобном для определения типа интегральных уравнений, возникающих в дальнейшем. Благодаря выделению особенности "дополнительное" решение сходится достаточно быстро. Если до выделения особого решения ряды сходятся как $\frac{1}{K^n}$ , то после выделения главного значения решения ряды сходятся не медленнее, чем $\frac{1}{K^{n+4}}$ . Для рассматриваемых в работе геометрических параметров оболочек "дополнительное" решение практически сходится при удержании 6–8 гармоник соответствующих рядов.

Построенная матрица Грина используется для сведения исходной краевой задачи к системе интегральных уравнений на контуре отверстия. Для этого в рассмотрение вводятся следующие векторные потенциалы:

1) Ньютонов потенциал с векторной плотностью $\bar{F}(\xi,\eta)$

$$\iint\limits_{S} G(\alpha,\beta,\xi,\eta)\bar{F}(\xi,\eta)\,dS_{\xi,\eta};$$

2) Потенциал $\Gamma$ - слоя с векторной плотностью $\bar{\Psi}(\xi,\eta)$

$$\int\limits_{\ell} \Gamma G(\alpha,\beta,\xi,\eta)\bar{\Psi}(\xi,\eta)\,d\ell_{\xi,\eta}$$

3) Потенциал $\mathcal{T}$ -слоя с векторной плотностью $\bar{\varphi}(\xi,\eta)$

$$\int\limits_{\ell} \mathcal{T} G(\alpha,\beta,\xi,\eta)\bar{\varphi}(\xi,\eta)\,d\ell_{\xi,\eta}$$

В теории гармонического потенциала аналогом потенциалов $\Gamma$ и $\mathcal{T}$ -слоя являются соответственно потенциалы простого и двойного слоя.

Далее рассматриваются краевые задачи об определении НДС цилиндрической оболочки с произвольным закреплением торцов под действием заданной нагрузки; на контуре отверстий выполняются граничные условия одного из двух типов: 1) геометрические (заданы перемещения и углы поворота); 2) статические (заданы усилия и моменты)

$$
\begin{aligned}
&L\bar{U}(\alpha,\beta)=\bar{F}(\alpha,\beta) && (\alpha,\beta)\in S\\
1)\quad &\Gamma\bar{U}(\alpha,\beta)=\bar{f}_1(\alpha,\beta) && (\alpha,\beta)\in \ell \qquad (4)\\
2)\quad &\mathcal{T}\bar{U}(\alpha,\beta)=\bar{f}_2(\alpha,\beta) && (\alpha,\beta)\in \ell
\end{aligned}
$$

Решение краевой задачи первого типа выбирается в виде суммы ньютонова потенциала и потенциала $\Gamma$ -слоя. При подстановке решения, выбранного в таком виде, в краевые условия на контуре отверстия исходная краевая задача сводится к системе интегральных уравнений Фредгольма I рода для определения плотности на контуре отверстия.

Решение второй краевой задачи получено из формулы (2). В качестве вектора перемещений вспомогательного напряженного состояния выбран вектор-столбец матрицы Грина. При стремлении произвольной точки срединной поверхности к контуру отверстия и учете граничных условий на нем получено интегральное уравнение Фредгольма II рода для определения перемещений и угла поворота нормали на контуре отверстия.

Во второй главе рассматриваются вопросы численной реализации метода потенциала, относящиеся к сплайн-аппроксимации плотностей потенциалов и контуров отверстий, вычислению предельных значений потенциалов с особенностями в ядрах, определению характеристик напряженного состояния в произвольной точке срединной поверхности оболочки.

Полученная в первой главе система интегральных уравнений с помощью метода Крылова-Боголюбова сводится к системе линейных алгебраических уравнений. При этом плотности потенциалов аппроксимируются сплайнами 3-го порядка дефекта 2. Такое представление плотностей удовлетворяет условиям существования предельных значений всех потенциалов, входящих в решение. Гладкий контур отверстия также аппроксимируется сплайном 3-го порядка, что позволяет единым образом описывать геометрию произвольного контура.

Коэффициенты полученной таким образом системы линейных алгебраический уравнений представляют собой криволинейные интегралы, которые в зависимости от вида ядра и взаимного расположения точек истока и наблюдения разделяются на регулярные, несобственные и интегралы с особенностью вида $r^{-k} (1 \leq k \leq 4)$ , где $r$ - расстояние от точки истока до точки наблюдения. Регулярные интегралы вычисляются с использованием квадратурных формул Гаусса, несобственные - путем сведения к регулярным интегралам заменой переменных. Для интегралов с особенностью вида $r^{-k}$ предельные значения вычисляются при стремлении точки истока к контуру по нормали. Ввиду трудоемкости процесса вычисления потенциалов были построены их верхние и нижние оценки и затем осуществлялся предельный переход на контур. Предельные значения этих оценок совпадали, представляя собою искомые величины предельных значений. Аппроксимация особого участка осуществлялась параболой или отрезком прямой, а плотности аппроксимировались полиномами I-го порядка. Таблицы полученных предельных значений помещены в приложении к работе. Выяснено, что скачки в производных по касательной не зависят от кривизны контура. Добавки, вносимые учетом кривизны, представляют собой регулярные интегралы. Это позволяет с достаточной точностью аппроксимировать особый участок отрезком прямой.

На основе изложенного алгоритма численной реализации предложенного метода была составлена программа на языке $PL/1$ В процессе отладки программы с целью проверки правильности работы алгоритма и оценки точности получаемых результатов производилось решение ряда тестовых задач.

Рассматривалась неперфорированная цилиндрическая оболочка с защемленными торцами под действием равномерного внутреннего давления. Эта задача, как известно, имеет аналитическое решение, поэтому не составляло труда вычислить характеристики НДС в точках произвольной окружности, нанесенной на срединную поверхность оболочки. Центр окружности равноудален от торцов оболочки. На контуре этой окружности была сформирована система интегральных уравнений. В качестве ядра потенциального представления использовалась матрица Грина, а в качестве граничных условий – усилия и моменты, вычисленные по формулам точного решения. В результате решения системы интегральных уравнений определялись перемещения в точках заданной окружности. Сравнение полученных результатов с точным решением показало, что их отклонение не превышало 3%.

<u>В третьей главе</u> приведены результаты расчета цилиндрических оболочек с отверстиями, на контуре которых заданы геометрические или статические граничные условия. В частности, с целью сопоставления результатов расчета по предложенной методике с результатами других авторов была решена задача о растяжении бесконечной цилиндрической оболочки со свободным отверстием нагрузкой интенсивности $P$ . Зависимость максимальных напряжений на контуре отверстия от параметра $\beta_0$ представлена на рис. I. Расчетные значения изображены кружками, звездочками отмечены результаты А.Н.Гузя, а треугольниками – результаты Р. Петерсона. Расхождение результатов не превышает 5%.

Также рассматрена задача о действии внутреннего давления на короткую цилиндрическую оболочку со свободным круговым отверстием. Торцы оболочки защемлены. Предполагается, что отверстие закрыто крышкой, и на кромку отверстия передаются перерезывающие силы. Деформированная срединная поверхность оболочки изображена на рис. 2. Нормальный прогиб достигает максимума в точках $C$ и $D$, а напряжения максимальны в точках $A$ и $B$ Зависимость максимальных напряжений от параметра $\beta_0$ представлена на рис. 3. Здесь кружками отмечены расчетные значения, а звездочками и треугольниками – соответственно результаты А.Н. Гузя и Р. Петерсона

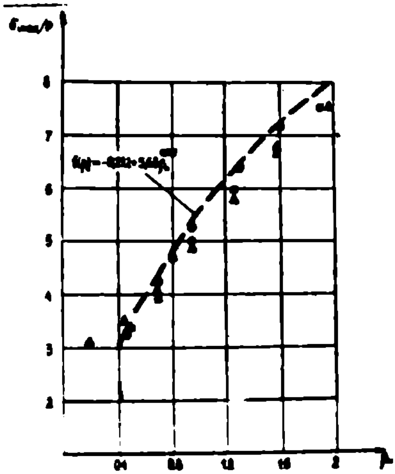


Рис. I

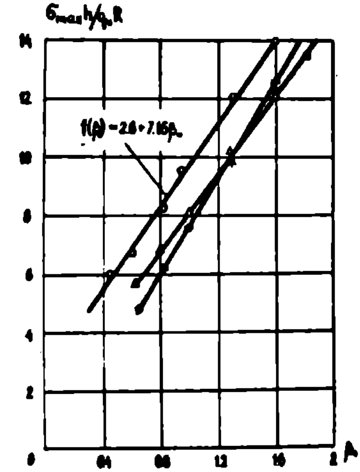


Рис. 3

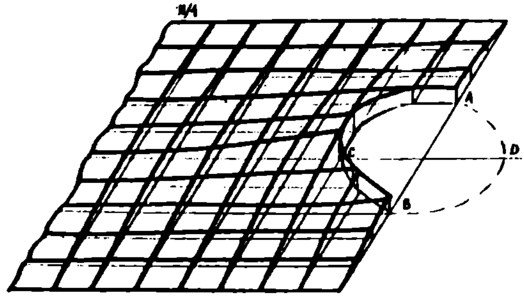


Рис. 2

для бесконечной оболочки. Для данной задачи близость защемленного контура повышает величину коэффициента концентрации на 20%.

Для случая задания геометрических граничных условий на контуре отверстий рассматривалась задача о действии внутреннего давления на оболочку с защемленными отверстиями. Торцы оболочки защемлены. Рассмотрены круговые и эллиптические отверстия, центры которых расположены периодически на направляющей, равноудаленной от торцов. На рис. 4,5 изображены деформированные срединные поверхности оболочек соответственно с одним и четырьмя эллиптическими отверстиями. Оболочка с четырьмя защемленными отверстиями жестче, чем с одним, вследствие чего максимальный прогиб в первом случае на 30% меньше, чем во втором.

И менение максимальных напряжений вдоль контура отверстия в оболочке с несколькими эллиптическими отверстиями показано на рис. 6. Здесь кривая I соответствует случаю оболочки с одним отверстием, кривая 2 - с двумя отверстиями, кривая 3 - с четырьмя отверстиями. Точки $\theta = 0$ и $\theta = \pi/2$ лежат соответственно на образующей и направляющей, проходящих через центр отверстия. Для всех рассмотренных случаев напряжения в точке $\theta = 0$ практически совпадают, что обусловлено близостью защемленного торца. В точке $\theta = \pi/2$ напряжения максимальны для оболочки с четырьмя отверстиями, так как в этом случае сказывается взаимовлияние отверстий.

Аналогичная задача рассмотрена для оболочки с четырьмя круговыми отверстиями. На рис. 7 линиями уровня показано распределение усилий и моментов в срединной поверхности такой оболочки.

Изучено напряженное состояние оболочки, создаваемое жестким смещением контуров отверстий вдоль нормали к срединной поверхности. Такая расчетная схема моделирует практическую ситуацию, воз-

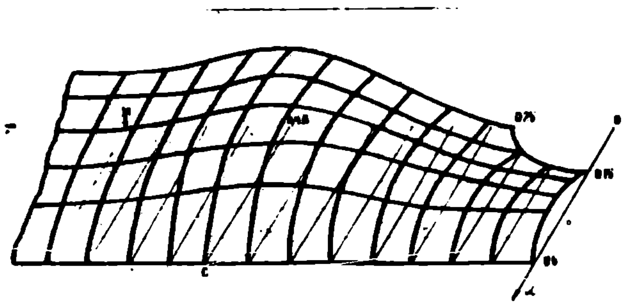

Рис. 4

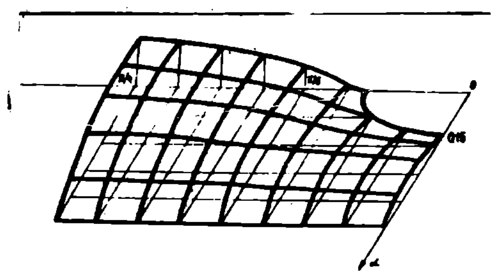

Рис. 5

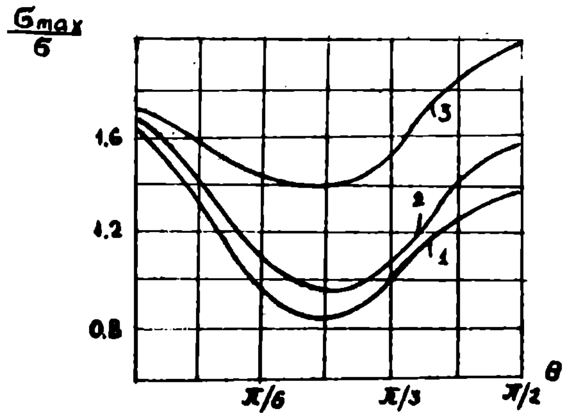


Рис. 6

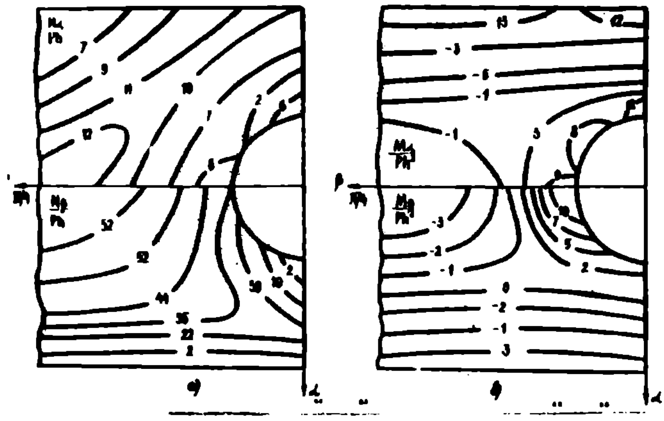

Рис. 7



никающую при монтаже конструкции в виде оболочки с патрубком. Исследовалось напряженно-деформированное состояние такой конструкции. Определена область возмущений, вызванная жестким смещением контура отверстия.

В заключении сформулированы основные результаты работы, которые состоят в следующем:

I) Разработана методика расчета напряженно-деформированного состояния цилиндрической оболочки с отверстиями методом граничных интегральных уравнений, позволяющая получать решения с высокой точностью для оболочек с немалыми отверстиями. При этом следует отметить, что основные разрешающие уравнения получены на основе теоремы о взаимности работ.

2) В аналитическом виде построена матрица Грина системы уравнений упругого равновесия цилиндрической оболочки в смещени-

ях с произвольными граничными условиями на торцах. Сходимость элементов матрицы Грина улучшена за счет выделения особого решения.

3) Получены предельные значения потенциалов с особенностями вида $r^{-k}$ $(1 \leq k \leq 4)$ при стремлении точки истока к контуру по нормали, что позволяет вычислять с высокой точностью характеристики напряженного состояния оболочки в произвольной точке ее срединной поверхности, включая контур отверстия.

4) На основе предложенного алгоритма разработана программа для ЭВМ, позволяющая рассчитывать напряженно-деформированное состояние оболочек с отверстиями произвольной формы без угловых точек. Достоверность получаемых численных результатов подтверждается рядом тестовых задач.

5) Исследовано влияние геометрических параметров оболочки и граничных условий на торцах на коэффициентах концентрации напряжений на отверстии. Проведено сравнение результатов расчета с результатами других авторов.

6) Исследовано напряженно-деформированное состояние оболочки с одним, двумя и четырьмя отверстиями и на основании расчетов сделан вывод о взаимовлиянии отверстий, расположенных на одной направляющей.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

I. Цадикова Е.Ц. О построении матрицы Грина для цилиндрической оболочки. В кн.: Динамика и прочность тяжелых машин, вып. 2, Днепропетровск, 1977, с. 110-116.

2. Мельников Ю.А., Хрущ И.К., Цадикова Е.Ц. Построение матриц Грина оболочек вращения с меридианом произвольной формы методом ортогональной прогонки. В кн.: Механика деформируемого твер-

дого тела. Всесоюзная школа и конференция молодых ученых (тезисы докладов), Куйбышев, 1978, с. 29-30.

3. Мельников Ю.А., Хрущ И.К., Цадикова Е.Ц. О численном использовании матриц Грина оболочек вращения. Тезисы доклада на II республиканской конференции "Вычислительная математика в современном научно-техническом прогрессе", Киев, 1978, с. 100.

4. Мельников Ю.А., Хрущ И.К., Цадикова Е.Ц. Применение метода ортогональной прогонки к построению матриц Грина оболочек вращения. В кн.: Прочность и долговечность конструкций, К., "Наукова думка", 1980, с. 133-141.

5. Мельников Ю.А., Цадикова Е.Ц. Расчет упругого равновесия цилиндрической оболочки с немалыми отверстиями методом интегральных представлений. ДАН УССР, 1978, № 12, сер. А., с. 1107-1112.

6. Цадикова Е.Ц. Построение ядер потенциальных представлений в задачах упругого равновесия цилиндрических оболочек с отверстиями. В кн.: Динамика и прочность тяжелых машин, вып. 6, Днепропетровск, Днепропетровский госуниверситет, 1981, с. 146-152.

7. Цадикова Е.Ц. Применение метода граничных интегральных уравнений к задачам теории оболочек. III республиканская конференция "Вычислительная математика в современном научно-техническом прогрессе". Тезисы докладов, К., 1982, с. 157-158.

8. Говорун Г.М., Цадикова Е.Ц. Аппроксимация плотности потенциала в интегральных представлениях расчета статики оболочек и пластин с отверстиями. В кн.: Алгоритмы решения нелинейных задач и обработка данных. Сборник научных трудов, Днепропетровск, Днепропетровский госуниверситет, 1984, с. 26-33.

9. Говорун Г.М., Цадикова Е.Ц. Численный расчет цилиндрических оболочек и пластин с немалыми отверстиями методом потенциала. В кн.: Теория и численные методы расчета пластин и оболочек. Тру-

ды Всесоюзного совещания семинара. Тбилиси, 1984, с. 97-105.

10. Мельников Ю.А., Цадикова Е.Ц. Об использовании метода потенциала для расчета цилиндрических оболочек с отверстиями. В кн.: III Всесоюзный симпозиум "Метод дискретных особенностей в задачах математической физики и его роль в развитии численного эксперимента на ЭВМ", Тезисы докладов. Харьков, 1987, с. 128-127.

11. Адлуцкий В.Я., Говорун Г.М., Мельников Ю.А., Цадикова Е.Ц. Дальнейшее развитие метода функций Грина в задачах упругого изгиба пластин и оболочек с отверстиями. Труды XIУ Всесоюзной конференции по теории пластин и оболочек. Тбилиси, Тбилистский университет, 1987, т. I, с. 41-46.

12. Адлуцкий В.Я., Мельников Ю.А., Цадикова Е.Ц. О вычислении предельных значений бигармонических потенциалов на криволинейных контурах. Рук. деп. в ВИНИТИ 4.05.88, № 3435 В88, 21 с.

Цадикова Елена Цаликовна

# РАСЧЕТ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК С ОТВЕРСТИЯМИ МЕТОДОМ ГРАНИЧНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Специальность - 05.23.17 - Строительная механика

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подп. в печ. 20.XI 91. Формат 60 x 84 I/I6. Бумага оберточная
Усл. печ. л. Тираж 100 экз. Заказ № 367
Днепропетровский государственный университет
320625 г. Днепропетровск, ГСП-10, пр. Гагарина, 72