

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

На правах рукописи

ГЛЕБА Андрей Юльевич

УДК 539.3

**ПОДКРЕПЛЕНИЕ ОТВЕРСТИЙ
В ОБОЛОЧКАХ УПРУГО-
ДЕФОРМИРОВАННЫМИ КОЛЬЦАМИ**

(специальность 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

**НТБ
ДНУЖТ**

Работа выполнена в Ужгородском государственном университете

Научный руководитель – кандидат физико-математических наук
доцент ГАЛАСИ А.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук
профессор МАКАРЕНКОВ А.Г.,
кандидат технических наук
доцент БРЫЗА А.А.

Ведущая организация – Институт механики АН УССР

Защита состоится "17" июня 1983 г. в 15¹⁵ часов на
заседании специализированного совета К II4.07.02 в Днепропет-
ровском институте инженеров железнодорожного транспорта
им. М.И.Калинина (320629, ГСП, Днепропетровск-10, ул. акад.
В.А.Лазаряна, 2).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Днепро-
петровского института инженеров железнодорожного транспорта
им. Калинина.

Заявление разослано "25" мая 1983 г.

секретарь
научного совета
доцент

Радзиховский Ю.А.

НТБ
ДНУЖТ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Тонкостенные оболочки, ослабленные отверстиями, являются ответственными элементами многих конструкций современной техники. Для расчета и проектирования таких оболочек наиболее важными являются вопросы определения концентрации напряжений, возникающих в зоне отверстия, и устранения концентрации напряжений путем подкрепления отверстия упругими элементами. Основные результаты по этим проблемам изложены в монографиях А.И.Дурье, Г.Н.Савина, А.Н.Гузя, Н.П.Флейшмана, Б.Л.Пелеха, которые внесли фундаментальный вклад в разработку теории оболочек, ослабленных отверстиями. Ряд задач об исследовании концентрации напряжений возле отверстий в оболочках и о подкреплении отверстий решен в работах И.М.Пирогова, Д.А.Шевлякова, И.С.Чернышенко, В.Н.Чехова, К.И.Шнеренко, В.В.Васильева, Е.И.Луны, А.А.Сяського, Т.С.Хазанова, Е.И.Михайловского, В.П.Малкова и др.

Развитие современной техники предъявляет, с одной стороны, повышенные требования к прочности и надежности в эксплуатации различных оболочечных конструкций, а с другой - к уменьшению веса и металлоемкости конструкций, экономному использованию материалов. Эти противоречивые требования вызывают необходимость разработки новых эффективных способов подкрепления отверстий в оболочках с целью создания оптимальных равнопрочных конструкций минимального веса. Перспективным представляется способ создания предварительно напряженных конструкций, используя для подкрепления отверстий в оболочках упруго-деформируемые кольца. Начальные напряжения, возникающие в оболочке за счет предварительного упругого деформирования подкрепляющего кольца, поглощают часть напряжений от рабочей нагрузки и,

6638a

А.И. Дурье
ПОДАКТИНО

Днепропетровский
институт инженеров
жел. доп. транспорта
им. М. В. Вольгина
БИБЛИОТЕКА

таким образом, улучшаются некоторые эксплуатационные показатели конструкции. В связи с этим необходимо исследовать влияние параметров предварительной деформации кольца на напряженное состояние оболочки и выбрать для указанных параметров оптимальные значения, обеспечивающие наиболее рациональное подкрепление отверстия. В настоящее время такие исследования отсутствуют.

Целью работы является получение соотношений, описывающих напряженно-деформированное состояние сферической и цилиндрической оболочек, ослабленных круговыми отверстиями, края которых подкреплены упруго-деформированными элементами; исследование влияния параметров предварительной деформации подкрепляющего кольца на концентрацию напряжений возле круговых отверстий в оболочках, нагруженных равномерным внутренним давлением; постановка и решение задач синтеза оптимальных подкреплений центрального кругового отверстия в оболочке вращения, криволинейного отверстия в пологой оболочке, а также круговых отверстий в сферической и цилиндрической оболочках.

Методика решения. В процессе исследований в работе в основном используются известные методы расчета оболочек, ослабленных отверстиями, методы теории упругости и строительной механики. При решении оптимизационных задач используются методы математического программирования: симплексный метод и один из релаксационных методов. Численная реализация решения задач проводится на ЭВМ.

Научная новизна. В реферируемой работе впервые ставятся и решаются задачи о напряженном состоянии оболочек, отверстия в которых подкреплены упруго-деформированными кольцами. Помимо получения аналитических решений, учитывающих наличие в отверстиях предварительно деформированных подкрепляющих элемен-

ИТБ
ДНУЖТ

тов, поставлены и решены на ЭВМ задачи с целью оптимизации характеристик напряженного состояния конструкции путем управления параметрами предварительной деформации кольца. Введен новый критерий оптимальности подкрепления отверстий в оболочках, на базе которого решены задачи определения жесткостных и геометрических характеристик упруго-деформированных колец, являющихся при данной системе нагрузок наилучшими подкрепляющими элементами.

Практическая ценность. Результаты, полученные в работе, могут быть использованы при расчете и проектировании подкрепляющих элементов оболочечных конструкций, ослабленных отверстиями. Расчетные формулы и программы на ЭВМ дают возможность оценить влияние предварительных деформаций подкрепляющего кольца на напряженное состояние оболочки, а также позволит увеличить несущую способность конструкции и снизить ее массу за счет оптимального выбора характеристик упруго-деформированных колец. Отдельные результаты работы внедрены при разработке алгоритмов и программ расчета подогревателей тепловых электростанций в НПО ЦКТИ (г. Ленинград).

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на научных конференциях профессорско-преподавательского состава Ужгородского госуниверситета (1974-1982), на II-й конференции молодых ученых Западного научного центра АН УССР (Ужгород, 1975), на расширенном заседании секции математики и механики Западного научного центра АН УССР (Дрогобыч, 1976), на научных семинарах Института прикладных проблем механики и математики АН УССР (Львов, 1979, 1981), на I-ом Всесоюзном семинаре "Неклассические проблемы механики композиционных материалов и создания конструкций на них" (Львов, 1981), на научных семинарах кафедры прикладной математики Львовского гос-

ДНУЖТ

университета (1982), отдела динамики и устойчивости сплошных сред Института механики АН УССР (Киев, 1982), кафедры строительной механики Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта.

Публикации. По результатам выполненных исследований опубликовано семь статей.

Объем работы. Диссертационная работа содержит 92 страницы машинописного текста, 23 рисунка, 12 таблиц, библиографический список, включающий 80 наименований литературных источников и 56 страниц приложения. Общий объем диссертации 184 страницы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа состоит из шести разделов и приложения.

В первом разделе дан краткий обзор исследований, связанных с решением задач о концентрации напряжений около отверстий в оболочках, определена цель диссертации и изложено ее краткое содержание.

Во втором разделе приведен вывод граничных условий для тонкой упругой изотропной оболочки, край которой неразрывно спаян с упруго-деформированным стержнем. В отличие от ранее известных, условия неразрывности на линии спая представлены в виде

$$\vec{u}^k = \vec{u} + \vec{u}_0 ; \quad \theta_c = \theta_n + \theta_{oc} , \quad (I)$$

где \vec{u} , θ_n - вектор смещения точек срединной поверхности и угол поворота граничного элемента оболочки; \vec{u}^k , θ_c - вектор смещения точек оси стержня и угол его закручивания; \vec{u}_0 , θ_{oc} - те же величины, но возникающие в процессе преднапряжения стержня.

НТБ
ДНУЖТ

Применительно к пологой оболочке получены упрощенные граничные условия, вывод которых основывается на допущении, что в пологой оболочке контур отверстия незначительно отличается от плоской кривой n , поэтому, его кручение принимается равным нулю. В качестве примера приведены граничные условия для случая, когда упруго-деформированное кольцо подкрепляет край кругового отверстия в пологой оболочке. Более точный (уточненный) вариант граничных условий для пологой оболочки получен с привлечением общепринятых допущений теории оболочек с большим показателем изменяемости.

В третьем разделе решена задача определения напряженного состояния сферической оболочки с круговым отверстием, край которого подкреплен тонким упруго-деформированным кольцом постоянного поперечного сечения. Оболочка нагружена равномерным внутренним давлением p_0 . Ввиду осевой симметрии задачи закон предварительной деформации кольца выбирается также осесимметричным и определяется двумя величинами: предварительным радиальным смещением u_0 и углом предварительного закручивания θ_0 . В результате решения граничной задачи получены аналитические выражения компонентов напряженного состояния оболочки, которые содержат безразмерные параметры предварительной деформации кольца:

$$\delta^* = \frac{E}{\rho} \frac{u_0}{\rho_0}; \quad \omega^* = \frac{E}{\rho} \theta_0, \quad (2)$$

где $\rho = \frac{\rho_0 R}{2h}$; R, h - радиус сферы и толщина стенки оболочки; E - модуль Юнга материала оболочки; ρ_0 - радиус отверстия.

Поставлены и решены на ЭВМ следующие задачи:

А. При заданных значениях параметров δ^* и ω^* определить в зоне отверстия коэффициенты концентрации напряжений

НТБ
ДНУЖТ

$$k_p = \frac{T_p}{\rho h} \pm \frac{6M_p}{\rho h^2} \quad k_\lambda = \frac{T_\lambda}{\rho h} \pm \frac{6M_\lambda}{\rho h^2}, \quad (8)$$

где $T_p, T_\lambda, M_p, M_\lambda$ - нормальные усилия и изгибающие моменты в оболочке.

Б. Найти для параметров предварительной деформации те значения, при которых наибольший коэффициент концентрации напряжения в оболочке

$$k_{\max} = \max(k_p, k_\lambda)$$

будет минимальным.

В. Найти для параметров δ^* и ω^* оптимальные значения, минимизирующие максимальное расчетное (эквивалентное) напряжение в оболочке $\max \sigma_3$, при условии

$$\max \sigma_3^k \leq n_k \max \sigma_3 \quad (4)$$

где $n_k = \frac{[\sigma]_k}{[\sigma]}$; $\sigma_3^k, [\sigma]_k$ - соответственно расчетное и допустимое напряжения в кольце; $\sigma_3, [\sigma]$ - те же, в оболочке. Иначе говоря, здесь требуется определить параметры такого упруго-деформированного кольца, которое максимально увеличивало бы прочность составной конструкции оболочка-кольцо в целом.

Расчетные напряжения в оболочке и в кольце определяются по третьей теории прочности (теории наибольших касательных напряжений). В этом случае оптимизационные задачи Б и В принадлежат к задачам чебышевского приближения, которые являются задачами выпуклого кусочно-линейного программирования. Последние сводятся к задаче линейного программирования, для решения которой использован симплексный метод. Все задачи доведены до числового результата.

НТБ
ДНУЖТ

В четвертом разделе рассмотрена задача о напряженном состоянии цилиндрической оболочки с малым круговым отверстием, край которой подкреплён упруго-деформированным кольцом. Оболочка нагружена равномерным внутренним давлением; отверстие закрыто крышкой, передающей на подкреплённый край лишь действие перерезывающей силы.

Ввиду двойной симметрии задачи рассмотрены следующие случаи предварительной деформации кольца:

а) кольцо предварительно деформировано в своей плоскости

$$u_{\theta\theta} = u_0 + u_1 \cos 2\lambda; \quad u_{\alpha\alpha} = v_1 \sin 2\lambda; \quad w_0 = \theta_{\theta\lambda} = 0; \quad (5)$$

б) кольцо равномерно растянуто (или сжато)

$$u_{\theta\theta} = u_0; \quad u_{\alpha\alpha} = w_0 = \theta_{\alpha\lambda} = 0; \quad (6)$$

в) кольцо предварительно закручено

$$\theta_{\alpha\lambda} = \theta_0 + \theta_1 \cos 2\lambda; \quad u_{\alpha\alpha} = u_{\theta\theta} = w_0 = 0. \quad (7)$$

Задача о напряженном состоянии оболочки решена методом Дурье-Флейшмана на основании соответствующих граничных условий, полученных в разделе 2. В результате получены аналитические выражения для компонентов напряженного состояния оболочки, содержащие безразмерные параметры предварительной деформации кольца

$$\xi_i^* = \frac{E v_i}{q p_0}; \quad \delta_i^* = \frac{E u_i}{q p_0}; \quad \omega_i^* = \frac{E}{q} \theta_i \quad (i = 0, 1). \quad (8)$$

Здесь также, как и в разделе 3, поставлены и решены на ЭВМ задачи А, Б, В (применительно к цилиндрической оболочке), в которых варьируемыми параметрами являются параметры ξ_i^* , δ_0^* , δ_1^* , ω_0^* , ω_1^* .

НТБ
ДНУЖТ

Оптимизационная задача Б, т.е. задача минимизации концентрации напряжения в оболочке, является задачей чебышевского приближения и решается симплексным методом. Результаты решения числового примера представлены на рис. 1, где кривыми 1,2,3 изображены значения наибольшего коэффициента концентрации напряжения k_{max} , полученные соответственно в случаях а, б, в предварительной деформации кольца, а штриховой линией - в случае традиционного подкрепления. Как видно, путем предварительного упругого деформирования подкрепляющего кольца можно значительно повлиять на его эффективность в снижении концентрации напряжения около отверстия в оболочке, особенно, если значение параметра относительной жесткости кольца \mathcal{K} сравнительно большое. Здесь

$$\mathcal{K} = \frac{\delta}{\delta + 20}; \quad \delta = (1 - \nu^2) \frac{E_1}{E} \quad (9)$$

E_1 - модуль Юнга кольца; ν - коэффициент Пуассона оболочки.

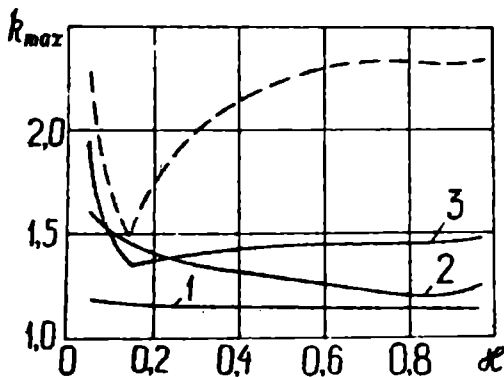


Рис. 1.

НТБ
ДНУЖТ

Задача В, т.е. задача оптимизации показателя прочности составной конструкции, принадлежит к числу наиболее общих задач нелинейного программирования; для ее решения использован один модифицированный релаксационный метод. На рис. 2 изображены безразмерные величины

$$k_3 = \frac{\max \sigma_3}{\sigma_3^0}; \quad k_3^k = \frac{\max \sigma_3^k}{n_k \sigma_3^0} \quad (10)$$

характеризующие соответственно максимальные расчетные напряжения в оболочке (сплошные линии) и в кольце (штриховые линии). Здесь σ_3^0 - расчетное напряжение в сплошной оболочке. Кривые 1, 2, 3 на рис. 2 соответствуют случаям а, б, в предварительной деформации кольца, а кривая 4 - случаю, когда кольцо предварительно не деформировано. Как видно, за счет предварительной упругой деформации подкрепляющего элемента можно существенно уменьшить значения коэффициентов k_3 и k_3^k и тем самым увеличить прочность составной конструкции.

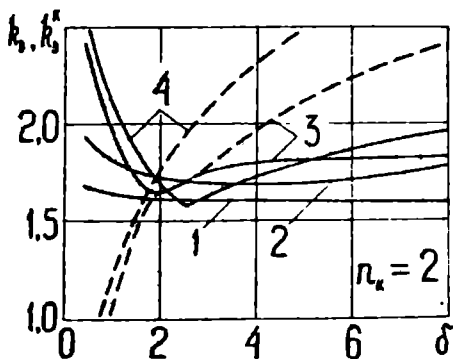


Рис. 2.

В пятом разделе рассмотрены задачи синтеза (проектирования) оптимальных подкрепляющих элементов отверстий в оболочках на базе упруго-деформированных колец. Введен новый критерий оптимальности подкрепления отверстий в оболочках - M -эквивалентность.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ. Подкрепление назовем M -эквивалентным, если при заданной максимальной нагрузке p_m оно удовлетворяет условиям эквивалентности

$$\vec{u} = \vec{u}^{\circ} \quad \theta_{\alpha} = \theta_{\alpha}^{\circ}, \quad (II)$$

а при любой одной той же нагрузке $p < p_m$ вызывает в оболочке такое напряженно-деформированное состояние, в котором

$$\max \sigma_3(p) \leq \max \sigma_3(p_m). \quad (I2)$$

Здесь \vec{u}, θ_{α} - вектор смещения и угол поворота в оболочке с подкрепленным отверстием; $\vec{u}^{\circ}, \theta_{\alpha}^{\circ}$ - те же величины, но относящиеся к сплошной оболочке; $\sigma_3(p), \sigma_3(p_m)$ - расчетные напряжения в оболочке соответственно при нагрузках p и p_m

Следовательно, если p_m - наибольшая рабочая нагрузка, для которой сплошная оболочка запроектирована рационально, то M -эквивалентное подкрепление отверстия в оболочке полностью восстановит ее первоначальную прочность.

На основании условия M -эквивалентности решена задача определения жесткостных характеристик упруго-деформированного кольца, оптимально подкрепляющего центральное круговое отверстие в оболочке вращения. В качестве примера найдены параметры M -эквивалентного кольца прямоугольного поперечного сечения, являющегося оптимальным подкреплением для кругового отверстия в сферической оболочке, нагруженной равномерным внутренним давлением. Получено также соотношение, позволяющее рассчитать M -эквивалентное кольцо, прочность которого равна

НИИ
ДНУЖТ

прочности сплошной оболочки. На рис. 3 показана зависимость величины $\frac{h_1 E_1}{h E}$ от параметра предварительной деформации кольца δ^* при $b_1/\rho_0 = 0,1; 0,2; 0,3$, где h_1, b_1 - соответственно толщина и ширина кольца; ρ_0 - радиус отверстия. Установлено (при $b_1/\rho_0 = 0,2$), что если характерный параметр материалов кольца и оболочки $\frac{E_1}{n_k E}$ удовлетворяет одному из неравенств

$$\frac{E_1}{n_k E} < 1,1; \quad \frac{E_1}{n_k E} > 1,3, \quad (13)$$

то для снижения веса оболочечной конструкции отверстие в ней целесообразно подкреплять упруго-деформированным кольцом.

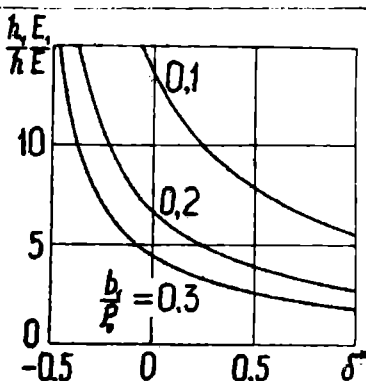


Рис. 3.

Поставлена и решена задача определения оптимального подкрепления для криволинейного отверстия в пологой оболочке. При этом в качестве подкрепляющего элемента используется упруго-деформированное кольцо переменного поперечного сечения. Установлено, что жесткости искомого M -эквивалентного кольца зависят от формы отверстия, от основного напряженно-деформированного состояния оболочки и от предварительной деформации

КАТЬ
ДНУЖТ

кольца. Закон предварительной деформации кольца предлагается выбрать идентично тому закону, по которому деформируется контур намеченного отверстия в соответствующей сплошной оболочке.

Исследован частный случай, когда круговое отверстие в цилиндрической оболочке, нагруженной равномерным внутренним давлением, подкрепляется кольцом прямоугольного поперечного сечения. Закон предварительной деформации кольца выбран в виде (5). Показано, что если выполняется условие

$$2\delta_0^* = 3(\nu + 2\delta_1^* + 4\varepsilon_1^*), \quad (14)$$

то M -эквивалентное кольцо имеет постоянное поперечное сечение, ширина и высота которого рассчитываются по формулам

$$\frac{b_1}{b_0} = \sqrt{\frac{3(1+\nu+4\delta_1^*+8\varepsilon_1^*)}{1+\nu-4\varepsilon_1^*-8\delta_1^*}} \quad (15)$$

$$\frac{h_1}{h} = \frac{E}{E_1} \sqrt{\frac{1+\nu-4\varepsilon_1^*-8\delta_1^*}{3(1+\nu+4\delta_1^*+8\varepsilon_1^*)^3}}$$

Предложен еще один метод расчета M -эквивалентного подкрепления для криволинейного отверстия в оболочке, причем решение задачи обобщено применительно к трансверсально-изотропной пологой оболочке. В отличие от предыдущего метода здесь оптимальное подкрепление определяется из числа упруго-деформированных колец постоянного поперечного сечения. Решение задачи сводится к минимизации невязок

$$\Delta_i = g_i(\lambda, a_{ij}) - g_i \quad (i=1, 2, \dots, 5; j=0, 1, \dots, n) \quad (16)$$

относительно параметров предварительной деформации кольца

a_{ij} . Здесь $g_i = const$ - искомые жесткости кольца; $g_i(\lambda, a_{ij})$ - аналитические выражения для жесткостей кольца, полученные на

базе соответствующих граничных условий. Последний метод более эффективен, поскольку его можно реализовать на ЭВМ.

В шестом разделе приведены основные результаты и выводы работы:

1. Поставлены и решены задачи о напряженном состоянии сферических и цилиндрических оболочек, ослабленных круговыми отверстиями, в которые впаены упруго-деформированные кольца.

2. Разработан пакет прикладных программ для расчета коэффициентов концентрации напряжений возле кругового отверстия в сферической и цилиндрической оболочках; для оптимизации напряженного состояния оболочек путем управления параметрами предварительной деформации кольца; для поиска оптимальных значений параметров предварительной деформации кольца, максимально увеличивающих прочность составной конструкции оболочка-кольцо в целом.

3. Показано, что путем преднапряжения подкрепляющего элемента можно значительно снизить концентрацию напряжения в зоне отверстия в оболочке. Если материалы кольца и оболочки такие, что $E_1 \neq n_k E$, то за счет предварительной деформации кольца можно значительно увеличить прочность составной конструкции.

4. Введен новый критерий оптимальности подкрепления отверстий в оболочках (условия M -эквивалентности), который позволяет использовать упруго-деформированные кольца в качестве оптимального подкрепляющего элемента. Это позволяет расширить круг решаемых задач, так как к числу параметров, характеризующих оптимальное кольцо, прибавляется еще параметр его предварительной деформации.

НТБ
ДНУЖТ

5. Предложен метод синтеза оптимального подкрепления криволинейных отверстий в оболочках, основанный на использовании ЭВМ. Данный метод позволяет определить параметры M -эквивалентного упруго-деформированного кольца даже в таких случаях, когда эквивалентное подкрепление отверстия не осуществимо.

6. Получены формулы для расчета M -эквивалентного подкрепления для кругового отверстия в сферической и цилиндрической оболочках.

7. Показано, что подкрепляя отверстие в оболочке M -эквивалентным кольцом можно создать равнопрочную конструкцию и, таким образом, уменьшить ее вес.

8. Результаты проведенных исследований использованы при проектировании теплообменных аппаратов.

В приложении приведены программы на языке АЛГОЛ-60 и их описания.

По теме диссертации опубликованы следующие работы:

1. Галася А.А., Глеба А.Ю. Граничные условия для оболочки, армированной упруго-деформированным ребром. - В сб.: Труды 28-й науч. конф. проф.-препод. состава Ужгород. ун-та. Секция мат. наук. (Ужгород, 1974), с. 86-95. Деп. в ВИНИТИ 11.02.1975, № 314-75.

2. Галася А.А., Глеба А.Ю. Влияние упруго-деформированного кольца на распределение напряжений в цилиндрической оболочке с круговым отверстием. - В сб.: Труды 29-й науч. конф. проф.-препод. состава Ужгород. ун-та. Секция мат. наук. (Ужгород, 1975), с. 77-84. Деп. в ВИНИТИ 10.03.1976, № 705-76.

НТБ
ДНУЖТ

3. Глеба А.Ю. Уточненные граничные условия для пологой оболочки с упруго-деформированным ребром (укр.яз.). - В сб.: Материали II конф. молодых ученых Западного науч. центра АН УССР. Секция мат. и мех. (Ужгород, 1975), с. 65-69. Дел. в ВИНТИ 18.05.1976, № 1734-76.

4. Глеба А.Ю., Галаси А.А. К вопросу об эквивалентном подкреплении отверстий в оболочке. - Прикладная механика, 1977, т. 13, № 9, с. 40-45.

5. Пелех Б.Л., Глеба А.Ю. Об одном новом подходе к проблеме оптимального подкрепления отверстий в трансверсально-изотропных оболочках. - Механика полимеров, 1978, № 6, с. 1065-1070.

6. Галаси А.А., Глеба А.Ю. Об одном методе оптимального подкрепления отверстий в оболочках вращения. - В кн.: Сопротивление материалов и теория сооружений. Вып. 34. Киев, Будивельник, 1979, с. 89-92.

7. Пелех Б.Л., Галаси А.А., Глеба А.Ю. Влияние упруго-деформированного кольца на распределение напряжений в сферической оболочке с круговым отверстием. - Прикладная механика, 1980, т. 16, № 9, с. 43-47.

6638a

Тол

НАУКОВО-ТЕХНІЧНА БІБЛІОТЕКА
Дніпропетровського національного
університету залізничного транспорту
імені академіка В.Лазаряна

НТБ
ДНУЖТ

1-00

ББ 02249 от 4.04.83 г.
Ужг. тип. з. 1813-83 г., т. 100х20. Ротаврнит.

Сканировала Камянская Н.А.

НТБ
ДНУЖТ