

ТЕОРИЯ УПРУГОСТИ

Б. Л. Абрамян

О температурных напряжениях в прямоугольном
бетонном блоке

В настоящей статье рассматривается плоская задача о температурном состоянии прямоугольного бетонного блока при различных условиях закрепления его основания.

Задача о температурных напряжениях в бетонных блоках имеет существенное значение в связи с вопросом определения размеров блоков бетонирования. Впервые этот вопрос был рассмотрен Г. Н. Масловым [1] на основе теории упругости. В дальнейшем эта работа была продолжена А. З. Басевичем и Г. С. Шапиро [2], Ю. А. Нилендером [3], самим Г. Н. Масловым [4—6] и совсем недавно С. В. Александровским [7], который пользовался в своих исследованиях теорией ползучести, развитой Н. Х. Арутюняном [8].

Во всех этих исследованиях вопрос о влиянии размеров блока на температурные напряжения рассматривался из допущения, что сцепление блока с основанием равно нулю.

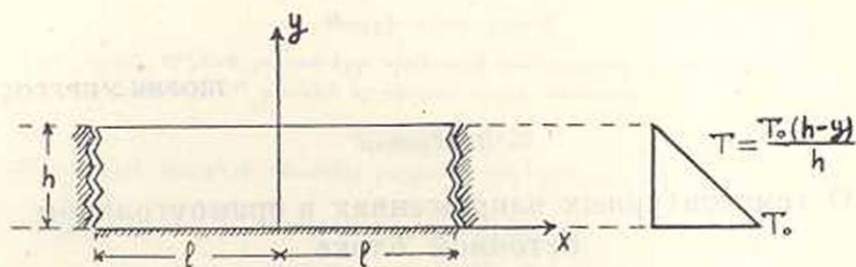
В настоящей статье рассматривается задача о распределении температурных напряжений по длине блока, исходя из вышеуказанного допущения, а также задача о распределении температурных напряжений, исходя из предположения, что между новым блоком и фундаментом на линии контакта действуют постоянные по величине касательные напряжения, равные сопротивлению бетона сцеплению. Эти результаты сравниваются. Показывается, что второе допущение приводит к более близким к действительности результатам и может быть полезным при определении размеров блоков бетонирования.

Решение задачи вначале дается методами теории упругости, опираясь на работы Г. Н. Маслова, а затем приводится решение с учетом ползучести бетона, основываясь на теории ползучести бетона, развитой Н. Х. Арутюняном.

Приведены числовые примеры.

1. Пусть прямоугольный блок высотой h , продольной стороной $y=0$ (фиг. 1) связан с жестким основанием так, что все принадлежащие ей точки лишены возможности вертикальных и горизонтальных перемещений, а торцы блока лишены возможности вертикальных пере-

мещений v , но они свободно перемещаются в горизонтальном направлении.



Фиг. 1.

Температуру будем предполагать падающей по линейному закону от нижней грани к верхней.

В условиях термонапряженного состояния дифференциальные уравнения равновесия, выраженные через перемещения, для плоской задачи имеют вид

$$\left. \begin{aligned} (\lambda' + 2\mu) \frac{\partial \theta}{\partial x} - 2\mu \frac{\partial \Omega}{\partial y} &= 2(\lambda' + \mu) \alpha \frac{\partial T}{\partial x}, \\ (\lambda' + 2\mu) \frac{\partial \theta}{\partial y} + 2\mu \frac{\partial \Omega}{\partial x} &= 2(\lambda' + \mu) \alpha \frac{\partial T}{\partial y}, \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

где μ и λ — коэффициенты Ляме,

$$\lambda' = \frac{2\mu\lambda}{\lambda + 2\mu}, \quad (1.2)$$

α — коэффициент линейного расширения,

u и v — перемещения по направлению осей x и y ,

$$\theta = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (1.3)$$

$$\Omega = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right). \quad (1.4)$$

Напряжения в блоке в условиях плоской задачи определяются формулами

$$\sigma_z = \tau_{xz} = \tau_{zy} = 0, \quad (1.5)$$

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= (\lambda' + 2\mu) \frac{\partial u}{\partial x} + \lambda' \frac{\partial v}{\partial y} - 2(\lambda' + \mu) \alpha T, \\ \sigma_y &= \lambda' \frac{\partial u}{\partial x} + (\lambda' + 2\mu) \frac{\partial v}{\partial y} - 2(\lambda' + \mu) \alpha T, \\ \tau_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right). \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

Следуя Маслову [1], полный интеграл уравнений (1.1) представим в виде сумм

$$\begin{aligned} u &= u_1 + u_2, \\ v &= v_1 + v_2, \end{aligned} \quad (1.7)$$

из которых u_1 и v_1 — решения уравнений (1.1) без последних членов, а u_2 и v_2 — одно из частных решений с последними членами.

Решение для u_1 и v_1 , а также выражения для напряжений σ_{x_1} , σ_{y_1} и τ_{xy} , было дано Файлоном [9].

Учитывая симметрию рассматриваемой задачи относительно оси y , решение Файлона можно представить в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_1 = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{l}{\mu(2k-1)\pi} \left[\left(\frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} A_k + C_k \right) \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} B_k + D_k \right) \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] + \right. \\ \left. + \frac{y}{\mu} \left[A_k \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + B_k \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] \right\} \sin \frac{(2k-1)\pi x}{2l}, \end{aligned} \quad (1.8)$$

$$\begin{aligned} v_1 = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{l}{\mu(2k-1)\pi} \left[\left(\frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} A_k - C_k \right) \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} B_k - D_k \right) \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] - \right. \\ \left. - \frac{y}{\mu} \left[A_k \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + B_k \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] \right\} \cos \frac{(2k-1)\pi x}{2l}. \end{aligned} \quad (1.9)$$

Одно решение для u_2 и v_2 может быть найдено, если положить, что

$$\Omega_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_2}{\partial x} - \frac{\partial u_2}{\partial y} \right) = 0.$$

Тогда $\theta_2 = \frac{2(\lambda' + \mu)}{\lambda' + 2\mu} \alpha T$ и u_2 , и v_2 должны быть частными решениями дифференциальных уравнений

$$\frac{\partial u_2}{\partial x} + \frac{\partial v_2}{\partial y} = \frac{2(\lambda' + \mu)}{\lambda' + 2\mu} \alpha T, \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial v_2}{\partial x} - \frac{\partial u_2}{\partial y} = 0,$$

$$\text{где } T = \frac{T_0(h-y)}{h}. \quad (1.11)$$

Перемещения u_2 и v_2 выбираем так, чтобы они, удовлетворяя уравнениям (1.10), одновременно обеспечивали выполнение граничных условий

$$\left. \begin{aligned} u &= v = 0 && \text{при } y = 0, \\ u &= 0, \sigma_x = 0 && \text{при } x = l, \\ \sigma_y &= 0, \tau_{xy} = 0 && \text{при } y = h. \end{aligned} \right\} \quad (1.12)$$

Выражения для u_2 и v_2 берем в следующем виде:

$$\begin{aligned} u_2 &= \frac{2(\lambda' + \mu) \alpha T_0 (h - y) x}{(\lambda' + 2\mu) h}, \\ v_2 &= - \frac{(\lambda' + \mu) \alpha T_0 (x^2 - l^2)}{(\lambda' + 2\mu) h}. \end{aligned} \quad (1.13)$$

Пользуясь соотношениями (1.6), (1.7), (1.8), (1.9) и (1.13), для перемещений и напряжений получаем:

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{l}{\mu(2k-1)\pi} \left[\left(\frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} A_k + C_k \right) \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + \right. \right. \\ &+ \left. \left(\frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} B_k + D_k \right) \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] + \frac{y}{\mu} \left[A_k \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + \right. \\ &+ \left. B_k \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] \left. \right\} \sin \frac{(2k-1)\pi x}{2l} + \frac{2(\lambda' + \mu) \alpha T_0 (h - y) x}{(\lambda' + 2\mu) h}, \end{aligned} \quad (1.14)$$

$$\begin{aligned} v(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ \frac{l}{\mu(2k-1)\pi} \left[\left(\frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} A_k - C_k \right) \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + \right. \right. \\ &+ \left. \left(\frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} B_k - D_k \right) \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] - \frac{y}{\mu} \left[A_k \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + \right. \\ &+ \left. B_k \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] \left. \right\} \cos \frac{(2k-1)\pi x}{2l} - \frac{(\lambda' + \mu) \alpha T_0 (x^2 - l^2)}{(\lambda' + 2\mu) h}, \end{aligned} \quad (1.15)$$

$$\begin{aligned} \sigma_x(x, y) &= \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ (3A_k + C_k) \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + (3B_k + D_k) \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + \right. \\ &+ \left. \frac{(2k-1)\pi y}{l} \left[A_k \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + B_k \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] \right\} \cos \frac{(2k-1)\pi x}{2l}, \end{aligned} \quad (1.16)$$

$$\sigma_y(x, y) = \sum_{k=1}^{\infty} \left\{ A_k - C_k \right\} \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + (B_k - D_k) \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} -$$

$$-\frac{(2k-1)\pi y}{l} \left[A_k \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + B_k \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] \cos \frac{(2k-1)\pi x}{2l} - \frac{4\mu(\lambda' + \mu) \alpha T_0 (h-y)}{(\lambda' + 2\mu)h}, \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} \tau_{(x,y)}(x,y) = \sum_{k=1}^{\infty} & \left\{ (A_k + C_k) \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + (B_k + D_k) \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + \right. \\ & \left. + \frac{(2k-1)\pi y}{l} \left[A_k \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} + B_k \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi y}{2l} \right] \right\} \sin \frac{(2k-1)\pi x}{2l} - \\ & - \frac{4\mu(\lambda' + \mu) \alpha T_0 x}{(\lambda' + 2\mu)h}. \end{aligned} \quad (1.18)$$

Учитывая формулы (1.14)–(1.18), требуем выполнения тех из краевых условий (1.12), которые не удовлетворяются автоматически. Тогда для определения неизвестных коэффициентов A_k , B_k , C_k и D_k получим соотношения

$$\frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} A_k + C_k = \frac{16\mu(\lambda' + \mu) \alpha T_0}{(2k-1)(\lambda' + 2\mu)\pi} (-1)^k \quad (1.19)$$

$$\frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} B_k - D_k = \frac{32\mu(\lambda' + \mu) \alpha T_0 l}{(2k-1)^2 (\lambda' + 2\mu) h \pi^2} (-1)^k, \quad (1.20)$$

$$\begin{aligned} (A_k - C_k) \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi h}{2l} + (B_k - D_k) \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi h}{2l} - \\ - \frac{(2k-1)\pi h}{l} \left[A_k \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi h}{2l} + B_k \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi h}{2l} \right] = 0, \end{aligned} \quad (1.21)$$

$$\begin{aligned} (A_k + C_k) \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi h}{2l} + (B_k + D_k) \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi h}{2l} + \\ + \frac{(2k-1)\pi h}{l} \left[A_k \operatorname{ch} \frac{(2k-1)\pi h}{2l} + B_k \operatorname{sh} \frac{(2k-1)\pi h}{2l} \right] = \\ = \frac{32\mu(\lambda' + \mu) \alpha T_0 l}{(2k-1)^2 (\lambda' + 2\mu) h \pi^2} (-1)^{k+1}. \end{aligned} \quad (1.22)$$

При этом использованы следующие разложения

$$x = \frac{8l}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(2k-1)^2} \sin \frac{(2k-1)\pi x}{2l}, \quad (0 \leq x \leq l) \quad (1.23)$$

$$l^2 - x^2 = \frac{32l^2}{\pi^3} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{(2k-1)^3} \cos \frac{(2k-1)\pi x}{2l}, \quad (0 \leq x \leq l). \quad (1.24)$$

Уравнения (1.19)–(1.22) позволяют определить неизвестные коэффициенты A_k , B_k , C_k и D_k :

$$A_k = \frac{2\alpha_k}{\nabla_k} \left\{ 1 - \frac{\text{th } \alpha_k}{\alpha_k} - \frac{\mu}{\lambda' + \mu} \cdot \frac{\text{th } \alpha_k \text{sch } \alpha_k}{\alpha_k} - \text{sch } \alpha_k + \frac{\lambda' + 2\mu}{\lambda' + \mu} (1 - \text{th}^2 \alpha_k) \right\}, \quad (1.25)$$

$$B_k = \frac{2\alpha_k}{\nabla_k} \left\{ \frac{1}{\alpha_k} - \text{th } \alpha_k + \text{th } \alpha_k \text{sch } \alpha_k - \frac{2\mu + \lambda'}{\lambda' + \mu} \frac{\text{sch } \alpha_k}{\alpha_k} + \left(\frac{\mu}{\lambda' + \mu} \cdot \frac{1}{\alpha_k} - \alpha_k \right) (1 - \text{th}^2 \alpha_k) \right\}, \quad (1.26)$$

$$C_k = \frac{2\alpha_k}{\nabla_k} \left\{ \frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} \left(1 + \frac{\text{th } \alpha_k}{\alpha_k} + \text{sch } \alpha_k \right) + \frac{\mu(\lambda' + 3\mu)}{(\lambda' + \mu)^2} \cdot \frac{\text{th } \alpha_k \text{sch } \alpha_k}{\alpha_k} + \left(2\alpha_k^2 - \frac{\lambda' + 4\mu}{\lambda' + \mu} \right) (1 - \text{th}^2 \alpha_k) \right\}, \quad (1.27)$$

$$D_k = \frac{2\alpha_k}{\nabla_k} \left\{ \frac{\lambda' + 3\mu}{\lambda' + \mu} \left(\text{th } \alpha_k \text{sch } \alpha_k - \text{th } \alpha_k - \frac{1}{\alpha_k} \right) - \frac{(\lambda' + 2\mu)(\lambda' + 3\mu)}{(\lambda' + \mu)^2} \cdot \frac{\text{sch } \alpha_k}{\alpha_k} + \left(\frac{\mu}{\lambda' + \mu} \cdot \frac{1}{\alpha_k} - \frac{3\lambda' + 5\mu}{\lambda' + \mu} \alpha_k \right) (1 - \text{th}^2 \alpha_k) \right\}, \quad (1.28)$$

где
$$\alpha_k = \frac{16\mu(\lambda' + \mu)\alpha T_0}{(2k-1)(\lambda' + 2\mu)\pi} (-1)^k, \quad (1.29)$$

$$\alpha_k = \frac{(2k-1)\pi\hbar}{2l}, \quad (1.30)$$

$$\nabla_k = 4 \left\{ \frac{\lambda' + 5\mu}{\lambda' + \mu} + \left[\alpha_k^2 + \left(\frac{\mu}{\lambda' + \mu} \right)^2 \right] (1 - \text{th}^2 \alpha_k) \right\}. \quad (1.31)$$

В таблице 1 приведены вычисления, произведенные для частных случаев блока, когда отношение высоты блока к его длине составляет 1/3, 1/4, 1/6 и 1/8, причем при вычислениях использованы значения

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{2}{5} E, \\ \lambda' &= \frac{E\nu}{1-\nu^2} = \frac{4}{15} E, \end{aligned} \right\} \quad (1.32)$$

где значение числа Пуассона ν принято 1/4.

Таблица 1

$h/2l$	1/8	1/6	1/4	1/3
$\frac{\sigma_y(0, 0)}{E \alpha T_0}$	0,0115	0,0301	0,0822	0,1115
$\frac{\sigma_x\left(\frac{3l}{4}, h\right)}{E \alpha T_0}$	0,3629	0,4657	0,5436	0,5552
$\frac{\sigma_x\left(\frac{l}{4}, h\right)}{E \alpha T_0}$	0,0421	0,0978	0,2578	0,4194
$\frac{\sigma_x\left(\frac{3l}{4}, 0\right)}{E \alpha T_0}$	-0,9913	-0,0055	-1,0333	-1,0673
$\frac{\sigma_x\left(\frac{l}{4}, 0\right)}{E \alpha T_0}$	-0,9955	-0,9895	-0,9789	-0,9787
$\frac{\tau_{xy}\left(\frac{l}{2}, 0\right)}{E \alpha T_0}$	0,0648	0,0920	0,1022	0,0927
$\frac{\sigma_x(0, h)}{E \alpha T_0}$	0,0273	0,0735	0,2138	0,3833

Из таблицы видно, что наибольшие нормальные напряжения $\sigma_x(x, y)$ имеют место в плоскости сопряжения блока с основанием, где они практически постоянны по всей длине блока и равны $\sim -E \alpha T_0$.

При $y=h$, т. е. у верхней грани, напряжения $\sigma_x(x, y)$ меняются по длине блока. Наибольшие растягивающие напряжения имеют место у краев блока; они уменьшаются с приближением к средней части, но у коротких блоков они значительны и в средней части.

Нормальные напряжения $\sigma_y(x, y)$ при повышении температуры у середины блока вызывают стремление к его отрыву от основания. Это явление еще заметнее у коротких блоков.

Скалывающие напряжения $\tau_{xy}(x, y)$ при $y=0$ и $x=l$ теоретически равны бесконечности. Следовательно, вблизи этих точек можно ожидать либо возникновения пластических деформаций, либо отрыва блока от основания.

На остальном протяжении прямой $y=0$ распределение скалывающих напряжений близко к прямолинейному закону.

2. Пусть температурный режим в рассматриваемом бетонном блоке стационарен и в некотором возрасте $\tau=\tau_1$ бетонного блока определяется зависимостью (1.11).

Тогда составляющие упруго-мгновенного напряжения $\sigma_x(x, y, \tau_1)$, $\sigma_y(x, y, \tau_1)$ и $\tau_{xy}(x, y, \tau_1)$ будут определяться соотношениями (1.16)–(1.18).

На основании результатов, приведенных в указанной работе [8], можно утверждать, что термонапряженное состояние, вызванное в бетонном массиве от действия стационарного теплового потока, в возрасте $\tau = \tau_1$, под влиянием ползучести бетона с течением времени затухает, причем закон этого затухания определяется функцией $H(t, \tau_1)$ следующим образом:

$$\begin{aligned}\sigma_x^*(t) &= \sigma_x(x, y, \tau_1) H(t, \tau_1), \\ \sigma_y^*(t) &= \sigma_y(x, y, \tau_1) H(t, \tau_1), \\ \tau_{xy}^*(t) &= \tau_{xy}(x, y, \tau_1) H(t, \tau_1).\end{aligned}\quad (1.33)$$

Функция $H(t, \tau_1)$ называется коэффициентом затухания и определяется соотношением

$$H(t, \tau_1) = 1 - \frac{\gamma E}{r^{1-p}} \left(\frac{A_1}{\tau_1} + C_0 \right) \tau_1^p e^{r\tau_1} [\Phi(rt, p) - \Phi(r\tau_1, p)], \quad (1.34)$$

где A_1 , C_0 и γ — известные коэффициенты, определяющие меру ползучести бетона (при $A_1 = 4,82 \cdot 10^{-5}$, $C_0 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ и $\gamma = 0,026$ эти коэффициенты определяют свойство ползучести бетонов на портландцементных),

$$\left. \begin{aligned}r &= \gamma(1 + EC_0), \\ p &= \gamma A_1 E.\end{aligned} \right\} \quad (1.35)$$

$$\Phi(\tau, p) = \int_0^\tau e^{-\tau_1} \tau_1^{-p} d\tau_1 \text{ — функция влияния [8],}$$

E — модуль упругости бетона.

Для бетонов со следующими характеристиками

$$\left. \begin{aligned}A_1 &= 4,82 \cdot 10^{-5}, \quad \gamma = 0,026, \\ C_0 &= 0,9 \cdot 10^{-5}, \quad r = 0,073, \\ E &= 2 \cdot 10^5 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}, \quad p = 0,25,\end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

коэффициент затухания $H(t, \tau_1)$ взят из работы [8] и приводится в таблице 2.

Таблица 2

t в днях	Возраст бетона τ_1 в днях						
	7	14	28	45	60	90	360
7	1						
14	0,584	1					
28	0,250	0,470	1				
45	0,130	0,297	0,487	1			
60	0,105	0,252	0,359	0,535	1		
90	0,092	0,232	0,301	0,323	0,334	1	
360	0,092	0,232	0,301	0,323	0,334	0,340	1
∞	0,092	0,232	0,301	0,323	0,334	0,340	0,355

Напряжения σ_x , σ_y и τ_{xy} в какой-либо произвольной точке (x_0, y_0) могут быть определены формулами

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x(x_0, y_0, \tau_1) &= c_1 \alpha E T_0, \\ \sigma_y(x_0, y_0, \tau_1) &= c_2 \alpha E T_0, \\ \tau_{xy}(x_0, y_0, \tau_1) &= c_3 \alpha E T_0. \end{aligned} \right\} \quad (1.37)$$

Некоторые значения постоянных c_1 , c_2 и c_3 приведены в таблице 1.

Пользуясь соотношениями (1.33) и (1.37), для нормальных напряжений можем написать неравенство

$$E T_0 < \frac{\sigma_{\text{доп.}}}{\alpha c_i H(t, \tau_1)}, \quad (i=1,2). \quad (1.38)$$

По неравенству (1.38), имея модуль упругости и допускаемые напряжения для данного бетона на растяжение и сжатие, можно определить ту температуру T_0 , при которой возможны отрыв блока от основания, трещины на свободной поверхности и возникновение пластических деформаций.

Ниже, в таблицах 3 и 4, приводятся температуры T_0 , при которых на верхней грани блока возможно появление трещин.

При вычислениях для модуля упругости, коэффициента линейного расширения и допускаемых нормальных напряжений на растяжение для бетона марки 110 приняты следующие значения:

$$\left. \begin{aligned} E &= 2 \cdot 10^5 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}, \\ \alpha &= 0,00001, \\ \sigma_{\text{доп.}} &= 12 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2}, \end{aligned} \right\} \quad (1.39)$$

и использованы значения $H(t, \tau_1)$, приведенные в таблице 2.

Таблица 3

Температура T_0 , при которой в точке $\left(\frac{3l}{4}, h\right)$ возможно появление трещин

t в днях	h/2l							
	1/8		1/6		1/4		1/3	
	τ_1							
	7	28	7	28	7	28	7	28
7	16,53°	—	12,89°	—	11,04°	—	10,81°	—
14	28,31°	—	22,06°	—	18,9°	—	18,51°	—
28	66,13°	16,53°	51,54°	12,89°	44,15°	11,04°	43,23°	10,81°
45	123,38°	33,95°	96,16°	26,46°	82,37°	22,67°	80,65°	22,19°
60	157,48°	46,06°	122,7°	35,89°	105,12°	30,75°	102,92°	30,1°
90	179,70°	54,93°	140,06°	42,8°	120,0°	36,67°	117,47°	35,9°
360	179,7°	54,93°	140,06°	42,8°	120,0°	36,67°	117,47°	35,9°
∞	179,7°	54,93°	140,06°	42,8°	120,0°	36,67°	117,47°	35,9°

Таблица 4

Температура T_0 , при которой в точке (0, h) возможно появление трещин

t в днях	h/2l					
	1/6		1/4		1/3	
	τ_1					
	28	45	28	45	28	45
28	81,64°	—	28,07°	—	15,66°	—
45	167,65°	81,64°	57,63°	28,07°	32,14°	15,66°
60	227,35°	152,6°	78,2°	52,45°	43,6°	29,26°
90	271,25°	252,75°	93,2°	86,9°	52,0°	48,46°
360	271,25°	252,75°	93,2°	86,9°	52,0°	48,46°
∞	271,25°	252,75°	93,2°	86,9°	52,0°	48,46°

Из таблиц 3 и 4 следует, что при замыкании бетонного блока в раннем периоде после укладки бетона ($\tau = \tau_1$) температурные напряжения в бетоне с учетом явления ползучести сравнительно низки.

При повышении температуры T_0 трещины могут появляться в период строительства и в начальное время после замыкания бетонных сооружений.

В рассматриваемых бетонных блоках трещины появляются больше у краев верхней грани, а если блок короткий ($h/2l > 1/3$), то и по всей длине верхней грани.

В таблице 5 приводятся температуры T_0 , при которых в середине блока в плоскости его сопряжения с основанием возможен отрыв блока от его основания.

Таблица 5

Температура T_0 , при которой в точке (0,0) возможен отрыв блока от основания

t в днях	h/2l					
	1/4			1/3		
	τ_1					
	7	28	45	7	28	45
7	73,0°	—	—	53,8°	—	—
14	125,0°	—	—	92,2°	—	—
28	292,0°	73,0°	—	215,2°	53,8°	—
45	545,0°	150,0°	73,0°	401,6°	110,5°	53,8°
60	695,3°	203,3°	136,5°	512,4°	150,0°	100,6°
90	793,7°	242,5°	226,0°	584,8°	178,8°	166,7°
360	793,7°	242,5°	226,0°	584,8°	178,8°	178,8°
∞	793,7°	242,5°	226,0°	584,8°	178,8°	178,8°

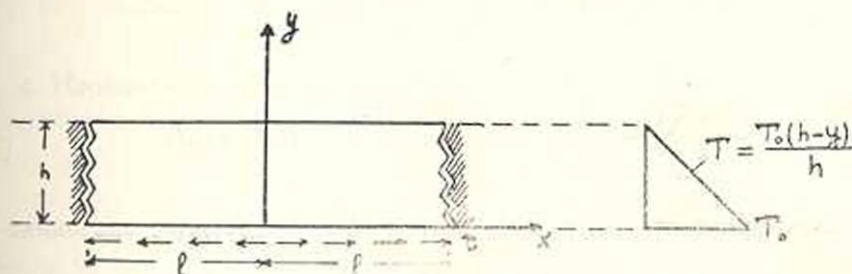
Из таблицы 5 следует, что отрыв середины блока от основания возможен для коротких блоков, когда $h/2l > 1/3$.

Следует отметить, что допущение об отсутствии горизонтальных и вертикальных перемещений на линии контакта бетонного блока с основанием не отражает действительного положения при рассмотрении температурных напряжений в массивных бетонных блоках, так как здесь не учитываются силы сцепления блока с фундаментом.

Такая постановка не отвечает на вопрос — как определить рациональную длину блока, в котором возникают наименьшие температурные напряжения, если задана высота блока.

II

1. Предположим теперь, что на нижней грани блока $y=0$ (фиг. 2) действуют постоянные по величине касательные напряжения τ_{xy} , равные сопротивлению бетона сцеплению τ (величина τ при расчетах на ползучесть предполагается зависящей от времени t). Очевидно, что в средней части рассматриваемой грани должна существовать зона, где касательные напряжения $|\tau_{xy}(x, 0)| < \tau$, так как из условия симметрии следует, что при $x=0$ должно быть $\tau_{xy}=0$. Для простоты длину этой зо-



Фиг. 2.

ны будем считать равной нулю. Очевидно, что полученное при этих условиях решение будет иметь силу лишь на некотором удалении от начала координат. Напряжения σ_y в любом сечении $y=\text{const}$, на протяжении участков $0 < |x| < l$, образуют самоуравновешивающуюся систему сил; в связи с этим считаем возможным допустить, что на нижней грани блока напряжения $\sigma_y(x, 0)=0$ (аналогичное допущение относительно напряжений $\sigma_y(x, 0)$ сделано С. В. Александровским [7]).

$$\sigma_y(x, 0)=0, \quad \tau_{xy}(x, 0)=\tau. \quad (2.1)$$

Продольную сторону блока $y=h$, как прежде (в I), считаем свободной от внешних напряжений, а торцы блока лишены перемещений в направлении оси y и свободно перемещаются в направлении оси x

$$\left. \begin{aligned} \sigma_y(x, h)=0, \quad \tau_{xy}(x, h)=0, \\ \sigma_x(l, y)=0, \quad v(l, y)=0. \end{aligned} \right\} \quad (2.2)$$

Как это сделано в предыдущем разделе, перемещения берем в виде (1.14) и (1.15), а напряжения $\sigma_x(x, y)$, $\sigma_y(x, y)$ и $\tau_{xy}(x, y)$ —в виде (1.16)—(1.18).

Требуя выполнение краевых условий (2.1) и (2.2), для определения неизвестных коэффициентов A_k , B_k , C_k и D_k , получим соотношения:

$$\begin{aligned} (A_k - C_k) \operatorname{ch} \alpha_k + (B_k - D_k) \operatorname{sh} \alpha_k - 2\alpha_k (A_k \operatorname{sh} \alpha_k + B_k \operatorname{ch} \alpha_k) &= 0, \\ (A_k + C_k) \operatorname{sh} \alpha_k + (B_k + D_k) \operatorname{ch} \alpha_k + 2\alpha_k (A_k \operatorname{ch} \alpha_k + B_k \operatorname{sh} \alpha_k) &= -\frac{x_k}{\alpha_k}, \\ A_k - C_k &= -x_k, \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$B_k + D_k = \frac{4\tau}{\pi(2k-1)} - \frac{x_k}{\alpha_k},$$

где
$$\alpha_k = \frac{(2k-1)\pi h}{2l}, \quad x_k = \frac{16\mu(\lambda' + \mu)\alpha T_0(-1)^k}{(2\mu + \lambda')\pi(2k-1)}. \quad (2.4)$$

При этом использованы разложения (1.23),

$$1 = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^{k+1}}{2k-1} \cos \frac{(2k-1)\pi x}{2l} \quad (0 \leq x < l), \quad (2.5)$$

и

$$1 = \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \sin \frac{(2k-1)\pi x}{2l} \quad (0 < x \leq l). \quad (2.6)$$

Коэффициенты A_k , B_k , C_k и D_k имеют следующие значения:

$$A_k = \frac{1}{2\nabla_k} \left\{ \left[\frac{x_k}{\alpha_k} - \frac{4\tau}{\pi(2k-1)} \right] \left(\operatorname{th} \alpha_k - \frac{\alpha_k}{\operatorname{ch}^2 \alpha_k} \right) + \right. \\ \left. + \frac{x_k}{\operatorname{ch} \alpha_k} - \frac{x_k \operatorname{th} \alpha_k}{\alpha_k \operatorname{ch} \alpha_k} - x_k \operatorname{th}^2 \alpha_k \right\}. \quad (2.7)$$

$$B_k = \frac{1}{2\nabla_k} \left\{ - \left[\frac{x_k}{\alpha_k} - \frac{4\tau}{\pi(2k-1)} \right] \operatorname{th}^2 \alpha_k + \right. \\ \left. + \frac{x_k \alpha_k}{\operatorname{ch}^2 \alpha_k} + x_k \operatorname{th} \alpha_k - \frac{x_k \operatorname{th} \alpha_k}{\operatorname{ch} \alpha_k} \right\}, \quad (2.8)$$

$$C_k = \frac{1}{2\nabla_k} \left\{ \left[\frac{x_k}{\alpha_k} - \frac{4\tau}{\pi(2k-1)} \right] \left(\operatorname{th} \alpha_k - \frac{\alpha_k}{\operatorname{ch}^2 \alpha_k} \right) + \right. \\ \left. + \frac{x_k}{\operatorname{ch} \alpha_k} + x_k \operatorname{th}^2 \alpha_k - \frac{x_k \operatorname{th} \alpha_k}{\alpha_k \operatorname{ch} \alpha_k} - 2x_k \left(\frac{\alpha_k}{\operatorname{ch} \alpha_k} \right)^2 \right\}, \quad (2.9)$$

$$D_k = \frac{1}{2\nabla_k} \left\{ - \left[\frac{x_k}{\alpha_k} - \frac{4\tau}{\pi(2k-1)} \right] \left(\operatorname{th}^2 \alpha_k - 2 \frac{\alpha_k^2}{\operatorname{ch}^2 \alpha_k} \right) + \right. \\ \left. + \frac{x_k \operatorname{th} \alpha_k}{\operatorname{ch} \alpha_k} - \frac{x_k \alpha_k}{\operatorname{ch}^2 \alpha_k} - x_k \operatorname{th} \alpha_k \right\}, \quad (2.10)$$

где введено обозначение

$$\nabla_k = \operatorname{th}^2 \alpha_k - \left(\frac{\alpha_k}{\operatorname{ch} \alpha_k} \right)^2. \quad (2.11)$$

В таблице 6 приведены результаты вычислений, произведенные для частных случаев блока, когда отношение высоты блока к его длине составляет 1/3, 1/4, 1/6 и 1/8, причем при вычислениях использованы значения (1.32).

Таблица 6

$h/2l$	1/8	1/6	1/4	1/3
$\sigma_x \left(\frac{3l}{4}, h \right)$	$2\tau + 0,030E\alpha T_0$	$1,5\tau + 0,034E\alpha T_0$	$\tau + 0,102E\alpha T_0$	$0,757\tau + 0,150E\alpha T_0$
$\sigma_x \left(\frac{l}{4}, h \right)$	$6,012\tau - 0,007E\alpha T_0$	$4,518\tau - 0,004E\alpha T_0$	$3,003\tau - 0,001E\alpha T_0$	$2,214\tau + 0,002E\alpha T_0$
$\sigma_x \left(\frac{3l}{4}, 0 \right)$	$-4,044\tau - 0,011E\alpha T_0$	$-2,999\tau + 0,036E\alpha T_0$	$-1,999\tau + 0,124E\alpha T_0$	$-1,493\tau + 0,212E\alpha T_0$
$\sigma_x \left(\frac{l}{4}, 0 \right)$	$-11,974\tau + 0,008E\alpha T_0$	$-8,976\tau - 0,0003E\alpha T_0$	$-5,993\tau - 0,001E\alpha T_0$	$-4,547\tau + 0,002E\alpha T_0$

2. Нормальные напряжения $\sigma_x^*(t)$ с учетом ползучести бетона определяются соотношением

$$\sigma_x^*(x, y; \tau_1, t) = \sigma_x(x, y, \tau_1) H(t, \tau_1), \quad (2.12)$$

где $\sigma_x(x, y, \tau_1)$ — упруго-мгновенное напряжение, вызванное в блоке, в возрасте бетона $\tau = \tau_1$ действием стационарного теплового потока. Некоторые значения $\sigma_x(x, y, \tau_1)$ приведены в таблице 6.

$H(t, \tau_1)$ имеет значение, которое дается формулой (1.34) и таблицей 2.

Ниже, в таблицах 7—10, пользуясь известными значениями $\sigma_x(x, y, \tau_1)$ и $H(t, \tau_1)$, а также полагая для бетона марки 110, согласно (1.39), $E\alpha = 2 \frac{K^2}{cm^2}$, приводим некоторые значения напряжений $\sigma_x^*(x, y; \tau_1, t)$.

Таблица 7

Значения напряжений σ_x^* в точке $\left(\frac{3l}{4}, h \right)$

t в днях	h/2l							
	1/8		1/6		1/4		1/3	
	τ_1							
	7	28	7	28	7	28	7	28
1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	$2\tau + 0,06T_0$	—	$1,5\tau + 0,038T_0$	—	$\tau + 0,204T_0$	—	$0,757\tau + 0,3T_0$	—
14	$1,168\tau + 0,035T_0$	—	$0,876\tau + 0,04T_0$	—	$0,584\tau + 0,119T_0$	—	$0,442\tau + 0,175T_0$	—
28	$0,5\tau + 0,015T_0$	$2\tau + 0,06T_0$	$0,375\tau + 0,017T_0$	$1,5\tau + 0,068T_0$	$0,25\tau + 0,051T_0$	$\tau + 0,204T_0$	$0,189\tau + 0,075T_0$	$0,757\tau + 0,3T_0$
45	$0,26\tau + 0,008T_0$	$0,974\tau + 0,029T_0$	$0,195\tau + 0,009T_0$	$0,73\tau + 0,033T_0$	$0,13\tau + 0,027T_0$	$0,487\tau + 0,099T_0$	$0,098\tau + 0,039T_0$	$0,369\tau + 0,146T_0$
60	$0,21\tau + 0,006T_0$	$0,718\tau + 0,022T_0$	$0,158\tau + 0,007T_0$	$0,539\tau + 0,024T_0$	$0,165\tau + 0,021T_0$	$0,359\tau + 0,073T_0$	$0,079\tau + 0,032T_0$	$0,272\tau + 0,108T_0$

1	2	3	4	5	6	7	8	9
90	0,184 τ + +0,006 T_0	0,602 τ + +0,018 T_0	0,138 τ + +0,006 T_0	0,452 τ + +0,02 T_0	0,092 τ + +0,019 T_0	0,301 τ + +0,061 T_0	0,07 τ + +0,028 T_0	0,228 τ + +0,09 T_0
360	0,184 τ + +0,006 T_0	0,602 τ + +0,018 T_0	0,138 τ + +0,006 T_0	0,452 τ + +0,02 T_0	0,092 τ + +0,019 T_0	0,301 τ + +0,061 T_0	0,07 τ + +0,028 T_0	0,228 τ + +0,09 T_0
∞	0,184 τ + +0,006 T_0	0,602 τ + +0,018 T_0	0,138 τ + +0,006 T_0	0,452 τ + +0,02 T_0	0,092 τ + +0,019 T_0	0,301 τ + +0,061 T_0	0,07 τ + +0,028 T_0	0,228 τ + +0,09 T_0

Таблица 8

Значения напряжений σ_x^* в точке $\left(\frac{l}{4}, h\right)$

t в днях	h/2l							
	1/8		1/6		1/4		1/3	
	τ_1							
	7	28	7	28	7	28	7	28
7	6,012 τ — —0,014T ₀	—	4,518 τ — —0,008T ₀	—	3,003 τ — —0,002T ₀	—	2,214 τ + +0,004T ₀	—
14	3,511 τ — —0,008T ₀	—	2,639 τ — —0,005T ₀	—	1,754 τ — —0,001T ₀	—	1,293 τ + +0,002T ₀	—
28	1,503 τ — —0,004T ₀	6,012 τ — —0,014T ₀	1,13 τ — —0,002T ₀	4,518 τ — —0,008T ₀	0,751 τ — —0,001T ₀	3,003 τ — —0,002T ₀	0,554 τ + +0,001T ₀	2,214 τ + +0,004T ₀
45	0,782 τ — —0,002T ₀	2,928 τ — —0,007T ₀	0,587 τ — —0,001T ₀	2,2 τ — —0,004T ₀	0,39 τ —	1,462 τ — —0,001T ₀	0,288 τ + +0,001T ₀	1,078 τ + +0,002T ₀
60	0,631 τ — —0,001T ₀	2,158 τ — —0,005T ₀	0,474 τ — —0,001T ₀	1,622 τ — —0,003T ₀	0,315 τ —	1,078 τ — —0,001T ₀	0,232 τ —	0,795 τ + +0,002T ₀
90	0,553 τ — —0,001T ₀	1,81 τ — —0,004T ₀	0,416 τ — —0,001T ₀	1,36 τ — —0,002T ₀	0,276 τ —	0,904 τ — —0,001T ₀	0,204 τ —	0,666 τ + +0,001T ₀
360	0,553 τ — —0,001T ₀	1,81 τ — —0,004T ₀	0,416 τ — —0,001T ₀	1,36 τ — —0,002T ₀	0,276 τ —	0,904 τ — —0,001T ₀	0,204 τ —	0,666 τ + +0,001T ₀
∞	0,553 τ — —0,001T ₀	1,81 τ — —0,004T ₀	0,416 τ — —0,001T ₀	1,36 τ — —0,002T ₀	0,276 τ —	0,904 τ — —0,001T ₀	0,204 τ —	0,666 τ + +0,001T ₀

При нагревании блока ($T_0 > 0$) в плоскости его сопряжения с основанием вдоль всей длины блока возникают касательные напряжения τ , которые препятствуют блоку расширяться ($\tau > 0$). При охлаждении же ($T_0 < 0$), наоборот, касательные напряжения препятствуют блоку сжиматься ($\tau < 0$).

Максимальное значение касательного напряжения τ равно сопротивлению бетона сцеплению. Если бетонный блок уложен на другой блок из старого бетона, тогда τ равняется сопротивлению сцепления нового блока со старым. Прочность сцепления нового блока со старым может колебаться в зависимости от условий кладки [10]. В среднем для бетона марки 110 можно принять $\tau_{\max} \approx 15 \text{ кг/см}^2$.

Таблица 9

Значения напряжений σ_x^* в точке $\left(\frac{3l}{4}, 0\right)$

t в днях	h/2l							
	1/8		1/6		1/4		1/3	
	σ_1							
	7	28	7	28	7	28	7	28
7	-4,044 τ — -0,022T ₀	—	-2,999 τ + +0,072T ₀	—	-1,999 τ + +0,248T ₀	—	-1,493 τ + +0,424T ₀	—
14	-2,362 τ — -0,013T ₀	—	-1,751 τ + +0,042T ₀	—	-1,167 τ + +0,145T ₀	—	-0,872 τ + +0,248T ₀	—
28	-1,011 τ — -0,006T ₀	-4,044 τ — -0,022T ₀	-0,75 τ + +0,018T ₀	-2,999 τ + +0,072T ₀	-0,5 τ + +0,062T ₀	-1,999 τ + +0,248T ₀	-0,373 τ + +0,106T ₀	-1,493 τ + +0,424T ₀
45	-0,526 τ — -0,003T ₀	-1,969 τ — -0,011T ₀	-0,39 τ + +0,009T ₀	-1,461 τ + +0,035T ₀	-0,26 τ + +0,032T ₀	-0,974 τ + +0,121T ₀	-0,194 τ + +0,055T ₀	-0,727 τ + +0,206T ₀
60	-0,425 τ — -0,002T ₀	-1,452 τ — -0,008T ₀	-0,315 τ + +0,008T ₀	-1,077 τ + +0,026T ₀	-0,21 τ + +0,026T ₀	-0,718 τ + +0,089T ₀	-0,157 τ + +0,045T ₀	-0,536 τ + +0,152T ₀
90	-0,372 τ — -0,002T ₀	-1,217 τ — -0,007T ₀	-0,276 τ + +0,007T ₀	-0,903 τ + +0,022T ₀	-0,184 τ + +0,023T ₀	-0,602 τ + +0,075T ₀	-0,137 τ + +0,039T ₀	-0,449 τ + +0,128T ₀
∞	-0,372 τ — -0,002T ₀	-1,217 τ — -0,007T ₀	-0,276 τ + +0,007T ₀	-0,903 τ + +0,022T ₀	-0,184 τ + +0,023T ₀	-0,602 τ + +0,075T ₀	-0,137 τ + +0,039T ₀	-0,449 τ + +0,128T ₀

Таблица 10

Значения напряжений σ_x в точке $\left(\frac{l}{4}, 0\right)$

l в дюйм	h/2l							
	1/8		1/6		1/4		1/3	
	τ_1							
	7	28	7	28	7	28	7	28
7	-11,974 τ + +0,016T ₀	—	-8,976 τ - -0,001T ₀	—	-5,993 τ - -0,002T ₀	—	-4,547 τ - +0,004T ₀	—
14	-6,993 τ + +0,009T ₀	—	-5,242 τ - -0,001T ₀	—	-3,5 τ - -0,001T ₀	—	-2,655 τ + +0,003T ₀	—
28	-2,934 τ + +0,004T ₀	-11,974 τ + +0,056T ₀	-2,244 τ	-8,976 τ - -0,001T ₀	-1,498 τ - -0,001T ₀	-5,993 τ - -0,002T ₀	-1,137 τ + +0,001T ₀	-4,547 τ + +0,004T ₀
45	-1,557 τ + +0,002T ₀	-5,831 τ + +0,008T ₀	-1,167 τ	-4,371 τ	-0,779 τ	-2,919 τ - -0,001T ₀	-0,591 τ + +0,001T ₀	-2,214 τ + +0,002T ₀
60	-1,257 τ + +0,002T ₀	-4,299 τ + +0,006T ₀	-0,942 τ	-3,222 τ	-0,629 τ	-2,151 τ - -0,001T ₀	-0,477 τ	-1,632 τ + +0,001T ₀
90	-1,102 τ + +0,001T ₀	-3,604 τ + +0,005T ₀	-0,826 τ	-2,702 τ	-0,551 τ	-1,804 τ - -0,001T ₀	-0,418 τ	-1,369 τ + +0,001T ₀
∞	-1,102 τ + +0,001T ₀	-3,604 τ + +0,005T ₀	-0,826 τ	-2,702 τ	-0,551 τ	-1,804 τ - -0,001T ₀	-0,418 τ	-1,369 τ + +0,001T ₀

При нагревании блока в плоскости основания возникают, вдоль направления оси x , сжимающие нормальные напряжения σ_x , причем эти напряжения могут достигнуть в средней части нижней плоскости блока значительной величины. На верхней же грани блока при этом возникают опасные растягивающие напряжения σ_x (вблизи краев блока эти напряжения могут оказаться и сжимающими).

При охлаждении нижней плоскости блока имеем обратную картину: вдоль нижней грани возникают растягивающие нормальные напряжения, которые могут привести к трещинам, а на верхней грани в ее средней части—сжимающие напряжения σ_x , которые уменьшаются при приближении к торцам блока.

Картина эта усиливается, если увеличивается длина блока.

Учет ползучести бетона показывает, что трещинообразование может произойти главным образом в период строительства, во время укладки бетонных блоков и в первый период их работы. Нормальные напряжения σ_x^* с учетом ползучести бетона оказываются низкими, когда замыкание бетонных блоков произведено в раннем возрасте бетона (при скоростной укладке); они велики, если замыкание бетонных блоков произведено поздно (при τ_1 больших) и если применяются длинные блоки.

Таблицы 6—10 отчетливо показывают влияние размеров блока на величину опасных для разрыва напряжений σ_x . Для того, чтобы на основании проделанных вычислений можно было дать практические рекомендации о выборе бетонирования, необходимо получить из опыта величины сопротивления бетона сцеплению τ при различном возрасте бетона.

В заключение считаю своим приятным долгом выразить благодарность Г. С. Шапиро за ценные советы при выполнении этой работы.

Сектор математики и механики
АН Армянской ССР

Поступило 6 X 1953

ЛИТЕРАТУРА

1. Маслов Г. Н. Температурные напряжения и деформации в бетонных массивах на основах теории упругости. Известия НИИГ, том XIII, 1934.
2. Басевич А. З. и Шапиро Г. С. Сборник „Свирьстрой“, 1937.
3. Нилендер Ю. А. Расчет разрезки массивных бетонных сооружений. Труды IV Всесоюзной конференции по бетону и железобетонным конструкциям, ч. II. Стройиздат, 1949.
4. Маслов Г. Н. Задачи теории упругости о термоупругом равновесии. Известия НИИГ, том 23, 1938.
5. Маслов Г. Н. Элементарные статические расчеты сооружений на температурные изменения. Известия НИИГ, том 26, 1940.
6. Маслов Г. Н. Термическое напряженное состояние бетонных массивов при учете ползучести бетона. Известия НИИГ, том 28, 1940.
7. Александровский С. В. Температурные напряжения в массивных блоках от экзотермии цемента. Сборник НИИ по строительству. Исследования, массивные Известия VII, № 3—2.

- и стержневые конструкции" Министерства строительства предприятий машиностроения, М., 1952.
8. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Гостехиздат, М.—Л., 1952.
9. Filon L. N. G. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Ser. „A“, Vol. 201, 1903.
10. Гвоздев А. А., Васильев А. П. и Димитриев С. А. Изучение сцепления нового бетона со старым. ОНТИ, 1936.

Բ. Լ. Աբրահամյան

ՈՒՂՂԱՆԿՅՈՒՆԱԶԵՎ ԲԵՏՈՆՅԱ ԲԼՈԿՈՒՄ ԶԵՐՄԱՅԻՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄՍՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հողմածուր քննություն է անցված ուղղանկյունաձև բետոնյա բլոկի ջերմային վիճակի հարթ խնդիրը՝ հիմնատակի հետ ամրացման տարրեր պայմանների գեղարված:

Խնդրի լուծումը սկզբում արված է առաձգականության առարկայի նկատմամբ, հենվելով Գ. Ն. Մասլովի աշխատությունների վրա, իսկ հետո, համաձայն Ն. Ս. Հարությունյանի կողմից մշակված բետոնի սողքի առարկայի՝ սողքի ակնառումով:

Յուզյ է արված, որ ջերմային լարումների հաշվարկման այս կղանակը կարող է օգտակար լինել բետոնյա բլոկների կիրառելի շախերը որոշելու համար:

ТЕОРИЯ ПОЛЗУЧЕСТИ

М. М. Манукян

Усадочные напряжения в симметрично армированных железобетонных элементах с учетом нелинейной ползучести бетона

В работе исследуется усадочное напряжение в симметрично армированных железобетонных элементах с учетом ползучести бетона, когда между напряжениями и деформациями существует нелинейная связь и бетон обладает свойством изменяемости во времени модуля мгновенной деформации.

Общее решение этой задачи по линейной теории ползучести бетона было дано Н. Х. Арутюняном [1] и Швецовым [2].

Ниже, при решении поставленной задачи, будем исходить из нелинейной теории ползучести бетона, предложенной в работе [1].

1. *Постановка задачи и основные уравнения.* Рассмотрим симметрично армированный железобетонный элемент. Обозначим нормальные усадочные напряжения в бетоне в момент времени t с учетом ползучести и изменяемости модуля мгновенной деформации через $\delta_b(t)$, а в арматуре — через $\delta_a(t)$. Ползучестью железа будем пренебрегать ввиду ее незначительности по сравнению с ползучестью бетона.

Эти напряжения при любом t , в силу отсутствия внешних сил, должны удовлетворять уравнению равновесия:

$$\sigma_a(t) F_a + \sigma_b(t) F_b = 0, \quad (1.1)$$

где F_a и F_b — соответственно площади поперечного сечения арматуры и бетона.

Функцию $S_n(t)$, характеризующую закон изменения процесса усадки, примем в следующей форме [1]:

$$S_n(t) = S_0 \left(e^{-\alpha t_1} - e^{-\alpha t} \right), \quad (1.2)$$

где S_0 — наибольшее значение усадки, величина которой устанавливается для данного бетона на основании опытных данных; α — показатель, характеризующий скорость нарастания усадки данного бетона во времени, а t_1 — возраст бетона, рассчитываемый от момента его укладки.

Полная продольная деформация бетона $\varepsilon_b(t)$ с учетом его ползучести, согласно [1], будет:

$$\varepsilon_b(t) = S_n(t) + \frac{\sigma_b(t)}{E(t)} - \int_{t_1}^t \sigma_b(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} \right] d\tau -$$

$$-\int_{\tau_1}^t f \left[\sigma_0(\tau) \right] \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau, \quad (1.3)$$

где $\frac{1}{E(t)}$ — упруго-мгновенная деформация, а $C(t, \tau)$ — деформация ползучести к моменту времени t , $f \left[\sigma_0(\tau) \right]$ — некоторая определенная из опыта функция $\sigma_0(\tau)$, характеризующая нелинейную зависимость между напряжениями и деформациями ползучести для данного бетона^{*}.

Из условия совместности деформаций арматуры и соприкасающегося с ней слоя бетона следует:

$$\varepsilon_0(t) = \varepsilon_a(t). \quad (1.4)$$

С другой стороны, имеем:

$$\varepsilon_a(t) = \frac{\sigma_a(t)}{E_a}, \quad (1.5)$$

где E_a — модуль деформации арматуры.

Из соотношения (1.3), пользуясь равенствами (1.4) и (1.5), находим:

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_a(t)}{E_a} = S_n(t) + \frac{\sigma_0(t)}{E(t)} - \int_{\tau_1}^t \sigma_0(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} \right] d\tau - \\ - \int_{\tau_1}^t f \left[\sigma_0(\tau) \right] \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} d\tau. \end{aligned} \quad (1.6)$$

Внеся значение $\sigma_a(t)$ из (1.1) в (1.6), после некоторых преобразований получим:

$$\begin{aligned} \sigma_a(t) = - \frac{\mu E_a}{1 + \mu m(t)} S_n(t) + \\ + \mu E_a \int_{\tau_1}^t \sigma_0(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} \right] \frac{d\tau}{1 + \mu m(t)} + \\ + \mu E_a \int_{\tau_1}^t f \left[\sigma_0(\tau) \right] \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} \frac{d\tau}{1 + \mu m(t)}. \end{aligned} \quad (1.7)$$

* Следует отметить, что, согласно [1], функция $f[z]$ должна удовлетворять условию $f[1] = 1$. Если принять $f[z] = \beta_0 z + \beta z^2$, то при условии $\beta_0 + \beta = 1$ будем иметь $f[1] = 1$. Однако здесь для простоты принято $f[z] = z + \beta z^2$, что удовлетворяет этому условию приближенно, так как $f[1] \approx 1 + \beta$.

где $\mu = \frac{F_a}{F_b}$ — процент армирования, $m(t) = \frac{E_a}{E(t)}$ — модульное отношение в данный момент времени, $E(\tau_1)$ — значение модуля мгновенной деформации бетона в момент времени $t = \tau_1$.

Пользуясь зависимостями (1.1) и (1.7), получим следующее уравнение для определения напряжения в арматуре $\sigma_a(t)$, как функцию времени t :

$$\sigma_a(t) = \frac{E_a}{1+\mu m(t)} S_n(t) + \mu E_a \int_{\tau_1}^t \sigma_a(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} \right] \frac{1}{1+\mu m(t)} - \\ - E_a \int_{\tau_1}^t \left[-\mu \sigma_a(\tau) \right] \frac{\partial C(t, \tau)}{\partial \tau} \frac{d\tau}{1+\mu m(t)}. \quad (1.8)$$

Таким образом, задача по определению усадочных напряжений $\sigma_b(t)$ и $\sigma_a(t)$ в симметрично армированных элементах с учетом ползучести бетона и изменяемости его модуля мгновенной деформации сводится к решению интегральных уравнений (1.7) и (1.8).

2. *Приведение интегральных уравнений (1.7) и (1.8) к дифференциальным уравнениям.* Закон изменения меры ползучести $C(t, \tau)$ бетона примем в следующей форме (1):

$$C(t, \tau) = \varphi(\tau) \left[1 - e^{-\gamma(t-\tau)} \right], \quad (2.1)$$

где $\varphi(\tau)$ — некоторая функция возраста материала τ , определяемая из опыта и характеризующая процесс старения данного бетона, а γ — постоянная.

Внеся значение $C(t, \tau)$ из (2.1) в (1.7), получим:

$$\sigma_b(t) = - \frac{\mu E_a}{1+\mu m(t)} S_n(t) + \frac{\mu E_a}{1+\mu m(t)} \int_{\tau_1}^t \sigma_b(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)} \right] d\tau + \\ + \mu E_a \int_{\tau_1}^t \left[\sigma_b(\tau) \right] \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\varphi(\tau) \left(1 - e^{-\gamma(t-\tau)} \right) \right] \frac{d\tau}{1+\mu m(t)}. \quad (2.2)$$

Умножив уравнение (2.2) на $1+\mu m(t)$ и продифференцировав по t , получим:

$$\left[1 + \mu m(t) \right] \sigma'_b(t) = - \mu E_a S'_n(t) + \\ + \mu E_a \gamma \int_{\tau_1}^t \left[\sigma_b(\tau) \right] \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\varphi(\tau) e^{-\gamma(t-\tau)} \right] d\tau - \mu E_a \gamma \left[\sigma_b(t) \right] \varphi(t). \quad (2.3)$$

Отсюда, определяя значение интеграла

$$\int_{\tau_1}^t f[\sigma_0(\tau)] \frac{\partial}{\partial \tau} [\varphi(\tau) e^{-\gamma(t-\tau)}] d\tau$$

и подставляя в исходное уравнение (2.2), находим:

$$\begin{aligned} \left[1 + \mu m(t)\right] \sigma_0(t) = & -\mu E_a S_n(t) + \mu E_a \int_{\tau_1}^t \sigma_0(\tau) \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{1}{E(\tau)}\right] d\tau + \\ & + \mu E_a \int_{\tau_1}^t f[\sigma_0(\tau)] \varphi'(\tau) - \frac{1}{\gamma} \sigma_0'(t) \left[1 + \mu m(t)\right] - \\ & - \frac{\mu E_a}{\gamma} S_n'(t) - \mu E_a f[\sigma_0(t)] \varphi(t). \end{aligned} \quad (2.4)$$

Дифференцируя выражение (2.4) еще раз по t , после некоторых преобразований приведем его к следующему виду:

$$\begin{aligned} \sigma_0'(t) + \left[\gamma + \frac{\mu m'(t)}{1 + \mu m(t)}\right] \sigma_0(t) + \frac{\mu E_a \gamma}{1 + \mu m(t)} f'[\sigma_0(t)] \varphi(t) = \\ = -\frac{\mu E_a}{1 + \mu m(t)} \left[\gamma S_n'(t) + S_n''(t)\right]. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Пользуясь зависимостью (1.1), для $\sigma_a(t)$ получим следующее уравнение:

$$\begin{aligned} \sigma_a'(t) + \left[\gamma + \frac{\mu m'(t)}{1 + \mu m(t)}\right] \sigma_a(t) - \frac{E_a \gamma \varphi(t)}{1 + \mu m(t)} f'[-\mu \sigma_a(t)] = \\ = \frac{E_a}{1 + \mu m(t)} \left[S_n''(t) + \gamma S_n'(t)\right]. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Таким образом, решение исходных интегральных уравнений (1.7) и (1.8) сводится к решению дифференциальных уравнений (2.5) и (2.6).

Положим, что $f(\sigma)$ является степенной функцией следующего вида:

$$f(\sigma) = \sigma + \beta \sigma^2 \quad (2.7)$$

и характерна тем, что значение параметра β определяет степень нелинейности ползучести бетона. Тогда будем иметь:

$$f[\sigma_0(\tau)] = \sigma_0(\tau) + \beta \sigma_0^2(\tau), \quad (2.8)$$

$$f[-\mu \sigma_a(t)] = -\mu \sigma_a(t) + \beta \mu^2 \sigma_a^2(t). \quad (2.9)$$

Подставляя эти значения из (2.8), (2.9) в (2.5) и (2.6), получим:

$$\begin{aligned} \sigma_0^*(t) + \left\{ \gamma \left[1 + \frac{\mu E_a \varphi(t)}{1 + \mu m(t)} \right] + \frac{\mu m'(t)}{1 + \mu m(t)} \right\} \sigma_0'(t) + \\ + 2\beta \frac{\mu E_a \gamma \varphi(t)}{1 + \mu m(t)} \sigma_0(t) \sigma_0'(t) = \\ = - \frac{\mu E_a}{1 + \mu m(t)} \left[S_n^*(t) + \gamma S_n'(t) \right], \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\begin{aligned} \sigma_a^*(t) + \left\{ \gamma \left[1 + \frac{\mu E_a \varphi(t)}{1 + \mu m(t)} \right] + \frac{\mu m'(t)}{1 + \mu m(t)} \right\} \sigma_a'(t) - \\ - 2\beta \mu^2 \frac{E_a \gamma \varphi(t)}{1 + \mu m(t)} \sigma_a(t) \sigma_a'(t) = \\ = \frac{E_a}{1 + \mu m(t)} \left[S_n^*(t) + \gamma S_n'(t) \right]. \end{aligned} \quad (2.11)$$

Таким образом, задача определения усадочных напряжений $\sigma_0(t)$ и $\sigma_a(t)$ в симметрично армированных элементах с учетом ползучести бетона и изменяемости его модуля мгновенной деформации сводится к решению нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами (2.10) и (2.11).

Положим, что модуль мгновенной деформации бетона изменяется во времени незначительно и практически его можно считать постоянным, т. е. $E = E_0$. Тогда уравнения (2.10) и (2.11) примут вид:

$$\begin{aligned} \sigma_0^*(t) + \gamma \left[1 + \frac{\mu E_a \varphi(t)}{1 + \mu m_0} \right] \sigma_0'(t) + 2\beta \mu \frac{E_a \gamma \varphi(t)}{1 + \mu m_0} \sigma_0(t) \sigma_0'(t) = \\ = - \mu \frac{E_a}{1 + \mu m_0} \left[S_n^*(t) + \gamma S_n'(t) \right], \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} \sigma_a^*(t) + \gamma \left[1 + \frac{\mu E_a \varphi(t)}{1 + \mu m_0} \right] \sigma_a'(t) - 2\beta \mu^2 \frac{E_a \gamma \varphi(t)}{1 + \mu m_0} \sigma_a(t) \sigma_a'(t) = \\ = \frac{E_a}{1 + \mu m_0} \left[S_n^*(t) + \gamma S_n'(t) \right], \end{aligned} \quad (2.13)$$

где $m_0 = E_a / E_0$ — постоянная величина.

Уравнения (2.12) и (2.13) определяют усадочные напряжения в арматуре и бетоне в симметрично армированных железобетонных элементах с учетом только ползучести бетона.

Исследования показывают [1], что для $\varphi(\tau)$ можно принять следующее выражение:

$$\varphi(\tau) = C_0 + \frac{A_1}{\tau}, \quad (2.14)$$

где C_0 — предельное значение меры ползучести для данного бетона,

A_1 — некоторый параметр, зависящий от свойства и условий старения данного бетона.

Если в уравнениях (2.12) и (2.13) заменить функцию ее предельным значением $\varphi(\infty) = C_0$, то полученные уравнения будут характеризовать состояние ползучести для старого или уже стареющего бетона. В этом случае уравнения (2.12) и (2.13) примут вид:

$$\sigma'_0(t) + \gamma(1+A)\sigma'_0(t) + 2A\beta\gamma\sigma_0(t)\sigma'_0(t) = -\frac{A}{C_0} \left[S'_n(t) + \gamma S'_n(t) \right], \quad (2.15)$$

$$\sigma'_a(t) + \gamma(1+A)\sigma'_a(t) - 2A\beta\gamma\mu\sigma_a(t)\sigma'_a(t) = \frac{A}{\mu C_0} \left[S'_n(t) + \gamma S'_n(t) \right], \quad (2.16)$$

где

$$A = \frac{\mu E_a C_0}{1 + \mu m_0}.$$

3. Интегрирование уравнений (2.15) и (2.16). Заметим, что, согласно (2.2) и (2.3), для $\sigma_0(t)$ имеют место следующие начальные условия:

$$\sigma_0(\tau_1) = 0, \quad \sigma'_0(\tau_1) = -\frac{A}{C_0} S'_n(\tau_1). \quad (3.1)$$

Аналогичные условия получим и для $\sigma_a(t)$:

$$\sigma_a(\tau_1) = 0, \quad \sigma'_a(\tau_1) = \frac{A}{\mu C_0} S'_n(\tau_1). \quad (3.2)$$

Пользуясь начальными условиями (3.1) и (3.2), можно снизить порядок дифференциальных уравнений (2.15) и (2.16) и привести их к виду

$$\sigma'_0(t) + \gamma(1+A)\sigma_0(t) + A\beta\gamma\sigma_0^2(t) + \frac{A}{C_0} \left[S'_n(t) + \gamma S'_n(t) \right] = 0, \quad (3.3)$$

$$\sigma'_a(t) + \gamma(1+A)\sigma_a(t) - A\beta\gamma\mu\sigma_a^2(t) - \frac{A}{\mu C_0} \left[S'_n(t) + \gamma S'_n(t) \right] = 0. \quad (3.4)$$

Если значение $S_n(t)$ из (1.2) подставить в уравнения (3.3) и (3.4), то они примут следующий вид:

$$\sigma'_0(t) + \gamma(1+A)\sigma_0(t) + A\beta\gamma\sigma_0^2(t) + \frac{AS_0}{C_0} \left[(\alpha - \gamma)e^{-\alpha t} + \gamma e^{-\alpha \tau_1} \right] = 0, \quad (3.5)$$

$$\sigma'_a(t) + \gamma(1+A)\sigma_a(t) - A\beta\gamma\mu\sigma_a^2(t) - \frac{AS_0}{\mu C_0} \left[(\alpha - \gamma)e^{-\alpha t} + \gamma e^{-\alpha \tau_1} \right] = 0. \quad (3.6)$$

Эти уравнения являются обобщенными уравнениями Рикати. Переходя к новым неизвестным $u(t)$ и $v(t)$ посредством соотношений

$$\sigma_6(t) = \frac{1}{A \beta \gamma} \frac{u'(t)}{u(t)}, \quad (3.7)$$

$$\sigma_2(t) = -\frac{1}{A \beta \gamma \mu} \frac{v'(t)}{v(t)}, \quad (3.8)$$

уравнения (3.5) и (3.6) приведем к виду

$$\frac{d^2 u}{dt^2} + \gamma(1+A) \frac{du}{dt} + A \beta \gamma \frac{AS_0}{C_0} \left[(\alpha - \gamma) e^{-\alpha t} + \gamma e^{-\alpha \tau_1} \right] u = 0, \quad (3.9)$$

$$\frac{d^2 v}{dt^2} + \gamma(1+A) \frac{dv}{dt} + A \beta \gamma \frac{AS_0}{C_0} \left[(\alpha - \gamma) e^{-\alpha t} + \gamma e^{-\alpha \tau_1} \right] v = 0. \quad (3.10)$$

Займемся интегрированием и исследованием одного из этих уравнений.

Введем обозначения

$$a = -\frac{\gamma(1+A)}{\alpha}, \quad b = \frac{A^2 \beta \gamma S_0}{C_0 \alpha^2} (\alpha - \gamma),$$

$$c = \frac{A^2 \beta \gamma^2 S_0}{C_0 \alpha^2} e^{-\alpha \tau_1}, \quad x = -\alpha t. \quad (3.11)$$

Тогда уравнение (3.9) примет вид

$$\frac{d^2 u}{dx^2} + a \frac{du}{dx} + (be^x + c)u = 0, \quad (3.12)$$

общее решение которого будет (3.4):

$$u(x) = e^{-\frac{ax}{2}} \left[C_1 I_\nu \left(2\sqrt{b} e^{\frac{x}{2}} \right) + C_2 L_\nu \left(2\sqrt{b} e^{\frac{x}{2}} \right) \right], \quad (3.13)$$

где $I_\nu \left(2\sqrt{b} e^{\frac{x}{2}} \right)$ и $L_\nu \left(2\sqrt{b} e^{\frac{x}{2}} \right)$ — функции Бесселя первого ряда с произвольным индексом

$$\nu = \frac{\gamma}{\alpha} \sqrt{(1+A)^2 - \frac{4A^2 \beta S_0}{C_0} e^{-\alpha \tau_1}},$$

а C_1 и C_2 — постоянные интегрирования. Если $\alpha > \gamma$, то аргумент бesselевых функций будет действительным числом, а если $\alpha < \gamma$, то аргумент будет мнимым числом.

Рассмотрим случай, когда $\alpha \neq \gamma$.

Переходя к переменной t , из (3.13) получим:

$$u(t) = e^{\frac{\alpha \gamma}{2} t} \left[C_1 I_\nu \left(2\sqrt{b} e^{-\frac{\alpha t}{2}} \right) + C_2 L_\nu \left(2\sqrt{b} e^{-\frac{\alpha t}{2}} \right) \right]. \quad (3.14)$$

Подставляя значение $u(t)$ и ее производной из (3.14) в (3.7), найдем:

$$\sigma_0(t) = -\frac{\alpha}{2A\beta\gamma} \left\{ \frac{C_1 \left[k I_{\nu-1}(k) - \nu I_{\nu}(k) \right] + C_2 \left[k I_{-(\nu+1)}(k) + \nu I_{-\nu}(k) \right]}{C_1 I_{\nu}(k) + C_2 I_{-\nu}(k)} - a \right\}, \quad (3.15)$$

где $k = 2\sqrt{be}^{-\frac{\alpha t}{2}}$.

Если числитель и знаменатель этой дроби разделить на C_1 и отношение C_2 и C_1 обозначить через B , то выражение (3.15) можно записать в виде:

$$\sigma_0(t) = -\frac{\alpha}{2A\beta\gamma} \left[k \frac{I_{\nu-1}(k) - B I_{1-\nu}(k)}{I_{\nu}(k) + B I_{-\nu}(k)} - (a + \nu) \right]. \quad (3.16)$$

При этом использованы рекуррентные соотношения для бесселевых функций [5].

Пользуясь начальными условиями (3.1), найдем:

$$B = \frac{k_1 I_{\nu-1}(k_1) - (a + \nu) I_{\nu}(k_1)}{k_1 I_{1-\nu}(k_1) + (a + \nu) I_{-\nu}(k_1)}, \quad (3.17)$$

где $k_1 = 2\sqrt{be}^{-\frac{\alpha t_1}{2}}$.

Аналогичным путем получим решение уравнения (3.10):

$$\sigma_a(t) = \frac{\alpha}{2A\beta\gamma\mu} \left[k \frac{I_{\nu-1}(k) - B I_{1-\nu}(k)}{I_{\nu}(k) + B I_{-\nu}(k)} - (a + \nu) \right]. \quad (3.18)$$

Выражения (3.16) и (3.18) определяют закон изменения усадочных напряжений в симметрично армированных железобетонных элементах с учетом ползучести бетона, когда $\alpha > \gamma$.

Если $\alpha < \gamma$, то аргумент бесселевых функций будет мнимым числом. В этом случае желательно представить решение в вещественном виде, поэтому вместо функции $I_{\nu}(ki)$ применяется функция

$$L_{\nu}(k) = e^{-\frac{1}{2} \pi i \nu} I_{\nu}(ki) = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{2}k\right)^m}{\Gamma(m + \nu + 1) \Gamma(m + 1)},$$

которая является вещественной функцией от аргумента k и называется обобщенной функцией Бесселя первого рода.

Тогда решения уравнений (3.9) и (3.10) можно представить в форме:

$$\sigma_0(t) = -\frac{\alpha}{2A\beta\gamma} \left[k \frac{L_{\nu-1}(k) + B_1 L_{1-\nu}(k)}{L_{\nu}(k) + B_1 L_{-\nu}(k)} - (a + \nu) \right], \quad (3.19)$$

$$\sigma_a(t) = \frac{\alpha}{2A\beta\gamma\mu} \left[k \frac{L_{\nu-1}(k) + B_1 L_{1-\nu}(k)}{L_{\nu}(k) + B_1 L_{-\nu}(k)} - (a + \nu) \right], \quad (3.20)$$

$$\text{где } B_1 = \frac{k_1 L_{v-1}(k_1) - (a+v) L_v(k_1)}{k_1 L_{i-v}(k_1) - (a+v) L_{-v}(k_1)}. \quad (3.21)$$

Выражения (3.19) и (3.20) определяют закон изменения усадочных напряжений в симметрично армированных железобетонных элементах с учетом ползучести бетона, когда $\alpha < \gamma$.

В формулах (3.16) и (3.19) отрицательный знак соответствует растяжению.

Нетрудно показать, что если $S_0 < 0$, то выражения усадочных напряжений будут вышеполученные, только с обратным знаком. Действительно, если в уравнениях (3.5) и (3.6) и их решениях (3.16), (3.18), (3.19), (3.20) $\sigma_0(t)$ и $\sigma_a(t)$ заменить соответственно через $-\sigma_0(t)$ и $-\sigma_a(t)$, а β через $-\beta$, то они остаются инвариантами.

Рассмотрим еще случай, когда $\alpha = \gamma$. Тогда уравнение (3.5) примет следующий вид:

$$\sigma_0'(t) + \gamma(1+A)\sigma_0(t) + A\beta\gamma\sigma_0^2(t) + \frac{A\gamma S_0}{C_0} e^{-\gamma t} = 0. \quad (3.22)$$

Решение этого уравнения будет

$$\sigma_0(t) = -\frac{\gamma(1+A) - \nu_1}{2A\beta\gamma} + D \frac{\nu_1 e^{-\nu_1 t}}{1 - DA\beta\gamma e^{-\nu_1 t}}, \quad (3.23)$$

где D — постоянная интегрирования, а

$$\nu_1 = \sqrt{\gamma^2(1+A)^2 - \frac{A\gamma S_0}{C_0} e^{-\gamma t}}. \quad (3.24)$$

Пользуясь начальными условиями (3.1), можно решению (3.23) придать следующий вид:

$$\sigma_0(t) = -\frac{\gamma(1+A) - \nu_1}{2A\beta\gamma} \frac{1 - e^{-\nu_1(t-\tau_1)}}{1 - \frac{\gamma(1+A) - \nu_1}{\gamma(1+A) + \nu_1} e^{-\nu_1(t-\tau_1)}}. \quad (3.25)$$

При линейной ползучести уравнение (3.5) имеет вид:

$$\sigma_0'(t) + \gamma(1+A)\sigma_0(t) + \frac{A\gamma S_0}{C_0} e^{-\gamma t} = 0. \quad (3.26)$$

Интегрируя это уравнение и принимая во внимание начальные условия (3.1), находим:

$$\sigma_0(t) = -\frac{A S_0}{(1+A) C_0} e^{-\gamma t} \left[1 - e^{-\gamma(1+A)(t-\tau_1)} \right]. \quad (3.27)$$

Аналогичные результаты получим и для $\delta_a(t)$. Обозначим усадочные напряжения в бетоне и в арматуре при линейной ползучести через $\delta_0^*(t)$ и $\delta_a^*(t)$, а при нелинейной ползучести — через $\sigma_0(t)$ и $\sigma_a(t)$. Кроме того, пусть

$$H_0(t) = \frac{\sigma_0(t)}{\sigma_0^*(t)}, \quad H_a(t) = \frac{\sigma_a(t)}{\sigma_a^*(t)}. \quad (3.28)$$

Если в решениях (3.25) и (3.27) подставить $t=\infty$, то соответственно будем иметь:

$$\begin{aligned}\sigma_0(\infty) &= -\frac{\gamma(1+A)-\nu_1}{2A\beta\gamma}, \\ \sigma_0^*(\infty) &= -\frac{AS_0}{(1+A)C_0}e^{-\alpha\tau_1},\end{aligned}\quad (3.29)$$

откуда непосредственно следует, что

$$\frac{1}{H_0(\infty)} = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{\nu_1}{\gamma(1+A)} \right], \quad (3.30)$$

и в силу условия (так как $S_0 > 0$)

$$\nu_1 < \gamma(1+A),$$

получим

$$|\sigma_0(\infty)| > |\sigma_0^*(\infty)|.$$

Ниже приводятся таблицы (1—3), которые характеризуют закон изменения усадочных напряжений в бетоне и в арматуре в симметрично армированных элементах в зависимости от интенсивности меры ползучести $C(t, \tau)$, возраста бетона τ_1 , меры нелинейности β , процента армирования μ , при $\alpha=\gamma=0,026$.

Характеристики меры ползучести бетона приняты следующие:

$$\begin{aligned}C_0 &= 0,9 \cdot 10^{-5}, \quad E_a = 2 \cdot 10^6 \text{ кг/см}^2, \quad m_0 = 10, \\ S_0 &= 2 \cdot 10^{-4}, \quad \gamma = 0,026.\end{aligned}$$

Таблица 1

Значения усадочных напряжений в бетоне $\sigma_0(t)$ и арматуре $\sigma_a(t)$ и коэффициентов $H_0(t)$ и $H_a(t)$ при $\tau_1=1$ дню, $\mu=1\%$, $\beta=0,01$ и $\alpha=0,026$

t	$\frac{\sigma_0^*(t)}{S_0 E_0}$	$\frac{\sigma_0(t)}{S_0 E_0}$	$H_0(t)$	$\frac{\sigma_a^*(t)}{S_0 E_a}$	$\frac{\sigma_a(t)}{S_0 E_a}$	$H_a(t)$
7 дней	-0,012634	-0,012636	1,0001	0,12634	0,12636	1,0001
14 дней	-0,02475	-0,02476	1,0004	0,2475	0,2476	1,0004
28 дней	-0,0425	-0,0426	1,002	0,425	0,426	1,002
3 мес.	-0,0710	-0,0712	1,003	0,710	0,712	1,003
1 год	-0,0761	-0,0764	1,004	0,761	0,764	1,004
∞	-0,0761	-0,0764	1,004	0,761	0,764	1,004

Таблица 2

Значения усадочных напряжений в бетоне $\varepsilon_0(t)$ в зависимости от времени t и процента армирования μ , при $\tau_1=1$ дню; $\beta=0,12$ и $\alpha=\gamma=0,026$

t		$\mu=1\%$	$\mu=1,5\%$	$\mu=2\%$	$\mu=2,5\%$	$\mu=3\%$
7 дней	$\varepsilon_0^*(t)/S_0 E_0$	-0,01263	-0,01803	-0,02293	-0,0274	-0,0314
	$\varepsilon_0(t)/S_0 E_0$	-0,01264	-0,01805	-0,02297	-0,0275	-0,0316
	$H_0(t)$	1,0007	1,001	1,0017	1,004	1,006
14 дней	$\varepsilon_0^*(t)/S_0 E_0$	-0,02475	-0,03512	-0,0444	-0,0528	-0,0604
	$\varepsilon_0(t)/S_0 E_0$	-0,02481	-0,03528	-0,0447	-0,0534	-0,0612
	$H_0(t)$	1,002	1,004	1,007	1,011	1,013
28 дней	$\varepsilon_0^*(t)/S_0 E_0$	-0,0425	-0,0597	-0,0748	-0,0881	-0,1000
	$\varepsilon_0(t)/S_0 E_0$	-0,0428	-0,0606	-0,0767	-0,0913	-0,1048
	$H_0(t)$	1,007	1,015	1,025	1,036	1,048
3 мес.	$\varepsilon_0^*(t)/S_0 E_0$	-0,0710	-0,0979	-0,1187	-0,1371	-0,1529
	$\varepsilon_0(t)/S_0 E_0$	-0,0736	-0,1042	-0,1332	-0,1617	-0,1906
	$H_0(t)$	1,036	1,074	1,122	1,179	1,246
1 год	$\varepsilon_0^*(t)/S_0 E_0$	-0,0761	-0,1029	-0,1249	-0,1433	-0,1589
	$\varepsilon_0(t)/S_0 E_0$	-0,0805	-0,1150	-0,1497	-0,1882	-0,2384
	$H_0(t)$	1,058	1,117	1,199	1,313	1,500
∞	$\varepsilon_0^*(t)/S_0 E_0$	-0,0761	-0,1029	-0,1249	-0,1433	-0,1589
	$\varepsilon_0(t)/S_0 E_0$	-0,0805	-0,1150	-0,1498	-0,1884	-0,2400
	$H_0(t)$	1,058	1,117	1,200	1,314	1,510

Таблица 3

Значения усадочных напряжений в арматуре $\sigma_a(t)$ в зависимости от времени t и процента армирования μ , при $\tau_1=1$ дню, $\beta=0,12$ и $\alpha-\gamma=0,026$

t		$\mu=1\%$	$\mu=1,5\%$	$\mu=2\%$	$\mu=2,5\%$	$\mu=3\%$
7 дней	$\sigma_a^*(t)/S_0 E_a$	0,1263	0,12020	0,11465	0,1096	0,1047
	$\sigma_a(t)/S_0 E_a$	0,1264	0,12033	0,11485	0,1100	0,1053
	$H_a(t)$	1,0007	1,001	1,0017	1,004	1,006
14 дней	$\sigma_a^*(t)/S_0 E_a$	0,2475	0,23413	0,2220	0,2112	0,2013
	$\sigma_a(t)/S_0 E_a$	0,2481	0,23520	0,2235	0,2136	0,2040
	$H_a(t)$	1,002	1,004	1,007	1,011	1,013
28 дней	$\sigma_a^*(t)/S_0 E_a$	0,425	0,3980	0,3740	0,3524	0,3333
	$\sigma_a(t)/S_0 E_a$	0,428	0,4040	0,3835	0,3652	0,3493
	$H_a(t)$	1,007	1,015	1,025	1,036	1,048
3 мес.	$\sigma_a^*(t)/S_0 E_a$	0,710	0,6467	0,5935	0,5481	0,5097
	$\sigma_a(t)/S_0 E_a$	0,736	0,6947	0,6660	0,6468	0,6353
	$H_a(t)$	1,036	1,074	1,122	1,179	1,246
1 год	$\sigma_a^*(t)/S_0 E_a$	0,761	0,6860	0,6245	0,5732	0,5297
	$\sigma_a(t)/S_0 E_a$	0,805	0,7667	0,7485	0,7528	0,7947
	$H_a(t)$	1,058	1,117	1,199	1,313	1,500
∞	$\sigma_a^*(t)/S_0 E_a$	0,761	0,6860	0,6245	0,5732	0,5297
	$\sigma_a(t)/S_0 E_a$	0,803	0,7667	0,7490	0,7536	0,8000
	$H_a(t)$	1,058	1,117	1,200	1,314	1,510

Из этих таблиц видно, что: 1) абсолютная величина усадочных напряжений в бетоне $\sigma_b(t)$ и в арматуре $\sigma_a(t)$ с течением времени быстро возрастает, причем это возрастание зависит от процента армирования μ ; 2) возрастание напряжений $\sigma_b(t)$ и $\sigma_a(t)$ происходит только в течение первых трех месяцев, после чего изменения этих величин почти не происходит; 3) при нелинейной ползучести абсолютная величина усадочных напряжений в бетоне $\sigma_b(t)$ и в арматуре $\sigma_a(t)$ больше, чем при линейной ползучести, т. е.

$$\begin{aligned} \left[\sigma_b(t) - \sigma_b^*(t) \right] &> 0, \\ \left[\sigma_a(t) - \sigma_a^*(t) \right] &> 0. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Это возрастание усадочных напряжений доходит до 51 процента; 4) чем больше меры нелинейности β , тем больше (по абсолютной величине) и усадочные напряжения $\sigma_b(t)$ и $\sigma_a(t)$.

Ереванский государственный университет
им. В. М. Молотова

Поступило 21 IV 1954

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнян Н. Х. Некоторые вопросы теории ползучести. Москва, 1952.
2. Швецов А. В. Метод определения собственных напряжений в бетонных и железобетонных элементах с учетом изменяемости во времени деформативных свойств бетона. Автореферат диссертации, 1951.
3. Камке Э. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Изд. иностран. лит., 1951.
4. Görtler H. Zeitschr. f. angew. Math., Mech., 23 (1943).
5. Watson G. H. Теория бесселевых функций. Госиздат, Москва, 1949.

Մ. Մ. Մանուկյան

ԿԾԿՄԱՆ ԼԱՐՈՒՄՆԵՐԸ ՍԻՄԵՏՐԻԿ ԱՐՄԱՏՈՒՐԱՎՈՐՎԱԾ ԵՐԿԱՅԱՐԲԵՏՈՆ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐՈՒՄ ԲԵՏՈՆԻ ՊԶ-ԳԾԱՅԻՆ ՍՈՂՔԻ ՀԱՇՎԱՌՈՒՄՈՎ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում քննարկվում են սիմետրիկ արմատաբախտոված երկաթաբետոն էլեմենտներում կծկման լարումները, երբ լարման և սողքի ղեֆորմացիայի միջև գոյություն ունի ոչ-զծային կապ: Բացի դրանից, ընդունվում է, որ բետոնի ակնթարթային ղեֆորմացիայի մոդուլը՝ $E(t)$ ժամանակի ընթացքում փոփոխվում է:

Այս խնդրի ընդհանուր լուծումը բետոնի զծային սողքի ղեպքում ավել է ն. Ս. Հարությունյանը [1]:

Հոգվածում ցույց է տրվում, որ բետոնի և արմատաւրայի կծկման նորմալ լարումների որոշումը բերվում է (1,7) և (1,8) ինտեգրալ հավասարումների և կամ՝ փոփոխական գործակիցներով 2-րդ կարգի ոչ-գծային (2,15) և (12,16) դիֆերենցիալ հավասարումների լուծումները դանկլուն:

Ընդունելով $E = \text{const}$, այս հավասարումներին տրվում է (3,5) և (3,6) տեսքը, որոնք հանդիսանում են Ուիլատի ընդհանրացած դիֆերենցիալ հավասարումները: (3,5) և (3,6) հավասարումների լուծումները ստացվում են (3,16) և (3,18) տեսքով, երբ $\alpha > \gamma$ և կամ՝ (3,19) և (3,20) տեսքով, երբ $\alpha < \gamma$: Առաջին դեպքում խնդրի լուծումը, այսինքն՝ բետոնի և արմատաւրայի կծկման լարումների փոփոխման օրենքը, տրվում է իրական արգումենտ ունեցող՝ Բեսսելի ֆունկցիաների միջոցով, իսկ 2-րդ դեպքում՝ կեղծ արգումենտ ունեցող Բեսսելի ֆունկցիաներով: Հոգվածում քննարկվում է նաև մասնավոր դեպք, երբ $\alpha = \gamma$:

Կազմված են համապատասխան աղյուսակներ:

АСТРОФИЗИКА

Б. Е. Маркарян

К вопросу о флуктуациях в видимом распределении
звезд

1. После установления факта наличия в межзвездном пространстве пылевой среды и появления ряда работ В. А. Амбарцумяна [1, 2], в которых выявлена клочковатая структура и определены некоторые характеристики этой среды, стало очевидно, что в видимом распределении звезд следует ожидать нерегулярности, обусловливаемые клочковатой структурой межзвездного поглощающего слоя.

Давно известно, что в распределении звезд на небе наблюдаются значительные неравномерности. Они вызываются отчасти основными структурными особенностями Галактики и отчасти крупными и близкими темными туманностями. Неравномерности, вызываемые структурными особенностями Галактики, выражаются в сравнительно плавном изменении плотности звезд на небе в зависимости от галактической широты и долготы. Но наряду с этими плавными изменениями видимой плотности звезд наблюдаются довольно заметные флуктуации в числах звезд в пределах одного и того же участка неба, обладающего более или менее значительными размерами.

Изучением природы этих флуктуаций мы занимались еще в 1943—1944 гг., основываясь на подсчетах звезд, выполненных другими исследователями.

Анализ подсчетов звезд [3, 4] показал, что принятый нами в качестве меры флуктуаций квадрат относительных среднеквадратичных отклонений наблюдаемых чисел звезд $N(m)$, ярче величины m , определяемый выражением:

$$\xi^2 = \frac{[N(m) - \bar{N}(m)]^2}{\bar{N}(m)^2} \quad (1)$$

заметно возрастает по мере приближения к плоскости Галактики, несмотря на значительное возрастание $N(m)$.

Обнаруженная закономерность аналогична той, которая была выявлена В. А. Амбарцумяном для внегалактических туманностей [2].

Учитывая характер пространственного распределения межзвездной материи, нетрудно понять, что в обоих этих случаях обнаруженная закономерность обуславливается одним и тем же фактором, а именно — межзвездной поглощающей средой.

Исходя из этого, межзвездную поглощающую среду следует рассматривать как один из основных факторов, обуславливающих наблюдаемые флюктуации в видимом распределении звезд. Другими факторами, вызывающими эти флюктуации, являются естественные случайные отклонения от средней плотности в самом пространственном распределении звезд и наличие в Галактике звездных систем, входящих в нее в качестве ее составных частей, как, например, звездные скопления и ассоциации. Последний фактор играет сравнительно небольшую роль и обычно легко поддается учету. Поэтому в качестве основных причин, обуславливающих наблюдаемые флюктуации в числах звезд, можно рассматривать межзвездную поглощающую среду и естественные случайные отклонения от среднего значения плотности в видимом распределении звезд.

Возникает вопрос, какой из этих двух факторов и при каких обстоятельствах играет более существенную роль?

Как легко видеть, квадрат среднеквадратичных относительных естественных флюктуаций $N(m)$ определится выражением:

$$\delta^2_{\text{ест.}} = \frac{1}{N(m)} - \frac{1}{\Sigma N(m)},$$

где знаменатель во втором члене правой части означает полное число звезд до величины m в изучаемой области неба.

Учитывая, что второй член в подавляющем большинстве случаев весьма мал по сравнению с первым членом, можно положить:

$$\delta^2_{\text{ест.}} = \frac{1}{\bar{N}(m)}. \quad (2)$$

Заметим, что средняя квадратичная ошибка этой величины в свою очередь определится выражением $\pm \frac{1}{\bar{N}(m)} \sqrt{\frac{2}{p}}$, где p — число рассматриваемых величин, по которым определяются флюктуации. Эта ошибка заслуживает внимания лишь в тех случаях, когда естественные флюктуации мало отличаются от наблюдаемых. В тех же случаях, когда естественные флюктуации составляют незначительную долю наблюдаемых флюктуаций, она перестает играть сколько-нибудь существенную роль.

Из (2) видно, что по мере приближения к плоскости Галактики величина $\delta^2_{\text{ест.}}$ должна убывать вследствие возрастания $\bar{N}(m)$. Но, как уже упоминалось выше, наблюдаемые флюктуации в числах сравнительно слабых звезд показывают как раз обратный ход. Отсюда мы неминуемо должны заключить, что доминирующую роль в наблюдаемых флюктуациях при слабых звездах играет межзвездная поглощающая среда. Роль же естественных флюктуаций довольно заметна в случае ярких, т. е. близких звезд.

Таким образом, можно утверждать, что наблюдаемые флюктуации

в видимом распределении звезд отличаются по величине от естественных флюктуаций благодаря клочковатой структуре межзвездной поглощающей среды. Интересно, что эти отклонения, определяемые выражением

$$\delta_{\text{ост.}}^2 = \delta_{\text{наб.}}^2 - \delta_{\text{ест.}}^2,$$

возрастают по мере приближения к галактической плоскости и тем больше, чем более слабые звезды мы берем.

В сравнительно низких галактических широтах для звезд слабее 12^m 0 естественные флюктуации уже перестают играть сколько-нибудь заметную роль при сравнении чисел звезд, приходящихся на один квадратный градус.

После установления этого важного факта нами была разработана теория флюктуаций в числах звезд, обусловливаемых клочковатостью межзвездной поглощающей среды. При этом для упрощения задачи было допущено, что поглощающие облака имеют одинаковую прозрачность— q и что они, наряду со звездами в данном направлении, распределены равномерно.

В последние годы Чандрасекар и Мюнх напечатали серию статей, посвященных вопросам флюктуаций яркостей Млечного Пути (М. П.) и в числах звезд. В этих работах они, развив разработанную нами теорию флюктуаций в числах звезд и в их суммарных яркостях, обобщили ее также на случай возможной вариации в величине q и дали более уточненные формулы для применения их в самой галактической плоскости [5, 6]. В своих работах они широко пользовались результатами проведенного нами анализа подсчетов звезд для определения характеристик межзвездной поглощающей среды.

Заметим здесь, что уже до появления этих работ сравнительно полную теорию флюктуаций яркостей М. П. и в числах звезд разработал В. А. Амбарцумян [7], положивший, как известно, в своих еще более ранних работах основу этого раздела статистической астрономии.

Сравнительно недавно Миллер опубликовал работу [8], в которой, не касаясь теории флюктуаций в числах звезд, делает некоторые критические замечания по поводу проведенного нами анализа подсчетов чисел звезд и, приводя некоторые новые данные, основанные на анализе собственных подсчетов звезд, приходит к заключению, что отклонение наблюдаемых флюктуаций от естественных случайных незначительно. Исходя из этого, он находит, что характеристики межзвездной поглощающей среды, полученные на основании определенных нами величин, нуждаются в пересмотре.

Познакомившись со статьей Миллера, мы пришли к выводу, что как его возражения, так и приведенные им новые данные не дают оснований ставить под сомнение определенные нами значения величины отклонения наблюдаемых флюктуаций от естественных и,

следовательно, полученные на основании этих отклонений характеристики межзвездной поглощающей среды.

Учитывая важность затронутого здесь вопроса, мы считаем необходимым вкратце остановиться на возражении и новых данных Миллера.

2. Произведенный нами анализ чисел звезд $N(m)$ основывается на подсчетах звезд, произведенных в Избранных Площадках, опубликованных ван Райном [9], и на подсчетах, произведенных в двух довольно больших участках М. П. (в созвездиях Орiona-Близнецов и Возничего) Лавдовским [10] и Кифером и Бакером [11].

Из Избранных Площадок нами были использованы все те, которые примыкают к зонам 0° , 10° , 30° и 40° галактических широт. В каждую из составленных таким путем групп вошло по 10–12 Избранных Площадок, которые, мало отличаясь друг от друга по гал. широте b , довольно заметно растягиваются по гал. долготе l . Ввиду разницы в b и l площадок одной и той же группы, наблюдаемые в них $N(m)$ были редуцированы к средней для данной группы широте и долготе по таблицам ван Райна* [9] для исключения тех плавных изменений видимой плотности звезд, о которых упоминалось выше.

Замечание Миллера по поводу использования указанным путем подсчетов, произведенных в Избранных Площадках, сводится к тому, что введенные значительные поправки в $N(m)$ при редуцировании их по l могут искусственно повышать наблюдаемые, следовательно и остаточные, флуктуации.

Следует отметить, что введенные поправки действительно большие, но они отнюдь не увеличивают имеющихся флуктуаций, а, наоборот, заметно сглаживают их.

Ниже, в таблице 1, приведены значения $\bar{\sigma}_{\text{наб.}}$ для рассмотренных ранее четырех групп (I, II, III, IV), причем в первых строках при-

Таблица 1

№№ групп	m							$\bar{\sigma}_{\text{наб.}}$	$\bar{\sigma}_{\text{ост.}}$
	13	14	15	16	17	18			
I ($b=0^\circ$)	0,250 0,037	0,276 0,075	0,335 0,099	0,303 0,072	0,319 0,089	0,355 0,116	0,306 0,090		0,035
II ($b=10^\circ$)	0,192 0,059	0,174 0,053	0,157 0,071	0,121 0,094	0,148 0,100	0,186 0,079	0,163 0,076		0,071
III ($b=30^\circ$)	0,054 0,049	0,069 0,031	0,064 0,038	0,090 0,044	0,204 0,050	0,191 0,027	0,112 0,040		0,032
IV ($b=40^\circ$)	0,118 0,052	0,014 0,029	0,031 0,032	0,051 0,023	0,069 0,016	0,117 0,027	0,072 0,030		0,022

* Эти таблицы дают ход изменения видимой плотности звезд в зависимости от b и l .

ведены значения $\delta^2_{\text{наб.}}$ при редуцировании $N(m)$ только по b , а во вторых строках значения $\delta^2_{\text{наб.}}$ при редуцировании $N(m)$ по b и l .

Как видно из этих данных, вопреки мнению Миллера, редуцирование по l почти в три раза убавляет значения $\delta^2_{\text{наб.}}$. Такая же картина получается для $\delta^2_{\text{ост.}}$. Тем не менее здесь остается некоторая неуверенность по причине введенных заметных поправок в $N(m)$ по таблицам, составленным без учета межзвездного поглощения. Именно поэтому были привлечены подсчеты, произведенные в областях Ориона-Близнецов и Возничего для проверки полученных значений $\delta^2_{\text{наб.}}$, так как в этом случае сравниваемые площадки не так заметно отличаются друг от друга по l . Результаты анализа подсчетов чисел звезд в упомянутых областях подтвердили реальность полученных величин и, вообще выводы, вытекающие из анализа подсчетов, произведенных в Избранных Площадках.

Однако по поводу использования подсчетов, произведенных в областях Ориона-Близнецов и Возничего, Миллер замечает, что имеющееся в этих областях заметное поглощение, обусловленное темными туманностями, и определенный отбор площадок для подсчетов звезд не могут не завышать флюктуации в $N(m)$.

Тенденция Миллера (встречающаяся в ряде мест его статьи) изобегать при выявлении остаточных флюктуаций областей, где имеется заметное поглощение, вызывает недоумение. Ведь совершенно ясно, что при полном отсутствии поглощения наблюдаемые флюктуации должны быть порядка естественных. Такие области в М. П. встречаются исключительно редко и в данном случае они нас мало интересуют.

Наша цель заключается в том, чтобы выявить природу наблюдаемых флюктуаций в наиболее характерных областях М.П., чтобы выявленные флюктуации были близки к статистическим средним. Именно поэтому мы остановились на подсчетах звезд, произведенных в Избранных Площадках. Что же касается подсчетов, выполненных в областях Ориона-Близнецов и Возничего, привлеченных для устранения неуверенности, возникающей вследствие вводимых в $N(m)$ поправок (из-за растянутости по l сравниваемых площадей), то следует сказать, что эти области по своим данным являются довольно характерными для М.П. Наряду с наличием в М.П. областей с меньшей концентрацией темной материи имеется довольно много областей с большей концентрацией темной материи, чем рассмотренные нами области.

Помимо этого, считаем не лишним заметить, что обнаруженные Лавдовским, а также Кифером и Бакером крупные темные туманности лишь своими краями задевают области, в которых они производили подсчеты звезд. Поэтому поглощение в изученных областях можно считать умеренным и приписывать его суммарному эффекту имеющихся в этом направлении темных облаков, совокупность которых обуславливает интересующие нас остаточные флюктуации.

В последние годы в литературе появилось много работ, посвя-

щенных анализу отдельных областей М. П., основанных на звездных подсчетах, которыми можно воспользоваться для более уверенной проверки величин, характеризующих отклонение наблюдаемых флюктуаций в числах звезд от естественных. В этих работах обычно в анализируемой области на основании подсчетов звезд выделяются участки с почти одинаковыми $N(m)$ и приводятся для этих участков значения $N(m)$ на один квадратный градус.

Хотя и эти подсчеты не дают возможности подобрать в пределах одной и той же области большое количество площадок для сравнения, тем не менее по ним можно получать довольно уверенное представление о величине интересующих нас отклонений, так как имеющиеся области с подсчетами с небольшими перерывами заполняют галактический пояс, заключенный между долготами 0° и 180° .

На основании данных ряда исследователей в 11 областях неба нами были определены величины отклонения наблюдаемых флюктуаций в числах звезд от естественных флюктуаций. При этом было обращено внимание на то, чтобы в число сравниваемых между собой площадок данной области не вошли площадки, в которых поглощение заметно отличается от его среднего значения (см. табл. 2), выведенного для области данной группы.

Заметим, что протяжения по l областей, в которых определялись флюктуации, небольшие. Они находятся в пределах $10-25^\circ$, поэтому наблюдаемые числа звезд были исправлены только за эффект галактической концентрации (для приведения их к средней широте для каждой группы).

Эти поправки, введенные по таблицам ван Райна [9], были незначительны, так как наибольшие отклонения внутри площадок по b от их среднего значения доходят до $2^\circ.5$.

Данные для рассмотренных 11 групп приведены в таблице 2. Как видно из этой таблицы, полученные значения для $\delta_{\text{ост.}}^2$ в пределах одной и той же галактической зоны, мало отличаются друг от друга, а их средние значения не только не меньше соответствующих значений, полученных по Избранным Площадкам, а даже несколько больше.

Единственным поводом для сомнения здесь может служить то обстоятельство, что использованные подсчеты чисел звезд произведены для неравновеликих площадок и лишь потом пересчитаны на один квадратный градус.

Вследствие этого вес различных площадок должен быть различен, что может повлиять на величину определяемых флюктуаций. Но насколько значительно может быть это влияние—можно судить по данным V, VIII, X и XIII группам, для которых величины площадок известны. Приписывая числам звезд $N(m)$, отнесенным на один квадратный градус, вес, равный поверхности s , соответствующей им площадке, можно определить значения квадрата взвешенных относительных среднеквадратичных отклонений по легко получаемой формуле:

№ № групп	Созвездие, источник подсчетов звезд	Интервал изменения <i>b</i>	Интервал изменения <i>t</i>	Кол-ч. площа- док	Средн. погл.
V	Орел, [12]	-2°,5, +2°,5	13°, 18°	11	2°,5
VI	Кассиопея, [13]	-2,5, +2,5	81, 100	13	1,6
VII	Персей, [14]	-2,5, +2,5	102, 120	10	2,3
VIII	Возничий, [11]	-2,5, +2,5	120, 139	12	1,7
IX	Близнецы—Орион, [10]	-0,8, +2,9	158, 171	10	1,5
X	Орел, [12]	+7,5, +12,5	9, 30	13	1,2
XI	Кассиопея, [13]	-7,5, -12,5	76, 101	10	0,9
XII	Кассиопея—Цефей, [15]	+7,5, +12,5	77, 98	10	0,9
XIII	Возничий, [11]	+7,5, +12,5	117, 139	12	1,4
XIV	Кассиопея—Цефей, [15]	+17,5, +22,5	78, 93	6	0,9
XV	Кассиопея—Цефей, [15]	+25, +30	80, 92	7	0,7

Таблица 2

$\bar{b}$	$\sigma^2_{\text{ост.}}$			Среднее
	$m = 13$	$m = 14$	$m = 15$	
0°	0,067	0,077	0,126	0,090
0	0,069	0,072	0,099	0,080
0	0,099	0,095	0,097	0,097
0	0,096	0,100	0,097	0,098
0	0,069	0,094	0,104	0,089
+10	0,028	0,067	0,070	0,055
-10	0,076	0,070	0,064	0,070
+10	0,074	0,070	0,076	0,073
+10	0,078	0,088	0,102	0,089
+20	0,029	0,044	0,075	0,049
+27	0,036	0,047	0,054	0,044

$$\delta'^2 = \frac{\sum_i s_i \sum_i s_i N_i^2(m)}{[\sum_i s_i N_i(m)]^2} - \frac{\sum_i s_i}{\sum_i s_i N_i(m)} - 1. \quad (3)$$

Определенные таким путем флюктуации будут примерно соответствовать такому случаю, когда сравниваемые площадки сплошным образом покрывают изучаемую область. В этом случае уже полностью отпадает вопрос о влиянии как избирательности сравниваемых площадок, так и отдаленности их друг от друга. Для сопоставления результатов в таблице 3 приведены значения $\delta^2_{\text{ост.}}$ из таблицы 2 и значения $\delta'^2_{\text{ост.}}$, вычисленные по формуле (3) для V, VIII, X и XIII групп.

Таблица 3

№№ групп		m			
		13	14	15	Средн.
V	$\delta^2_{\text{ост.}}$	0,067	0,077	0,126	0,090
	$\delta'^2_{\text{ост.}}$	0,057	0,093	0,144	0,100
VIII	$\delta^2_{\text{ост.}}$	0,096	0,100	0,097	0,098
	$\delta'^2_{\text{ост.}}$	0,122	0,118	0,116	0,119
X	$\delta^2_{\text{ост.}}$	0,028	0,067	0,070	0,055
	$\delta'^2_{\text{ост.}}$	0,021	0,055	0,065	0,047
XIII	$\delta^2_{\text{ост.}}$	0,078	0,088	0,102	0,089
	$\delta'^2_{\text{ост.}}$	0,055	0,063	0,069	0,062

Как видно из этих данных, введение поправок не приводит к большим изменениям $\delta^2_{\text{ост.}}$. В двух случаях (гр. V и VIII) значения относительных среднеквадратичных флюктуаций несколько увеличились, а в двух случаях (гр. X и XIII), наоборот, убавились. Причем эти изменения находятся в пределах изменений, наблюдающихся у групп одной и той же зоны.

Таким образом, с уверенностью можно сказать, что анализ подсчетов звезд, произведенных в 11 областях М.П., полностью подтверждает сделанные ранее выводы как о возрастании остаточных флюктуаций по мере приближения к плоскости Галактики, так и о порядке величин, характеризующих отклонение наблюдаемых флюктуаций в видимом распределении звезд от естественных случайных флюктуаций.

3. Перейдем теперь к рассмотрению новых данных Миллера, которые привели его к заключению о незначительном отклонении наблюдаемых флюктуаций в числах звезд от естественных.

Миллер рассмотрел три примера. Первый из них относится к подсчетам звезд, произведенным им в 9 небольших областях созвездия Пегаса при $b \sim 30^\circ$, имеющих поверхность примерно по 3 квадратных градуса.

Каждая из упомянутых областей Миллером была разделена в

среднем на 50 частей, сравнением которых определились значения остаточных флюктуаций.

В среднем по 9 областям у Миллера получилось:

$$\delta^2_{\text{ост.}} = 0,0022 \pm 0,0008 \text{ (с. о.)}$$

для звезд ярче $17^m.3-17^m.4$.

Значение это более чем на порядок ниже определенного нами значения для той же зоны (см. табл. 1).

Следует заметить, что полученные нами значения $\delta^2_{\text{ост.}}$ для различных зон представляют собой как бы средние. Поэтому отклонения от них безусловно будут существовать. В частности, при незначительном поглощении эти отклонения будут заметны, так как в этом случае значение $\delta^2_{\text{ост.}}$ будет незначительным.

Но полученное Миллером низкое значение для $\delta^2_{\text{ост.}}$ в области Пегаса объясняется не только небольшой величиной поглощения. Дело в том, что поглощающие облака, вызывающие флюктуации в числах звезд, имеют некоторую протяженность, поэтому числа звезд до какой-нибудь определенной величины $N(m)$ в двух соседних участках неба не могут быть независимыми. Между соседними участками должна существовать определенная корреляция, величина которой зависит от ряда причин, но в первую очередь от протяженности облаков и от их среднего числа на единицу длины (по лучу зрения), а также от величины площади, занимаемой ими на небе.

Ясно поэтому, что при определении остаточных флюктуаций, обусловливаемых темными облаками, нельзя пренебречь корреляционными связями. Но поскольку учет их связан с большими трудностями, то целесообразно выбор сравниваемых площадок производить так, чтобы можно было их считать независимыми друг от друга.

Миллер не принимал во внимание корреляционные связи, хотя ими нельзя пренебречь при выбранной им методике определения флюктуаций, когда сравниваемые площадки ни в коем случае нельзя считать независимыми.

В самом деле, как известно, полутолщина поглощающего слоя Галактики порядка 100 парсеков, а поперечник поглощающих облаков (совокупность которых и обуславливает этот слой) не менее 5—6 парсеков, поэтому даже наиболее удаленные облака в рассматриваемой зоне галактических широт -30° в проекции на небо будут иметь угловые диаметры порядка 2° , в то время, как наибольшие протяжения областей, внутри которых Миллер определил флюктуации, порядка 3° . Ясно, что лишь небольшая доля сравниваемых в этом случае площадок, расположенных на краях рассматриваемой области, могут быть независимыми. Поскольку влияние поглощающих облаков для значительного большинства сравниваемых площадок будет почти одинаковым, то наблюдаемые флюктуации не могут заметно отклониться от естественных.

Сказанное в еще большей степени относится к третьему приме-

ру Миллера, т. е. к флюктуациям, выведенным по подсчетам, произведенным в Избранных Площадках. В этом случае он, выбрав ряд Избранных Площадок при $b \sim \pm 10^\circ$, определил в каждой из них остаточные флюктуации на основании подсчитанных чисел звезд до предельной величины в Маунт-Вильсоновском каталоге фотографических величин. При этом каждая Избранная Площадка с поверхностью $15' \times 15'$ была разделена на 15 частей. На широте 10° средний угловой диаметр наиболее удаленных темных облаков будет больше размеров Избранных Площадок, в которых определялись флюктуации. Поэтому даже наиболее удаленные друг от друга сравниваемые площадки в этом случае не могут считаться независимыми в смысле влияния межзвездного поглощения.

Второй пример, разобранный Миллером, относится к анализу произведенных им подсчетов звезд на снимках в обычных фотографических лучах и красных лучах области северного полюса Мира ($b \sim 28^\circ$). В этом случае методика определения флюктуаций почти не отличается от первого примера, однако полученное здесь значение

$$\bar{\delta}_{\text{ост.}} = 0,0155 \pm 0,0057 \text{ (с. о.)},$$

определенное по данным снимка, полученного в обычных фотографических лучах, заметно больше приведенного выше значения, полученного в области Пегаса. Оно лишь в два раза меньше даваемого нами значения для этой зоны. Можно не сомневаться, что реальное значение $\bar{\delta}_{\text{ост.}}$ в области северного полюса Мира заметно больше значения, полученного Миллером, так как заметная часть сравненных Миллером площадок не могут быть независимыми друг от друга — обстоятельство, которое, безусловно, снижает значение флюктуаций.

Результат же сравнения Миллером флюктуаций чисел звезд, определенных на снимках, произведенных в красных и обычных фотографических лучах, может служить дополнительным доказательством того, что основным фактором, обуславливающим наблюдаемые флюктуации в числах сравнительно слабых звезд, является межзвездная поглощающая среда.

Резюмируя, можно сказать, что возражения Миллера против использованного нами материала — подсчетов звезд, произведенных в Избранных Площадках и в отдельных больших участках М. П. и против метода их анализа, несостоятельны. Приведенный нами дополнительный материал (табл. 2) убедительно подтверждает реальность наших выводов и численных значений величин, характеризующих наблюдаемые флюктуации в числах звезд и их отклонение от естественных случайных флюктуаций.

Из трех разобранных Миллером примеров один (область северного полюса Мира) находится в неплохом согласии с нашими результатами, а остальные два (область в Пегасе и Избранные Площадки), которые Миллера привели к заключению о незначительном расхождении наблюдаемых и естественных флюктуаций, нельзя считать

сколько-нибудь заслуживающими внимания, так как примененная им методика при определении остаточных флюктуаций не обеспечивает независимости сравниваемых между собой площадок и не учитывает влияния их корреляционных связей, безусловно снижающих величину флюктуаций.

Бюраканская астрофизическая
обсерватория АН Армянской ССР

Поступило 21 IV 1954

ЛИТЕРАТУРА

1. Амбарцумян В. А., Горделадзе Ш. Г. Бюлл. Абаст. обсер., № 2, 1938.
2. Амбарцумян В. А. Бюлл. Абаст. обсер., № 4, 1940.
3. Маркарян Б. Е. ДАН Армянской ССР, 5, 1944.
4. Маркарян Б. Е. Сообщ. Бюр. обсер., 1, 1946.
5. Chandrasekar S., Munch G. Ap. J., 112, 380, 1950.
6. Chandrasekar S., Münch G. Ap. J., 113, 150, 1951.
7. Амбарцумян В. А. Сооб. Бюр. обсер., VI, 1951.
8. Miller F. A. J., 7, 57, 152, 1952.
9. van Rhijn P. J. Gron. Publ., № 43, 1929.
10. Лавдовский В. В. Изв. Пулск. обсер., XVI, 4, 1941.
11. Kiefer L., Baker R. Ap. J., 94, 482, 1941.
12. Calvert R. Ap. J., 114, 123, 1951.
13. Baker R., Nantkes E. Ap. J., 99, 125, 1944.
14. Heeschen D. Ap. J., 114, 132, 1951.
15. Nantkes E., Baker R. Ap. J., 107, 113, 1948.

Բ. Ե. Մարգարյան

ԱՍՏՂԵՐԻ ՏԵՍԱՆԵԼԻ ԲԱՇԽՄԱՆ ՄԵՋ ԵՂԱԾ ՖԼԵՈՒԿՏՈՒԱՑԻԱՆԵՐԻ ՀԱՐՑԻ ՇՈՒՐՁԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Աստղերի տեսանելի բաշխման մեջ գոյություն ունեն զգալի անկանոսություններ, որոնք պայմանավորված են Դալանկտիկայի կառուցվածքի առանձնահատկություններով և համեմատաբար մոտ ու խոշոր մութ միգամածություններով։ Սակայն, բացի այս անկանոսություններից, աստղերի բաշխման մեջ նկատվում են զգալի ֆլուկտուացիաներ և երկրների ոչ առանձնապես մեծ չափեր ունեցող տիրույթների սահմաններում։ Այս ֆլուկտուացիաների հետազոտությունը զեռեա 1943—44 թվականներին մեզ բերեց այն եզրակացության, որ դրանք պայմանավորված են միջաստղային կլանող նյութի կտորված ընդլայնումով։ Այս առթիվ մշակված տեսությունը [3, 4] հետազոտում զարգացրին և ընդհանրացրին Չանդրասեկարն ու Մյունխը [5, 6], որոնք իրենց աշխատություններում լայնորեն օգտվել են մեր հետազոտության արդյունքներից՝ կլանող ամպերի խառակաբևեռականների որոշման համար։

Պետք է նշել, որ Ծիր կաթնի պայծառություններին ու աստղերի

թվերի մեջ եղած ֆլյուկտուացիաների համեմատաբար լրիվ տեսութիւնը տվել է Վ. Հ. Համբարձումյանը [7], որի աշխատութիւններով փաստորեն հիմնավորվել է աստղաբաշխութեան այս բաժինը:

Վերջին ժամանակներս Միլլերը հրատարակեց մի հոդված [8], որտեղ նա առարկում է մեր հետազոտութեան որոշ արդյունքների դեմ: Նա հանդուս է այն եզրակացութեան, որ աստղերի բաշխման մեջ գիտփող ֆլյուկտուացիաների շեղումը բնական ֆլյուկտուացիաներից՝ աննշան է: Այս պատճառով նա դնում է այդ շեղումներով որոշված կլանող ամպերի խառակտերիստիկաների վերանայման հարցը:

Հանգամանորեն ծանոթանալով Միլլերի աշխատութեանը, մենք եկանք այն եզրակացութեան, որ նրա առարկութիւններն անհիմն են, իսկ հիշյալ եզրակացութիւնն արդյունք է նրա հետազոտութեան ոչ ճիշտ մեթոդի՝ կորրելյացիոն կապերի անտեսման: Նկատի ունենալով խնդրի կարևորութիւնը, մենք կատարել ենք աստղերի թվերի մեջ եղած ֆլյուկտուացիաների լրացուցիչ հետազոտութիւն: Ծիր կաթնի 11 բնդարձակ տիրույթների համար: Այս հետազոտութիւնը լիովին հաստատում է նախկինում մեր ստացած եզրակացութիւններն ու արդյունքները:

АСТРОФИЗИКА

Л. В. Мирзоян

О космическом поглощении света*

Несмотря на большое разнообразие размеров, оптических свойств и формы частиц, составляющих межзвездное поглощающее вещество, закон космического поглощения (закон изменения коэффициента ослабления света с длиной волны), представляющий общую картину поглощения, одинаков [1, 2] для всех направлений в Галактике в достаточно большом диапазоне длин волн. Это, повидимому, результат того, что средние размеры частиц, ответственных за избирательное поглощение в межзвездном пространстве, в среднем одинаковы для всех направлений.

С другой стороны, теоретические расчеты распределения космической пыли в Галактике указывают [3] на то, что мелкие частицы должны быть больше сконцентрированы в галактической плоскости, чем крупные. Согласно работе Е. К. Харадзе [4], наоборот, средний диаметр частиц в высоких галактических широтах на 10—15% меньше их среднего диаметра около галактической плоскости.

Настоящая работа посвящена рассмотрению вопроса о пространственном распределении частиц поглощающей материи в связи с законом космического поглощения.

1. Вид закона поглощения обусловлен средними размерами частиц, ответственных за поглощение. Поэтому, если средние размеры частиц существенно изменяются с галактической широтой (точнее, с удалением от галактической плоскости), то при этом следует ожидать также изменение закона космического поглощения.

Разность видимых величин двух звезд одинаковой температуры (одинакового спектрального класса) для данной длины волны равна:

$$\Delta m_{\lambda} = C f(\lambda) + R, \quad (1.1)$$

где C с точностью до постоянного множителя совпадает с разностью однородных толщин избирательно-поглощающих слоев в направлениях этих звезд ($C \approx 1,09 \Delta N$), $f(\lambda)$ — избирательная часть закона поглощения, а постоянная R зависит от светимостей и фотометрических расстояний указанных звезд:

* Результаты работы доложены на заседании Отделения физико-математических наук Академии наук Армянской ССР 23 ноября 1953 года.

$$R = 5 \Delta \lg r + \Delta M. \quad (1.2)$$

Здесь $\Delta \lg r$ и ΔM — разности в $\lg r$ и M рассматриваемых звезд, причем r — фотометрическое расстояние, которое включает в себя не подающееся определению нейтральное поглощение, а M — абсолютная звездная величина.

Условимся считать, что для данной области длин волн нейтральное поглощение — эта та часть общего поглощения, которая не изменяется с длиной волны. На вопросе о существовании нейтрального поглощения мы подробно остановимся ниже.

Пусть для двух каких-либо направлений в Галактике закон межзвездного поглощения один и тот же в его избирательной части. Тогда, написав для них выражение (1.1) и исключая $f(\lambda)$, получим:

$$\Delta m_{\lambda 1} = \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} \Delta m_{\lambda 2} + \left(R_1 - \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} R_2 \right). \quad (1.3)$$

Индексы 1 и 2 относятся соответственно указанным направлениям. Согласно соотношению (1.3) зависимость между $\Delta m_{\lambda 1}$ и $\Delta m_{\lambda 2}$ в рассматриваемом случае прямолнейная. Очевидна справедливость обратного утверждения: прямолнейность зависимости между $\Delta m_{\lambda 1}$ и $\Delta m_{\lambda 2}$ для двух направлений указывает на идентичность закона поглощения $f(\lambda)$ для них.

Этот критерий использован ниже для изучения характера изменения $f(\lambda)$ с удалением от галактической плоскости. Аналогичное сравнение закона поглощения для трех направлений в созвездиях Лебедя, Персея и Стрельца, выполненное Л. Диван [5], показало идентичность закона поглощения для них в области $\lambda = 3300-6300 \text{ \AA}$.

Указания на изменение $f(\lambda)$ с галактической широтой имеются в работах О. А. Мельникова [3] и Вилькенса [6], основанных на исследовании планетарных туманностей и шаровых звездных скоплений.

Для проверки этого результата нами использованы данные Дж. Стеббинса и А. Уитфорда [7] по шестичетной фотометрии О и В звезд. Выбрана 51 звезда с заметным покраснением межзвездного происхождения, входящие в список Д. Дюка [8]. Такой выбор вызван стремлением иметь дело с однородным материалом относительно спектральной классификации, светимостей и фотометрических расстояний звезд.

Материал этот был разбит на четыре группы по z -координате: $z = r \sin b + z_\odot$, где r — попрежнему фотометрическое расстояние звезды, b — ее галактическая широта, а $z_\odot$ — соответствующая координата Солнца*.

Данные об этих группах представлены в таблице 1: $|z|$ — расстояние от галактической плоскости, n — число звезд в группе, $\bar{z}$ — сред-

* Принято $z_\odot = 20 \text{ парсек}$ [3, 9].

нее значение $[z]$ для группы, $\bar{E}$ —средний электрофотометрический избыток цвета, $\bar{r}$ —среднее фотометрическое расстояние группы по [8]*.

Все расстояния выражены в парсеках.

Таблица 1

Группа	z		$\bar{z}$	$\bar{E}$	$\bar{r}$
I	0—50	22	30	0,30	897
II	50—100	18	70	0,25	714
III	100—150	5	120	0,16	982
IV	>150	6	272	0,08	1308

Разности Δm_i для всех звезд вычислены по отношению к звездам соответствующих спектральных классов с минимальным избытком цвета. Данные о звездах сравнения табулированы ниже (табл. 2). Испол-

Таблица 2

ИД	Звезда	Спектр	M	r	E	$[z]$
14633	—	O9	$-4,5^m$	2300	-0,03	670
36186	β Ori	O9,5 III	-5,2	320	0,04	70
705021	β Cep	B1 IV	-3,8	250	0,00	82
214933	12 Lac	B2 III	-4,0	600	0,04	148
120315	γ UMa	B3 V	-2,0	60	-0,02	75
247394	ϵ Her	B5 IV	-2,2	165	-0,03	135

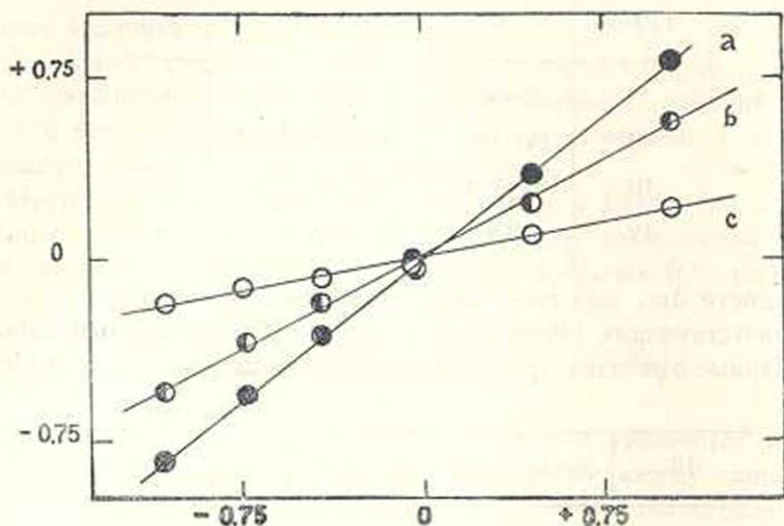
зована спектральная классификация В. Моргана и др. по [8]. Полученные указанным путем разности Δm_i затем усреднены для каждой группы. Результаты усреднения представлены в таблице 3, где заглавными буквами латинского алфавита обозначены цвета, а цифры под этими буквами указывают эффективные длины волн соответствующих цветов в Å [7].

Таблица 3

Группа	U 3530	V 4220	R 4880	G 5700	R 7190	I 10 000
I	1,07	0,73	0,42	0,03	-0,46	-1,08
II	0,84	0,56	0,32	0,03	-0,35	-0,83
III	0,55	0,35	0,19	0,00	-0,22	-0,57
IV	0,19	0,11	0,08	0,00	-0,08	-0,21

* В работе [8] даны избытки цвета по Стеббинсу и др. с соответствующими поправками за нормальные показатели цвета.

Зависимость между $\Delta m_{\lambda 1}$ и $\Delta m_{\lambda 2}$ на основе данных таблицы 3 для трех пар групп—I—II, I—III и I—IV—графически представлена на фигуре 1. Прямые проведены в результате решения по способу наименьших квадратов.



Фиг. 1. Зависимость (1,3) по наблюдениям (табл. 3) для групп: I—II (a), I—III (b) и I—IV (c).

График этой зависимости наглядно иллюстрирует ее прямолинейный характер для всех пар групп. Следовательно, согласно статистике использованных данных, *закон межзвездного поглощения в среднем одинаков для разных расстояний от галактической плоскости*. Этот вывод справедлив для расстояний, по крайней мере, до 250 парсеков. Но в слое толщиной 500 парсеков около галактической плоскости сосредоточена основная масса поглощающей материи. Поэтому следует считать, что полученный вывод справедлив вообще для всех расстояний от плоскости Галактики.

Указанный результат не исключает возможность отклонения от среднего закона для отдельных направлений [7, 10]. Между прочим, работа Л. Диван [11] ставит под сомнение реальность отклонения, обнаруженного в работах [7, 10].

Вывод об идентичности закона поглощения для разных расстояний от галактической плоскости трудно согласовать с упомянутым выводом О. А. Мельникова [3] и Вилькенса [5] о существенном изменении этого закона с удалением от плоскости Галактики. Фигура 1 указывает на отсутствие каких-либо систематических отклонений от прямой в рассматриваемой зависимости для исследуемых пар групп, т. е. на отсутствие намеков об изменении закона поглощения с z -координатой. Этот результат, повидимому, обусловлен тем, что различие в средних размерах избирательно-поглощающих частиц в разных плоско-параллельных слоях Галактики так незначительно, что

оно не сказывается на характере избирательности поглощения света со стороны совокупности этих частиц.

Вместе с этим полученный результат показывает, что различия в средних размерах всех частиц для разных расстояний от галактической плоскости, если таковые действительно существуют, должны быть обусловлены различиями в отношении чисел частиц избирательно и нейтрально-поглощающих свет для указанных расстояний.

2. Угловой коэффициент $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}$ и свободный член $R_1 - \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} R_2$ в зависимости (1.3) можно легко вычислить: отношение $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}$ фактически есть отношение средних избытков цвета двух групп*, к которым относятся индексы 1 и 2, а свободный член $R_1 - \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} R_2$ является известной функцией (1.2) средних фотометрических расстояний и светимостей указанных групп.

С другой стороны, как угловой коэффициент, так и свободный член легко определить из зависимости (1.3) на основе данных таблицы 3. Сопоставление полученных двумя упомянутыми способами значений может дать возможность судить относительно законности нашего вывода о прямолинейности зависимости между Δm_1 и Δm_2 для рассматриваемых пар групп.

Для определения $R_1 - \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} R_2$ из зависимости (1.3) данные таблицы 3, основанные на определениях Стеббинса и Уитфорда, несколько видоизменены. В работе этих авторов измерения всех звезд приведены к одинаковому нуль-пункту приравниванием результатов измерений при желтом цвете: $\lambda = 5700 \text{ \AA}$. Тем самым из результатов измерений исключена слагающая, обусловленная различием в фотометрических расстояниях и светимостях звезд. Введение этой слагающей, необходимой для определения свободного члена в зависимости (1.3), выполнено нами на основе известных визуальных величин использованных звезд по Гарвардской фотометрии**. Для них $\lambda = 5290 \text{ \AA}$ [12] и в первом приближении было принято: $m_v = 0,5 (B+G)$ (см. табл. 3). С помощью последнего равенства фактически снова было восстановлено видимое абсолютное распределение энергии в непрерывном спектре использованных звезд. На основе восстановленных таким путем звездных величин были составлены системы шести уравнений (по одному для каждого цвета) вида (1.3) для следующих пар групп: I—II, I—III и I—IV. Решением этих систем способом наименьших квадратов определены величины $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}$ и $R_1 - \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} R_2$ для указанных пар

* Это справедливо в случае, когда звезды сравнения не подвержены покраснению. В противном случае следует учитывать это покраснение.

** Очевидно, что это не изменит наклон прямых на фигуре I, т. е. $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}$.

групп. Результаты решений приведены во втором и четвертом столбцах таблицы 4. В третьем и пятом столбцах даны те же величины, вычисленные по известным избыткам цвета $\bar{E}$ (с поправкой за E звезд сравнения), фотометрическим расстояниям и светимостям с помощью соотношения (1.2).

Таблица 4

Пара групп	$\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}$		$2R_1 - \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} R_2$	
	из (1.3)		из (1.3)	
I—II	1,30	1,26	0,35	0,25
I—III	1,96	1,94	-0,09	-0,15
I—IV	5,53	5,07	7,02	6,87

Согласие между определениями двумя различными способами величин $\frac{\Delta H_1}{\Delta H_2}$ и $R_1 - \frac{\Delta H_1}{\Delta H_2} R_2$ следует считать удовлетворительным, чем и подтверждается законность полученного выше вывода об идентичности закона поглощения для разных расстояний от галактической плоскости.

3. Рассмотрим вопрос о существовании нейтрального поглощения света в связи с полученным выводом о неизменности закона поглощения.

Известно, что величина ослабления света в межзвездном пространстве убывает с возрастанием длины волны. Как долго продолжается это убывание — мы пока не знаем. Допустим, что с некоторого значения длины волны величина ослабления становится постоянной или почти постоянной. Условимся называть эту величину нейтральной составляющей общего поглощения или нейтральным поглощением.

Существует ли нейтральное поглощение в этом смысле в межзвездном пространстве? В то время, как многими авторами безоговорочно принимается [3, 4, 13 и т. д.] существование заметного нейтрального поглощения, существуют работы, указывающие на столь незначительное его влияние, что им можно свободно пренебречь [14, 15].

Совокупность частиц в данном направлении в Галактике при наличии нейтрального поглощения будет поглощать по определенному интегральному закону:

$$A(\lambda) = f(\lambda) + A_0. \quad (3.1)$$

В этом законе $f(\lambda)$ — его избирательная часть, а A_0 — нейтральная.

Общее поглощение A , как известно, определяется посредством избытка цвета ИЦ с помощью переходного множителя γ :

$$A = \gamma \text{ ИЦ}. \quad (3.2)$$

Из (3.1) и (3.2) имеем:

$$\gamma = \frac{A}{I_{\text{II}}} = \frac{f(\lambda_1) + \kappa A_0}{f(\lambda_1) - f(\lambda_2)}, \quad (3.3)$$

где κ — постоянный коэффициент ($\kappa = 1$ при пропорциональности нейтрального поглощения избирательному), а λ_1 и λ_2 — эффективные длины волн системы показателей цвета.

При отсутствии нейтрального поглощения вместо (3.3) имеем:

$$\gamma = \frac{f(\lambda_1)}{f(\lambda_1) - f(\lambda_2)}. \quad (3.4)$$

Таким образом, для переходного множителя γ имеем выражение (3.3) при существовании нейтрального поглощения и выражение (3.4) при его отсутствии.

Стеббинсом и Уитфордом [16] было обнаружено изменение (возрастание) γ с галактической широтой на основе изучения избытков цвета внегалактических туманностей и шаровых звездных скоплений. При отсутствии нейтрального поглощения, согласно (3.4), изменение γ должно указывать на изменение закона поглощения $f(\lambda)$ с галактической широтой. Однако, как показано выше, закон поглощения одинаков в плоско-параллельных слоях Галактики, расположенных, до расстояний, по крайней мере, 250 парсеков от галактической плоскости. Следовательно, $A_0 \neq 0$, т. е. изменение γ с галактической широтой, указывает на существование нейтрального поглощения в межзвездном пространстве, при этом для него следует отказаться от представления о плоско-параллельных слоях*.

В заключение следует указать, что в связи с затронутыми в настоящей работе вопросами значительный интерес представляет определение величины нейтрального поглощения на разных расстояниях от плоскости Галактики.

К сожалению, метод, предложенный недавно М. А. Вашакидзе [13], здесь неприменим. Это обусловлено тем, что его можно применить лишь к высоким галактическим широтам, при этом применение связано с трудностью учета реальных флуктуаций в числах внегалактических туманностей, которые в данном случае трудно отделить от флуктуаций в величине поглощения.

Бюраканская астрофизическая обсерватория
АН Армянской ССР

Поступило 21 IV 1954

* *Примечание:* О результате работы Дюфея [15] нам было известно из обстоятельного обзора Е. К. Харалде [4]. В недавно вышедшей книге Дюфея [17] приведены подробности этой работы. Вывод об отсутствии нейтрального поглощения получен на основе анализа формулы, аналогичной формуле (3.3) нашей работы в предположении неизменности $f(\lambda)$ и постоянства отношения $\frac{A}{I_{\text{II}}} = \gamma$. Между тем как работа Стеббинса и Уитфорда [16], так и работа Альтера [18], из которую имеется ссылка в книге Дюфея [17], указывают на изменение γ .

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Stebbins J., Whitford A. Ap. J. 98, 20, 1943.
2. Divan L. Ann d. Ap. 15, 237, 1952.
3. Мельников О. А. Труды ГАО, 64, 98, 104, 118, 1950.
4. Харадзе Е. К. Бюлл. Абаст. обс. 12, 366, 1952.
5. Divan L. CR, 235, 410, 1952.
6. Wilkens H. Mitteil. Sternw. Breslau, 4, 1, 1937.
7. Stebbins J., Whitford A. Ap. J. 102, 318, 1945.
8. Duke D. Ap. J. 113, 100, 1951.
9. Паренаго П. П. Курс звездной астрономии, 272, 1946.
10. Baade W., Minkowski R. Ap. J. 86, 119, 123, 1937.
11. Divan L., CR, 236, 2301, 1953.
12. Шаронов В. В. Курс астрофизики и звездной астрономии, 457, 1951.
13. Вашакидзе М. А. Астр. журн., 30, 143, 1953.
14. Greenstein J., Heyney L. Ap. J. 93, 327, 1941.
15. Dufay J. CR, 228, 1277, 1949.
16. Stebbins J., Whitford A. Ap. J. 86, 247, 1937.
17. Dufay J. Nebuleuses galactiques et matiere interstellaire, 242, Paris, 1954.
18. Alter G. Memoirs and observ. Czechoslovak astr. Soc., Prague, № 10, 1949.

Լ. Վ. Միրզոյան

ԼՈՒՅՍԻ ԿՈՍՄՈԼՈԳԱՆ ԿԼԱՆՄԱՆ ՄԱՍԻՆ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոգիածուժ քննարկված է միջաստղային կլանող նյութը կազմող մասնիկների տարածական բաշխման հարցը՝ կլանման օրենքի հնարավոր փոփոխությունների տեսակետից:

Ձերմ աստղերի ճառագայթման էլեկտրամագնիսական ճառագայթների արդյունքների հիման վրա ցույց է տրվում, որ կոսմիկական կլանման օրենքը, միջին իմաստով, նույնն է Գալակտիկայի հարթությանը զուգահեռ և նրանից տարբեր ճեղքվորությունների վրա գտնվող շերտերում: Այս եզրակացությունն ստացվում է տեսված մինչև 250 պարսեկ հեռավորություններ հեռու շերտերի համար: Քանի որ այդ շերտերում է կուտակվում միջաստղային կլանող նյութի հիմնական զանգվածը, ապա եզրակացությունը ճիշտ է ընդհանրապես բոլոր շերտերի համար:

Կլանման օրենքի նույնությունից բխում է, որ բնորակա՛ն կլանումը պայմանավորող մասնիկների միջին չափերը Գալակտիկայի տարբեր մասերում նույնն են:

Ստացված արդյունքը թույլ է տալիս բացատրել ընդհանուր կլանման և գոյնի ավելցուկի հարաբերության դիտվող փոփոխությունը՝ Գալակտիկայի հարթությունից հեռանալիս, որպես հետևանք լույսը չեղոք կլանող մասնիկների գոյությունը—միջաստղային տարածության մեջ:

ИНЖЕНЕРНАЯ СЕЙСМОЛОГИЯ

А. Г. Назаров

О новой сейсмической шкале

С 1 января 1953 г. введена в действие новая сейсмическая шкала ГОСТ 6249-52 взамен сейсмической шкалы ОСТ ВКС-4537*.

Согласно новому ГОСТ, балльность землетрясения устанавливается по величине максимального относительного смещения сферического упругого маятника сейсмометра X_0 (в мм) в соответствии с таблицей 1.

Маятник имеет период свободных колебаний $T=0,25$ сек. и логарифмический декремент затухания 0,50.

Таблица 1

Интенсивность землетрясения в баллах	Максимальное смещение сферического маятника X_0 (в мм)
6	от 1,1 до 2
7	2,1 до 4
8	4,1 до 8
9	8,1 до 16

При отсутствии данных сейсмометрических измерений интенсивность землетрясения рекомендуется определять по повреждениям построек и остаточным деформациям грунтов на дневной поверхности. Признаки эти сведены в таблицу 2.

Здания в этой таблице подразделены на 3 группы:

группа А—здания со стенами глинобитными, из кирпича-сырца, самана и т. п.;

группа Б—здания каменные;

группа В—здания деревянные.

Повреждения и разрушения частей зданий подразделены на четыре группы:

а) легкие повреждения—тонкие трещины в штукатурке, в кладке печей и т. п.;

б) значительные повреждения—трещины в штукатурке, откалы-

* Новая шкала составлена С. В. Медведевым [3].

6	7	8	9
Во многих зданиях легкие повреждения. В отдельных зданиях группы А и Б значительные повреждения. В редких случаях (при сырых грунтах) поперечные тонкие трещины на дорогах.	В большинстве зданий группы А значительные повреждения и в отдельных — разрушения. В большинстве зданий группы Б легкие повреждения и во многих — значительные повреждения. Во многих зданиях группы В легкие повреждения и в отдельных — значительные повреждения. На крутых откосах насыпей дорог редкие оползни. В отдельных случаях поперечные трещины на дорогах. В единичных случаях нарушение стыков трубопроводов. Повреждение каменных оград.	Во многих зданиях группы А значительные разрушения и в отдельных — обвалы. В большинстве зданий группы Б значительные повреждения и в отдельных — разрушения. В большинстве зданий группы В легкие повреждения и во многих — значительные повреждения. Небольшие оползни на крутых откосах выемок и насыпей дорог. Отдельные случаи разрыва стыков трубопроводов. Памятники и статуи сдвигаются или опрокидываются. Каменные ограды обрушиваются.	Во многих зданиях группы А обвалы. Во многих зданиях группы Б разрушения и в отдельных — обвалы. Во многих зданиях группы В значительные повреждения и в отдельных — разрушения. В некоторых случаях повреждения насыпей дорог и в отдельных случаях — искривление железнодорожных рельсов. Большое количество трещин на дорогах. Многочисленные разрывы и повреждения трубопроводов. Памятники и статуи опрокидываются. Большая часть труб и башен разрушается.
Трещины в сырых грунтах шириной до 1 см. В горных районах единичные случаи оползней и осыпания грунтов. Небольшие изменения дебита источников и уровня воды в колодцах.	Остаточные деформации в грунтах и изменение режима грунтовых и наземных вод. Тонкие трещины в сухих грунтах. Большое количество трещин в сырых грунтах. Отдельные случаи оползней на берегах рек. В горных районах небольшие оползни и осыпания грунтов. Возможны горные обвалы. В отдельных случаях мутнеет вода в водоемах и реках. Изменяется дебит источников и уровень грунтовых вод. В некоторых случаях возникают новые или пропадают существующие источники воды.	Трещины в грунтах достигают несколько сантиметров. Много трещин на склонах гор и в сырых грунтах. Большие осыпания, оползни и горные обвалы. Вода в водоемах становится мутной. Возникают новые водоемы. Возникают новые или пропадают существующие источники воды. Часто меняется дебит источников и уровень воды в колодцах.	Трещины в грунтах до 10 см шириной, а по склонам и берегам рек — свыше 10 см. Большое количество тонких трещин в грунтах. Горные обвалы. Много оползней и осыпания грунтов. Небольшие грязевые извержения. Большие волнения в водоемах. Часто возникают новые или пропадают существующие источники воды.

вание кусков штукатурки, тонкие трещины в стенах, повреждение дымовых труб отопительных печей и т. п.;

в) разрушения—большие трещины в стенах, расслоение каменной кладки, обрушение отдельных участков стен, падение карнизов и парапетов, обвалы штукатурки, падение дымовых труб отопительных печей и т. п.;

г) обвалы—полное или частичное обрушение стен, перекрытий и т. п.

Основным преимуществом этой шкалы перед предыдущей является четкое подразделение обследуемых зданий, а также их повреждений на различные группы, что должно способствовать и более четкой систематизации последствий разрушительных землетрясений, являющейся важным фактором в деле оценки силы землетрясения.

Однако эта шкала имеет и ряд существенных недостатков, главнейшие из которых свойственны всем существующим шкалам.

Чтобы сейсмическая шкала была полноценной и пригодной для объективной характеристики силы землетрясения, она должна удовлетворять, по меньшей мере, следующим условиям:

1. Независимо от индивидуальных особенностей исследователей, применяющих сейсмическую шкалу, они должны получить одну и ту же балльность для одного и того же землетрясения;

2. Совокупность признаков балла должна быть независима от географического положения населенного пункта, где имело место разрушительное землетрясение;

3. Совокупность признаков балла должна быть независима от фактора времени;

4. Сейсмическая шкала должна давать четкие количественные показатели, необходимые для строительного дела.

Пока мы оставим в стороне разбор таблицы 1 и рассмотрим таблицу 2, с которой только и должны иметь дело в ближайшие годы, поскольку мы не располагаем инструментальными данными, отвечающими требованию таблицы 1.

Нетрудно убедиться, что рассматриваемая сейсмическая шкала не удовлетворяет первому условию. Признаки интенсивности землетрясения, изложенные в таблице 2, недостаточно четки и должны приводить к различным толкованиям. Действительно, что следует понимать под терминами, употребляемыми в этой таблице?—«большинство зданий», «многие здания» и «отдельные здания». Повидимому, под большинством зданий следует понимать количество зданий свыше 50%, т. е. под термином «большинство» надо понимать довольно внушительный диапазон изменения количества от 50 до 100%. Еще больше нечеткости в определении «многие здания» и «отдельные здания». Имеется произвол в толковании этих терминов. В частности, если землетрясению одинаковой интенсивности будут подвергнуты крупный и малый населенные пункты с однотипными зданиями в одинаковых процентных соотношениях, то в крупном населенном пункте повреж-

дены могут быть „многие“ здания данного типа, а в малом населенном пункте „отдельные“ здания того же типа.

Из таблицы 2 формально следует, что в малом населенном пункте землетрясение слабее, чем в крупном населенном пункте.

Для избежания этого следовало бы оценивать силу землетрясения в зависимости от процента поврежденных зданий.

Второй крупный недостаток таблицы 2 заключается в том, что при оценке силы землетрясения совершенно не учитывается качество зданий. Стало быть, молчаливо допускается, что вероятное распределение качественных характеристик зданий данного типа во всех населенных пунктах одно и то же, что, конечно, не имеет места в действительности.

Между тем хорошо известно, что разрушения построек в значительной мере зависят от качества их исполнения. Нередки случаи, когда лишь одно качественное выполнение работ спасало здание, при землетрясении, от существенных повреждений.

Не меньшее значение имеет степень изношенности здания, вызванная предыдущими сейсмическими толчками и вообще его амортизация.

Наконец, при основании зданий на сильно деформируемых грунтах имеют место неравномерные деформации, вызывающие в стенах начальные напряжения, влекущие за собою вскрытие трещин уже при относительно слабых землетрясениях, что может привести, согласно таблице 2, к преувеличенному представлению о силе землетрясения [7].

Третий крупный дефект таблицы 2 заключается в том, что она составлена по признакам повреждений несейсмостойких зданий.

Сейсмические районы СССР расположены в полосе вдоль ее южной границы, где интенсивное строительство началось после установления Советской власти, причем в основном уже около 20 лет принимались во внимание правила сейсмостойкого строительства. Следовательно, рассматриваемая сейсмическая шкала ориентируется лишь на поведение старых зданий, совершенно не характерных для нашего времени. Она оценивает силу землетрясения по старым постройкам и на основании этого мы должны будем выносить суждение о сопротивляемости сейсмическим воздействиям современных сооружений и давать практические рекомендации!

Второе условие, касающееся требования о независимости совокупности признаков балла от географического положения населенного пункта, также не соблюдается новой сейсмической шкалой, так как не учитываются специфические особенности в условиях строительства в различных пунктах СССР.

В Средней Азии одни условия для строительства, в Закавказье — другие. Здесь существенное значение имеют различия в употребляемых строительных материалах, в конструктивных решениях, в производстве работ, в условиях твердения вяжущего, зависящего от климатических параметров, и прочее.

Все эти факторы могут привести к тому, что землетрясения одинаковой интенсивности окажутся отнесенными, на основании видимых проявлений их действий, к землетрясениям различной интенсивности.

Третье условие о независимости совокупности признаков балла землетрясения от фактора времени также совершенно не выполняется.

Мы указывали на то, что признаки силы землетрясения даются на основе анализа повреждений несейсмостойких зданий, т. е. с уже устаревших позиций.

За последние 20 лет соблюдение антисейсмических мероприятий на территории СССР практически стало обязательным. Имеет место также, со временем, усовершенствование конструкций, улучшение качества возведения построек, которое совершается на наших глазах и которое также не учитывается новой сейсмической шкалой.

В результате, чем позже произойдет землетрясение, тем большей должна быть его интенсивность, чтобы вызвать те же самые повреждения.

Четвертое условие о необходимости получения четких количественных показателей, необходимых для строительного дела, не может быть выполнено по данным таблицы 2. По этому вопросу следует обратиться к таблице 1.

На основе проведенного анализа приходим к заключению, что характеристика силы землетрясения на основании таблицы 2 получается расплывчатой и нечеткой.

Следует подчеркнуть, что всем существующим сейсмическим шкалам присущи недостатки рассматриваемой новой сейсмической шкалы.

Остановимся на этом вопросе.

Основным методом исследования теории сейсмостойкости сооружений является полевое обследование последствий разрушительных землетрясений. Методы аналитического и лабораторного исследований вопросов сейсмостойкости сооружений являются пока подсобными, вспомогательными методами. Крупным дефектом в существующих приемах обследования является полное отсутствие инструментальных наблюдений с инженерной точки зрения за разрушительными землетрясениями и их последствиями. Поэтому материалы обследований носят, в основном, качественный характер. Положение это усугубляется тем, что все существующие сейсмические шкалы, в том числе, как было установлено, и шкала, приведенная в таблице 2, характеризуют балльность разрушительных землетрясений в основном по повреждениям зданий*. Поэтому в существующем методе обследования последствий землетрясений, чем далее, тем более выпукло проявляется следующее противоречие, заложенное в его основе. Это противоречие заключается в том, что исследователями на здания в сейсмических районах одновременно накладываются две противоположные задачи: *здания должны играть роль приборов, правда, весьма грубых и неточных, но все же приборов, фиксирующих силу землетрясения согласно сейсмической*

* См. по этому поводу работу В. А. Быховского [1].

шкале и, одновременно, здания должны являться объектами исследования, поскольку надо изучить их поведение при том же самом землетрясении.

Короче, при существующем положении вещей, здания одновременно являются и инструментами и объектами исследования.

Строго говоря, существующие сейсмические шкалы, в части характеристики повреждения зданий, являются, по существу, не сейсмическими шкалами, которые дают оценку интенсивности землетрясений в баллах, а являются шкалами, дающими оценку повреждения зданий в баллах.

Сейсмические шкалы дают скорее не балльность интенсивности землетрясения, а балльность интенсивности повреждений зданий.

Для организаций, имеющих отношение к разрушительным последствиям землетрясений, такая подмена функции сейсмической шкалы является даже удобной, так как их скорее интересуют размеры бедствия, постигшего потрясенный район, и оценка его в баллах дает определенные представления, необходимые для проведения мероприятий в помощь населению. С этой точки зрения, весьма возможно, могло бы иметь практическое значение построение специальной шкалы интенсивности повреждения зданий и сооружений при землетрясении.

Ясно также, что для инженера-антисейсмика важна не только характеристика повреждений, но весьма необходимо знание и интенсивности землетрясения, определенной *не на основании анализа повреждений зданий*, а на основе объективных показаний специальным образом сконструированных и размещенных приборов *для анализа повреждений зданий*. В частности, нет прямой пропорциональности между интенсивностью землетрясений и интенсивностью повреждения зданий. Более того, как указывалось выше, с течением времени качество построек все улучшается и, стало быть, нужны все большие силы землетрясений для их повреждения.

Несмотря на это коренное противоречие, лежащее в основе всех сейсмических шкал, несмотря и на ряд других недостатков, на которых здесь не останавливаемся, существующие методы обследования позволили создать такой серьезный документ, как ПСП-101-51 (Положение по строительству в сейсмических районах). Но не подлежит также сомнению, что дальнейшее серьезное развитие теории и практики сейсмостойкого строительства возможно лишь на основе инструментальной фиксации силы землетрясения с инженерной точки зрения [4].

Новая сейсмическая шкала ГОСТ 6249-52 выгодно отличается от всех других шкал тем, что в ней сделана первая попытка прямого определения балльности землетрясения на основе показаний сейсмометра. В этой шкале прямо указывается, что балльность землетрясений должна быть определена по максимальному относительному отклонению упругого сферического маятника с периодом свободных

колебаний 0,25 сек. и с логарифмическим декрементом затухания 0,5 (таблица 1)*.

Таблице же 2, которую мы рассматривали выше и подвергали критике, придается вспомогательное значение на тот отрезок времени, пока не будут организованы сейсмометрические наблюдения.

Остановимся теперь на содержании таблицы 1, характеризующей силу землетрясения на основе показаний сейсмометра и, которая, согласно замыслу, должна вытеснить в будущем таблицу 2.

Первое, что бросается в глаза, это увеличение максимального значения отклонения маятника X_0 в геометрической прогрессии, при знаменателе прогрессии, равном 2.

Известно, что примерно такое же соотношение имеет место для максимальных значений сейсмических ускорений, принятых в шкале Меркалли—Канкани и вошедших также в сейсмическую шкалу ОСТ-4537 (ср. таблицы 1 и 3).

Таблица 3

Интенсивность зем- летрясения в баллах	Максимальное сейсми- ческое ускорение в мм/сек ²
6	50—100
7	100—250
8	250—500
9	500—1000

Учитывая, что деформация упругого маятника подчинена закону Гука, его максимальные отклонения должны быть пропорциональны действующим на него силам инерции.

Следовательно, рассматриваемые две шкалы, приведенные в таблицах 1 и 3, должны отличаться лишь постоянным множителем. К этому вопросу впоследствии вернемся.

Второе замечание касается неполноты характеристики параметров сферического упругого маятника. В тексте указано лишь, что период свободных колебаний маятника равен 0,25 сек., а логарифмический декремент затухания—0,5.

Можно указать на бесчисленное множество упругих сферических маятников, имеющих точно такие же периоды свободных колебаний и декремент затухания, но с различающимися максимальными относительными перемещениями X_0 при одном и том же землетрясении. Значение X_0 зависит от закона распределения масс вдоль оси стержня, т. е. от конструкции маятника. Об этом в ГОСТ-е не дается никаких указаний. Значение X_0 зависит также от характера демпфирующих сил, вызывающих уменьшение амплитуды колебаний маятни-

* Такая рекомендация дана, по нашему мнению, на основе чрезмерного упрощения нашего предложения о способе замера интенсивности землетрясения (см. [3] и [4]).

ка. Известно, что постоянство логарифмического декремента затуханий, в данном случае равного 0,5, далеко не полностью характеризует внутренние силы трения. Например, постоянство логарифмического декремента имеет место и при силах сопротивления, пропорциональных первой степени скорости и при наличии гистерезиса, дающего сдвиг между напряжениями и деформациями на постоянный фазовый угол [5, 6].

В ГОСТ-е не указано, какая конструкция демпфера, обеспечивающего постоянство логарифмического декремента, принята для сейсмометра.

Из статьи С. В. Медведева „Новая сейсмическая шкала“, которую, повидимому, можно рассматривать как пояснительную записку к ГОСТ 6249-52, мы находим некоторые дополнительные разъяснения [3].

Оказывается, что с достаточной точностью инертную массу маятника можем рассматривать как точечную массу, подвешенную к концу упругого стержня, весом же самого стержня практически можно пренебречь.

Из описания сейсмометра следует, что он снабжен магнитным демпфером, т. е. сила сопротивления, приложенная к инертной массе сейсмометра, пропорциональна первой степени скорости.

Данные о том, что масса сосредоточена, позволяют получить некоторое дополнительное представление о содержании таблицы 1.

Вычислим приведенные сейсмические ускорения, т. е. такие статически приложенные ускорения, которые дали бы максимальные смещения маятника, приведенные в таблице 1.

Для упругой системы с одной точечно-сосредоточенной массой период свободных колебаний T можно определить по следующей формуле

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\lambda_{ст}}{g}}$$

где $\lambda_{ст}$ — статическое смещение инертной массы по направлению колебаний под действием силы, равной весу инертной массы, а g — ускорение силы тяжести.

Из этой формулы можно определить величину $\lambda_{ст}$, поскольку T задано равным 0,25 сек.

$$\lambda_{ст} = \frac{gT^2}{4\pi^2} = \frac{9,81 \times 0,25^2}{4 \times 3,14^2} = 1,55 \text{ см} \approx 16 \text{ мм.}$$

Таким образом усилие, равное весу инертной массы маятника, вызывает его смещение на 16 мм. Как раз такое смещение массы маятника, согласно таблице 1, имеет место при 9 баллах. Таким образом, 9 баллам отвечает приведенное сейсмическое ускорение, равное ускорению силы тяжести, т. е. получили приведенное ускорение, в 10

раз превышающее расчетное сейсмическое ускорение шкалы ОСТ ВКС-4537 (ср. таблицы 1 и 3).

Но выше уже было подчеркнуто имеющееся подобие между шкалами ГОСТ 6249-52 и ОСТ 4537, вытекающее из сравнения таблиц 1 и 3.

Стало быть теперь можем утверждать, что приведенное сейсмическое ускорение при всех баллах шкалы ГОСТ 6249-52 примерно в 10 раз более максимальных сейсмических ускорений старой шкалы ОСТ 4537.

Приведенное сейсмическое ускорение является условным ускорением, статически приложенным, дающим упругому маятнику с периодом свободных колебаний 0,25 сек., то же самое отклонение, что и землетрясение. Поэтому приведенное сейсмическое ускорение учитывает всю сложность динамики сейсмической нагрузки и не только вынужденные колебания, но и колебания свободные.

Таким образом, согласно новой сейсмической шкале, во всяком случае для сооружений, несущих сосредоточенный груз и с периодом свободных колебаний 0,25 сек., расчетное сейсмическое ускорение примерно в 10 раз превышает величину максимального сейсмического ускорения старой шкалы. Анализ повреждений элементов конструкций показывает, как правило, на необходимость значительно больших величин сейсмических ускорений, иногда в несколько раз, по сравнению со шкалой ОСТ-4537 для возможности объяснения этих разрушений, но все же, надо полагать, десятикратное увеличение сейсмической нагрузки, вытекающее из таблицы 1, преувеличено.

Мы не будем далее останавливаться на этом вопросе; автор сейсмической шкалы формально имеет право приписывать данному максимальному отклонению упругого маятника любой балл, поскольку начало отсчета не имеет значения. Важно лишь то, чтобы на основании показаний прибора можно было установить интенсивность землетрясения по данной шкале и осуществлять анализ повреждений построек, отвечающих этому землетрясению.

Возникает следующий принципиальный вопрос — возможно ли характеризовать силу землетрясения с инженерной точки зрения, с помощью лишь максимального относительного отклонения одного упругого маятника? Этот вопрос равносителен следующему: возможно ли землетрясение характеризовать лишь одним параметром, в данном случае максимальным отклонением одного маятника.

Принципиально это возможно в двух частных случаях.

Рассмотрим первый случай. Если бы все сооружения представляли собою системы с одной степенью свободы, обладали точно таким же периодом свободных колебаний и декрементом затухания, что и маятник сейсмометра, то нас вполне устраивало бы располагать данными о максимальном отклонении одного маятника; по ним мы могли бы оценить меру воздействия землетрясения на сооружения хотя бы потому, что приведенные ускорения, при поставленных выше условиях, для сооружения и сейсмометра одинаковы [4].

Однако возможность этого случая на практике исключается, так как динамические характеристики сооружений меняются в широких пределах. Более того, каждое сооружение представляет собою сложную систему со многими степенями свободы и потому его колебания не могут быть описаны с помощью колебаний одного лишь маятника.

Здесь может возникнуть возражение, что балльность землетрясения достаточно характеризовать для большинства зданий, период основных свободных колебаний которых 0,25 сек., что и предусмотрено новой сейсмической шкалой.

При ближайшем рассмотрении и эта точка зрения не выдерживает критики. По имеющимся данным, здания в массе имеют периоды свободных колебаний в пределах 0,15—0,45 сек., т. е. сильно отличающиеся от стандартного периода 0,25 сек., принятого в сейсмической шкале. Далее, при современных темпах прогресса строительного дела в будущем не исключено возникновение совершенно новых конструктивных решений, в особенности в сейсмических районах, например, легких металлических каркасных построек с легкими же сборными теплозащитными ограждениями. Периоды свободных колебаний такого рода построек могут оказаться сильно отличающимися от 0,25 сек., и данные длительных сейсмометрических наблюдений могут оказаться потому в значительной мере обесцененными.

Рассмотрим теперь второй случай.

Положим, что все сейсмограммы различных землетрясений таковы, что ординаты их отличаются лишь постоянными множителями. Такие сейсмограммы для краткости условимся называть стандартными. Тогда ясно, что такими же множителями различаются между собою и показания рассматриваемого сейсмометра.

Интенсивность землетрясения в этом случае вполне точно можно охарактеризовать лишь с помощью максимального отклонения одного маятника с фиксированными параметрами. При наличии стандартных сейсмограмм мы могли бы раз навсегда определить приведенные сейсмические ускорения, отвечающие различным периодам свободных колебаний и декрементам затуханий с помощью инструментальных исследований какого-либо одного землетрясения, впоследствии же для всех других землетрясений показания маятников фиксированных параметров были бы достаточны для оценки интенсивности землетрясения, во всяком случае в пределах упругих деформаций, путем их умножения на соответствующие поправочные коэффициенты.

Существующие сейсмограммы разрушительных землетрясений не создают впечатления стандартных. Они довольно существенно разнятся между собою. Не исключена возможность, что сейсмограммы приближенно могут считаться стандартными; в некоторых случаях единичные наблюдения подтверждают это, в особенности при землетрясениях, исходящих из одного и того же очага и фиксируемых в одном и том же месте. Но этот вопрос сам требует специального изу-

чения и потому при существующем уровне знаний мы не можем опираться на него при исследовании воздействия землетрясения на сооружения и, тем более, при построении новой сейсмической шкалы*.

Следующее замечание касается избранного способа демпфирования маятника сейсмометра.

Магнитный демпфер сообщает инертной массе сопротивление, пропорциональное первой степени скорости, что отвечает строительным материалам и конструкциям с внутренним трением, следующим гипотезе Фохта. Известно, что гипотеза Фохта не подтверждена фактами для существующих строительных материалов и уже давно устарела. Коль скоро маятник сейсмометра должен моделировать колебания сооружения при землетрясении, то его следует снабдить другим демпфером, дающим силу затухания, более приближающейся к действительности. Например, в сейсмометрах нашей конструкции принят гистерезисный демпфер.

Нашу точку зрения о способе инструментальной фиксации интенсивности землетрясения мы высказывали неоднократно* еще до появления новой сейсмической шкалы (см. напр. [4]).

Существо его сводится к следующему.

Землетрясение следует характеризовать спектральной кривой приведенных сейсмических ускорений. Для этой цели надо пользоваться сейсмометром, состоящим из серии маятников с различными периодами свободных колебаний, охватывающими весь диапазон свободных колебаний, имеющих место в сооружениях, и фиксирующих, при землетрясении, свои относительные максимальные отклоненные положения. Маятники должны быть снабжены гистерезисным затуханием, дающим примерно тот же декремент затухания, что и у сооружений. При таких условиях маятники сейсмометра моделируют, в известных масштабах, колебания сооружений, отвечающих соответствующим фундаментальным функциям. На основе этих данных и строится спектральная кривая приведенных сейсмических ускорений, характеризующая собою интенсивность силы данного землетрясения в данном месте.

Байот пытался строить такие кривые на основе интегрирования дифференциального уравнения колебаний упругих систем с одной степенью свободы и различных периодов свободных колебаний [9]. Для этой цели использовались записи сейсмических ускорений, полученных акселерографами. Поскольку акселерографы имеют периоды свободных колебаний в пределах 0,1—0,2 сек., то сейсмические ускорения записываются достаточно точно лишь для длиннопериодных составляющих колебания почвы. Поэтому результаты интегрирования должны приводить к большим погрешностям для жестких сооружений,

* В свое время мы принимали участие в разработке сейсмоскопа упрощенной конструкции, также представлявшего собою упругий маятник, фиксирующий свое максимальное отклоненное положение, но отказались от его реализации на основе последующих исследований [2].

и кривые приведенных сейсмических ускорений, в особенности в участке коротких периодов, не могут внушать доверия.

Вторым существенным недостатком предложения Байота является использование акселерографов, массовое распространение которых в сейсмических районах вряд ли возможно в силу их дороговизны и необходимости содержания большого штата работников для их обслуживания и обработки их показаний (акселерограмм).

Наше предложение сводится к тому, чтобы необходимое интегрирование, для получения спектров приведенных сейсмических ускорений, осуществлять маятниковыми максимальными сейсмометрами непосредственно в полевых условиях. Эти приборы, являясь по конструкции весьма простыми и дешевыми и не требующими систематического ухода, могут быть размещены в сейсмических районах в массовом количестве. Обработка их показаний также предельно проста, поскольку для каждого маятника заданного периода приведенное сейсмическое ускорение определяется непосредственно по максимальному относительному отклоненному положению маятника.

Характеристика интенсивности землетрясения с помощью одного числа, скажем, номера балла, может оказаться практически невозможной, если полученные спектральные кривые будут сильно различаться между собой. Это будет означать, что интенсивность силы землетрясения нельзя достоверно определять с помощью лишь одного параметра, что интенсивность землетрясения определяется несколькими параметрами. Только в том случае, когда интенсивность землетрясения определяется одним параметром, что имеет место при стандартных сейсмограммах, возможно его характеризовать в баллах, т. е. нумеровать.

Поскольку все же пользование сейсмической шкалой представляет известные удобства, то в основу ее можно положить какие-либо интегральные признаки интенсивности землетрясения, что стихийно имело место при составлении всех шкал [1].

Интересно, что эта идея Бениоффом осуществлена в самом прямом смысле; именно—за меру интенсивности сейсмического воздействия на здания им предложено принять площадь, ограниченную кривой приведенных сейсмических ускорений [8]. Мы не могли установить физический смысл такой меры, поскольку нет прямого соотношения между нею и характером повреждения построек.

Не исключена возможность принятия за признак балла землетрясения максимального или осредненного значения приведенного сейсмического ускорения.

Таким образом, оценка интенсивности землетрясения с помощью маятникового сейсмометра с магнитным затуханием не является обоснованным. Необходимо массовое применение маятниковых сейсмометров, снабженных гистерезисным затуханием. Не исключена возможность применения маятниковых сейсмометров с гистерезисным затуханием для вспомогательных пунктов в сети инженерно-

сейсмической службы, если будет установлена хотя бы приближенная стандартность сейсмограмм или спектра приведенных сейсмических ускорений.

Институт строительных материалов
и сооружений АН Армянской ССР

Поступило 24 VI 1944

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Быховский В. А. О сейсмических шкалах. Тр. СИ, № 73, М.—Л., 1936.
2. Завериев К. С. Сообщ. АН Грузинской ССР, № 8, т. 2, Тбилиси, 1941.
3. Медведев С. В. Новая сейсмическая шкала ГЕОФИАН, № 21 (148). Изд. АН СССР, М., 1953.
4. Назаров А. Г. Известия АН Армянской ССР, № 3, 1947.
5. Назаров А. Г. Известия АН Армянской ССР (серия ФМЕТ наук), т. VI, № 4, 1953.
6. Сорокин Е. С. Метод учета неупругого сопротивления материала при расчете конструкций на колебания. Сб. "Исследования по динамике сооружений", Стройиздат, 1951.
7. Чураян А. Л., Назаров А. Г. Инженерное обследование повреждений, вызванных ереванским землетрясением 7—8 января 1937 г., ТНИС, Тбилиси, 1937.
8. Buot M. A. A mechanical analyzer for the prediction of earthquake stresses. Bull. of the Seism. Soc. of America, vol. 31, 2, april, 1941.
9. Benioff H. The physical evaluation of seismic destructiveness. Bull. of the Seism. Soc. of America, vol. 24, 4, 1934.

Ա. Գ. ՆԱԶԱՐՈՎ

ՆՈՐ ՍԵՅՍՄԻԿ ՇԿԱԼԱՅԻ ՄԱՍԻՆ

Ա. Մ. Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոդվածում քննադատության է ենթարկվում ГОСТ 6249—52 նոր սեյսմիկ չկալան, որը կիրառության մեջ է մտցված ОСТ ВКС - 4537 սեյսմիկ չկալայի փոխարեն:

Յույց է արվում, որ թեև նոր չկալան որոշ առավելություններ ունի բոլոր հին չկալանների նկատմամբ, բայց և այնպես նա ունի նույն հիմնական թերությունները:

Նոր չկալայում փորձ է արվում երկրաշարժի ուժի գործիքային դնահատման՝ ճոճման 0,25 վայրկյան տևողություն և մարման 0,5 լողարիթմական դեկրեմենտ ունեցող առաձգական ճոճանակի մաքսիմալ հարաբերական շեղումը չափելու միջոցով:

Հոդվածում ցույց է արվում, որ երկրաշարժի ուժը, բնդհանուր դեպքում, հնարավոր չէ բնութագրել միայն մեկ առաձգական ճոճանակի միջոցով:

Երկրաշարժի ուժը կարելի է բնութագրել՝ հիստերեզիկ մարմամբ օժտված, ազատ ճոճման տարրեր տևողություն ունեցող առաձգական ճոճանակների սերիայի միջոցով:

ФИЗИЧЕСКАЯ ХИМИЯ

Т. В. Крмоян

Совместное выделение хлора и кислорода при
электролизе соляной кислоты

В электрохимических реакциях важное место занимает явление совместного разряда двух ионов. В этой области изучение совместного выделения хлора и кислорода при электролизе соляной кислоты является одной из серьезнейших задач электрохимии, ввиду ее большого теоретического и практического значения.

При электролизе соляной кислоты относительные количества выделяющихся хлора и кислорода зависят от концентрации раствора. Хотя этот факт в общих чертах известен [1, 2], однако, в литературе нет сведений о его количественной стороне. Что касается распределения тока между Cl^- и OH^- ионами, то этот вопрос еще мало изучен. В этой области, Стендер, Иоффе и их сотрудники [2] исследовали электролиз 0,1N соляной кислоты. Они снимали поляризационные кривые на разных анодах в растворах: H_2SO_4 —0,1N и HCl —0,1N; из полученных значений потенциалов рассчитывали выходы по току, по хлору и кислороду в 0,1N соляной кислоты и затем определяли их значения экспериментально. Довольно удовлетворительное совпадение найденных выходов с вычисленными по поляризационным кривым имело место только на магнетитовых анодах; на платиновых же анодах ни количественного, ни даже качественного совпадения не было. Интересно отметить, что на платиновых анодах плотность тока при совместном выделении хлора и кислорода оказывалась ниже, чем при выделении одного кислорода при данном потенциале.

Целью настоящей работы является определение количества хлора, выделяющегося на электродах из гладкой платины при электролизе растворов соляной кислоты и исследование того, как полученный молярный процент хлора зависит от концентрации раствора и плотности тока.

Теоретическая часть

Электролитическое разложение воды и соляной кислоты можно представить следующими термодинамическими уравнениями:

$$E_p = E_{\text{H}_2\text{O}}^0 - \frac{RT}{F} \ln(\text{H}_2)^{1/2} (\text{O}_2)^{1/4} (\text{H}_2\text{O})^{-1/4}, \quad (1)$$

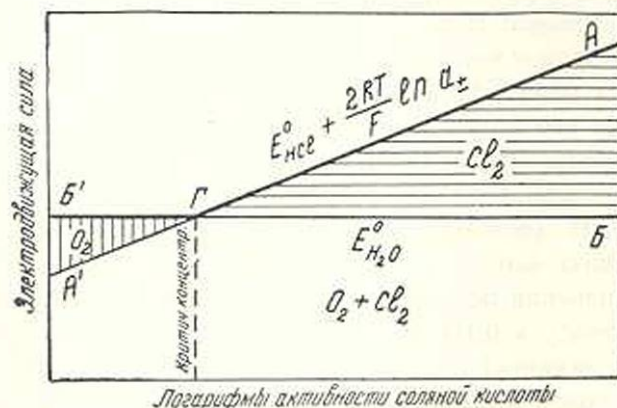
$$E_p = E_{\text{HCl}}^0 - \frac{RT}{F} \ln \frac{(H_2)^{1/2} (Cl_2)^{1/2}}{(H^+) (Cl^-)}, \quad (2)$$

где E_p — электродвижущая сила поляризации, а $E_{\text{H}_2\text{O}}^0$ и E_{HCl}^0 — обратимые потенциалы образования воды и соляной кислоты в нормальных условиях. Если парциальные давления газов равны одной атмосфере и изменение термодинамической активности воды незначительно, тогда уравнения (1) и (2) примут следующий вид:

$$E_p = E_{\text{H}_2\text{O}}^0, \quad (3)$$

$$E_p = E_{\text{HCl}}^0 + \frac{2RT}{F} \ln a_{\pm}, \quad (4)$$

где $a_{\pm}$ — термодинамическая активность соляной кислоты. Согласно этой термодинамической теории, от А до Г (фиг. 1) должен выделять-



Фиг. 1. Совместное выделение хлора и кислорода при обратимых условиях из растворов HCl.

ся хлор, в точке Г — смесь хлора и кислорода, а от Г до Б' — только кислород. Очевидно, что в точке Г парциальное давление отдельных газов ниже одной атмосферы и, кривая АГБ' не может иметь резкого перелома. Однако с практической точки зрения возможно по методу интерполяции определить точку Г, т. е. критическую концентрацию и потенциал разложения воды в растворах соляной кислоты.

Предполагая, что хлор и кислород выделяются в равновесном условии, при атмосферном давлении, уравнение (1) и (2) можем преобразовать в

$$E_{\text{H}_2\text{O}}^0 - E_{\text{HCl}}^0 = 0,118 \log a_{\pm} + 0,0148 \log \frac{(O_2)}{(Cl_2)^2}, \quad (5)$$

где (O_2) и (Cl_2) — парциальные давления кислорода и хлора. Если нам известны нормальные потенциалы разложения воды и соляной кисло-

ты, то возможна проверка этого уравнения лишь одним измерением молярного процента хлора, так как $(O_2)=1-(Cl_2)$.

На фиг. 1 видно, что, если приложенный потенциал увеличить до соответствующей величины, то на аноде можно одновременно получить кислород и хлор, независимо от концентрации раствора. Этот результат не может быть объяснен с термодинамической точки зрения, так как уравнение (5) относится к обратимым процессам, между тем как процессы электролиза обычно необратимы. Таким образом, следует знать не только термодинамически необходимые, но и кинетически достаточные условия процесса. Чтобы уравнение (5) носило реальный характер, следует внести в него исправления, которые зависят от скорости реакции выделения кислорода и хлора, т. е. от плотности тока. Необходимо, во-первых, определить потенциалы разложения воды и соляной кислоты при определенных плотностях тока; но этого еще недостаточно. Чтобы показать влияние приложенного высокого потенциала на процесс электролиза соляной кислоты, необходимо преобразовать уравнение (5) с внесением в него некоторой функции, выражающей связь между электродвижущей силой поляризации и плотностью тока.

Таким образом, общий вид уравнения (5) будет:

$$(E_{H_2O}^0 - E_{HCl}^0)' = 0,118 \log a_{\pm} + 0,0148 \log \frac{1 - (Cl_2)}{(Cl_2)^{1/2}} + i(I). \quad (6)$$

В уравнении (6) величины $(E_{H_2O}^0 - E_{HCl}^0)'$ и $i(I)$ должны быть определены, исходя из опытных данных.

Для определения потенциалов разложения обыкновенно пользуются формулой Леблана

$$I = \frac{V - E_p}{R}. \quad (7)$$

Предполагается, что вместе с повышением плотности тока поляризационная электродвижущая сила доходит до максимального постоянного значения и экстраполированием кривых $I-V$ определяется точка пересечения оси приложенного потенциала (V), которая называется „потенциалом разложения раствора“. Ввиду того, что электродвижущая сила поляризации не доходит до какого-то постоянного значения, очевидно, что предложенный метод ненадежен. Кроме того, значения потенциалов разложения необратимых процессов могут иметь теоретический и практический смысл только тогда, когда они даны при определенной плотности тока, когда реакция идет в определенных физических и химических условиях. К сожалению, в литературе для потенциалов разложения не указаны значения соответствующих плотностей тока. Таким образом, данное Лебланом [3] значение потенциала разложения воды 1,7 вольта ненадежно [4]. Можно сказать, что эта величина неправильна в случае растворов HCl , как это видно из данных самого Леблана.

На основании опытных данных, полученных при изучении зависимости между приложенным потенциалом и силой тока, нами было показано (5), что ход кривых $I-V$ можно выразить следующим дифференциальным уравнением

$$\frac{dI}{dV} = \frac{I}{\beta + RI} \quad (8)$$

При интегрировании уравнения (8) с введением некоторых упрощающих допущений нами было выведено следующее уравнение, удобное для определения потенциала разложения, как функции силы тока

$$V_i = V - IR - \beta \ln \frac{I}{I_1} \quad (9)$$

где V_i — потенциал разложения при плотности тока I , а β — коэффициент дифференциального уравнения электролиза, характеризующий суммарную электрохимическую реакцию, протекающую в электролизере. Для очищенных горячей азотной кислотой гладких платиновых электродов $\beta = 0.1 \pm 0.01$ вольт при образовании водорода и кислорода и 0.003 ± 0.005 вольт при образовании водорода и хлора. Кривые $V - \log I$ растворов соляной кислоты изменяют направление приблизительно при плотности тока 0.5 мА/см^2 , соответствующей выделению пузырьков водорода. Очевидно, что I_1 — особая точка на логарифмической поляризационной кривой, определенной экспериментально.

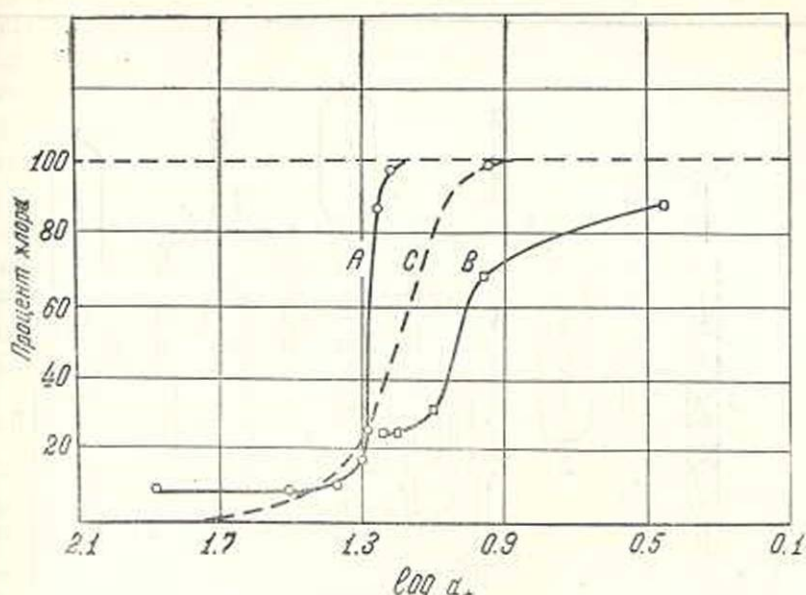
Используя значения потенциалов разложения растворов соляной кислоты при 0.5 мА/см^2 , по методу интерполяции, нами было показано, что потенциал разложения воды в растворах соляной кислоты равен —1,495 вольт при 0.5 мА/см^2 , а критическая концентрация — 0.05 Н . Среднее значение потенциала разложения соляной кислоты при 0.5 мА/см^2 и $a_+ = 1$ приблизительно равно нормальному потенциалу хлора. Таким образом, взяв его величину равной —1,3594 вольт, уравнение (6) преобразуется в

$$-0.1356 = 0.118 \log a_{\pm} + 0.0148 \log \frac{1 - (Cl_2)}{(Cl_2)^2} + f(I) \quad (10)$$

Очевидно, что, когда $I = 0.5 \text{ мА/см}^2$, то по условию $f(I) = 0$. В этом случае уравнение (10) даст формулу совместного выделения хлора и кислорода при постоянной плотности тока в 0.5 мА/см^2 . На фиг. 2 представлена кривая (С) молярных процентов хлора в зависимости от $\log a_{\pm}$ при 0.5 мА/см^2 , найденных из (10).

Экспериментальная часть

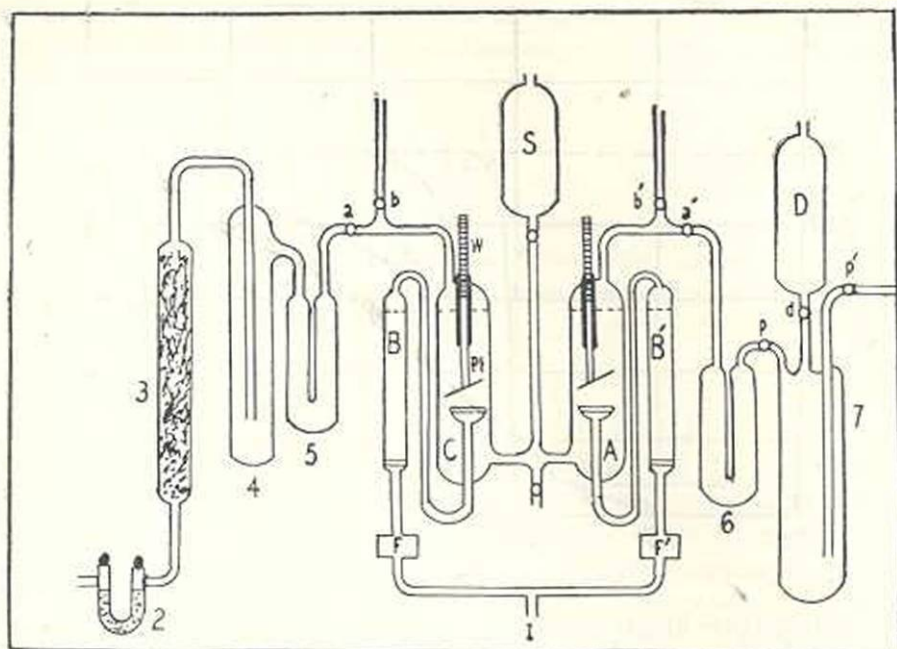
Опыты ставились в $0.0142 - 0.9750 \text{ Н}$ растворах соляной кислоты. Измерения приложенного потенциала и силы тока производились потенциометрическим методом. Израсходованное количество электричества определялось графическим интегрированием кривых си-



Фиг. 2. Изменение процента хлора при электролизе HCl. C—вычисленная кривая при постоянной плотности тока $0,5 \text{ мА/см}^2$, A—данные при $0,5\text{--}2,5 \text{ мА/см}^2$, B—данные при $2,5\text{--}8,5 \text{ мА/см}^2$.

лы тока в зависимости от времени. Количественное определение водорода и хлора производилось в аппарате, представленном на фиг. 3, состоящем из двух частей: U-образной ячейки и анализаторов для определения количества хлора и водорода. А и С—анодные и катодные пространства. Электроды—из гладкой платиновой пластины, каждый площадью в 1 см^2 с расстоянием между ними в 20 см . Платиновые пластины припаиваются к платиновым проволокам, которые в свою очередь припаиваются к вольфрамовым проволокам. Места соединения проволок платины и вольфрама предохраняются тонкой стеклянной рубашкой. Эта стеклянная рубашка показана на фигуре в виде двух толстых линий. Уровень раствора отмечен пунктирной линией. Место соединения платины с вольфрамом выше поверхности раствора. Электроды находятся приблизительно на расстоянии 2 см от стеклянных фильтров, сквозь которые можно пропускать какой-либо газ через два отделения ячейки, независимо друг от друга. Электроды очищаются концентрированной азотной кислотой, промываются дистиллированной водой, спиртом и, наконец, ацетоном. Ячейка, после высушивания струей сухого и чистого воздуха, заполняется раствором.

Через аппарат (I) пропускается очищенный азот для удаления выделяющихся газов. Азот очищался от следов кислорода пропусканием над активной медью при 200°C по методу Меера и Ранжа [6]. Газ на своем пути сушился над CaCl_2 и проходил через CO_2 —ацетонный холодильник и поступал в аппарат через I. Для предотвращения испарения воды в ячейке азот пропусклся через барботеры В и В', за-



Фиг. 3. Схема прибора для определения количества хлора и водорода при электролизе HCl .

полненные растворами соляной кислоты, подвергавшимися электролизу. После 48-часового пропускания азота концентрация соляной кислоты в ячейке не менялась.

Скорость прохождения азота, определявшаяся ртутными реометрами F и F' , была постоянна для каждого опыта и равна $25\text{--}35 \text{ см}^3/\text{мин}$. Смеси газов, выходящие из обоих отделений ячейки, пропускались через холодильники с охлаждающей смесью из CO_2 и ацетона (5,6) и жидкого азота (4,7). Контрольные опыты показали, что кислород не конденсируется в холодильнике жидкого азота, если скорость течения азота равна $25\text{--}35 \text{ см}^3/\text{мин}$.

Водород, образующийся на катоде, определялся следующим образом: очищенная от водяных паров смесь водорода и азота пропусклась над CuO (3) при 400°C . Выделявшаяся вода поглощалась CaSO_4 (2) и взвешивалась. Хлор, образующийся на аноде, охлаждался в холодильнике жидкого азота (7), куда добавлялся иодистый калий из D , и полученный под титровался раствором тиосульфата натрия. По окончании электролиза в течение 2 часов через раствор пропусклся азот для удаления из раствора возможных остатков хлора и водорода. Эти газы количественно можно удалить в течение одного часа.

Наличие воздуха в катодном пространстве определялось следующим образом: в конце водородного анализатора ставился сосуд с

CaSO_4 (2) и после продолжительного пропускания азота взвешивался до установления постоянного веса. Ввиду симметричности аппарата можно предполагать, что если из катодного отделения удален воздух, то его нет и в анодном отделении. После полного удаления воздуха холодильники ставились на свои места, производилось еще одно взвешивание сосуда с CaSO_4 и начинался электролиз.

Результаты, полученные при низких плотностях тока (0,15—4,55 мА/см^2), даются в таблице 1. С течением времени приложенный потенциал поднимается (столбцы 2 и 3), а сила тока понижается (столбцы 4 и 5). Теоретические количества выделяющихся хлора и водорода (в пересчете на воду) вычислены на основании закона Фарадея (столбцы 6 и 8).

Таблица 1

Результаты анализа хлора и водорода, образующихся при электролизе соляной кислоты при низких плотностях тока (0,15—4,55 мА/см^2)

Нормальность	Потенциал в вольтах		Плотность тока в мА/см^2		Хлор (в мг)		Вода (в мг)	
	в нач.	в конце	в нач.	в конце	вычисл.	найдено	вычисл.	найдено
0,9750	1,832	2,132	4,55	2,50	57,60	57,00	14,60	16,00
0,9700	1,832	2,113	4,50	2,54	40,98	20,28	10,41	10,0
0,4809	1,954	2,164	3,60	2,28	42,03	42,63	10,68	12,0
0,4809	1,960	2,192	3,60	1,95	70,96	70,59	18,03	17,2
0,1428	2,262	2,358	1,62	0,96	25,85	25,08	6,50	5,0
0,0711	2,318	2,390	1,60	0,65	13,06	13,70	3,20	1,0
0,0675	2,330	2,416	0,87	0,53	12,35	10,78	3,0	2,5
0,0650	2,373	2,424	0,72	0,25	10,90	2,70	2,60	1,2
0,0650	2,376	2,450	0,85	0,28	9,50	1,80	3,40	1,6
0,0625	2,365	2,460	0,72	0,22	8,29	1,30	2,10	0,5
0,0500	2,384	2,466	0,56	0,22	7,15	0,60	1,81	0,0
0,0357	2,424	2,900	0,50	0,18	6,40	0,60	1,60	0,0
0,0142	2,442	2,276	0,24	0,11	4,50	0,60	1,20	0,0
0,0142	2,452	2,480	0,26	0,15	3,90	0,90	1,00	0,0

В растворах, концентрацией выше 0,07N, количество выделяющегося хлора меньше теоретического на 0,5—0,6 мг. Количество воды, вычисленное согласно закону Фарадея, также меньше, и эта разница всегда колеблется. Аналогичные опыты были поставлены при высоких плотностях тока. Результаты даются в таблице 2. Здесь также наблюдается, что количество полученной воды меньше теоретически вычисленного*. Данные таблиц 1 и 2 представлены на фиг. 2, дающем выход хлора по току в зависимости от логарифма активности растворов соляной кислоты. На рисунке кривая А показывает результат, полученный при низких силах тока, а кривая В—при высоких. Как было указано выше, С—кривая, построенная на основании теоретических расчетов при плотности тока в 0,5 мА/см^2 .

* В разбавленных растворах водород не обнаруживается (табл. 1). Это можно объяснить тем, что количество обнаруживаемого водорода вообще на 1—2 мг меньше теоретически вычисленного. Интересно отметить, что в холодильнике жидкого азота (в катодном отделении) обнаруживается приблизительно 1 мг хлора. Если предположить, что в разбавленных растворах HCl при малых плотностях тока возникают атомарный водород и он соединяется с хлором, то ясно, что водород невозможно обнаружить. Не следует забывать, что при плотности тока ниже 0,5 мА/см^2 ни в одном опыте не обнаружено пузырьков водорода [5].

Таблица 2

Результаты анализа хлора и водорода, образующихся при электролизе соляной кислоты при 2,25—8,98 мА/см²

Нормальность	Плотность тока в мА/см ²		Хлор в мг		Вода в мг	
	в нач.	в конце	вычисл.	найдено	вычисл.	найдено
0,7809	8,95	7,40	126,00	115,0	30,60	31,60
0,1423	4,50	3,33	50,18	35,42	12,50	12,90
0,1020	3,98	2,90	49,96	16,00	12,30	12,00
0,0780	3,40	2,65	7,00	9,20	9,20	8,20
0,0575	3,01	2,25	37,82	9,40	9,50	7,00

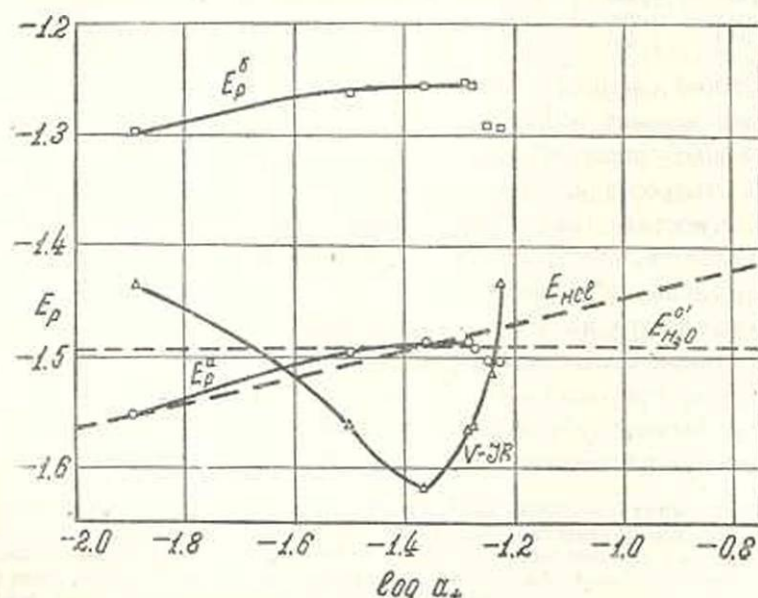
Для вычисления парциального давления газов следует сделать дополнительные предположения ввиду того, что через раствор пропускается азот, взяв для этого два крайних случая и принимая общее давление газов равным одной атмосфере.

а) На аноде хлор и кислород смешаны друг с другом, но не с азотом. Водород на катоде также не смешан с азотом.

б) На аноде азот смешан с хлором и кислородом, а на катоде — с водородом.

Чтобы определить, какое из двух предположений ближе к действительности, можно сверить измеренное значение э. д. с. поляризации с вычисленными и определить $E_{H_2O}^0$ согласно указанным выше двум предположениям.

На фиг. 4 обобщены результаты. Две линии представляют кри-



Фиг. 4. Изменение вычисленных (E_p^a , E_p^b) и измеренных ($V-IR$) электродвижущих сил поляризации при электролизе HCl.

вые потенциала разложения соляной кислоты E_{HCl} и воды $E_{\text{H}_2\text{O}}^0$ при $0,5 \text{ мА/см}^2$. Измеренные значения электродвижущей силы поляризации (E_p) представлены в виде светлых треугольников. Полученные опытные данные нельзя полностью подвергнуть анализу. Однако видно, что правильнее принимать предположение а, чем б. Этот результат понятен потому, что газы образуются в виде пузырьков под атмосферным давлением, и при достаточно высокой плотности тока скорость выделения пузырьков большая. Азот может проникать в пузырьки хлора и водорода диффузией через раствор. Так как концентрация азота незначительна и диффузия является в общем медленным процессом, а газовые пузырьки образуются быстро, проникновение азота в пузырьки хлора, кислорода и водорода весьма маловероятно.

Таким образом, уравнение (10) преобразуется в

$$-0,1356 = 0,118 \log a_{\pm} + 0,0148 \log \frac{(1 - N_{\text{Cl}_2})}{(N_{\text{Cl}_2})^2} + i(I), \quad (11)$$

где N_{Cl_2} — молярная доля хлора.

Ввиду того, что значение β для образования кислорода и водорода больше, чем для хлора и водорода, кривая С, при плотности тока выше $0,5 \text{ мА/см}^2$, должна сдвигаться влево. Этим объясняется положение кривой А, но не В. Ясно, что сильное повышение плотности тока должно выражаться в виде какой-то другой функциональной зависимости.

Факты показывают, что молярный процент кислорода возрастает: а) с повышением плотности тока и б) с разбавлением раствора соляной кислоты. При постоянном значении $(E_{\text{H}_2\text{O}}^0 - E_{\text{HCl}}^0)$, т. е. — $0,1356$, активность соляной кислоты должна уменьшаться, если молярный процент хлора уменьшается. Ясно, что должна существовать какая-то зависимость между плотностью тока и эффективной активностью HCl . Расчеты показывают, что разность между вычисленными и измеренными значениями $\log a_{\pm}$, т. е. $\Delta \log a_{\pm}$, меняется с изменением плотности тока согласно следующему уравнению:

$$\Delta \log a_{\pm} = -\log \frac{1}{I^{100}},$$

где $I^{100} = 2,28 \text{ мА/см}^2$. Таким образом уравнение (11) можно представить в следующем виде:

$$-0,1356 = 0,118 \left[\log \bar{a}_{\pm} - \log \frac{1}{I^{100}} \right] + 0,0148 \log \frac{(1 - N_{\text{Cl}_2})}{(N_{\text{Cl}_2})^2}. \quad (12)$$

В этом виде уравнение применяется для плотностей тока выше $2,28 \text{ мА/см}^2$; оно показывает положение кривой В по отношению к С.

Подобное уравнение можно вывести и для объяснения положения кривой А по отношению к кривой С.

$$-0,1356 = 0,118 \log a_{\pm} + 0,184 \log \frac{1}{I_i} + 0,0148 \log \frac{(1 - N_{\text{Cl}_2})}{(N_{\text{Cl}_2})^2}, \quad (13)$$

где $0,184 \log \frac{1}{I_1}$ — суммарное перенапряжение для хлора и кислорода,
 $I_1 = 0,5 \text{ мА/см}^2$.

Уравнения (12) и (13) показывают с количественной стороны совместное выделение кислорода и хлора. Можно легко объяснить поправки, введенные на перенапряжение в уравнении (13). Что же касается уравнения (12), то из него, повидимому, вытекает, что при плотности тока выше $2,28 \text{ мА/см}^2$ перенапряжение зависит от изменений концентраций раствора.

Наши опыты показывают, что, когда два различных иона при определенных энергетических условиях конкурируют друг с другом, перенапряжение зависит от изменения эффективной активности раствора непосредственно вокруг электрода. Если сказанное отнести, в частности, к совместному выделению хлора и кислорода, то можно сказать, что при электролизе HCl выделение кислорода имеет место только в ограниченных пределах концентрации раствора. Влияние высокой плотности тока сказывается на изменении эффективной концентрации раствора непосредственно у анода и приближает ее к концентрации, способствующей образованию кислорода.

Проведенные исследования показывают, что критическая концентрация, способствующая образованию кислорода, близка к $0,05\text{N}$ соляной кислоте, когда на аноде не образуется хлора. При этой концентрации измеренная электродвижущая сила поляризации доходит до минимума (фиг. 4).

Сопоставление дифференциального уравнения электролиза с результатами анализов хлора показывает, что I^0 не произвольно. Фиг. 5 показывает зависимость $\frac{dI}{dV}$ от I для $0,975\text{N}$, HCl . Из фигуры видно, что опытные данные можно выразить двумя дифференциальными уравнениями.

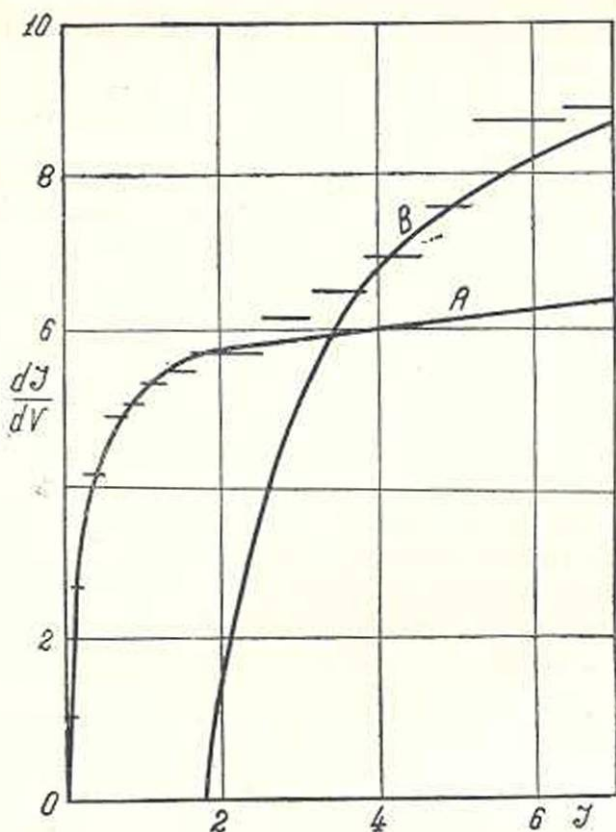
Кривая А выражается дифференциальным уравнением

$$\frac{dI}{dV} = \frac{I}{0,03 + 155I}$$

и соответствует только плотностям тока до $2,5 \text{ мА/см}^2$. С другой стороны, кривую В можно представить в виде следующего дифференциального уравнения:

$$\frac{dI}{dV} = \frac{I}{0,1 + 92I}$$

Из полученного значения β видно, что выделение кислорода начинается только после достижения плотности тока выше $2,5 \text{ мА/см}^2$. Это говорит о том, что для сохранения в двойном слое определенного количества гидроксильных ионов необходима некоторая мини-



Фиг. 5. Влияние плотности тока на ход электролиза в 6 Н соляной кислотой, согласно дифференциальному уравнению электролиза.

мальная скорость ионов. Надо предполагать, что происходит конкуренция между ионами хлора и ионами гидроксила, прежде чем они занимают определенное положение в двойном слое, из чего следует, что образование преобладающего количества кислорода при потенциале выше 1,495 вольта можно, по всей вероятности, объяснить большей скоростью движения ионов гидроксила. Надо отметить, что количество образующегося хлора нельзя уменьшить ниже определенного минимального значения, и это значение тем выше, чем выше концентрация раствора или сила тока. Таким образом, нельзя сказать, что в растворах, более разбавленных чем 0,05Н, хлор не выделяется—это возможно, по всей вероятности, при высокой силе тока. Эти довольно сложные вопросы имеют определенный интерес, особенно в связи с электролитическим получением кислородосодержащих кислот хлора.

Выводы

Исследовано явление совместного выделения хлора и кислорода при электролизе 0,0142—Н растворов соляной кислоты в пределах плотностей тока от 0,5 до 8,5 mA/cm^2 .

Установлено следующее:

а) Совместное выделение хлора и кислорода можно представить следующим уравнением

$$E_{\text{H}_2\text{O}}^0 - E_{\text{HCl}}^0 = \frac{2RT}{F} \ln a_{\pm} + \frac{RT}{4F} \ln \frac{(1 - N_{\text{Cl}_2})}{(N_{\text{Cl}_2})^2} + F(l),$$

где $E_{\text{H}_2\text{O}}^0 - E_{\text{HCl}}^0$ — разность потенциалов разложения воды и соляной кислоты при $0,5 \text{ мА/см}^2$, $a_{\pm}$ — термодинамическая активность HCl , N_{Cl_2} — молярная доля хлора, а $f(l)$ — поправка для случаев применения плотности тока выше $0,5 \text{ мА/см}^2$. Выведен вид функции $f(l)$ для различных интервалов концентрации HCl и плотностей тока.

б) При электролизе растворов соляной кислоты выделение кислорода имеет место только в ограниченных пределах концентрации HCl , приблизительно равных $0,05\text{N}$.

в) В концентрированных растворах соляной кислоты образование кислорода возможно только тогда, когда плотность тока доходит до определенного значения, приближающегося к $2,3 \text{ мА/см}^2$. Влияние плотностей тока выше $2,3 \text{ мА/см}^2$, повидимому, сказывается на изменении эффективной концентрации непосредственно у анода и приближает ее к концентрации, способствующей выделению кислорода, т. е. $0,05\text{N}$ соляной кислоты.

Химический институт
АН Армянской ССР

Поступило 3 X 1953

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Изгарышев Н. А. Электрохимия и ее технические применения. Москва, 1931.
2. Стендер В. В. Электролитическое производство хлора и щелочей. Ленинград, 1935.
3. Le Blanc M. Z. Phys. chem., **12**, 333 (1893).
4. Туров П. П., Скобец Ч. М., ЖФХ, **24**, 694 (1950).
5. Крмойн Т. В. Изв. АН Арм. ССР, № 3, 205 (1949).
6. Meyer P. R., Range O. Ang chemie, **52** 637 (1939).

Տ. Վ. Քրմոյան

ԱՂԱԹԹՎԻ ԷԼԵԿՏՐՈԼԻԶԻ ԺԱՄԱՆԱԿ ՔԼՈՐԻ ԵՎ ԹԹՎԱԾՆԻ ՀԱՄԱՏԵՂ ԱՌԱՋԱՑՈՒՄԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Աղաթթվի էլեկտրոլիզի ժամանակ անողի վրա առաջացող թթվածնի և քլորի քանակները կախված են պրոցեսի պայմաններից, Պրոցեսի ընթացքը ծանոթ է ընդհանրապես, սակայն գրականության մեջ չկան քանակական տեղեկություններ: Բացի այդ, մինչև այժմ քիչ է ուսումնասիրված եղել այն հարցը, թե անջատված քլորի մոլային ասկոսն ինչպես է կախված հոսանքի խտությունից:

Հոգիվածում շարադրված են այս հարցերի կապակցությամբ հեղինակի ստացած տվյալները: Նկար 2-ում ամփոփված են յուրաքանչյուր էլիվիված լենտ էլեկտրականության համար ստացված քլորի քանակը նվազ (A կոր)

և բարձր (B կոր) հոսանքի խտությունների համար: C կորը $0,5 \text{ մա/սմ}^2$ հոսանքի խտության համար որոշ ենթադրությունների հիման վրա հաշվված թեորեաիկ կորն է: Ինչպես երևում է, այս գեպում առկա ունի մրցող սեակցիաների մի երևույթ: Եթ իրոք, հաշվումները հաստատում են, որ ազաթթվի խիտ լուծույթներում և բարձր հոսանքի խտությունում թթվածնի առաջացումը հնարավոր է միայն այն գեպում, երբ անոդի անմիջական շրջանակում ազաթթվի կոնցենտրացիան մոտենում է միևնույն մի արժեքի՝ $0,05\%$: Ոչադրավ է այն երևույթը, որ երբ սեակցիայի համար հարկավոր ակախություն էներգիան նպաստավոր է լինում թե քլորի և թե թթվածնի առաջացման համար, ապա տիրուպետող է դառնում թթվածնի առաջացումը: Համարական է, որ քլորիդների էլեկտրոլիզի ժամանակ ընթացող կողմնակի և բարդ սեակցիաները, բայց որում առաջանում են օքսիդիզիվներ, առկա են ունենում ակախի թթվածնի առումների և կամ մոլեկուլների սկզբնական առաջացման հանադարձով:

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

С. Г. Саркисян

Определение показателя аварийности оборудования
ГЭС в гидроэнергетических системах

Бесперебойность энергоснабжения [потребителей обеспечивается путем наименьшего снижения рабочей мощности системы, а это может быть достигнуто осуществлением следующих мероприятий:

1. Установление рационального режима работы основного оборудования электрических станций системы.
2. Своевременное и качественное проведение планово-предупредительных ремонтов и ревизий всего основного оборудования электрических станций.
3. Создание оперативного резерва, необходимого для ликвидации последствий нарушения нормальной эксплуатации в любой части энергосистемы.
4. Внедрение автоматических устройств, позволяющих ограничивать действие аварии, уменьшение ее последствий для остальной части системы, сокращение аварийного простоя оборудования (путем принятия мер по повышению устойчивости, устройства быстродействующей защиты, автоматическое повторное включение и т. д.).

Одним из условий нормальной, бесперебойной работы энергосистемы является создание аварийных резервов мощности и энергии, которые входят в состав оперативного резерва. Назначение аварийного резерва мощности заключается в ликвидации дефицита рабочей мощности системы, вызванного аварией того или иного оборудования электрических станций. Аварийный резерв энергии призван сократить недовыработку энергии, вызванную авариями*.

Чтобы определить эту недовыработку, надо знать продолжительность нахождения агрегата в аварии. Понятно, однако, что возможная продолжительность аварий рабочих агрегатов, зависящая от разнообразных причин, есть величина неопределенная, а потому надо исходить из какой-то средней продолжительности аварии, основанной на статистических данных эксплуатируемых систем. Таким образом, задача сводится к определению возможной средней продолжительности аварии одного агрегата в году, и уже на этой основе можно

* Вопросы недовыпуска энергии потребителям является предметом специального исследования.

перейти к определению величины аварийного резерва системы. Последняя задача выходит за рамки данной статьи.

Изучению подверглись отчетные материалы по авариям на гидроэлектростанциях двух действующих гидроэнергетических систем за пятнадцать лет эксплуатации (1937—1951 гг.).

В таблице 1 приводится число аварий на один агрегат по системам №№ 1 и 2.

Таблица 1

Число аварий по гидроэлектростанциям систем
№№ 1 и 2

Система № 1		Система № 2	
годы	число аварий на один агрегат	годы	число аварий на один агрегат
1937	3,33	1937	1,5
1938	1,75	1938	1,17
1939	0,75	1939	0,417
1940	0,417	1940	0,50
1941	0,825	1941	0,75
1942	0,353	1942	0,417
1943	0,50	1943	0,417
1944	0,25	1944	—
1945	0,53	1945	0,167
1946	0,294	1946	0,25
1947	0,646	1947	0,25
1948	0,353	1948	—
1949	0,167	1949	0,133
1950	0,288	1950	0,055
1951	0,40	1951	0,238

Таблица 2

Число часов аварийного простоя различного
оборудования и сооружений ГЭС в системах
№№ 1 и 2

Система № 1		Система № 2	
годы	доля годового времени	годы	доля годового времени
1937	0,00333	1937	0,0164
1938	0,0035	1938	0,0122
1939	0,00291	1939	0,00074
1940	0,00241	1940	0,00094
1941	0,0185	1941	0,0075
1942	0,00059	1942	0,0035
1943	0,00384	1943	0,00002
1944	0,000129	1944	—
1945	0,00135	1945	0,00024
1946	0,0000135	1946	0,0094
1947	0,0162	1947	0,0031
1948	0,00005	1948	—
1949	0,00199	1949	0,0000012
1950	0,00022	1950	0,00001
1951	0,0034	1951	0,00077

В таблицу 2 сведены данные аварийного простоя (в долях годового времени) оборудования и сооружений в системах №№ 1 и 2 за пятнадцать лет их эксплуатации.

Приведенные выше данные дают представление о числе аварий и их продолжительности на гидростанциях систем №№ 1 и 2. Однако различное оборудование и сооружение гидростанций в разной степени подвергаются износу и выходу из строя. В этой связи весьма любопытно выяснить уязвимость того или иного узла гидростанции и ее влияние на бесперебойную работу энергосистемы. В зависимости от того, какое оборудование или сооружение более подвергается аварийному повреждению, следует либо увеличить его прочность, либо предусмотреть резерв, способный заменить вышедшую из строя рабочую мощность. С этой целью на станции выделяются следующие узлы:

1. Агрегаты (рабочие и собственных нужд);
2. Подстанции любого напряжения;
3. Гидротехнические сооружения;
4. Вторичная коммутация (включающая в себя: цепи управления, релейную защиту, цепи автоматики и телемеханики).

Результаты такого выделения даны в таблице 3.

Таблица 3

Число аварий и число часов аварийного простоя по отдельным узлам гидростанций систем №№ 1 и 2 за 15 лет

Наименование узла	Система № 1		Система № 2	
	число аварий	Аварийн. простой в часах	число аварий	Аварийн. простой в часах
1. Агрегат (турбина—генератор)	88	7865	28	3342
2. Подстанция	41	193	28	2022
3. Гидротехн. сооружения	18	215	13	979
4. Вторичная коммутация	7	4	9	2
Всего по системе	154	8277	78	6345
Ав. простой агрег. в проц. от всей продолжительности простоев	—	95,0	—	52,6

Из таблицы 3 видно, что наиболее уязвимыми в аварийном отношении являются рабочие агрегаты (от 52,6 до 95% общего аварийного простоя). Далее идут гидротехнические сооружения и оборудование подстанций любого напряжения. На долю вторичной коммутации падает совсем ничтожная (0,031%) величина аварийного простоя за многолетие.

Для бесперебойного энергоснабжения потребителей резерв в сетевых устройствах необходим в неменьшей мере, чем резерв мощности. Однако считаем, что установив резервные агрегаты, исходя из средних данных об аварийности рабочих машин, можно покрыть дефицит мощности, вызванный выходом из строя любого другого оборудования системы, в том числе сетевых устройств.

Касаясь вопроса аварийности сетевых устройств, следует учесть

существующее в руководящих указаниях по проектированию электрических систем положение, согласно которому «Аварийный выход из работы участков сети, одновременное аварийное отключение нескольких участков сети, а также совпадение аварий агрегатов на электростанциях с аварийными отключениями участков сети, не рассматриваются. В развитых сетях допускается учитывать совпадение плановой ревизии линии с аварийным выходом из работы одной из линий, находящейся в другом районе» [1].

Как видно из приведенной цитаты, принятое нами решение — исследовать аварийность только агрегатов, не противоречит существующим директивным указаниям, а следовательно, вопрос исследования аварийности электрических сетей может быть исключен из рассмотрения без особого ущерба для результата.

В таблице 4 приведены числа часов аварийного простоя только агрегатов систем №№ 1 и 2. Из общего числа выделены случаи выхода из строя одновременно двух, трех и т. д. агрегатов, откуда видно, что наибольшее число часов аварийного простоя приходится на выход из строя одного агрегата (97,5% общей продолжительности простоев агрегатов в системе № 1 и 99,8% — в системе № 2).

Таким образом, при наличии одного резервного агрегата в рассмотренных нами системах «надежность» последней резко увеличится, а «аварийность» сократится до весьма малой величины.

Таблица 4
Число часов аварийного простоя агрегатов в системах №№ 1 и 2

Количество агрегатов, находившихся в аварии	Система № 1		Система № 2	
	фактич. простой в агр/час.	в проц. от всей продолжит. простоев	фактич. простой в агр/час.	в проц. от всей продолжит. простоев
Один агрег.	7664	97,5	3336	99,8
Два "	194	2,47	—	—
Три "	3,5	0,3	1,3	0,06
Четыре "	2,0			
Пять "	1,5			
Шесть "	—		4,0	0,14
Итого	7865,0	100,0	3342	100,0

Как показал опыт эксплуатации, одновременный выход большого числа агрегатов маловероятен и за изучаемый период имел только один случай выхода пяти агрегатов (в системе № 1) и два случая выхода шести агрегатов (в системе № 2), причем длительность каждой из аварий колебалась в пределах от 14 мин. до 1 ч. 20 мин.

Прежде чем перейти к подсчету возможной средней продолжительности аварийного простоя одного агрегата, необходимо указать, что используемый в энергетике показатель «надежности»

$$q = \frac{T_k - T_{от}}{T_k} \quad (1')$$

и вытекающий из него показатель „аварийности“

$$p = 1 - q = \frac{T_{от}}{T_k} \quad (2)$$

не учитывают времени нахождения оборудования в ремонте и в резерве.

Известно, что календарное время для оборудования электрических станций τ_0 , в частности агрегатов, складывается из: рабочего времени ($\tau_{раб.}$), в течение которого оборудование несет нагрузку, выполняя свои непосредственные технологические функции; времени, проведенного в резерве ($\tau_{рез.}$), что вызывается либо отсутствием нагрузки, либо недостаточностью энергоресурса; времени нахождения в ремонте ($\tau_{рем.}$). Последнее можно разделить на время, проводимое в плановых ремонтах ($\tau_{п.р.}$), выполняемых в соответствии с требованиями „Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей“ и время, проводимое в аварийных ремонтах ($\tau_{ав.р.}$), вызванных повреждением оборудования электрических станций.

Таким образом:

$$\tau_0 = \tau_{раб.} + \tau_{рез.} + \tau_{рем.} = \tau_{раб.} + \tau_{рез.} + \tau_{п.р.} + \tau_{ав.р.} \quad (3)$$

При заданном режиме работы системы можно заранее планировать такой порядок проведения планово-предупредительных ремонтов, при котором была бы сохранена бесперебойность энергоснабжения потребителей, а следовательно, член $\tau_{п.р.}$ можно не учитывать.

На надежность системы не влияет также простой части ее мощности либо из-за отсутствия нагрузки, либо из-за недостаточности энергоресурса. Иначе обстоит дело в случае возникновения аварий оборудования электрических станций. В этом случае степень бесперебойности энергоснабжения и величина аварийного резерва мощности и энергии зависят от величины вышедшей из строя мощности и длительности аварийного простоя. Следовательно, отношение времени, проводимого в аварийном простое, ко времени, проводимому в работе и аварийном простое, характеризует степень „аварийности“ того или иного оборудования. Приведенную формулировку аналитически можно представить в следующем виде:

$$p = \frac{\tau_{ав.}}{\tau_{раб.} + \tau_{ав.}}; \quad (4)$$

величина

$$q = 1 - p = 1 - \frac{\tau_{ав.}}{\tau_{раб.} + \tau_{ав.}} = \frac{\tau_{раб.}}{\tau_{раб.} + \tau_{ав.}} \quad (5)$$

характеризует степень „надежности“.

* Здесь T_k — календарная длительность рассматриваемого периода; $T_{от}$ — суммарная длительность тех периодов, в которые энергия потребителю или не отпускалась вовсе (полное отключение) или отпускалась в пониженном против потребности количестве.

Пренебрегая в знаменателе выражения (4) величиной $\tau_{ав.}$ — в тех случаях, когда она весьма мала по сравнению с первым слагаемым, получим

$$p = \frac{\tau_{ав.}}{\tau_{раб.}} \quad (6)$$

Пользуясь формулой (4) и данными числа часов аварийного простоя агрегатов систем №№ 1 и 2 были определены средние аварийности одного агрегата в году, а затем и средняя продолжительность аварии агрегата в году в среднем за многолетие, которая для рассматриваемых систем составляла от 0,4 до 0,7% годового времени.

Таблица 5
Число часов аварийного простоя агрегатов систем
№№ 1 и 2

Система № 1		Система № 2	
годы	доля времени работы агрегата в году	годы	доля времени работы агрегата в году
1937	0,00334	1937	0,016
1938	0,00616	1938	0,0095
1939	0,00467	1939	0,00128
1940	0,00371	1940	0,00159
1941	0,0358	1941	0,00474
1942	0,00135	1942	0,00625
1943	0,00955	1943	0,0000023
1944	0,000277	1944	—
1945	0,00196	1945	0,000405
1946	0,0000033	1946	0,00037
1947	0,0336	1947	0,015
1948	0,0000078	1948	—
1949	0,00426	1949	0,0000012
1950	0,000054	1950	0,00000263
1951	0,00435	1951	0,00093

Из таблицы 5 видно, что в отдельные годы величина p принимает произвольные значения, по которым трудно судить об ее изменениях в многолетнем разрезе. За рассматриваемый период имели место случаи, когда средняя продолжительность аварии одного агрегата достигала значительных величин (3,58% годового времени в 1941 г. и 3,36% годового времени в 1947 г. по системе № 1, 1,6% годового времени в 1937 г. и 1,5% годового времени в 1947 г. по системе № 2). Однако подобные годы весьма редки и не характеризуют изучаемый ряд. Если изучить среднюю продолжительность аварии одного агрегата за последние 10 лет (с 1942 г. по 1951 г.), то, за исключением 1947 г. когда эта величина принимает значение 3,36% годового времени для системы № 1 и 1,5% годового времени для системы № 2, увидим, что величина p всегда меньше 1% годового времени. Большая аварийность в 1947 г. получилась из-за наложения друг на друга нескольких аварий, часть которых вызвана повреждением оборудования по вине заводов изготовителей.

Если за ряд лет определить значение p , а затем сравнить его со средней величиной p , полученной для другого ряда лет, то можно судить об изменении этой величины за многолетний период.

Так, например, за период с 1937 г. по 1943 г. $p=0,925\%$ (система № 1) и $p=0,562\%$ (система № 2), а за период с 1943 г. по 1951 г. включительно $p=0,565\%$ (система № 1) и $p=0,205\%$ (система № 2). Из этих данных следует, что аварийность агрегатов сократилась на $39,2\%$ в системе № 1 и на $63,7\%$ в системе № 2. Подобное снижение аварийности следует приписать, с одной стороны, широкому внедрению новейших достижений науки и техники в области машиностроения и автоматизации производственных процессов и, с другой — применению передовых методов труда.

Опубликованные в научно-технической литературе данные об аварийности рабочих агрегатов наглядно показывают, что величина средней продолжительности аварии одного агрегата неуклонно сокращается. Так, например, по данным иностранной литературы, средняя продолжительность аварий гидроагрегата в 1926 г. равнялась $5,4\%$ годового времени [2], а в 1949 г. эта величина уменьшилась до $1,63\%$ годового времени [3].

Сравнение средних продолжительностей аварий гидроагрегатов, опубликованных за последние годы в Советском Союзе и США, показывает, что эта величина в 3,5 раза меньше для Советского Союза, что следует приписать влиянию приведенных выше факторов. В дальнейшем, вследствие улучшения качества выпускаемой продукции, сократятся аварии оборудования по вине заводов-изготовителей, а также аварии по вине персонала электрических станций из-за неправильных действий.

Из сказанного следует, что полученная на основе опыта эксплуатации величина $p=0,7\%$ годового времени является максимально возможной для рассмотренных систем и в будущем не будет превзойдена. Пользуясь теорией вероятности, возможно определение вероятности выхода из строя различного числа агрегатов системы, причем существующие методы теоретического исследования аварийности, основанные на биномиальном и пуассоновом распределениях, требуют, обязательно, знания величины возможной средней продолжительности аварии агрегата.

Водно-энергетический институт
АН Армянской ССР

Поступило 26 VIII 1953

ЛИТЕРАТУРА

1. Руководящие указания по проектированию электрических систем. „Электричество“, № 10, 1946.
2. Ralston F. C., Thomas R. L. Reliability of hydro-electric units „Report of hydraulic power committee“ National electric light association. N.—Y. city. 1926y.
3. An AIEE commite report. Outage rates of steam turbines and boilers and of hydro units. „Transactions of the AIEE“, vol. 68, part I, 1949y.

Ս. Գ. Սարգսյան

ՀԻԴՐՈԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ՍԻՍՏԵՄՆԵՐՈՒՄ ՀԻԴՐՈԿԱՅԱՆՆԵՐԻ ՍԱՐՔԱՎՈՐՄԱՆ
ՎՅԱՐԱՅԻՆ ՑՈՒՑՁԻ ՈՐՈՇՈՒՄԸ

ԱՄՓՈՓՈՒՄ

Հոգվածում վերլուծված են երկու գործող հիդրոէներգետիկ սխեմաների 15 տարվա շահագործման վթարային հաշվետու նյութերը:

Հիդրոէկայանների առանձին հանգույցների վթարայնության վերաբերյալ կատարված հետազոտությունները ցույց են տվել, որ վթարային պարապուրդների ճնշող մասն ընկնում է հիդրոագրեգատների վրա:

Օգտվելով հիդրոագրեգատների վթարային պարապուրդների տվյալներից և վթարային ցուցչի հաշվարկման համար հեղինակի առաջարկած արտահայտությունից, որոշվել է նախագծային պրակտիկայի համար կարևոր՝ վթարային պարապուրդի միջին, հալոնական տեղումնայինը տարվա ընթացքում, Այդ մեծություն միջոցով կարելի է որոշել վթարային ռեգերդի անհրաժեշտ մեծությունը հիդրոէներգետիկ սխեմումում:

КРИТИКА И БИБЛИОГРАФИЯ

В. В. Пинаджян

Об одной ошибке К. Ежека в определении несущей способности внецентренножатых стержней

В 1936—37 годах К. Ежек предложил аналитический метод определения несущей способности внецентренножатых стержней любой симметричной формы сечения [1, 2], исходя из предположения, что материал стержня совершенно упруг до предела текучести и совершенно пластичен после начала текучести (фиг. 1). Метод расчета К. Ежека в настоящее время является общепризнанным и приводится в ряде курсов по строительным конструкциям как в СССР, так и за границей.

При рассмотрении более общей задачи расчета сжато-изогнутых стержней с учетом линейного упрочнения материала нами в исследованиях К. Ежека обнаружена ошибка.

Считаем необходимым обратить на это внимание, поскольку эта ошибка приводит к неправильным результатам при определении несущей способности внецентренножатых элементов.

Известно, что в сжато-изогнутом стержне любого сечения в упруго-пластической стадии работы элемента может возникнуть одно из следующих трех деформационных состояний [1—5].

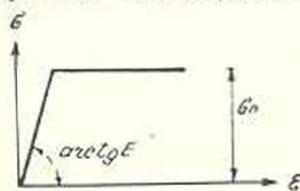
Деформационное состояние I ($\epsilon_c > \epsilon_n$, $\epsilon_p \leq \epsilon_n$)*, характеризующееся односторонней пластичностью сечения с вогнутой стороны элемента.

Деформационное состояние II ($\epsilon_c < \epsilon_n$, $\epsilon_p > \epsilon_n$), характеризующееся односторонней пластичностью сечения в растянутой зоне.

Деформационное состояние III, характеризующееся наличием пластических деформаций как в растянутой, так и в сжатой зонах опасного сечения.

Каждому из описанных выше деформационных состояний в координатном поле φ — λ соответствует вполне определенная область (фиг. 2).

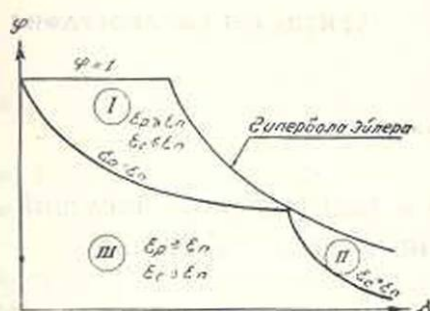
Границу между областями деформационных состояний I и III находим из условия $\epsilon_p = \epsilon_n$, границу между областями II и III — из условия $\epsilon_c = \epsilon_n$.



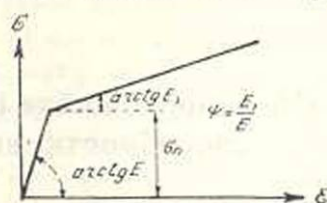
Фиг. 1.

* Буквенные обозначения приводятся в конце заметки.

Для внецентренножатых стержней любой симметричной формы сечения, при действии момента в плоскости симметрии и устойчивости плоской формы изгиба, в случае когда диаграмма $\sigma-\varepsilon$ материала стержня состоит из двух отрезков прямых (фиг. 3), нами получено следующее выражение граничной кривой между областями I и III [6]:



Фиг. 2.



Фиг. 3.

$$(\lambda_{I-III})^2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{\varphi \cdot \sigma_n \cdot I_x} \cdot \left\{ (1 - \psi) \left[I_{III} - (a_1 - c_1) \cdot S_{I\text{H}} - \right. \right. \\ \left. \left. - (1 - \psi) \cdot (h - c_1) \cdot \frac{F}{2} \cdot \frac{S_{I\text{H}} + (a_1 - c_1) \cdot \frac{\partial S_{I\text{H}}}{\partial c_1}}{\psi F - (1 - \psi) \cdot \frac{\partial S_{I\text{H}}}{\partial c_1}} \right] + \psi I_x \right\}, \quad (1)$$

где c_1 определяется из следующего соотношения:

$$(h - c_1) \cdot (1 - \psi) \cdot \frac{F}{2} = (1 - \psi) \cdot S_{I\text{H}} + \psi F (a_1 - c_1). \quad (2)$$

Выражение граничной кривой между областями II и III (фиг. 2) получено в следующем виде:

$$(\lambda_{II-III})^2 = \frac{\pi^2 E}{\varphi \cdot \sigma_n \cdot I_x} \cdot \left\{ (1 - \psi) \cdot \left[I_{2b} - (a_2 - c_2) \cdot S_{2b} - \right. \right. \\ \left. \left. - (1 + \psi) \cdot (h - c_2) \cdot \frac{F}{2} \cdot \frac{S_{2b} + (a_2 - c_2) \cdot \frac{\partial S_{2b}}{\partial c_2}}{\psi F - (1 - \psi) \cdot \frac{\partial S_{2b}}{\partial c_2}} \right] + \psi I_x \right\}, \quad (3)$$

где c_2 определяется из следующего выражения:

$$(h - c_2) \cdot (1 + \psi) \cdot \frac{F}{2} = (1 - \psi) \cdot S_{2b} + \psi F (a_2 - c_2). \quad (4)$$

В частном случае, когда материал стержня за пределом текучести совершенно пластичен (фиг. 1), в полученных формулах следует положить $\psi = 0$.

Положив в (1) и (2) $\psi = 0$ и, имея в виду, что $a_1 = h - a_2$ и $S_{1H} = -\frac{1}{2} \frac{\partial I_{1H}}{\partial c_1}$, после некоторых преобразований получим:

$$(\lambda_{I-III})^2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{\varphi \cdot \sigma_n \cdot I_x} \cdot \left[I_{1H} + \frac{(h - c_1)}{2} \cdot \frac{\partial I_{1H}}{\partial c_1} + (h - c_1)^2 \cdot (1 - \varphi) \cdot \frac{F}{2} - \right. \\ \left. - \frac{(h - c_1) \cdot (1 - \varphi) \cdot F}{4 \cdot \frac{\partial S_{1H}}{\partial c_1}} \cdot \frac{\partial I_{1H}}{\partial c_1} \right], \quad (5)$$

$$(h - c_1) \cdot (1 - \varphi) \cdot \frac{F}{2} = S_{1H}. \quad (6)$$

Аналогично положив в (3) и (4) $\psi = 0$, $a_2 = h - a_1$ и $S_{2b} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial I_{2b}}{\partial c_2}$, получим:

$$(\lambda_{II-III})^2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{\varphi \cdot \sigma_n \cdot I_x} \cdot \left[I_{2b} + \frac{(h - c_2)}{2} \cdot \frac{\partial I_{2b}}{\partial c_2} + (h - c_2)^2 \cdot (1 + \varphi) \cdot \frac{F}{2} - \right. \\ \left. - \frac{(h - c_2) \cdot (1 + \varphi) \cdot F}{4 \cdot \frac{\partial S_{2b}}{\partial c_2}} \cdot \frac{\partial I_{2b}}{\partial c_2} \right], \quad (7)$$

$$(h - c_2) \cdot (1 + \varphi) \cdot \frac{F}{2} = S_{2b}. \quad (8)$$

К. Ежек дифференцирует выражение (6) по переменной c_1 , в результате чего получает:

$$\frac{\partial S_{1H}}{\partial c_1} = -(1 - \varphi) \cdot \frac{F}{2}. \quad (9)$$

Подставив (9) в (5), К. Ежек получил следующее выражение граничной кривой между областями деформационных состояний I и III, применительно к внецентренносжатым стержням любой симметричной формы сечения, выполненным из идеального упруго-пластического материала (фиг. 1):

$$(\lambda_{I-III})^2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{\varphi \cdot \sigma_n \cdot I_x} \cdot \left[I_{1H} + (h - c_1) \cdot \frac{\partial I_{1H}}{\partial c_1} + (h - c_1)^2 \cdot (1 - \varphi) \cdot \frac{F}{2} \right], \quad (10)$$

где c_1 находится из выражения (6).

* См. формулу (19) на стр. 369 [1] и (16) на стр. 104 в монографии [2].

Совершенно таким же путем дифференцируя (8) по переменной c_2 , К. Ежек получил:

$$\frac{\partial S_{2b}}{\partial c_2} = -(1+\varphi) \cdot \frac{F}{2}. \quad (11)$$

Подставив (11) в (7), К. Ежек предложил следующее выражение граничной кривой между областями деформационных состояний II и III:

$$(\lambda_{II-III})^2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{\varphi \cdot \sigma_n \cdot I_x} \left[I_{2b} + (h - c_2) \cdot \frac{\partial I_{2b}}{\partial c_2} + (h - c_2)^2 \cdot (1 + \varphi) \cdot \frac{F}{2} \right], \quad (12)$$

где c_2 находится из выражения (8).

В своей монографии [2] К. Ежек использует формулы (10) и (12) при составлении расчетных графиков применительно к внецентренно-сжатым стальным стержням практических профилей. Формулы (10) и (12) являются ошибочными. Например, для прямоугольного сечения,

имеющего высоту h и ширину b , имеем: $F = bh$; $I_x = \frac{1}{12} \cdot bh^3$;

$$S_{Ih} = \frac{b}{2}(h - c_1)^2; \quad I_{Ih} = \frac{b}{3}(h - c_1)^3; \quad \frac{\partial S_{Ih}}{\partial c_1} = -b(h - c_1); \quad \frac{\partial I_{Ih}}{\partial c_1} = -b(h - c_1)^2.$$

Подставляя значения F и S_{Ih} в (6), после простых преобразований получим:

$$\frac{c_1}{h} = \varphi. \quad (13)$$

Подставляя приведенные выше пластические и геометрические характеристики в (10), в силу (13), для прямоугольного сечения по формуле (10) К. Ежека получим:

$$(\lambda_{I-II})^2 = - \frac{2\pi^2 E}{\varphi \cdot \sigma_n} \cdot (1 - \varphi)^3. \quad (14)$$

На основании правильных формул (5) и (6), для прямоугольного сечения получим:

$$(\lambda_{I-II})^2 = \frac{\pi^2 \cdot E}{\varphi \cdot \sigma_n} \cdot (1 - \varphi)^2. \quad (15)$$

Выражение (15) было получено К. Ежеком в 1935 году при рассмотрении внецентренно-сжатого стержня прямоугольного сечения [7].

Сопоставляя (14) и (15), нетрудно заметить, что между ними имеется существенное расхождение.

В чем же ошибка К. Ежека?

* См. формулу (30) на стр. 370 [1] и формулу (29) на стр. 107 [2].

Дело в том, что при заданных геометрических и механических характеристиках сечения h , F и φ формулы (2) и (4) и соответственно их частные решения (6) и (8) устанавливают функциональную зависимость между высотой пластической зоны сечения c_i ($i=1,2$) и коэффициентом уменьшения предела текучести внецентренножатого стержня φ .

При дифференцировании выражений (6) и (8) по переменной c_i ($i=1,2$) К. Ежек считал φ постоянной величиной, в то время как при переменном c_i коэффициент φ также является переменной величиной.

В связи с этим очевидно, что выражения (9) и (11) неправильные и лишены физического смысла. Равным образом неверны и выражения (10) и (12), по которым, кстати говоря, получается, что гибкость элемента — мнимая величина, в то время как она по физическому смыслу существенно положительная величина.

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

F — площадь сечения внецентренножатого элемента брутто;

I_x — момент инерции сечения относительно оси, проходящей через центр тяжести сечения и перпендикулярной плоскости изгиба;

h — высота сечения;

a_1 — кратчайшее расстояние от центра тяжести сечения до наиболее сжатого волокна сечения;

a_2 — кратчайшее расстояние от центра тяжести сечения до наиболее растянутого волокна сечения;

λ — гибкость элемента в плоскости изгиба;

ϵ_c — максимальная относительная деформация сжатых волокон;

ϵ_p — максимальная относительная деформация растянутых волокон;

ϵ_n — относительная деформация, соответствующая пределу пропорциональности;

c_1 — высота (в плоскости изгиба) пластической зоны в сжатой части сечения;

c_2 — высота пластической зоны в растянутой части сечения;

S_{1n} , I_{1n} — статический момент и момент инерции части сечения, расположенной ниже оси 1—1 относительно этой же оси; ось 1—1 проходит по контакту упругой и пластической зон в сжатой части сечения;

S_{2n} , I_{2n} — статический момент и момент инерции части сечения, расположенной выше оси 2—2 относительно этой же оси; ось 2—2 проходит по контакту упругой и пластической зон в растянутой части сечения;

σ_n — предел пропорциональности (текучести) при сжатии (растяжении);

E — модуль продольной упругости материала;

E_1 — модуль упрочнения материала;

$\varphi = \frac{N_{кр}}{F \cdot \sigma_n}$ — отношение критической продольной силы внецентренного сжатого стержня $N_{кр}$ к осевой сжимающей силе текучести $F \cdot \sigma_n$;

$$\psi = \frac{E_1}{E}.$$

Институт стройматериалов и
сооружений АН Армянской ССР

Поступило 22 IX 1953

ЛИТЕРАТУРА

1. Ježek K. Die Festigkeit aussermittig gedrückter Stahlstäbe. Bauingenieur, H. 30/31, 1936.
2. Ježek K. Die Festigkeit von Drückstäben aus Stahl, Wien, 1937.
3. Стрелецкий Н. С., Генцев А. Н., Балдин В. А., Белени Е. И., Лексиг Е. Н. Стальные конструкции. М., 1948.
4. Ильющин А. А. Пластичность. М., 1948.
5. Гвоздев А. А. Расчет несущей способности конструкций по методу предельного состояния. М., 1949.
6. Пинаджян В. В. К вопросу о предельном состоянии сжато-изогнутых стержней любой симметричной формы сечения. ДАН Армянской ССР, том XIV, № 4, 1951.
7. Ježek K. Näherungsberechnung der Tragkraft exzentrisch gedrückter Stahlstäbe. Stahlbau H. 12, 1935.

