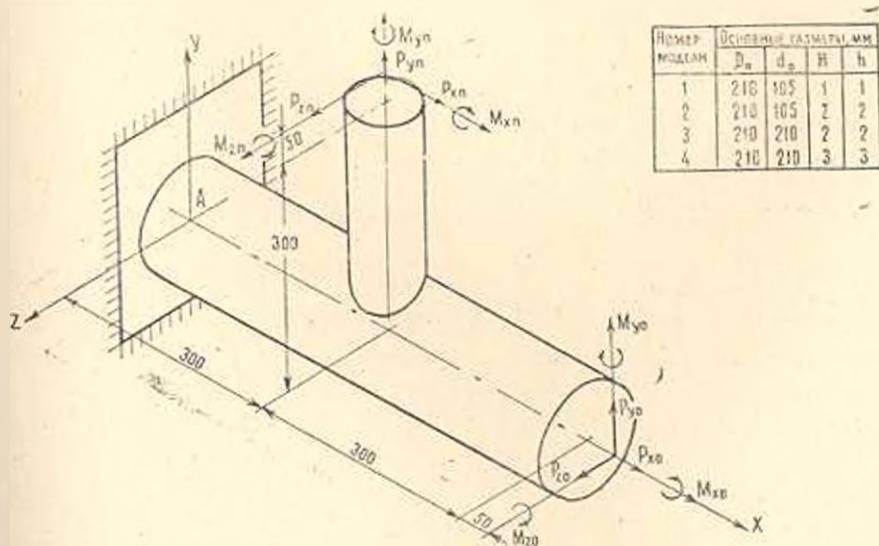


А. Н. ЕЛЬЦОВ, А. А. ЛИВШИЦ, Э. А. МОЛДАВСКИИ

### КОНЦЕНТРАЦИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧКАХ

В различных отраслях техники широко используются конструкции, представляющие собой пересечение цилиндрических оболочек (оболочечные тройники). Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) таких конструкций в зоне пересечения оболочек является весьма сложной проблемой, особенно если отношение диаметров патрубка ( $d$ ) и основной оболочки ( $D$ ) близко к единице. Случай внутреннего давления был рассмотрен в работах [1]—[3], случай поперечной силы, действующей на патрубок — в работе [4]. Отдельные численные результаты получены в США группой профессора Корума [5], [6] для более широкого диапазона нагрузок. Однако, отсутствие алгоритма расчета не дает возможности использовать эти результаты в расчетной практике.



Фиг. 1. Оболочки и действующие нагрузки.

В настоящей работе экспериментально исследуется влияние вида нагружения на напряженное состояние оболочек-тройников в случае защемления горца основой оболочки. Основные размеры моделей и варианты нагружения представлены на фиг. 1. В работе излагаются лишь результаты испытаний моделей № 4, изготовленных из стали и эпоксидной смолы.

Приняты обозначения: первый индекс обозначает направление действия нагрузки, второй — объект приложения. Например,  $P_{Ax}$  — сила, направленная вдоль оси  $Ax$  и приложенная к оболочке;  $M_{Ay}$  — пара сил, скручивающая патрубков, момент которой параллелен оси  $Ay$ .

Обе модели испытывались методом тензометрирования, а эпоксидный тройник испытывался также методом фотоупругости с «замораживанием» деформаций.

Для экспериментов применялись деформационные тензорезисторы ПКБ-5-100 с коэффициентом тензочувствительности 2,1. Количество тензорезисторов на оболочках колебалось от 368 до 480 штук. Подготовка тензорезисторов производилась по обычной методике (проверка коэффициента тензочувствительности, нанесение подслоя, сушка, вторичное нанесение подслоя), приклеивание тензорезисторов на металлические модели осуществлялось клеем БФ-2. Термообработка: нагрев до  $70^{\circ}\text{C}$ , выдержка в течение часа, нагрев до  $140^{\circ}\text{C}$  и выдержка в течение двух часов, нагрев до  $180^{\circ}\text{C}$  и выдержка два часа, затем — охлаждение вместе с термостатом.

Для приклеивания тензорезисторов на эпоксидную оболочку применялся клей того же состава, что и сама оболочка. Так как процесс полимеризации длится около трех часов, тензорезисторы при приклейке прижимались специальными пружинными поджимами.

Тензометрирование проводилось с использованием измерительно-вычислительного комплекса «Харьков» (измеритель деформаций ИД-40, ЭВМ «Днепр-21»), разработанного в Харьковском авиационном институте, который позволяет производить как регистрацию относительных деформаций тензорезисторов в двух режимах (ручном и автоматическом), так и дальнейшую обработку результатов измерений.

При проведении экспериментов на эпоксидной модели тройника регистрация показаний тензорезисторов проводилась в ручном режиме, так как на каждом этапе нагружения приходилось делать выдержку в 1,5—2 мин. для ликвидации явления последствия (из-за нагрева тензорезисторов).

Испытание эпоксидной модели методом фотоупругости проводилось на кафедре теории упругости Киевского государственного университета на стандартной аппаратуре. Срезы делались с помощью алмазных дисков, применение которых не требует дальнейшей полировки срезов.

Использование четырехдатчиковых розеток, наклеенных снаружи и внутри моделей, позволило получить достаточно полную картину НДС тройников при каждом виде нагружения. Розетки устанавливались на лучах, сходящихся (в плане) в одном центре-точке пересечения оси патрубка и поверхности основной оболочки. Первый луч ( $0^{\circ}$ ) лежит в поперечной плоскости симметрии и совпадает с образующей основной оболочки, остальные лучи образуют между собой углы в  $30^{\circ}$ .

Необходимость сравнения опытных данных для различных вариантов нагружения потребовала введения номинальных напряжений, которые определялись следующим образом:

осевая нагрузка  $\sigma_n = P/F$ , поперечная сила  $\sigma_s = Pa(r_1/f)$ , изгибающий момент  $\sigma_m = M_n(r_1/f)$ , крутящий момент  $\tau_m = M_{np}(r_1/f_p)$ , где

$P$  — величина действующей осевой (поперечной) силы;  $M_o$  — величина изгибающего момента;  $M_p$  — величина крутящего момента;  $r_1$  — наружный радиус оболочки (патрубка);  $J$  — осевой момент инерции оболочки (патрубка);  $J_p$  — полярный момент инерции оболочки (патрубка);  $a$  — наименьшее расстояние от точки приложения поперечной силы до образующей оболочки (в случае нагружения патрубка) или расстояние от точки приложения силы до поперечной плоскости симметрии (в случае нагружения оболочки);  $F$  — площадь сечения оболочки (патрубка).

Относя максимальные значения нормальных напряжений, полученные в эксперименте, к номинальным напряжениям, вычисляем коэффициент концентрации напряжений

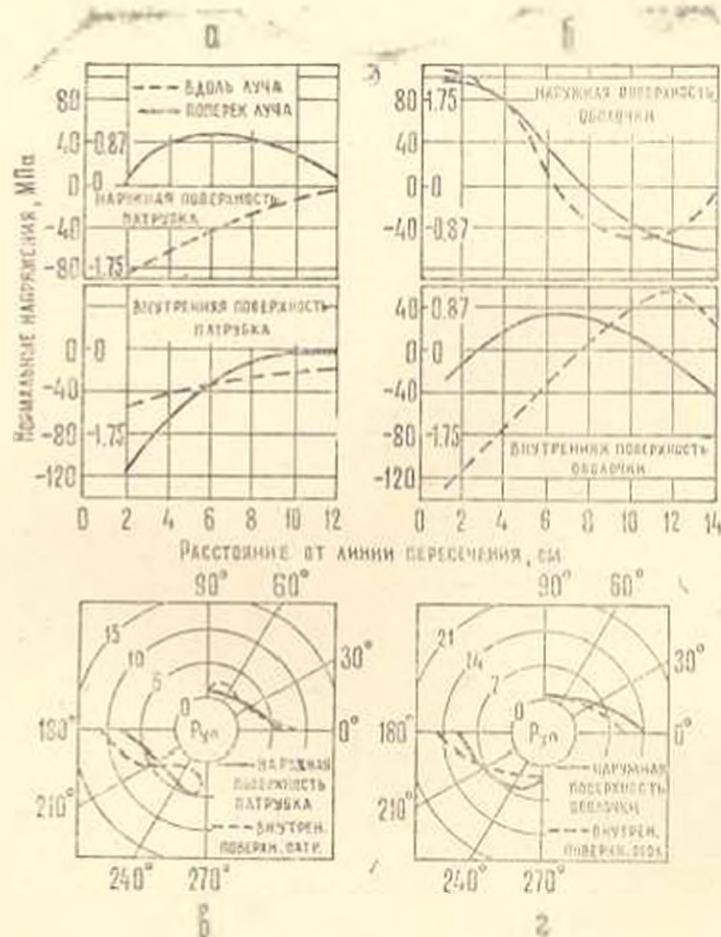
$$K = \frac{\sigma_o}{\sigma_n}$$

где  $\sigma_o$  — напряжения, найденные в эксперименте;  $\sigma_n$  — номинальные напряжения, вычисляемые по вышеприведенным формулам.

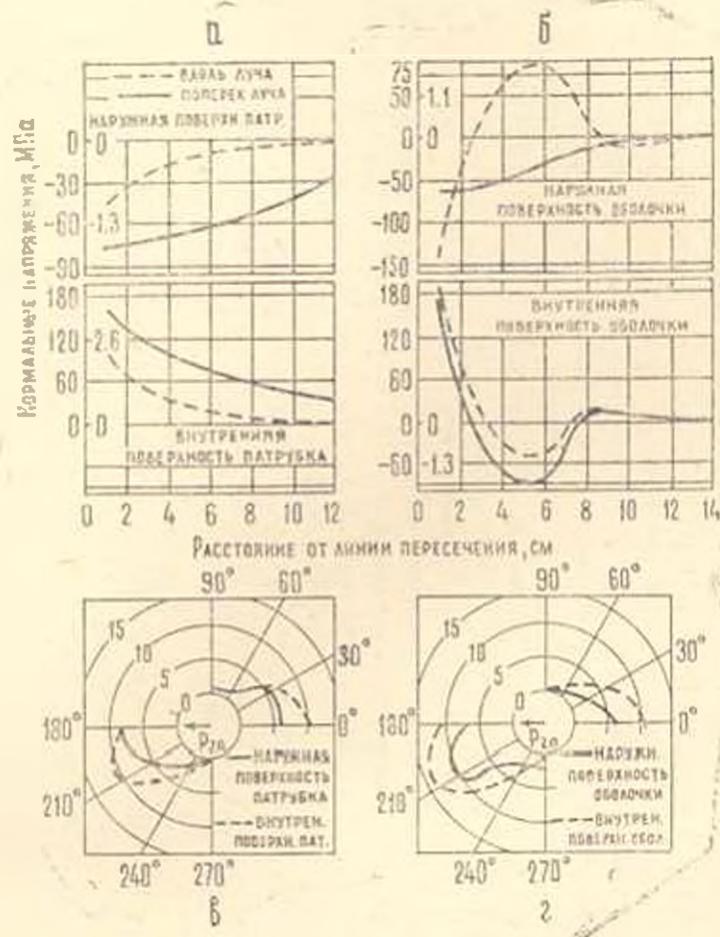
На фиг. 2—11 представлены графики, показывающие зависимость нормальных напряжений от расстояния до линии пересечения основной оболочки и патрубка (случаи в, б) на наиболее нагруженном луче при каждом виде нагружения. Левые вертикальные шкалы напряжений — для металлической модели, правые — для эпоксидной. На тех же фигурах (случаи н, г) показаны зависимости коэффициентов концентрации от расположения лучей на модели.

Таблица 1

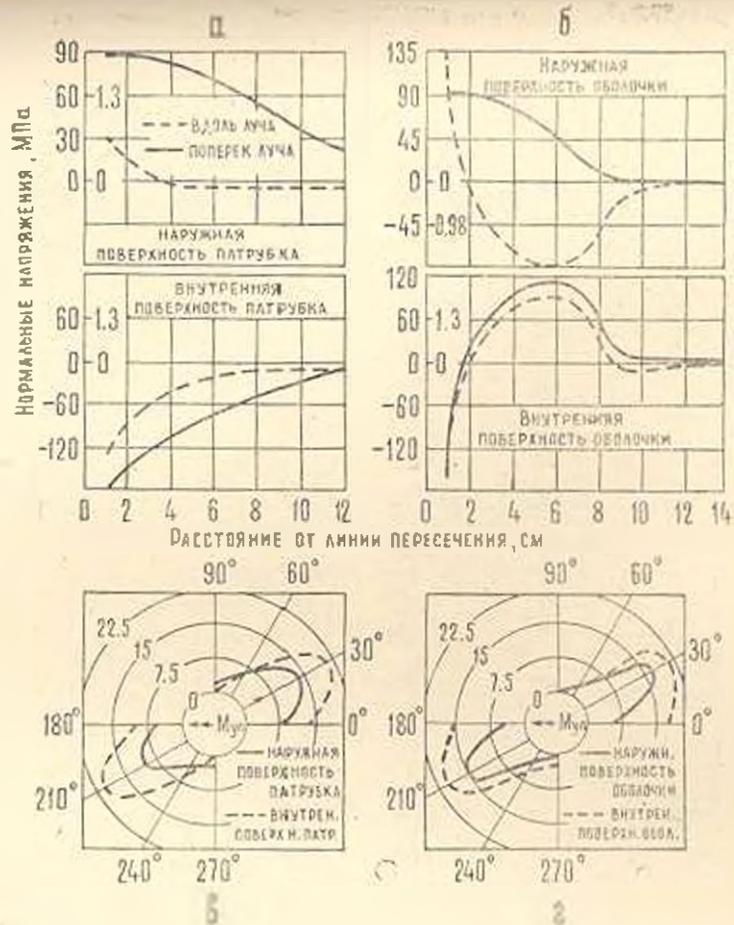
Нагрузка	Коэффициент концентрации	Зона максимальных напряжений
$P_{y1}$ — осевая сила на патрубок	15.2	Наружная поверхность оболочки, луч $180^\circ$
$P_{x1}$ — поперечная сила на патрубок, плоскость $Ayz$	13.6	Внутренняя поверхность патрубка, луч $180^\circ$
$M_{y1}$ — крутящий момент на патрубок	21.6	Внутренняя поверхность патрубка, луч $210^\circ$
$M_{z1}$ — изгибающий момент на патрубок, плоскость $Axy$	7.8	Внутренняя поверхность патрубка, луч $180^\circ$
$M_{x1}$ — изгибающий момент на патрубок, плоскость $Ayz$	7.7	Внутренняя поверхность оболочки, луч $0^\circ$
$P_{z0}$ — осевая сила на оболочку	17.8	Внутренняя поверхность патрубка, луч $180^\circ$
$P_{y0}$ — поперечная сила на оболочку, плоскость $Axy$	11.3	Внутренняя поверхность патрубка, луч $180^\circ$
$M_{z0}$ — крутящий момент на оболочку	22	Внутренняя поверхность патрубка, луч $30^\circ$
$M_{y0}$ — изгибающий момент на оболочку, плоскость $Axy$	10.3	Внутренняя поверхность патрубка, луч $0^\circ$
$P_{x0}$ — поперечная сила на оболочку, плоскость $Axy$	11.5	Внутренняя поверхность патрубка, луч $180^\circ$



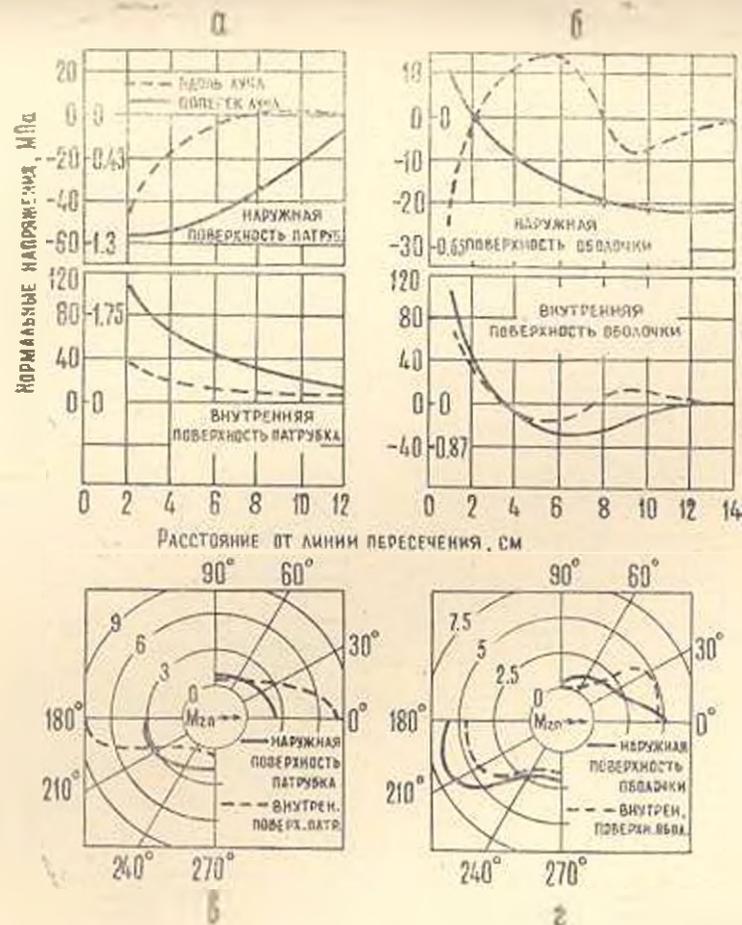
Фиг. 2. Картина напряженного состояния при действии на патрубок осевой силы  $P_{ax}$ .



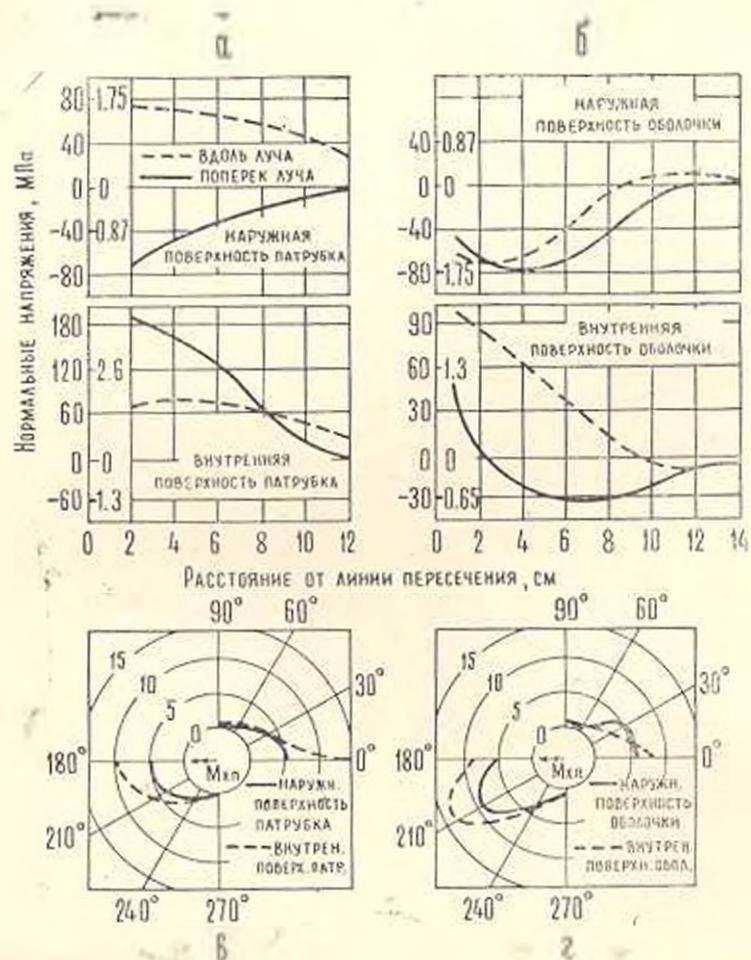
Фиг. 3. Картина напряженного состояния при действии на патрубок поперечной силы, плоскость  $A_{20}$ .



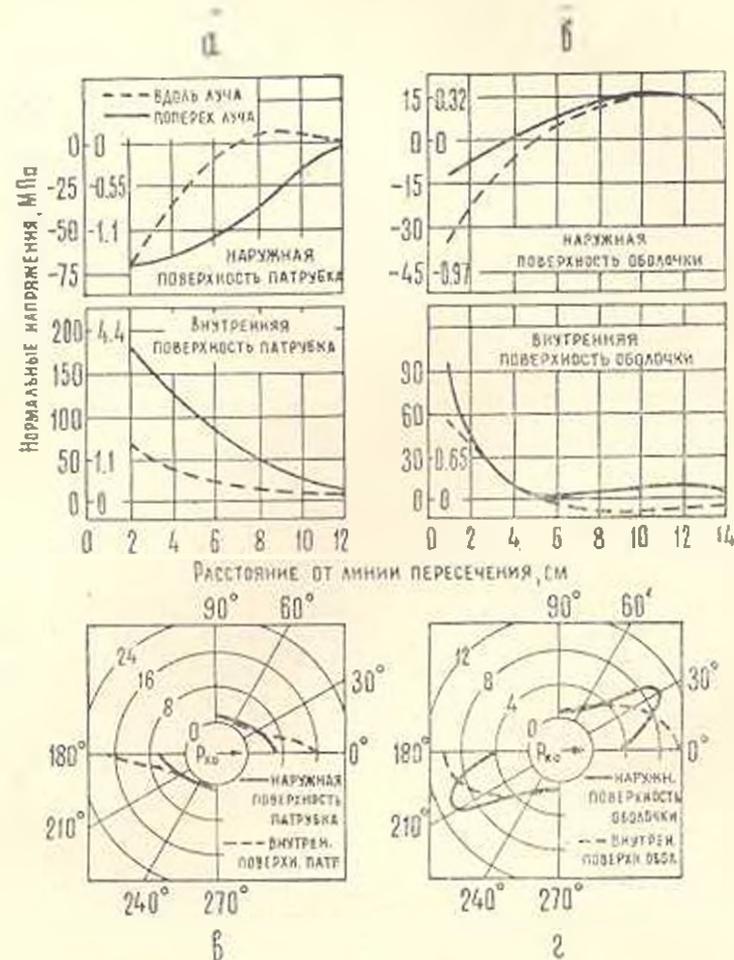
Фиг. 4. Картина напряженного состояния при действии на патрубок крутящего момента  $M_y$



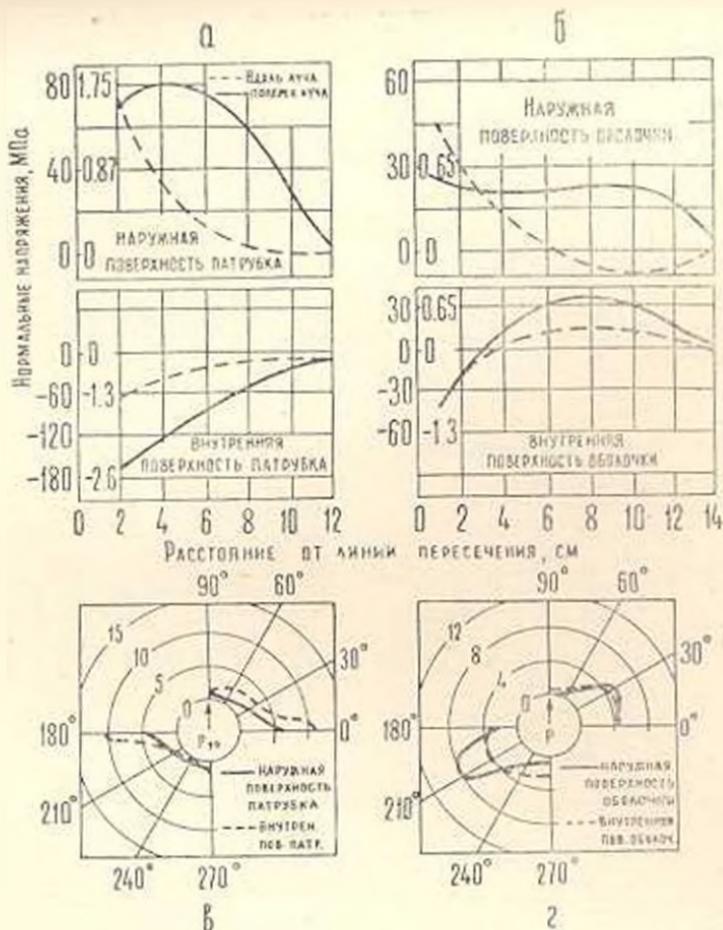
Фиг. 5. Картина напряженного состояния при действии на патрубок изгибающего момента, плоскость  $A_{12}$



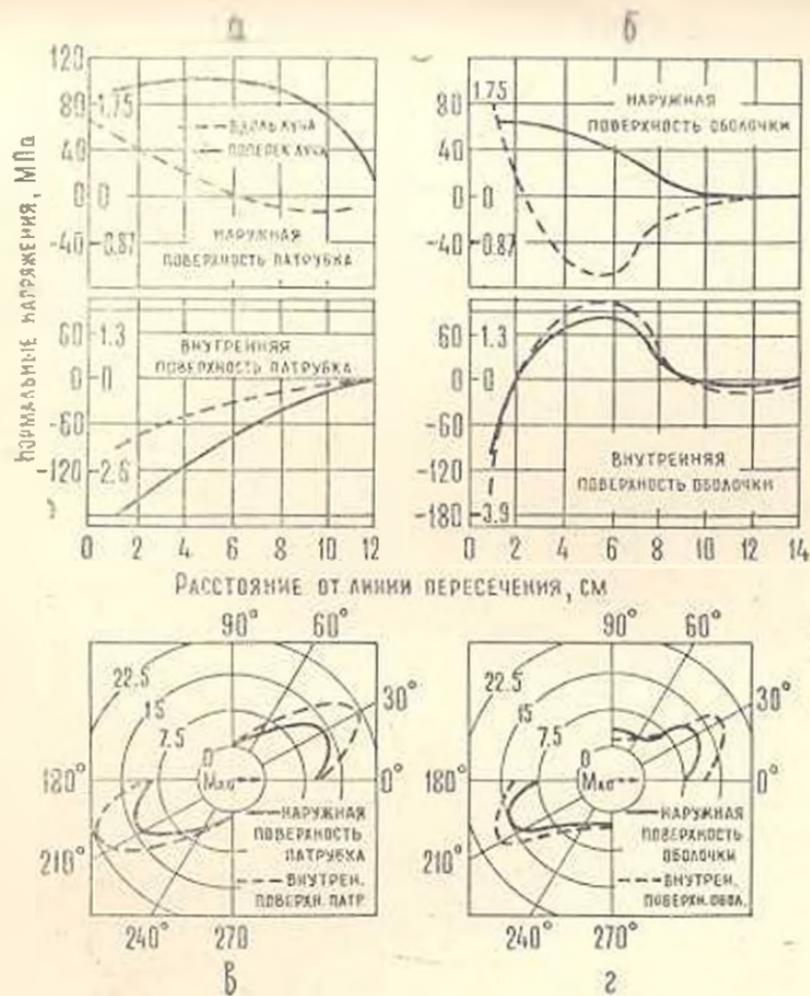
Фиг. 6. Картина напряженного состояния при действии на патрубок изгибающего момента, плоскости  $L_{00}$



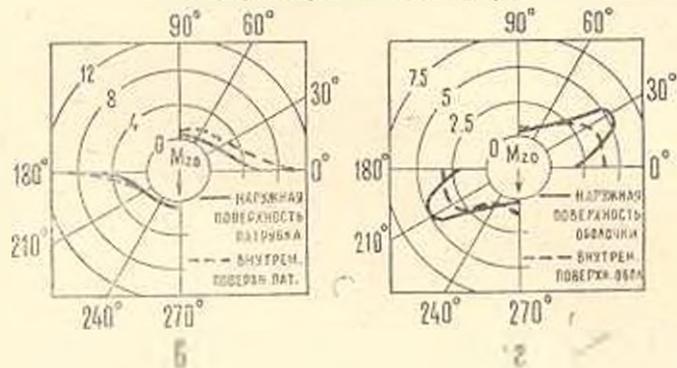
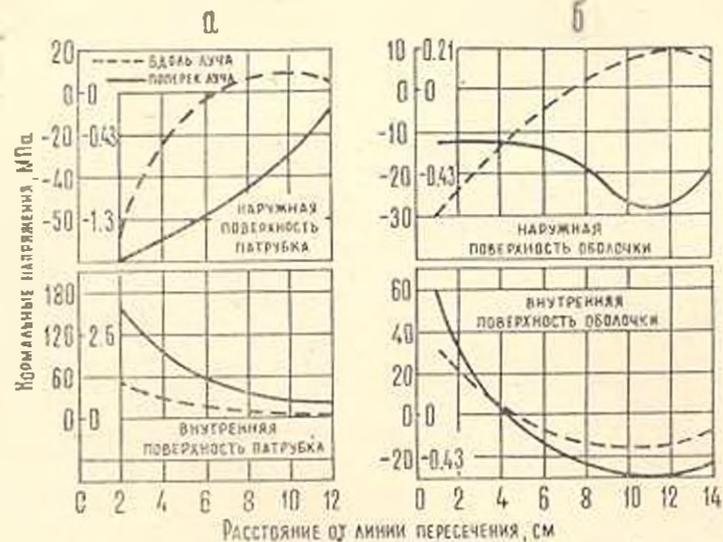
Фиг. 7. Картина напряженного состояния при действии на оболочку осевой силой  $P_{00}$



Фиг. 8. Картина напряженного состояния при действии на основную оболочку поперечной силы, плоскость  $A_2y$

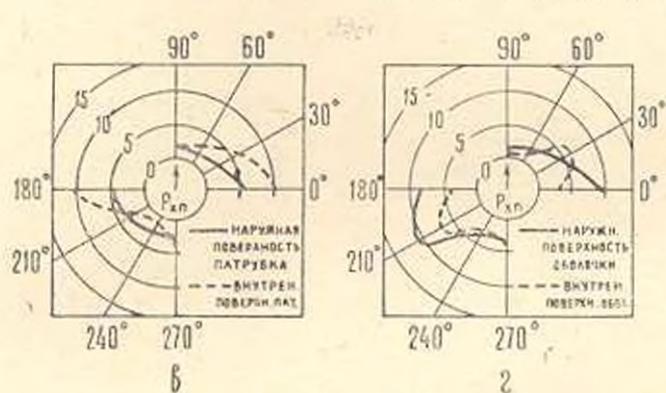
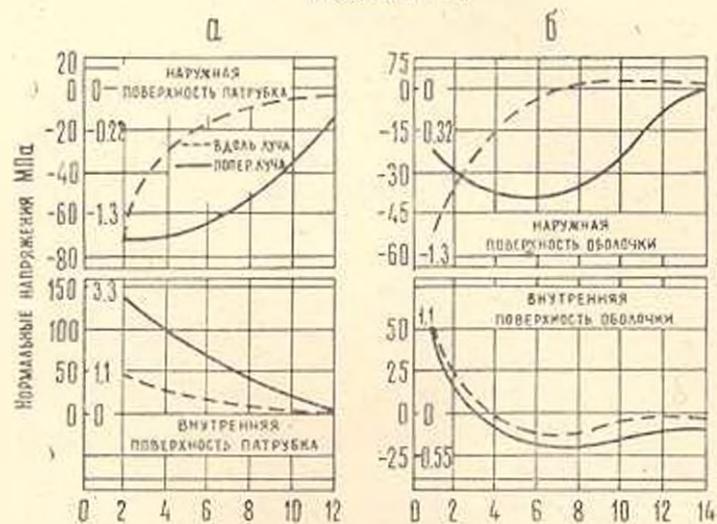


Фиг. 9. Картина напряженного состояния при действии на осевую оболочку крутящего момента  $M_0$



Фиг. 10. Картина напряженного состояния при действии на основную оболочку изгибающего момента, плоскость  $A_x B$

№ 2, Механика, № 2,



Фиг. 11. Картина напряженного состояния при действии на патрубок поперечной силы, плоскость  $A_y B$

В таблицу внесены наибольшие для каждого вида нагружения коэффициенты концентрации напряжений и указаны местоположения розеток, в которых обнаружены наибольшие коэффициенты концентрации.

Из таблицы видно, что при действии на тройники большинства нагрузок коэффициенты концентрации имеют величины порядка 10—15, самые низкие коэффициенты концентрации (7,7—7,8) наблюдаются при действии моментов  $M_{21}$ ,  $M_{31}$ , максимальные коэффициенты концентрации напряжений (порядка 22) — при действии крутящих моментов на патрубок и основную трубу.

В таблице не приведены результаты испытаний тройников при действии на оболочку поперечной силы в плоскости  $A_1$  и изгибающего момента в той же плоскости из-за нестабильности показаний приборов при этих нагрузках, которую можно объяснить резкими градиентами напряжений в зоне пересечения, что подтвердил дальнейший расчет методом конечных элементов. Это отмечается и в работах [5] и [6].

Наиболее нагруженные участки (для большинства нагрузок) располагаются в зонах  $0-30^\circ$  и  $180-210^\circ$ , то есть в плоскости поперечной симметрии, где и следует производить усиление конструкции в случае необходимости.

ИИИ Харьковского завода  
«Электротяжмаш»

Поступила 17 IX 1980

Ա. Ի. ԵՃՈՎ, Ա. Լ. ԼԻՎՇԻՏ, Ե. Ա. ՄՈՎԻՍՎՍԿԻ

ՀԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ԿՈՆՑԵՆՏՐԱՑԻԱՆ, ՀԱՏՎՈՂ ԿԸԱՆԱՅԻՆ ԹԱՎԱՆՔՆԵՐՈՒՄ

Ս. մ. փ. ո. փ. ո. մ.

Հոդվածում քննվում են փորձարարական արդյունքները լարումը ոտըշխու համար, միատեսակ կորոթյուններ ունեցող զլանային թաղանթների հատման շրջակայքում:

## STRESS CONCENTRATION NEAR CYLINDER-TO-CYLINDER INTERSECTION

A. I. ILCHOV, A. L. LIVSHITS, E. A. MOLDAVSKY

### S u m m a r y

The paper gives the results of the experimental determination of stress near cylinder-to-cylinder intersections of equal diameters.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Reidelbach W. Der Spannungszustand im Übergangsbereich einer rechtwinkligen Rohrabzweigung — Ingenieur Archiv, 1961. Bd. 30, No. 5, s. 293-316.

2. Bijlard P. P., Dohrmann R. J., Wang I. C. Stresses in junction of nozzle to cylindrical pressure vessel for equal diameter of vessel and nozzle. — Nuclear engineering and design, 1967, v. 5, p.p. 349—369.
3. Куликов Ю. А., Стасенко Н. В. Расчет тройничного соединения тонкостенных труб методом конечных элементов. — В кн. Расчеты на прочность. Вып. 18, М.: Машиностроение, 1977, с. 141—152.
4. Ando Y., Yagawa G., Kikuchi F. Stress distributions in thin-walled intersecting cylindrical shells subjected to internal pressure and in-plane force. — Preprints on the first international conference of structural mechanics in reactor technology, v. 3, Berlin, 1971, G. 2—2/1—G. 2—2/13.
5. Corum J. M., Greenstreet W. L. Experimental elastic stress analysis of cylinder-to-cylinder shell models and comparisons with theoretical predictions. — Preprints of the first international conference of structural mechanics in reactor technology, v. 3, Berlin, 1971, G. 25, p.p. 1—24.
6. Gwaltney R. C., Corum J. M., Bolt S. E., Bryann J. W. Experimental stress analysis of cylinder-to-cylinder shell models and comparisons with theoretical predictions. — Transactions of ASME, Journal of pressure vessel technology, Petroleum division, 1976, V. J. 98, No. 4, p.p. 283—290.