

3-328

24/X-68

ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна



P13 - 4059

А.Заплетал

ЛАБОРАТОРИЯ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИЧЕСКОЙ  
АНИЗОТРОПИИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ СТЕКОЛ  
5-МЕТРОВОЙ ВОДОРОДНОЙ КАМЕРЫ

1968

P13 - 4059

А. Заплетал

К ВОПРОСУ ОБ ОПТИЧЕСКОЙ  
АНИЗОТРОПИИ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ СТЕКОЛ  
5-МЕТРОВОЙ ВОДОРОДНОЙ КАМЕРЫ

7542/2 ч.



## В В Е Д Е Н И Е

Фотографирующие устройства 5-метровой водородной камеры отгорожены от пространства, заполненного водородом, сферическими предохранительными стеклами, которые находятся в напряженном состоянии, вызванном давлением водорода и уплотнения.

Известно, что напряженное состояние прозрачной аморфной среды способствует возникновению оптической анизотропии, которая проявляется эффектом двупреломления.

Поэтому, снимая через стекло на пленку траектории частиц, получаем искаженное в результате двупреломления изображение. Чтобы определить, как велико искажение, надо прежде всего определить напряженность стекол.

Выяснению этого вопроса в основном и посвящена настоящая работа.

### I. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

#### 1. Тензор напряжения

Напряженное состояние тела в точке А определяется уравнением

$$\vec{\sigma}_a = T \vec{n} . \quad (1)$$

где  $\vec{n}$  — единичный вектор нормали бесконечно малой площадки, содержащей точку  $A$ ;  $\vec{\sigma}_n$  — вектор напряжения, действующего на площадку с нормалью  $\vec{n}$ ;  $T$  — тензор напряжения.

Тензор напряжения является симметричным тензором второго ранга.

Тогда существует система главных координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , в которой тензор напряжения приобретает вид:

$$T = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} . \quad (2)$$

Векторами главных напряжений называют векторы

$$\vec{\sigma}_i = T \vec{e}_i \quad (i=1,2,3), \quad (3)$$

где  $\vec{e}_1$ ,  $\vec{e}_2$ ,  $\vec{e}_3$  — единичные векторы в направлении  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

Главными напряжениями принято называть величины  $\sigma_i$  ( $i=1,2,3$ ) главной диагонали матрицы тензора  $T$ . Каждому  $\vec{\sigma}_i$  соответствует  $\sigma_i$ , что выражается соотношением

$$\sigma_i = \vec{e}_i \cdot \vec{\sigma}_i \quad (i=1,2,3). \quad (4)$$

$\sigma_i$  называют или растяжением, если  $\sigma_i > 0$ , или сжатием, если  $\sigma_i < 0$ .

## 2. Оптическая индикатриса

Оптической индикатрисой выражают оптическую анизотропию среды. Оптическая индикатриса представляет собой эллипсоид показателей преломления с главными осями  $n_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ). Величины  $n_i$  называют главными показателями преломления. Направления, в которых откладываются главные показатели преломления  $n_i$ , отождествим с системой координат  $x', y', z'$ .

## 3. Соотношения между тензором напряжения и оптической индикатрисой

Напряженное состояние аморфной прозрачной среды вызывает в ней оптическую анизотропию. Напряженное состояние и оптическая анизотропия связаны следующим образом:

- а) Система главных координат тензора напряжения  $x, y, z$  совпадает с системой координат  $x', y', z'$  оптической индикатрисы.
- б) Величины главных показателей преломления определяются уравнениями

$$\begin{aligned}n_1 &= n_0 + c_1 \sigma_1 + c_2 (\sigma_2 + \sigma_3) \\n_2 &= n_0 + c_1 \sigma_2 + c_2 (\sigma_1 + \sigma_3) \\n_3 &= n_0 + c_1 \sigma_3 + c_2 (\sigma_1 + \sigma_2).\end{aligned}\tag{5}$$

Здесь  $n_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — главные показатели преломления,  $n_0$  — показатель преломления незагруженной (изотропной) среды,  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) — главные напряжения,  $c_1, c_2$  — абсолютные оптические постоянные.



## II. НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНЫХ СТЕКОЛ

Из сказанного выше видно, что определение оптической анизотропии, вызванной напряженным состоянием, сводится, в основном, к определению напряженного состояния.

В случае предохранительных стекол (см. рис.1) эта задача упрощается, т.к. стекла представляют собой осесимметричное тело, находящееся под симметричными нагрузками давления водорода и уплотнения, вследствие чего поля тензоров напряжений в любых двух меридиональных сечениях должны быть идентичны. Таким образом, достаточно определить напряженное состояние лишь одного меридионального сечения.

### 1. Экспериментальные данные

Напряженное состояние меридиональных сечений определялось путем моделирования при помощи поляризационно-оптического метода исследования напряжений.

Были изготовлены две модели стекол из эпоксидной смолы ЭД-6 в масштабе 1:2,3. На одной модели было "заморожено" <sup>x)</sup> напряженное состояние, соответствующее воздействию давления водорода, на второй — напряженное состояние, соответствующее тому, которое вызвано уплотнением стекол.

Из каждой модели был вырезан меридиональный элемент, на котором проводились измерения в линейно-поляризованном белом свете и в свете, поляризованном по кругу, как в белом, так и в монохроматическом свете натрия.

---

x)

См. приложение 1.

#### а) Изоклины, изостаты

В линейно поляризованном свете наблюдались изоклины - линии постоянного наклона двух из главных осей тензоров напряжений.

Тот факт, что две из главных осей тензоров расположены в меридиональных плоскостях тела, обусловлен тем, что третья ось должна быть в результате симметрии перпендикулярна к меридиональным плоскостям. Картина изоклин стекла <sup>x)</sup>, нагруженного давлением водорода, показана на рис.2.

На рис.5 показана картина изоклин, возникающая при наличии нагрузки стекла уплотнением. На основе картин изоклин графическим путем построены картины изостат.

Картина изостат представляет собой две системы взаимноортогональных кривых ( $s_1$ ,  $s_2$ ), которые обладают следующим свойством: направления касательной, главной нормали и бинормали в любой точке изостатических кривых совпадают с направлениями главных осей тензора  $T$  и, разумеется, с направлением векторов главных напряжений. Картина изостат, принадлежащая стеклу, нагруженному давлением водорода, показана на рис.3.

На рис.6 показаны изостаты, принадлежащие стеклу под нагрузкой уплотнения. Картины изостат, так же как и картины изоклин, не зависят от величины нагрузки, а зависят только от ее формы.

Обозначим векторы главных напряжений в зависимости от изостатической системы  $s_1$  следующим образом (см. рис.3,6). В направлении касательной действует вектор  $\vec{\sigma}_1$ , в направлении главной нормали - вектор  $\vec{\sigma}_2$ , в направлении бинормали - вектор  $\vec{\sigma}_3$ .

Вращением изостат вокруг оси симметрии получают изостатические поверхности.

#### б) Изохромы

В свете, поляризованном по кругу, наблюдались изохромы - линии

постоянного двуупреломления поляризованного пучка света, проходящего через меридиональный элемент.

Принято обозначать величину двуупреломления буквой  $\Delta$ .

Значение  $\Delta$  зависит от векторов  $\vec{\sigma}_1, \vec{\sigma}_2$ . Вектор  $\vec{\sigma}_3$  не оказывает на  $\Delta$  никакого влияния (направление вектора  $\vec{\sigma}_3$  параллельно направлению распространения световых лучей).

Зависимость  $\Delta$  от  $\vec{\sigma}_1, \vec{\sigma}_2$  определяется законом Вертхайма (WERTHEIM M. G.):

$$\Delta = \frac{t}{K} \cdot \epsilon, \quad (6)$$

где  $\Delta$  — двуупреломление, величина безразмерная,

$t$  — толщина меридиональной пластинки в см,

$K$  — оптическая чувствительность в кг/см,

$\epsilon = \sigma_1 - \sigma_2$ , где  $\epsilon$  в кг/см<sup>2</sup>,

$\sigma_1, \sigma_2$  — главные напряжения в кг/см<sup>2</sup>.

Модели изготовлены из смолы, оптическая чувствительность которой для света натрия при температуре "замораживания" (115°С) равна 0,364 кг/см.

Из уравнения (6) следует, что картина изохром представляет собой тоже картину линий постоянной разности  $\sigma_1 - \sigma_2$ .

На рис.4 представлена картина изохром от нагрузки давлением водорода. Каждая линия здесь обозначена двумя цифрами. Число в скобках обозначает величину  $\Delta_M$  модели при наличии давления  $p_M = 1,04$  кг/см<sup>2</sup>. Число вне скобок представляет собой величину  $\epsilon_H$  стекла при наличии давления  $p_H = 1$  кг/см<sup>2</sup>.

Рис.7 показывает изохромы стекла при наличии нагрузки уплотнения.



В скобках показана величина  $\Delta_M$  модели, вызванная нагрузкой уплотнения  $\rho_M = 2,82$  кг/см.

Число вне скобок представляет собой величину  $\epsilon_H$  стекла при наличии загрузки  $\rho_H = 1$  кг/см.

Картинки изохром зависят не только от формы, но также и от величины нагрузки. Если увеличить нагрузку стекла (модели) в  $n$  раз по сравнению с той, которая вызывает  $\epsilon_H(\Delta_M)$ , то  $\epsilon_H(\Delta_M)$  тоже увеличится в  $n$  раз.

## 2. Приведение данных измерения на модели к натуре

Между моделью и натурой (стеклом) сохранен закон геометрического подобия (модель изготовлена в масштабе 1:2,3), вследствие чего тензорные поля модели и природы в соответствующих точках должны быть пропорциональны друг другу, если только нагрузка по своему характеру соответствует нагрузке модели. Итак,

$$T_H = \lambda \cdot T_M, \quad (7)$$

где  $T_H$  -тензор напряжения природы,  $T_M$  -тензор напряжения модели,  $\lambda$  -коэффициент пропорциональности.

Коэффициент  $\lambda$  для стекла, загруженного равномерно распределенной нагрузкой водорода  $q_H$  [ кг/см<sup>2</sup> ], определяется посредством соотношения

$$\lambda_q = \frac{q_H}{q_M}, \quad (8)$$

где  $q_H$  -нагрузка природы,  $q_M$  -нагрузка модели.

Для нагрузки  $q_H = 1 \text{ кг/см}^2$ ,  $\lambda_c = 0,96$ . Для той же самой нагрузки  $q_H = 1 \text{ кг/см}^2$

$$\epsilon_H = 0,65 \Delta_M \text{ кг/см}^2. \quad (9)$$

$\epsilon_H = (\sigma_1 - \sigma_2)_H$  - разность главных напряжений,  $\sigma_i$  ( $i=1,2$ ) - главные напряжения натурy.  $\Delta_M$  - двуупреломление, измеряемое на модели. Для стекла, находящегося под плоским уплотнением  $p_H$  [кг/см], коэффициент  $\lambda$  имеет вид:

$$\lambda_D = \frac{p_H}{p_M} \cdot \frac{1}{\kappa}, \quad (10)$$

где  $p_H$  - нагрузка натурy,

$p_M$  - нагрузка модели,

$\frac{1}{\kappa}$  - масштаб модели.

Если  $p_H = 1 \text{ кг/см}$ , то

$$\lambda_D = 0,166 \quad (10a)$$

и

$$\epsilon_H = 0,075 \Delta_M \text{ кг/см}^2. \quad (11)$$

Из уравнения (7) видно, что переход к натуре не поворачивает главные оси  $T_H$  относительно главных осей  $T_M$ . Тогда переход от модели к натуре не оказывает никакого влияния на картины изоклин и изостат. Поэтому можно рис.2,3,5,8 считать идентичным как для модели, так и для натурy.

Переход от модели к натуре сказывается на картине изохром в том смысле, что величинам  $\Delta_M$  должны соответствовать величины  $\epsilon_H$ , полученные из соотношений (9), (11).

### 3. Обработка экспериментальных данных

Совокупность картин изоклин, изохром и изостат позволяет полностью определить поле тензоров напряжения, если к экспериментальным данным добавить два дифференциальных уравнения, которыми выражается равновесие бесконечно малого элемента, ограниченного изостатическими поверхностями в направлении напряжений  $\vec{\sigma}_i$  ( $i=1,2$ ), (см. рис.8).

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial s_1} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{r_2} + \frac{\cos \alpha}{r} (\sigma_1 - \sigma_3) = 0, \quad (12a)$$

$$\frac{\partial \sigma_2}{\partial s_2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{r_1} + \frac{\sin \alpha}{r} (\sigma_3 - \sigma_2) = 0. \quad (12b)$$

В уравнения (12) входят неизвестные функции  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ,  $(\sigma_3 - \sigma_2)$ .

Исключая эти разности, для  $\sigma_1, \sigma_2$  получаем уравнения

$$(\sigma_1)_\ell = (\sigma_1)_0 + \int_0^\ell \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial s_2} \cos \alpha - \epsilon \left( \frac{\sin \alpha}{r_2} + \frac{\cos \alpha}{r_1} + \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{r} \right) \right] d\ell \quad (13a)$$

$$(\sigma_2)_\ell = (\sigma_2)_0 - \int_0^\ell \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial s_1} \sin \alpha + \epsilon \left( \frac{\sin \alpha}{r_2} + \frac{\cos \alpha}{r_1} + \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{r} \right) \right] d\ell \quad (13b)$$

Уравнения (13) представляют собой криволинейные интегралы по путям интегрирования, параллельным оси симметрии стекла.  $\sigma_3$  определяет уравнение:

$$\sigma_3 = \sigma_1 + (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{r}{r_2 \cos \alpha} + \frac{\partial \sigma_1}{\partial s_1} \cdot \frac{r}{\cos \alpha} =$$

$$= \sigma_2 - (\sigma_1 - \sigma_2) \frac{r}{r_1 \sin \alpha} - \frac{\partial \sigma_2}{\partial s_2} \cdot \frac{r}{\sin \alpha} . \quad (13B)$$

В уравнениях (12), (13) (см. рис.8):  $\frac{\partial \sigma_i}{\partial s_i}$  — частная производная  $\sigma_i$  по кривой изостатической системы  $s_i$  ( $i=1,2$ );  $r_i$  — радиус кривизны изостатической системы  $s_i$  ( $i=1,2$ );  $r$  — расстояние пути интегрирования до оси симметрии;  $\frac{\partial \epsilon}{\partial s_i}$  — частная производная  $\epsilon$  по кривой изостатической системы  $s_i$  ( $i=1,2$ );  $\epsilon = \sigma_1 - \sigma_2$   $\alpha$  — угол между положительным направлением кривой изостатической системы  $s_1$  и осью X.

На основе уравнений (13) определены графо-числовым методом  $\sigma_i$  ( $i=1,2,3$ ) в опасной (в смысле оптической анизотропии) зоне стекла, через которую проходят лучи света, наклоненные к оси симметрии под углами  $30$  и  $45^\circ$  (см. рис.1).

Распределение  $\sigma_i$  вдоль путей интегрирования (они показаны на рис.1) приведено на рис.9-16. Кривая  $\alpha$  определяет положительное направление кривых изостатической системы  $s_1$  относительно оси X и тем самым задает ориентацию главных осей T.

Рис.17-20 определяют тензорное поле вдоль лучей с наклоном  $30$  и  $45^\circ$  относительно Y. Кривым  $\sigma_i$  (рис.9-20) соответствует нагрузка стекла или  $q = 1 \text{ кг/см}^2$ , или  $p = 1 \text{ кг/см}$ .

### III .ПЕРЕХОД ОТ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ К ОПТИЧЕСКОЙ АНИЗОТРОПИИ

Предыдущая глава посвящена определению тензорных полей напряжения, возникающих в предохранительных стеклах в результате воздействия давления водорода и уплотнения.

Поля определены полностью в той зоне стекла, через которую проходят лучи, наклоненные к оси симметрии под углом  $30^\circ$  и  $45^\circ$ . Луч, наклоненный на  $45^\circ$ , считается граничным лучом. Однако поля определены отдельно для давления водорода  $q = 1 \text{ кг/см}^2$  и уплотняющей силы  $P = 1 \text{ кг/см}$ .

Поэтому, переходя к оптической анизотропии стекол, мы должны:

- а) учесть настоящее давление водорода и настоящую уплотняющую силу;
- б) сложить тензорное поле, вызванное настоящим давлением, с полем, вызванным настоящей уплотняющей силой, и определить главные напряжения и главные оси тензоров суммарного поля.<sup>х)</sup>

Определяя главные оси тензоров суммарного поля, определяем одновременно направление осей оптической индикатрисы. Величины главных показателей преломления  $n_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) определим на основе уравнений (5).

Таким образом, получаем полную информацию об оптической анизотропии и неоднородности стекол.

#### Замечание

Заметим еще, что луч, проходящий через стекло вдоль оси симметрии, не претерпевает никакого преломления. Это заключение можно сделать без всяких расчетов - оно вытекает из принципа симметрии.

---

х)

См. приложение II.



## ПРИЛОЖЕНИЕ I.

"Замораживание" является приемом, которым пользуются, решая пространственные задачи упругости поляризационно-оптическим методом. Он заключается в следующем: модель нагревают до температуры "замораживания" (приблизительно  $120^{\circ}\text{C}$ ), затем нагружают и, не снимая нагрузки, охлаждают до комнатной температуры. Если при комнатной температуре снять нагрузку, то в модели остается "замороженным" оптический эффект, соответствующий напряженному состоянию, который не исчезает, даже если модель разрезать на куски.

## ПРИЛОЖЕНИЕ II.

Складывая тензорное поле  $T^q$ , выражающее напряженное состояние, возникающее под действием давления водорода, с полем  $T^p$ , вызванным нагрузкой уплотнения, необходимо сначала привести  $T^q$  и  $T^p$  к общей системе координат, например, к системе главных координат тензоров  $T^q$ . (Напомним, что  $T^q$  и  $T^p$  заданы рисунками 9-20 и что кривая  $a$  на этих рисунках определяет положительное направление оси  $X$  системы главных координат).

Тогда компоненты тензоров  $T^p$  преобразовываются на основе соотношения (сокращенная запись по Эйнштейну):

$$T'_{ij}{}^p = a_{ik} a_{jl} T_{kl}{}^p .$$

Символы  $a_{jk}$  определяет матрица:

		Главные координаты $T^p$		
		$x_p$	$y_p$	$z_p$
Главные коорд. $T^q$	$x_q$	$a_{11}$	$a_{12}$	$a_{13}$
	$y_q$	$a_{21}$	$a_{22}$	$a_{23}$
	$z_q$	$a_{31}$	$a_{32}$	$a_{33}$

которая в нашем случае приобретает вид

Главные координаты  $T^p$

$T^q$	$x_p$	$y_p$	$z_p$
$x_q$	$\cos \Delta\alpha$	$\sin \Delta\alpha$	0
$y_q$	$-\sin \Delta\alpha$	$\cos \Delta\alpha$	0
$z_q$	0	0	1

Здесь

$$\Delta\alpha = \alpha_q - \alpha_p,$$

$\alpha_q$  - угол, определяющий положительное направление  $x_q$  тензора  $T^q$  (рис.9-12),  $\alpha_p$  - угол, определяющий положительное направление  $x_p$  -тензора  $T^p$  (рис.13-16).

#### Л и т е р а т у р а

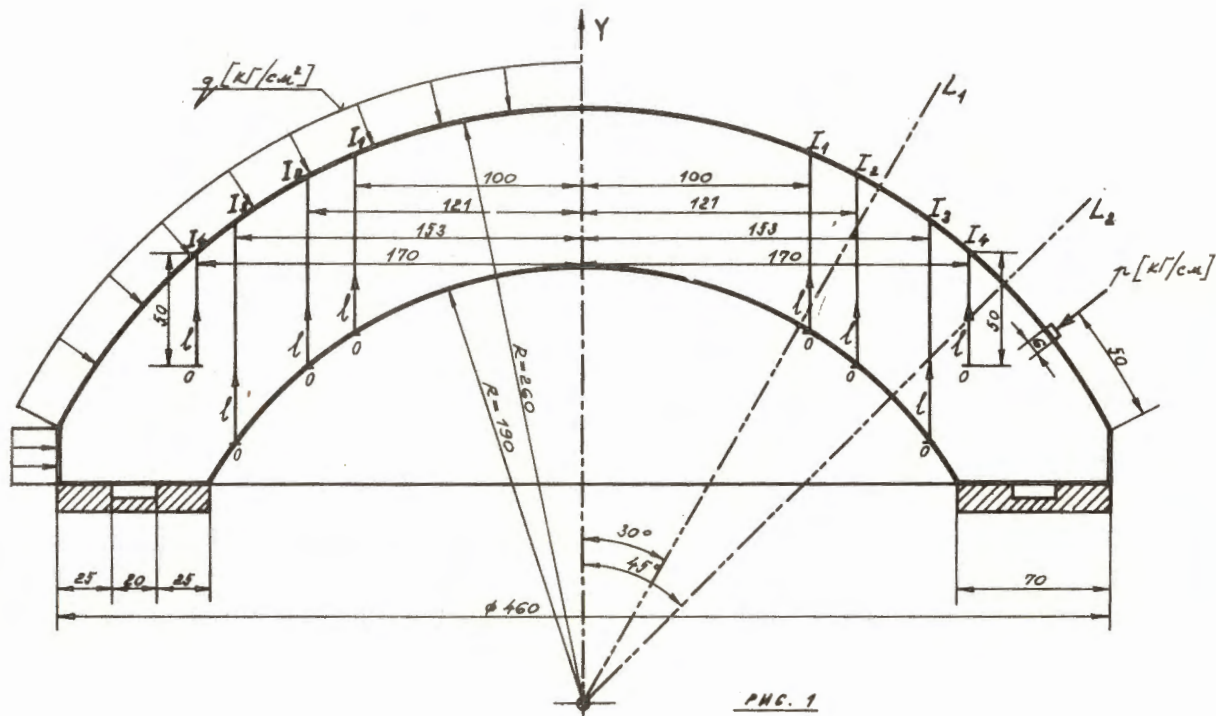
1. Coker E.G., Filon L.N. Photoelasticity. Cambridge 1931.
2. Ebner. Sitzungberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaft, Wien, 1885, / Том XCI./
3. Föppl L., Mönch E. Praktische Spannungsoptik. J.Springer, Berlin 1950.
4. Hetényi M. Handbook of Experimental Stress Analysis. Wiley and Sons, New York 1950

Б. Пригоровский Н.М. Метод пространственной фотоупругости для исследования распределения напряжений. Сб. Ин-та машиноведения АН СССР, Москва 1944 г.

Рукопись поступила в издательский отдел  
3 сентября 1968 года.

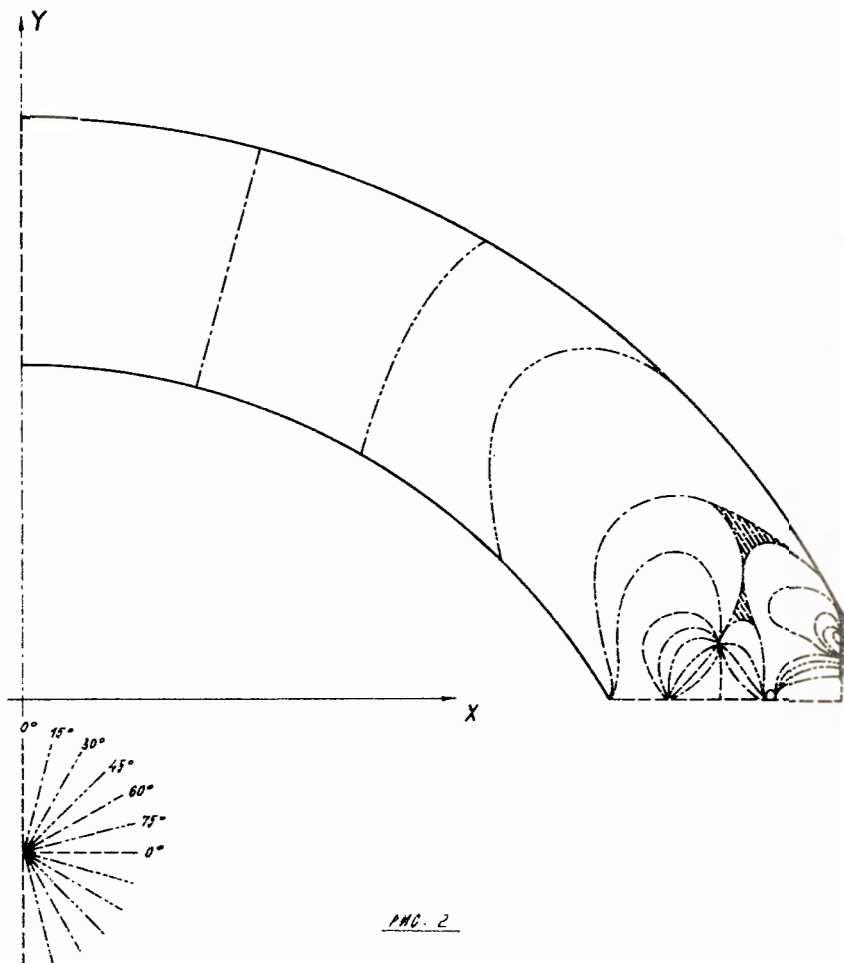
## ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЕ СТЕКЛО

$q$  — ЗАГРУЗКА ДАВЛЕНИЕМ ВОЗДУХА  
 $r$  — СЛОЙ УПЛОТНЕНИЯ  
 $L_1, L_2$  — ЛУЧИ ОТКЛОНЕННЫЕ ОТ  $Y$  НА УГОЛ  $30^\circ$  И  $45^\circ$   
 $I_1 \dots I_4$  — ПУТИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ



ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ СТЕКЛО — ЗАГРУЗКА ДАВЛЕНИЕМ ВОКРУДА  
ИЗОКЛИНЫ:

ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО НАКЛОНА: а) СИСТЕМЫ ГЛАВНЫХ КООРДИНАТ ТЕНЗОРА  
НАПРЯЖЕНИЯ  
б) ГЛАВНЫХ ОСЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ





ПРЕЖДЕВРАЩЕНАЕ СТЕКЛО — ЗАГРУЗКА ДАВЛЕНИЕМ ВОДОРОДА

ИЗОБАТЫ:

----- СИСТЕМА  $A_1$

———— СИСТЕМА  $A_2$

НАПРАВЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ, НОРМАЛ И БИНОРМАЛ КРИВЫХ СОЗДАЕТ  
С НАПРАВЛЕНИЕМ: а) СИСТЕМЫ ГЛАВНЫХ КООРДИНАТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЯ  
б) ГЛАВНЫХ ОСЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ИНДИКАТРИСЫ

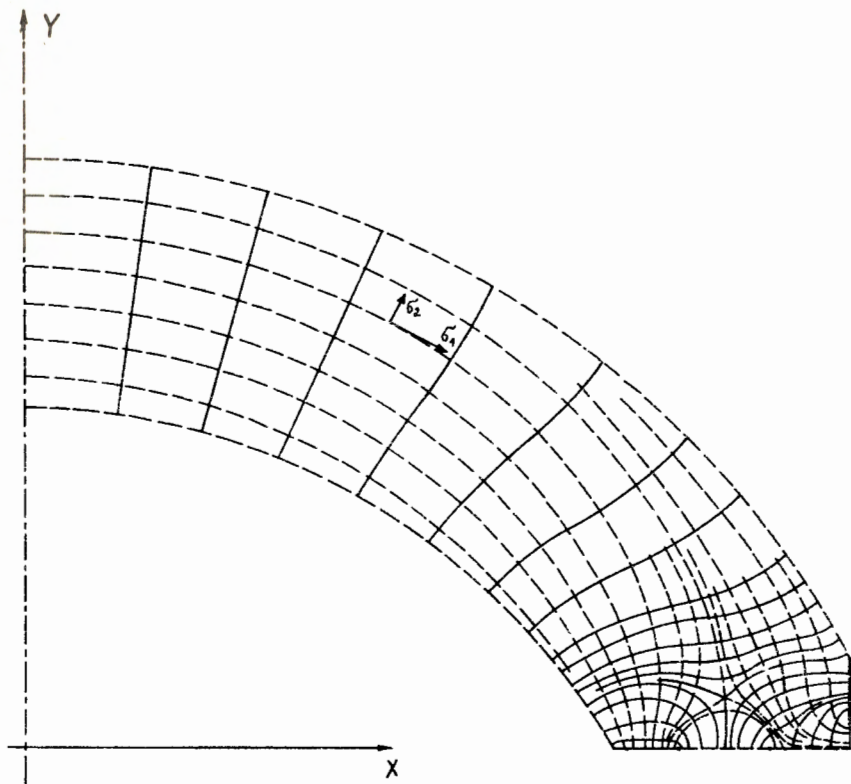


РИС. 3

ИЗОХРОНЫ

ЛИНИИ ПОСТОЯННОЙ РАЗНОСТИ  $\sigma_1 - \sigma_2$  ЦИФРОЙ В СКОБКЕ [ИЛИ СКОБКИ] ЗАДАНА ВЕЛИЧИНА  $\Delta \sigma [(\sigma_1 - \sigma_2)_0]$  СООТВЕТСТВУЮЩАЯ ДАВЛЕНИЮ ВОДОРОДА  $p_0 = 1,04 \text{ кг/см}^2$  [ $p_0 = 1 \text{ кг/см}^2$ ].

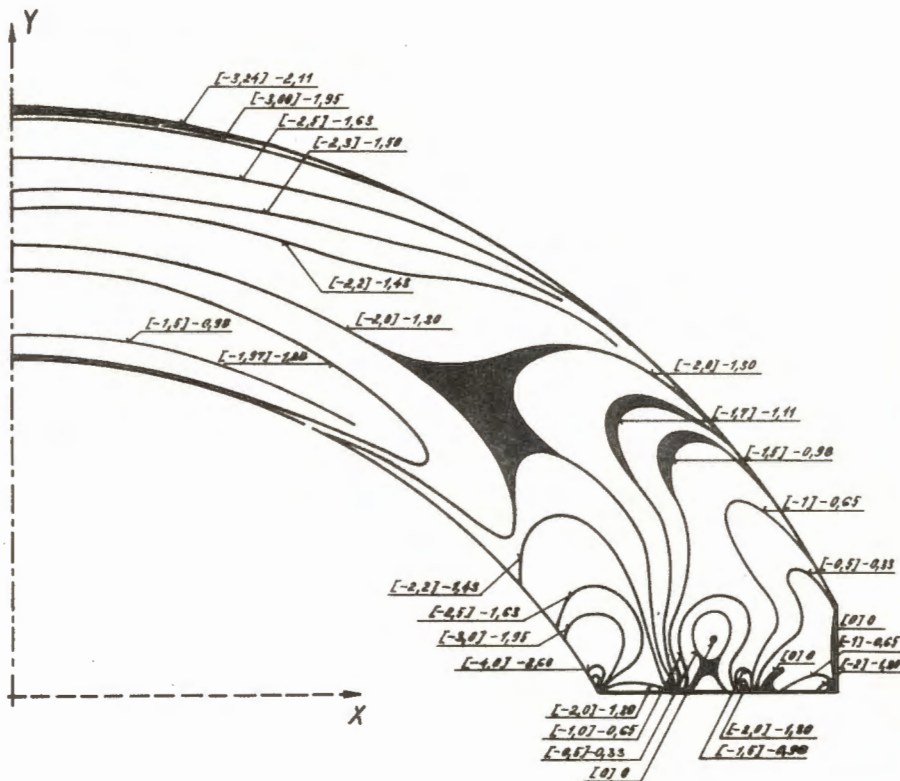


РИС. 4

ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНОЕ СТЕКЛО — ЗАГРЯЗКА УПЛОТНЕНИЕМ  
ИЗОКЛИНЫ:

ЛИНИИ ПОСТОЯННОГО НАКЛОНА: а) СИСТЕМЫ ГЛАВНЫХ КООРДИНАТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЯ  
б) ГЛАВНЫХ ОСЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ МАТРИЦЫ

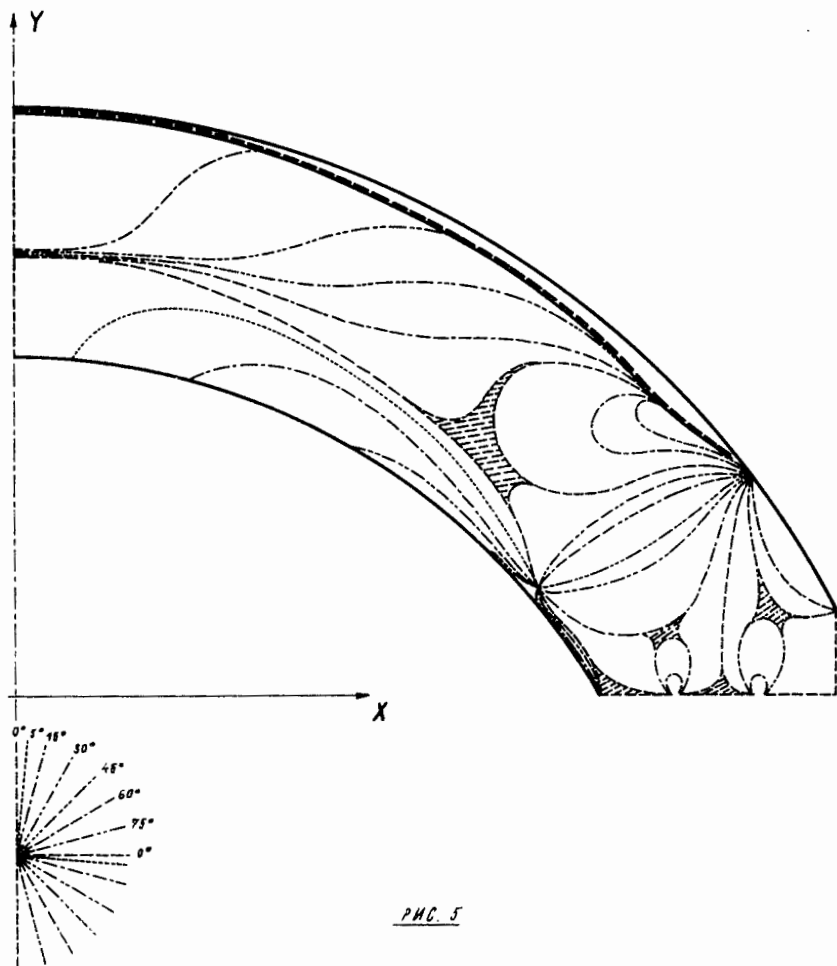


РИС. 5

ПРЕДОХРАНИТЕЛЬНОЕ СТЕКЛО — ЗАГРУЗКА ЧИСТОЙ СИММЕТРИЕЙ

ИЗОСТАТЫ:

----- СИСТЕМА  $A_1$   
----- СИСТЕМА  $A_2$   
НАПРАВЛЕНИЕ КАСАТЕЛЬНЫХ, НОРМАЛ. И БИНОРМАЛ. КРИВЫХ СООТВЕТСТ.  
С НАПРАВЛЕНИЕМ: а) СИСТЕМЫ ГЛАВНЫХ КООРДИНАТ ТЕНЗОРА НАПРЯЖЕНИЯ  
б) ГЛАВНЫХ ОСИЕЙ ОПТИЧЕСКОЙ ИНАКТИВНОСТИ

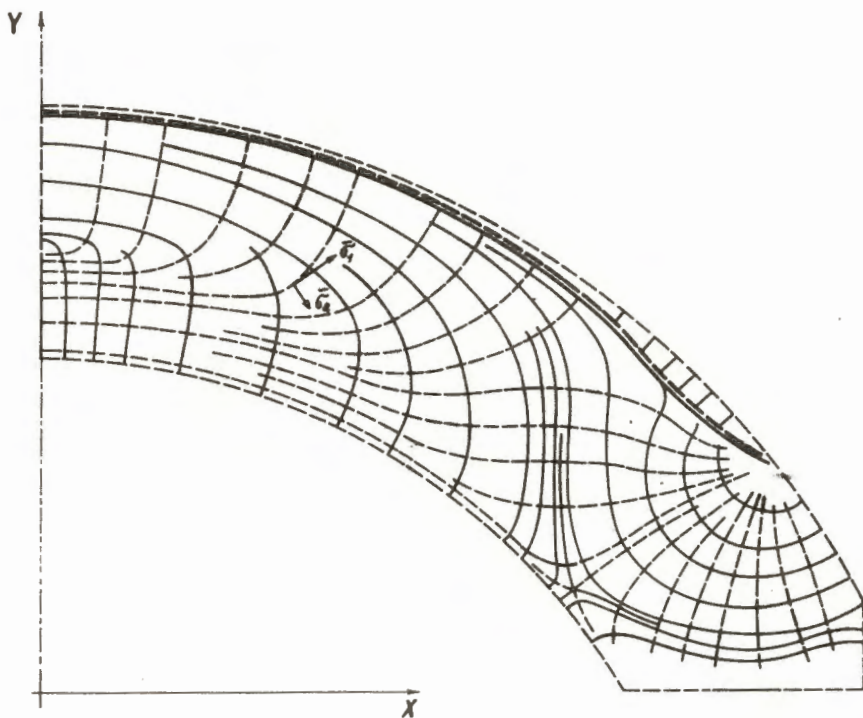


РИС. 6

ПРЕДУХРАНТЕЛЬНОЕ СТЕКЛО — ЗАГРЯЗКА УПЛОТНЕНИЕМ

ИЗОХРОМЫ :

линии постоянной разности  $\sigma_1 - \sigma_2$ .  
цифрой в скобке [вдв скобки] задана величина  $\Delta n$  [ $(\sigma_1 - \sigma_2)_0$ ] соответствующая уплотняющей силе  $\tau_{\Delta n} = 2,02 \text{ кг/см}^2$  [ $\tau_{\Delta n} = 1 \text{ кг/см}^2$ ].

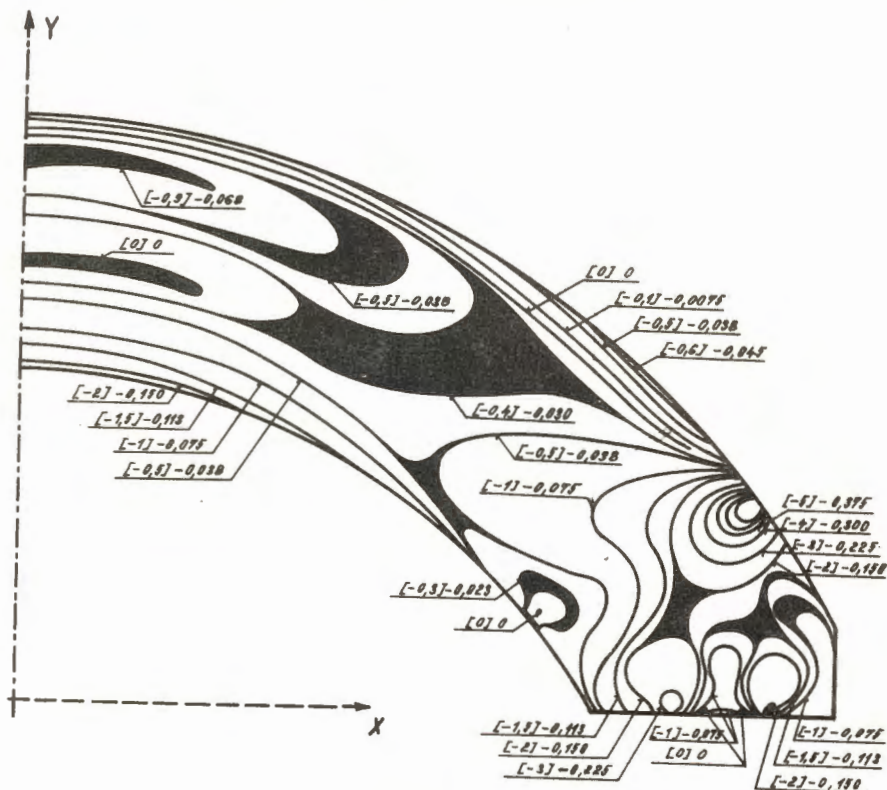


РИС. 7



# ИЗОСТАТИЧЕСКИЙ ЭЛЕМЕНТ

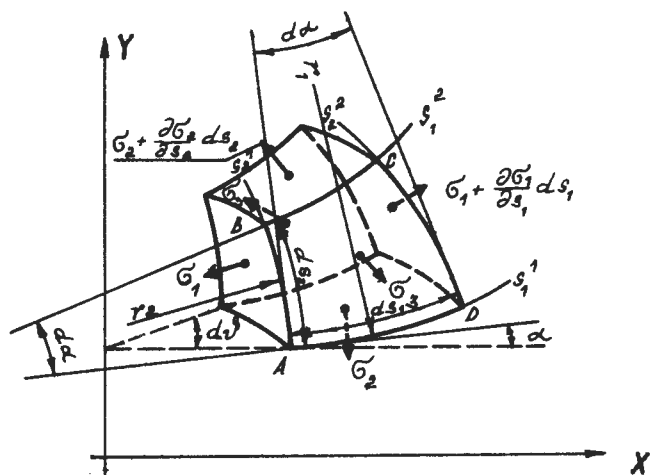


РИС. 8

# РАСПРЕДЕЛЕНИЕ $\sigma_i$ И $\alpha$ ВДОЛЬ ПУТИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ $I_i$ НАГРУЗКА ДАВЛЕНИЕМ ВОДОРОДА $q = 1 \text{ кг/см}^2$

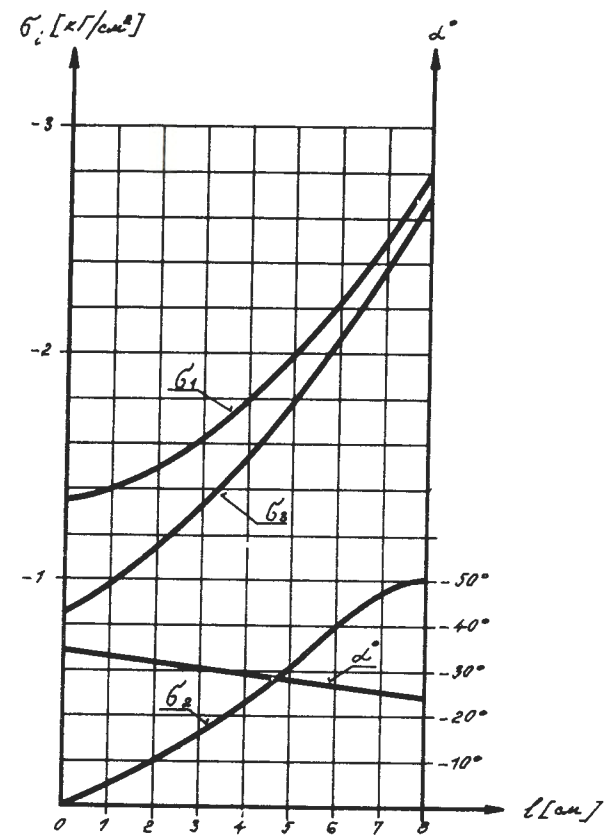


РИС. 9

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $G_i$  И  $\alpha$  ВОДОЙ ПУТИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ  $I_2$ :

НАГРУЗКА ДАВЛЕНИЕМ ВОДОРОДА  $q = 1 \text{ кг/см}^2$ .

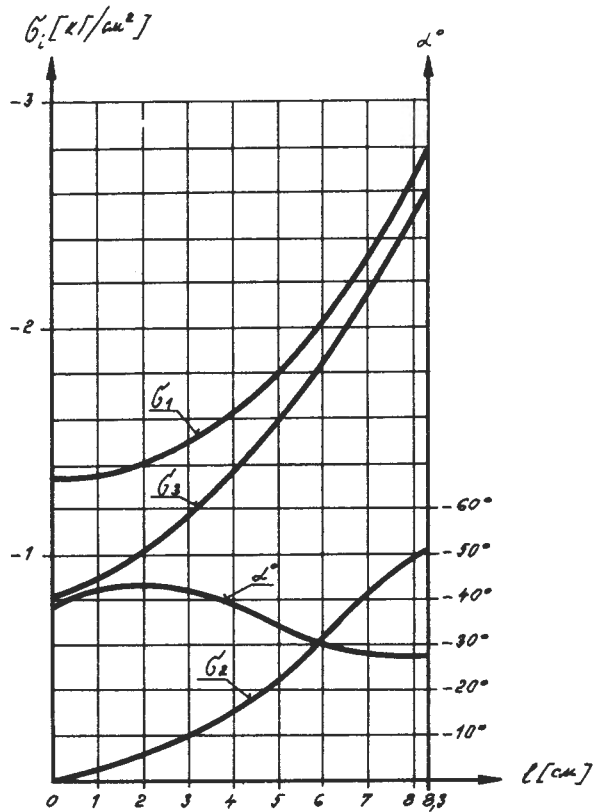


Рис. 10

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $G_i$  И  $\alpha$  ВОДОЙ ПУТИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ  $I_3$ :

НАГРУЗКА ДАВЛЕНИЕМ ВОДОРОДА  $q = 1 \text{ кг/см}^2$ .

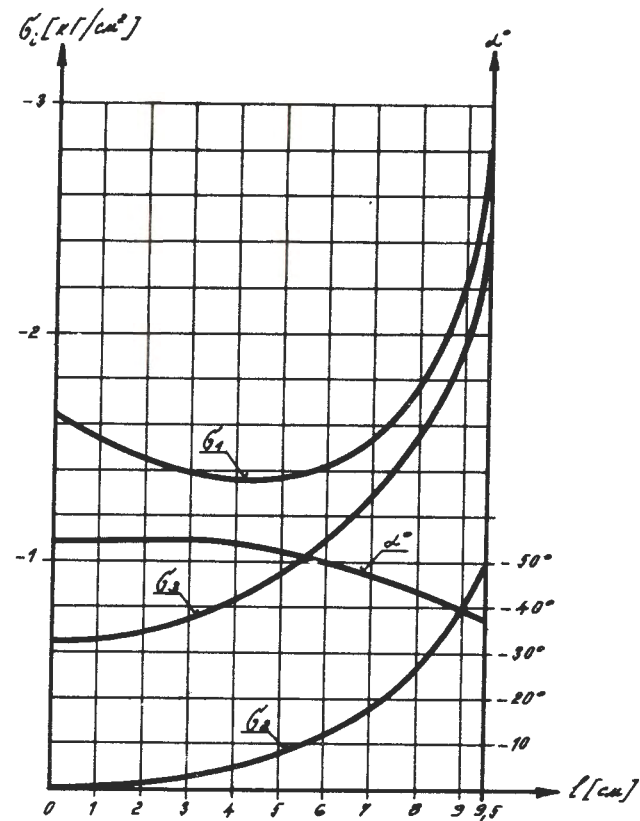


Рис. 11

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $b_i$  И  $\alpha$  ВОДЯ ПУТИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ I<sub>1</sub>.  
 НАГРУЗКА ДАВЛЕНИЕМ ВОДОРОДА  $q = 1 \text{ кг/см}^2$ .

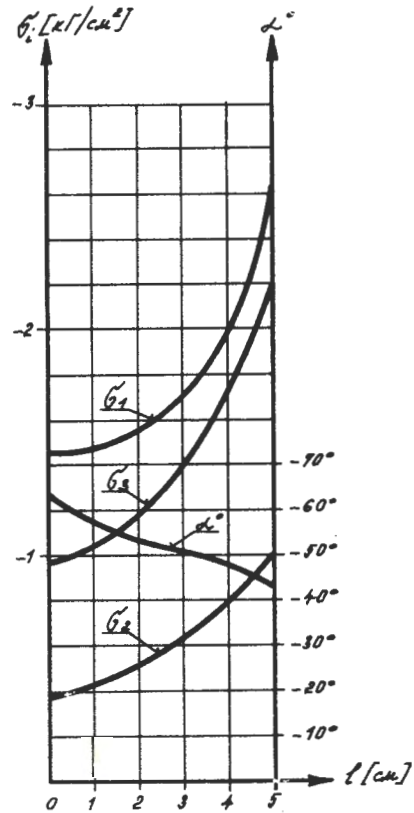


Рис. 12

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $b_i$  И  $\alpha$  ВОДЯ ПУТИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ I<sub>2</sub>.  
 НАГРУЗКА УПЛОТНЯЮЩЕЙ СЛОЕЙ  $q = 1 \text{ кг/см}^2$ .

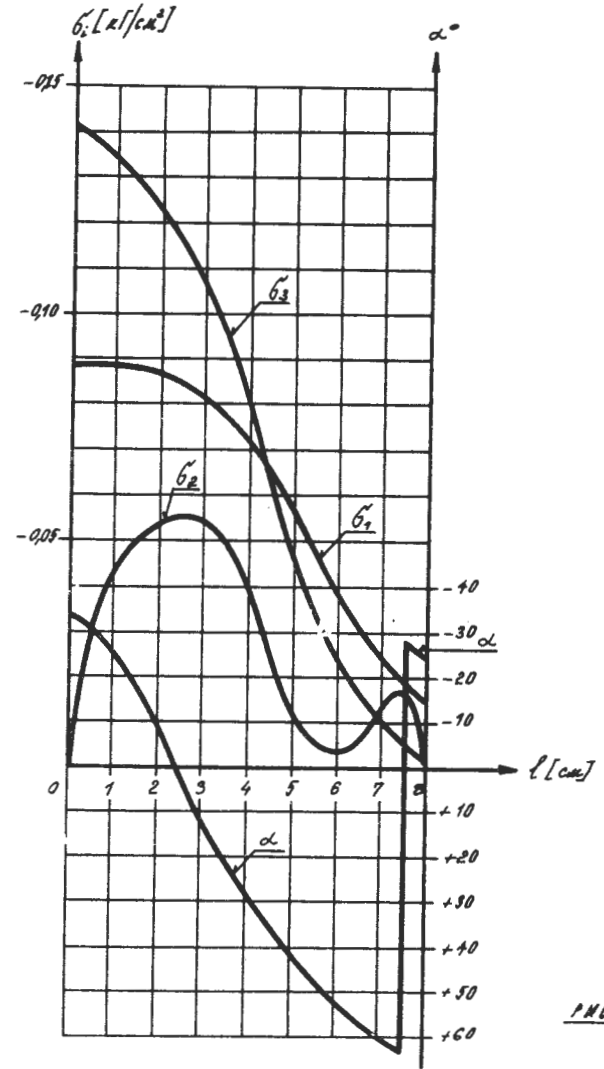


Рис. 13

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $\beta_i$  И  $\alpha$  ВОДОЙ ПУТИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ  $I_{12}$ .

НАГРУЗКА УПЛОТНЯЮЩЕЙ СИЛОЙ  $\rho = 1 \text{ кг/см}^2$ .

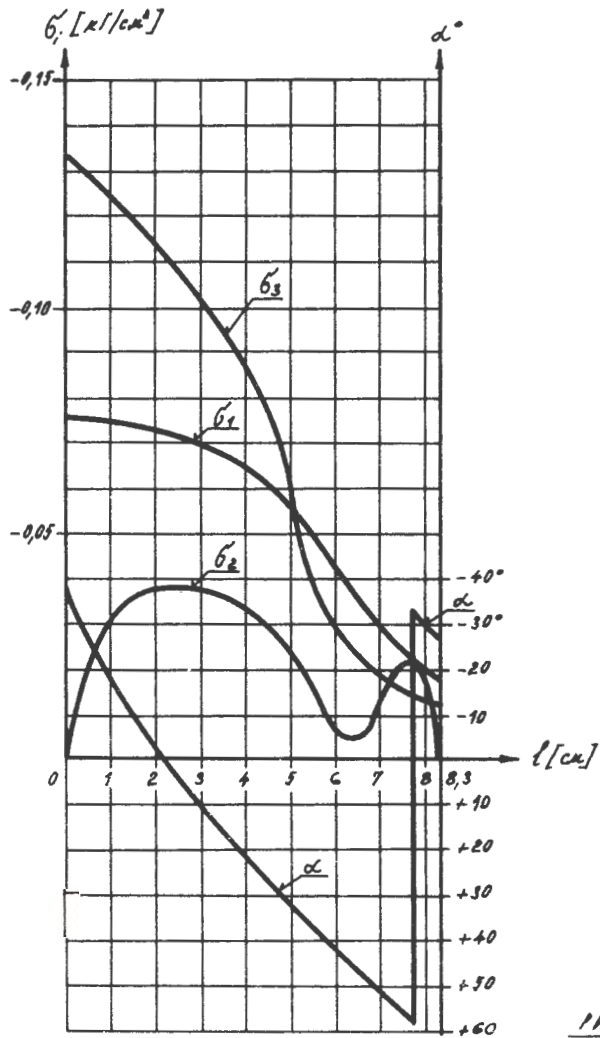


Рис. 14

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $\beta_i$  И  $\alpha$  ВОДОЙ ПУТИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ  $I_{23}$ .

НАГРУЗКА УПЛОТНЯЮЩЕЙ СИЛОЙ  $\rho = 1 \text{ кг/см}^2$ .

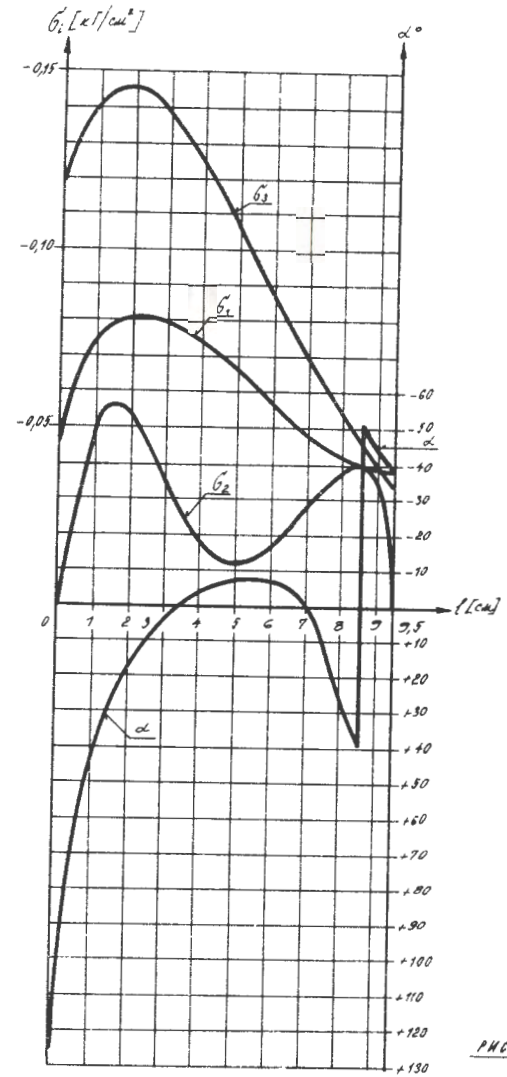


Рис. 15

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $\sigma_i$  И  $\alpha$  ВДОЛЬ ПУТИ ИНТЕГРИРОВАНИЯ  $I_d$ .

НАГРУЗКА УПЛОТНЯЮЩЕЙ СИЛОЙ  $p = 1 \text{ кг/см}^2$ .

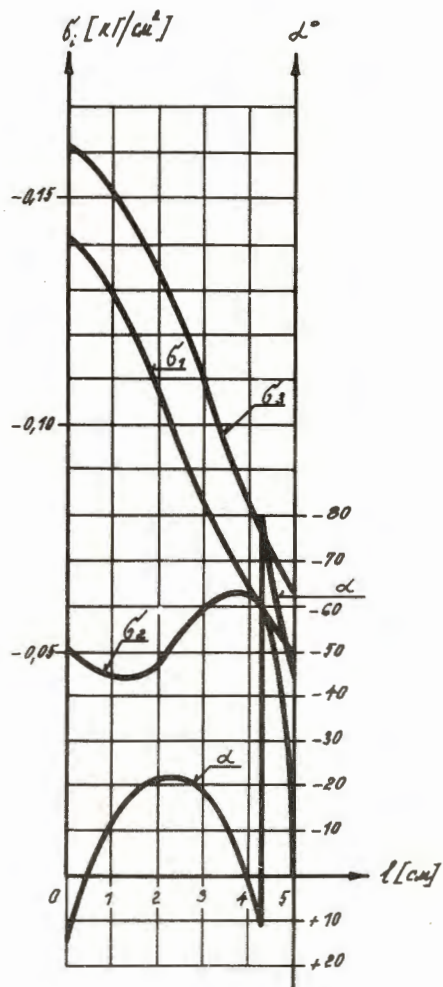


Рис. 16

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $\sigma_i$  И  $\alpha$  ВДОЛЬ ЛУЧА  $L_1$ .

НАГРУЗКА ДАВЛЕНИЕМ ВОДОРОДА  $p = 1 \text{ кг/см}^2$ .  
ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ  $L_1$  ОТ ВНЕШНЕЙ (БЛИЖЕ К ЦЕНТРУ) ПОВЕРХНОСТИ К НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА.

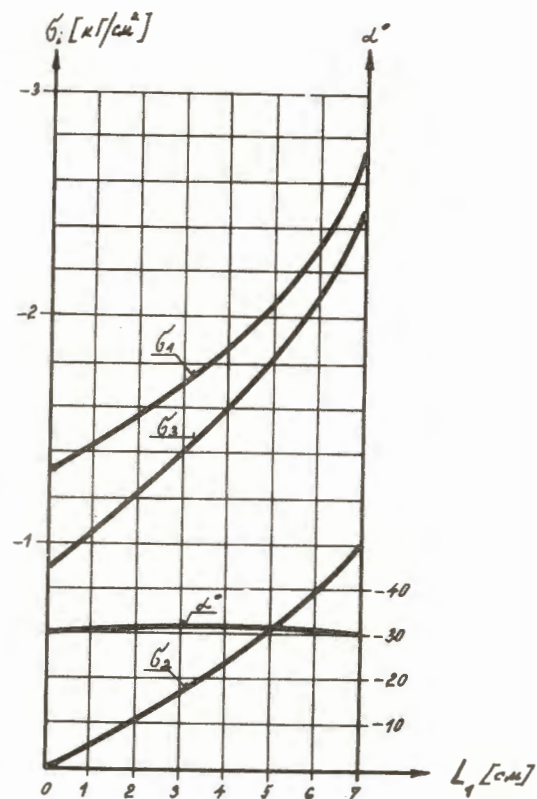


Рис. 17



РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $\sigma_i$  И  $\alpha$  ВОДЯН ЛУЧА  $L_2$ .

НАГРУЗКА ДАВЛЕНИЕМ ВОДОРОДА  $p = 1 \text{ кг/см}^2$ .  
ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ  $L_2$  ОТ ВНУТРЕННЕЙ (БЛИЖЕ К ЦЕНТРУ)  
ПОВЕРХНОСТИ К НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА.

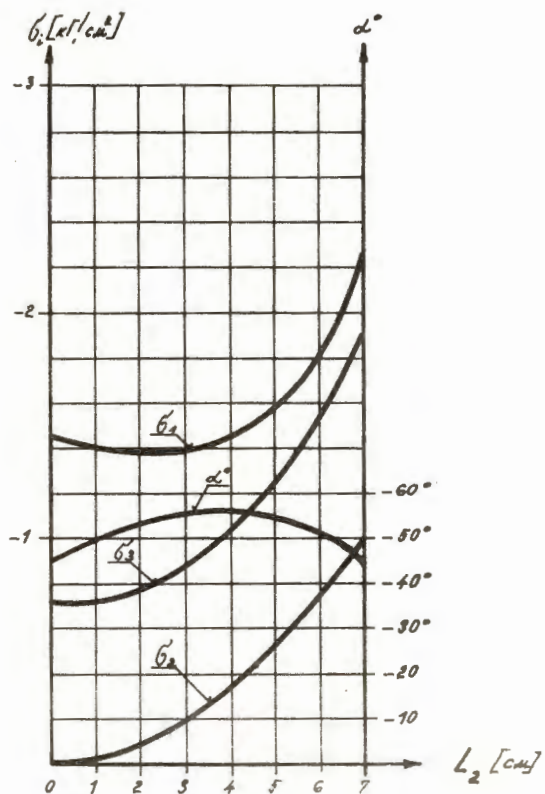


Рис. 18

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $\sigma_i$  И  $\alpha$  ВОДЯН ЛУЧА  $L_1$ .

НАГРУЗКА УПЛОТНЯЮЩЕЙ СИЛОЙ  $p = 1 \text{ кг/см}^2$ .  
ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ  $L_1$  ОТ ВНУТРЕННЕЙ (БЛИЖЕ К ЦЕНТРУ)  
ПОВЕРХНОСТИ К НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА.

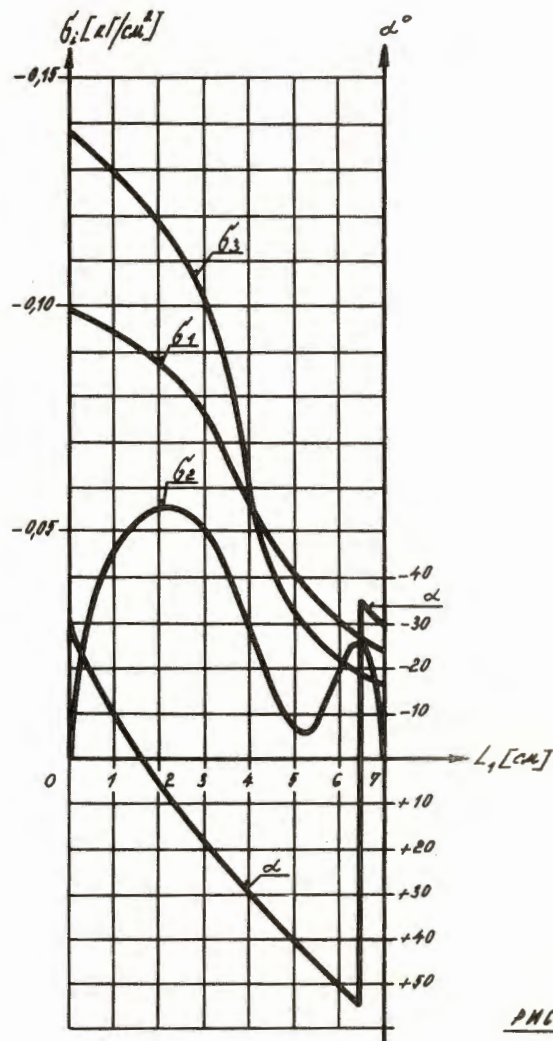


Рис. 19

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ  $\sigma_i$  И  $\alpha$  ВОДЬ ЛУЧА  $L_a$ .

НАГРУЗКА УПЛОТНЯЮЩЕЙ СЛОЙ  $\rho = 4 \text{ кг/см}$ .  
 ПОЛОЖИТЕЛЬНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ  $L_a$  ОТ ВНУТРЕННЕЙ (БЛИЗКЕ  
 К ЦЕНТРУ) ПОВЕРХНОСТИ К НАРУЖНОЙ ПОВЕРХНОСТИ СТЕКЛА.

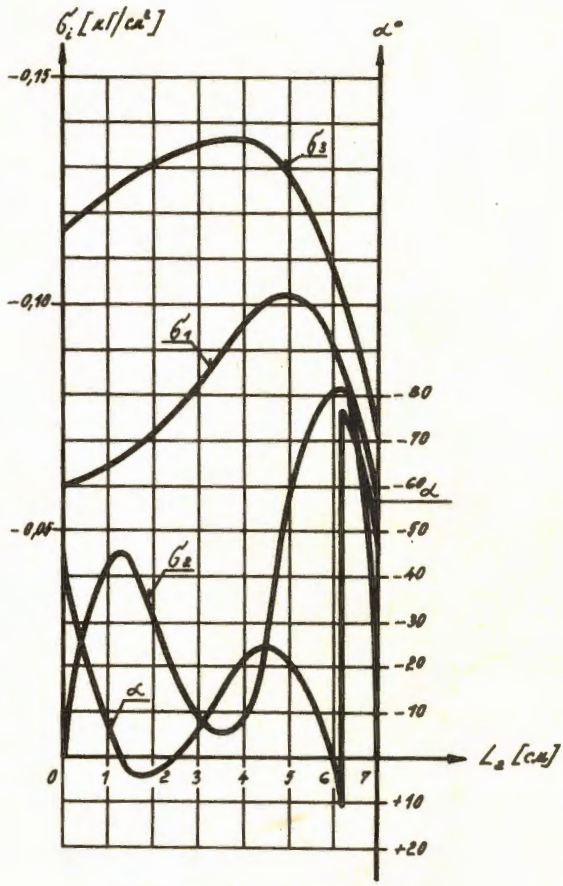


РИС. 20