

**ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА**

А. Г. Назаров

**Линейное дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами в контурных производных**

Излагаемый ниже путь решения не представляет принципиальный интерес, но все же имеет известные удобства, в особенности при наличии импульсивных членов, входящих в качестве неоднородной части уравнения. Последнее часто имеет место при решении технических задач.

Пусть дано

$$a_0^{(n)} y^{(n)} + a_1^{(n-1)} y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1}^{(1)} y' + a_n^{(0)} y = f(x) \quad \dots (1)$$

при начальных условиях:

$$x = x_0; y = y_0, y' = y_0', \dots, y^{(n-1)} = y_0^{(n-1)} \quad \dots (2)$$

т. е. требуется решить задачу Коши. Полагаем, что  $f(x)$  содержит в себе скачки и имеет своими несобственными значениями импульсивные функции. Выразим (1) в контурных производных [1]. Отсечем ненужную нам часть функции  $y(x)$ , расположенную влево от точки  $x = x_0$  с помощью разрывного множителя  $\Gamma(x - x_0)$ , и соответственно для  $f(x)$  введем  $\Gamma(x - x_0) f(x)$ .

Подставляя контурные производные  $y$  в (1), найдем, что равенство нарушится. Для восстановления этого равенства к правой части уравнения должны быть приписаны соответствующие члены. В результате окончательно получим:

$$\begin{aligned} & a_0^{(n)} [y] + a_1^{(n-1)} [y] + \dots + a_{n-1}^{(1)} [y]' + a_n^{(0)} y = a_0 y_0 \Gamma^{(n)}(x - x_0) + \\ & + (a_0 y_0' + a_1 y_0) \Gamma^{(n-1)}(x - x_0) + (a_0 y_0'' + a_1 y_0' + a_2 y_0) \Gamma^{(n-2)}(x - x_0) + \\ & \dots + (a_0 y_0^{(n-1)} + a_1 y_0^{(n-2)} + \dots + a_{n-1} y_0) \Gamma^{(1)}(x - x_0) + \Gamma(x - x_0) f(x) \quad \dots (3) \end{aligned}$$

При  $x < x_0$ , (3) тождественно равно нулю, при  $x > x_0$  оно переходит в (1). Уравнение (3) заменяет собой уравнение (1) и принадлежащие ему начальные условия (2).

Рассматривая уравнение (3), выраженное в контурных производных, мы убеждаемся, что начальные условия (2), умноженные на импульсивные функции, входят в правую часть (3) на равных началах с  $f(x)$ . Нетрудно убедиться, что к такому же виду приводится дифференциальное уравнение при пользовании операционным исчислением. Если  $f(x) \equiv 0$  и все начальные условия нулевые, то мы получаем решение  $y \equiv 0$ , поскольку при  $x < x_0$ ,  $y = 0$ . Таким образом, однородное дифференциальное уравнение в контурных производных практически не существует. Однородное дифференциальное уравнение в обычном смысле, преобразованное в дифференциальное уравнение в контурных производных, приводит опять-таки к неоднородному дифференциальному уравнению (3), где  $f(x) \equiv 0$ . Свободный член в этом случае содержит лишь систему импульсивных функций.

Докажем теперь следующее предложение:

Дифференциальное уравнение (3) может быть решено при любых начальных условиях (2) и для любого свободного члена  $f(x)$ , если удастся найти решение для следующего дифференциального уравнения:

$$a_0 [K(x)]^{(n)} + a_1 [K(x)]^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} [K(x)]' + a_n K(x) = \Gamma(x) \dots (4)$$

Для сокращения здесь вместо  $\Gamma(x) K(x)$  пишем  $K(x)$ .

Уравнение это получается из (3) при  $f(x) \equiv 0$ ,

$$y_0 = y_0' = \dots = y_0^{(n-2)} = y_0^{(n-1)} = 0 \text{ и при } y_0 = \frac{1}{a_0} \dots (5)$$

Заметим, что при замене  $\Gamma(x)$  через  $\Gamma(x-\xi)$  мы получим решение  $K(x-\xi)$ . Докажем, что общее решение для (3) может быть выражено через  $K(x-\xi)$ . Пользуясь линейностью (3), мы можем находить частные решения для каждого свободного члена, входящего в его правую часть, и затем полученные решения сложить. Найдем частное решение, соответствующее  $f(x)$ , т. е. в предположении равенства нулю всех начальных условий. Разобьем  $f(x)$  на элементарные импульсивные функции первого порядка:

$$\lim_{x_0} \sum_{x_0}^x \Gamma(x-\xi_i) f(\xi_i) \Delta \xi_i.$$

Каждой элементарной импульсивной функции

$$\Gamma(x-\xi_i) f(\xi_i) \Delta \xi_i$$

удовлетворяет решение

$$K(x-\xi_i) f(\xi_i) \Delta \xi_i.$$



Следовательно, решение для  $f(x)$ :

$$U_0(x; x_0) = \lim_{\Delta \xi_i \rightarrow 0} \sum_{\xi_i=0}^x K(x-\xi_i) f(\xi_i) \Delta \xi_i = \int_{x_0}^x K(x-\xi) f(\xi) d\xi. \quad \dots (6)$$

Чтобы найти полное решение для (3), достаточно вместо  $f(x)$  подставлять импульсивные функции различных порядков. Частное решение, отвечающее  $\Gamma^{(1)}(x-x_0)$ , определится из (6) следующим образом:

$$U_1(x; x_0) = \int_{x_0=0}^x K(x-\xi) \Gamma^{(1)}(\xi-x_0) d\xi = K(x-x_0). \quad \dots (7)$$

Нижний предел интеграла помечен через  $x_0=0$  в знак того, что точка особенности  $x_0$  должна быть включена в пределы интеграла. Результат (7) очевиден. Он непосредственно вытекает из (4) при замене  $\Gamma^{(1)}(x)$  через  $\Gamma^{(1)}(x-x_0)$ . Найдем теперь решение, отвечающее импульсивной функции  $\Gamma^{(k)}(x-x_0)$ :

$$U_k(x; x_0) = \int_{x_0=0}^x K(x-\xi) \Gamma^{(k)}(\xi-x_0) d\xi = (-1)^{k-1} \left[ \frac{d^{k-1}}{d\xi^{k-1}} K(x-\xi_0) \right]_{\xi=x_0}$$

или, имея в виду, что

$$(-1)^{k-1} \left[ \frac{d^{k-1}}{d\xi^{k-1}} K(x-\xi) \right]_{\xi=x_0} = \frac{d^{k-1}}{dx^{k-1}} K(x-x_0),$$

окончательно найдем:

$$U_k(x; x_0) = K^{(k-1)}(x-x_0). \quad \dots (8)$$

Общее решение для (3) запишется теперь в виде:

$$\begin{aligned} y = & a_0 y_0 u_n(x; x_0) + (a_0 y'_0 + a_1 y_0) u_{n-1}(x; x_0) \\ & + (a_0 y''_0 + a_1 y'_0 + a_2 y_0) u_{n-2}(x; x_0) \dots \\ & + (a_0 y_0^{(n-1)} + a_1 y_0^{(n-2)} \dots + a_{n-1} y_0) u_1(x; x_0) + u_0(x; x_0) \dots (9) \end{aligned}$$

Сопоставляя (9) и (3), приходим к следующему правилу: чтобы найти решение дифференциального уравнения (3), достаточно его выражение по левую сторону знака равенства приравнять искомому  $y$ , а в выражении по правую сторону знака равенства заменить  $\Gamma^{(k)}$  через  $u_k$ , в частности  $\Gamma(x-x_0)f(x)$  через  $u_0$ , определяемые формулами (6), (7) и (8).

Следует помнить, что при  $x < x_0$ ,  $u_k(x - x_0) = 0$ .

Если  $i(x)$  содержит импульсивные функции с точками особенности в  $x_i$ , то в  $u_0(x)$  будут в свою очередь входить члены типа (8) с заменой  $x_0$  на  $x_i$ , причем при  $x < x_i$ ,  $u_k(x - x_i) = 0$ .

Итак, если известно частное решение уравнения (4) для  $k(x - \xi)$ , то общее решение найдется согласно (6), (7), (8) и (9).  $K(x - \xi)$  является здесь ничем иным, как функцией влияния Грина, решающей в данном случае задачу (1,2). Практическое удобство такого приема решения заключается в том, что для данного, часто применяемого дифференциального уравнения достаточно раз навсегда найти функцию влияния  $K(x)$ , и это позволит впоследствии находить решения для (1) при любых начальных условиях и свободных членах. Вся задача заключается теперь в отыскании решения дифференциального уравнения (4).

Удобнее всего для этого применить символический способ. Тогда (4) следует представить в виде:

$$\varphi(D)K(x) = \Gamma^{(1)}(x),$$

откуда

$$K(x) = \frac{\Gamma^{(1)}(x)}{\varphi(D)}.$$

Разложим рациональную дробь  $\frac{1}{\varphi(D)}$  на простейшие

$$\frac{1}{\varphi(D)} = \sum_{s=1}^m \sum_{q=1}^{k_s} \frac{A_s^{(q)}}{(D - \alpha_s)^q},$$

где  $\alpha_s$  — корни уравнения  $\varphi(D) = 0$ . Тогда

$$K(x) = \sum_{s=1}^m \sum_{q=1}^{k_s} \frac{A_s^{(q)} \Gamma^{(1)}(x)}{(D - \alpha_s)^q}.$$

Поскольку

$$\begin{aligned} \frac{1}{(D - \alpha_s)^q} \Gamma^{(1)}(x) &= \frac{e^{\alpha_s x}}{(q-1)!} \int_0^x (x - \eta)^{q-1} e^{-\alpha_s \eta} \Gamma^{(1)}(\eta) d\eta \\ &= \frac{e^{\alpha_s x}}{(q-1)!} \int_0^x x^{q-1} \Gamma^{(1)}(\eta) d\eta = \frac{e^{\alpha_s x} x^{q-1}}{(q-1)!}, \end{aligned}$$

то получим

$$K(x) = \sum_{s=1}^m \sum_{q=1}^{k_s} A_s^{(q)} \frac{e^{\alpha_s x} x^{q-1}}{(q-1)!} \dots (10)$$



Задача решена до конца.

*Пример.* Колебания упругой системы с одной степенью свободы характеризуются уравнением:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + k^2x = f(t).$$

Дифференциальное уравнение в контурных производных при начальных условиях  $t=0$ ,  $x=x_0$  и  $\frac{dx}{dt} = v_0$  имеет вид:

$$\frac{d^2[x]}{dt^2} + k^2x = \Gamma^{(2)}(t)x_0 + \Gamma^{(1)}(t)v_0 + \Gamma(t)f(t).$$

Функция Грина удовлетворяет уравнению

$$\frac{d^2[K]}{dt^2} + k^2K = \Gamma^{(1)}(t).$$

Символический полином

$$\varphi(D) = D^2 + k^2$$

а решение для  $K(t)$

$$\begin{aligned} K(t) &= \frac{\Gamma^{(1)}(t)}{\varphi(D)} = -\frac{\Gamma^{(1)}(t)}{2ki(D+ki)} + \frac{\Gamma^{(1)}(t)}{2ki(D-ki)} = \\ &= \left( \frac{1}{2ki} e^{-ikt} + \frac{1}{2ki} e^{ikt} \right) \Gamma(t) \end{aligned}$$

или 
$$K(t) = \frac{1}{k} \Gamma(t) \sin kt.$$

Решение, отвечающее свободному члену  $f(t)$ , равно:

$$\frac{1}{k} \int_0^t \sin k(t-\xi) f(\xi) d\xi,$$

а для  $\Gamma^{(2)}(t)$

$$\frac{dK(t)}{dt} = \Gamma(t) \cos kt.$$

Окончательно имеем, опустив теперь без ущерба для дела  $\Gamma(t)$ :

$$x = x_0 \cos kt + \frac{v_0}{k} \sin kt + \frac{1}{k} \int_0^t \sin k(t-\xi) f(\xi) d\xi.$$

Если  $f(t)$  содержит в момент времени  $t=t_1$  импульс  $S \Gamma^{(1)}(t-t_1)$ , то

соответствующий член выделится из интеграла следующим образом:

$$\frac{S}{k} \int_0^t \sin k(t-\xi) \Gamma^{(1)}(\xi-t_1) d\xi = \frac{S}{k} \sin k(t-t_1) \cdot \Gamma(t-t_1).$$

Институт Строительных Материалов  
и Сооружений  
Академии Наук Армянской ССР

Поступило 25 VI 1948.

## ЛИТЕРАТУРА

1. А. Г. Назаров—ДАН Арм. ССР, VII, № 1, 1947 и VIII, № 3, 1948.

Ա. Գ. Նազարով

## ԵԶՐԱՅԻՆ ԱԾԱՆՑՅԱԼՆԵՐՈՎ, ՀԱՍՏԱՏՈՒՆ ԳՈՐԾԱԿԻՑՆԵՐՈՎ ԴԻՖԵՐԵՆՑԻԱԼ ՀԱՎԱՍԱՐՈՒՄՆԵՐ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Վ

Ուսումնասիրված է հավասարումների լուծման մի ուղի, որը թեև սկզբնաբան հետաքրքրություն չի ներկայացնում, բայց ունի հայտնի առավելություններ, առանձնապես այն դեպքերում, երբ հավասարման անհամասեռ մասի մեջ մտնում են իմպուլսիվ ֆունկցիաներ: Վերջիններին հախալի հանդիպում ենք տեխնիկական խնդիրներ լուծելու ժամանակ:

Մեթոդի էությունը կայանում է նրանում, որ (1) և (2) պայմանները լիովարինվում են եզրային ածանցյալներով հավասարմամբ (3) և սխեմիկ մեթոդով որոշվում է Գրինի ֆունկցիան:



## Фильтрация воды через земляные плотины на проницаемых основаниях с водой на н. б.

Вопросы теории фильтрации и фильтрационного расчета земляных плотин имеют большое практическое значение, поскольку устойчивость плотин в значительной степени обусловлена их способностью противостоять фильтрационному потоку, а также для правильной оценки возможных потерь из водохранилища. По этому вопросу имеется довольно обширная литература, но подавляющее большинство работ посвящено исследованию фильтрации через земляные плотины на водоупоре, в то время как наибольшее практическое значение имеет расчет плотин на проницаемых основаниях.

### Обзор работ о фильтрации через земляные плотины на непроницаемых основаниях.

Работы о фильтрации через земляные плотины, опубликованные до 1931 г., были основаны на ряде грубых допущений, совершенно искажающих природу явления. Впервые вопрос по фильтрации через земляные плотины на непроницаемых основаниях получил приемлемое разрешение в работе Акад. Н. Н. Павловского [1]. Однако и она не свободна от недочетов. Допущение о горизонтальности фильтрационных струек приводит к преувеличению роли низового и в особенности верхового клина в гашении напора, т. е. к ошибке в нежелательном направлении.

В 1934 г. весьма интересное решение дано доктором инженером Дахлером [2], положенное ныне в основу норм и технических условий по фильтрационным расчетам НИИГ.

Однако, вопрос фильтрации через низовой клин получил еще менее удовлетворительное решение, чем у Шаффернака [3] и у Павловского.

Проф. А. А. Угинчус [4] в своей диссертационной работе для верхового клина принимает за основу метод Павловского, опираясь на данные натурных наблюдений и учитывая возможность фильтрационного уплотнения повышающего сопротивление фильтрации. Однако, выводы Угинчуса в этой части весьма сомнительны, поскольку вышеупомянутые материалы относятся к плотинам с проницаемым основанием, которым свойственно более низкое положение депрессии, а фильтрационное уплотнение не всегда получает развитие и в первые годы совсем отсутствует. Для низового клина Угинчус принимает решение Казагранде [5], но последнее весьма не совершенно и это обстоятельство признает сам Угинчус в своей последующей работе. Таково современное состояние вопроса о фильтрационном



расчете плотин на непроницаемом основании. Работами Павловского, Дахлера и Угинчуса эта проблема получала в основном удовлетворительное решение.

В следующих наших работах мы дадим свое решение, вытекающее, как частный случай, из более общих формул фильтрации через земляные плотины на проницаемых основаниях и дадим оценку точности, которая покажет, что наши формулы имеют все преимущества над упомянутыми решениями.

Необходимо только экспериментальное разрешение ряда вопросов о роли верхового и низового клиньев в целях введения поправочных коэффициентов  $\beta_1$  и  $\beta_2$  [9] к имеющимся гидравлическим формулам.

### Обзор работ о фильтрации через земляные плотины на проницаемых основаниях.

Теория вопроса о фильтрации через земляные плотины на проницаемых основаниях до последнего времени отсутствовала. Имеется ряд грубо ориентировочных предложений и ограниченное число опытных данных. Интерес представляет только работа Джестина [6], который, заменив депрессионную кривую прямой, пытается определить положение ее в теле плотины и условие выклинивания на сухой откос (или поглощения фильтрационного потока в толщу основания). Им же даны формулы, позволяющие определить такую ширину плотины, при которой фильтрационный поток не будет выклиниваться на низовом откосе. С гидравлической точки зрения решение Джестина грубо ошибочно, т. к. положение линии депрессии внутри профиля вообще невозможно.

Кроме того, в своих исследованиях мы пришли к тому выводу, что в подавляющем большинстве случаев достичь поглощения фильтрационных вод в толще основания можно только применив специальные противофильтрационные устройства (замки, ядра, экран и т. п.).

В опубликованной в 1945 г. статье „Фильтрация воды через земляную плотину на проницаемом основании“ проф. Ведерников [7] берет земляную плотину трапециoidalного профиля с дренажом и проницаемым слоем неограниченно большой мощности. В результате ряда допущений (как например, верховой откос принимает как за дугу окружности, скорость у дренажа стремится к бесконечности и т. п.) получает простую формулу, пригодную для практики. Однако это решение является частным случаем своего названия.

В 1947 г. вышла книга проф. Ф. Б. Нельсона-Скорнякова [8] „Фильтрация в однородной среде“, в которой автор, в своем гидромеханическом решении, дает расчет фильтрации через земляные плотины на проницаемых основаниях, с дренажом, с противофильтрационными устройствами и т. п. Однако решение у него построено на достаточно произвольных упрощениях в пограничных условиях.

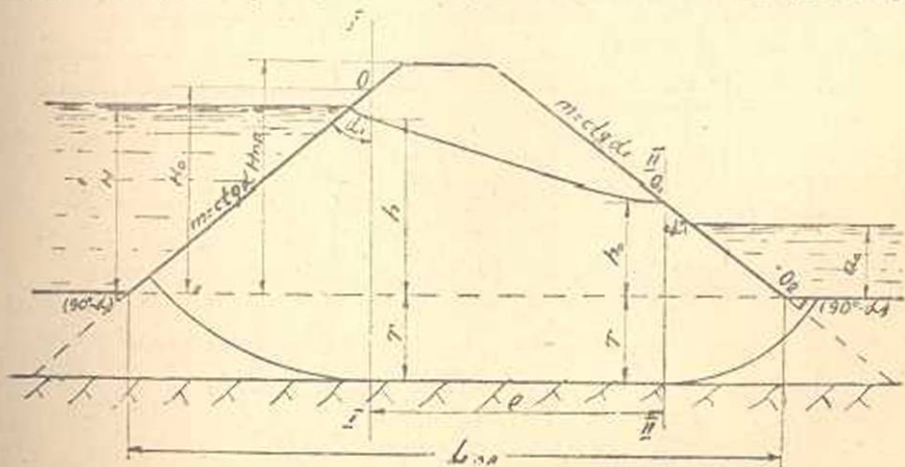


Очертание верхового откоса (принятое в одном случае горизонтальным, в другом вертикальным) получилось весьма заметно отличающимся от имеющих место в действительности. В этом решении водохранилище определенного дна так же не имеет. Таким образом, при применении этих упрощенных решений к конкретным расчетам всегда остается неясным вопрос—насколько в каждом частном случае эти большие отклонения от действительного очертания верхового откоса и дна сказываются на точности расчета.

В 1947 г. мы дали гидравлическое решение фильтрационного расчета для плотин трапециoidalного профиля [9]. Линии токов в пределах верхового и низового клиньев приняты криволинейными как дуги концентрических окружностей. Полученные уравнения решаются графическим способом. В работе приведено несколько примеров, показывающих предельную простоту этого решения. Нами дана оценка точности получаемых формул\*\*, где видно, что результаты прекрасно совпадают с опытными данными других авторов. Указанная работа посвящена расчету фильтрации земляных плотин при отсутствии воды на нижнем бьефе, между тем наиболее часто встречающимся случаем является плотина при наличии воды на бьефе. Этому случаю, как наиболее общему из всех выше указанных, посвящена настоящая работа. Полученные нами формулы [9] для верхового клина и средней части плотины здесь остаются без изменения. Только дадим новые формулы для низового клина, решение которых с формулами верхового клина и средней части плотины даст полный фильтрационный расчет земляных плотин.

### Предлагаемое решение автора

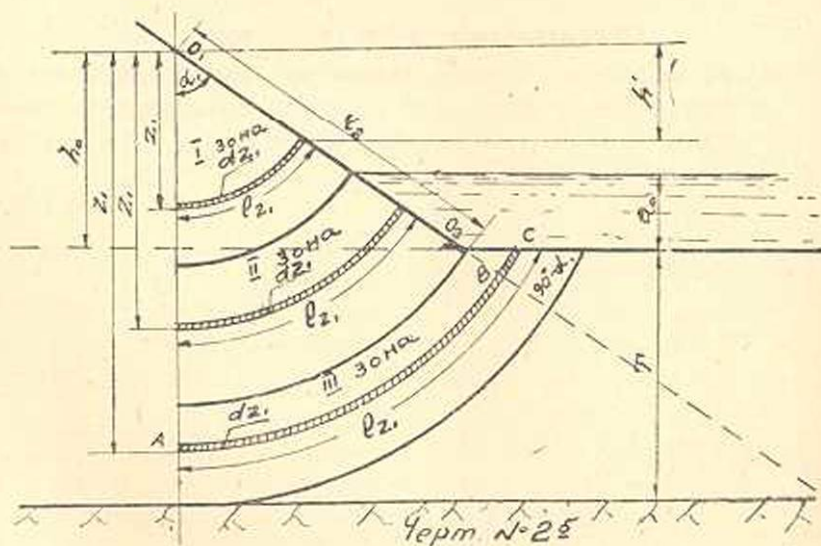
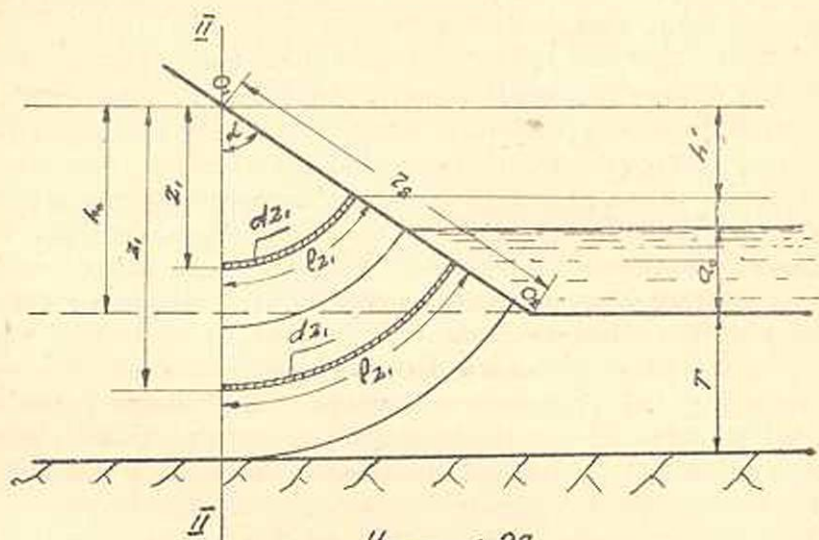
Возьмем земляную плотину обычного трапециoidalного профиля с проницаемым основанием и разобьем ее на 3 части сечением I—I и II—II (см. черт. 1) точно так, как сделано в нашей работе [9].



Черт. №1

\* Эта работа выйдет отдельной статьей.

При движении воды через низовой клин встречается 2 случая:  
 1) Когда имеем малую толщину проницаемого слоя  $T$ , самая нижняя линия тока выклинивается на низовом откосе плотины, т. е. имеем  $h_0 + T < r_2$  (см. черт. 2а и 2) 2) Когда имеем большую толщину проницаемого слоя  $T$ , самая нижняя линия тока выклинивается на дне нижнего бьефа, т. е. имеем  $h_0 + T > r_2$  (см. черт. 2б).



1 случай—когда  $h_0 + T < r_2$  или  $h_0 + T < \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$  . . . (1)

Разбиваем область фильтрации на 2 зоны, проводя дугу радиусом  $r_2$  из центра  $O_1$ . Обозначим расход в I зоне  $q_1$ , а во II— $q_2$ .



Разбиваем область фильтрации в этот раз на 3 зоны. (см. черт. 26).

Обозначим расход в I зоне через  $q_1$ , в II-ой— $q_2$  и в III— $q_3$ .

В I зоне гидравлический градиент равен:

$$I = \frac{h'}{l_{z_1}} = \frac{Z_1 \cdot \cos \alpha_1}{g_1 Z_1} = \frac{\cos \alpha_1}{g_1}$$

Скорость по Дарси равна  $V = KI = K \frac{\cos \alpha_1}{g_1}$

Элементарный расход в I зоне равен  $dq_1 = K \frac{\cos \alpha_1}{g_1} dz_1$ .

Интегрируя в пределах от  $Z_1 = 0$  до  $Z_1 = r_2 - \frac{a_0}{\cos \alpha_1}$

и учитывая, что  $r_2 = \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$ , получим

$$q_1 = \frac{K}{g_1} (h_0 - a_0).$$

Во II зоне гидравлический градиент равен:

$$I = \frac{h_0 - a_0}{l_{z_1}} = \frac{h_0 - a_0}{g_2 z_1}.$$

Скорость по Дарси  $V = KI = K \frac{h_0 - a_0}{g_2 z_1}$ .

Элементарный расход во II зоне равен:

$$dq_2 = K \frac{h_0 - a_0}{g_2 z_1} dz_1.$$

Интегрируя в пределах от  $Z_1 = r_2 - \frac{a_0}{\cos \alpha_1}$  и  $Z_1 = r_2$  и учитывая,

что  $r_2 = \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$ , получим

$$q_2 = K \frac{h_0 - a_0}{g_2} \ln \frac{h_0}{h_0 - a_0}.$$

В III зоне длина струйки складывается из:

- 1) дуги АВ, проведенной из центра  $O_1$ ;
- 2) дуги ВС, проведенной из центра  $O_2$ ;

общая длина элементарной струйки фильтрации будет:

$$l_{z_1} = 2\pi\beta_1 \frac{\alpha_1}{360} Z_1 + 2\pi\beta_1 \frac{90 - \alpha_1}{360} (z_1 - r_2) \text{ или}$$

$$l_{z_1} = g_2 z_1 + g_4 (z_1 - r_2), \text{ где } g_4 = 2\pi\beta_1 \frac{90 - \alpha_1}{360};$$

гидравлический градиент равен:

$$I = \frac{h_0 - a_0}{g_2 z_1 + g_4 (z_1 - r_2)};$$

скорость по Дарси равна:

$$V = KI = K \frac{h_0 - a_0}{g_3 z_1 + g_4 (z_1 - r_2)};$$

элементарный фильтрационный расход равен:

$$dq_1 = K \frac{(h_0 - a_0) dz_1}{g_3 z_1 + g_4 (z_1 - r_2)}.$$

Интегрируя в пределах от  $Z_1 = r_2$  и до  $Z_1 = h_0 + T$  и учитывая, что  $r_2 = \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$ , получим:

$$q_1 = \frac{K(h_0 - a_0)}{g_3 + g_4} \ln \left[ \cos \alpha_1 \left( 1 + \frac{g_4}{g_3} \right) \left( 1 + \frac{T}{h_0} \right) - \frac{g_4}{g_3} \right].$$

Суммируя расходы  $q_1$ ,  $q_2$  и  $q_3$ , получим расчетную формулу фильтрационного расхода, проходящего через низовой клин.

$$\frac{q}{k} = \frac{h_0 - a_0}{g_1} \left\{ \ln \frac{h_0 \cdot e}{h_0 - a_0} + \right. \\ \left. + \frac{g_2}{g_3 + g_4} \ln \left[ \cos \alpha_1 \left( 1 + \frac{g_4}{g_3} \right) \left( 1 + \frac{T}{h_0} \right) - \frac{g_4}{g_3} \right] \right\} \dots (4)$$

Таким образом, для низового клина получили 2 уравнения.

Уравнения для верхового клина и средней части плотины при наличии воды на нижнем бьефе или без нее остаются без изменения. Поэтому перепишем эти уравнения из нашей работы [9] и для определения входной ординаты  $h$ , выходной ординаты  $h_0$  расхода  $Q$  и расстояния между сечениями I—I и II—II—I составим системы уравнений для разных случаев.

Уравнения верхового клина для первого случая, когда  $h + T < r_1$  или  $h + T < \frac{H_0}{\cos \alpha}$  . . . (5)

$$\frac{q}{k} = \frac{H - h}{g_1} \ln \frac{1,1 H + T}{1,1 H - h} \dots (6)$$

Для второго случая, когда  $h + T > r_1$  или  $h + T > \frac{H}{\cos \alpha}$  . . . (7)

$$\frac{q}{k} = \frac{H - h}{g_1} \left[ \ln \frac{H \left( \frac{1}{\cos \alpha} + 1,1 \right) - h}{1,1 H - h} + \right. \\ \left. + \frac{g_1}{g_1 + g_2} \ln \frac{(g_1 + g_2) T + g_1 h + 1,1 g_1 H - g_2 \frac{H}{\cos \alpha}}{g_1 H \left( \frac{1}{\cos \alpha} + 1,1 \right) - g_1 h} \right] \dots (8)$$

Уравнение средней части для I и II случаев будет одинаково и равно:

$$q \frac{1}{k} = (h - h_0) T + \frac{h^2 - h_0^2}{2} \dots (9)$$



Четвертое уравнение получим весьма просто, как соотношение между элементами плотины:

$$l = L_{пл} - 1,1 m H - m_1 h_0 \quad \dots (10)$$

Составим системы фильтрационных уравнений для 3-х случаев: малой, средней и большой мощности проницаемого слоя.

*Случай 1* — при малой мощности проницаемого слоя, когда для низового клина

$$h_0 + T \leq r_2 \text{ или } h_0 + T \leq \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$$

и для верхового клина

$$h + T < r_1 \text{ или } h + T < \frac{H}{\cos \alpha}$$

Система фильтрационных уравнений имеет сравнительно простой вид:

$$\frac{q}{k} = \frac{H-h}{g_1} \ln \frac{1,1 H + T}{1,1 H - h} \quad \dots (6)$$

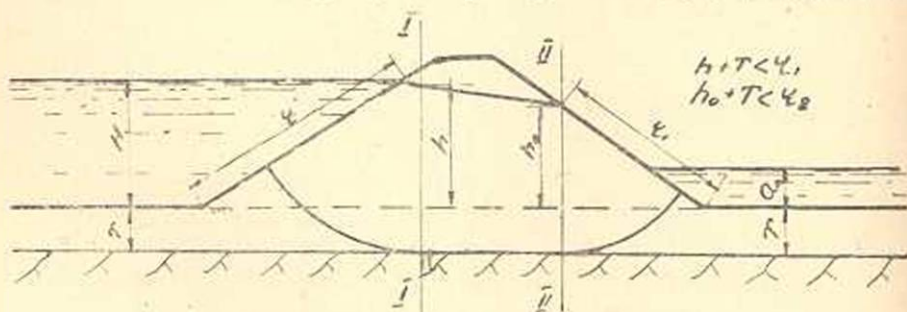
$$\frac{q}{k} \cdot l = T(h - h_0) + \frac{h^2 - h_0^2}{2} \quad \dots (9)$$

$$\frac{q}{k} = \frac{h_0 - a_0}{g_2} \ln \frac{(h_0 + T) \cos \alpha_1 \cdot e}{h_0 - a_0} \quad \dots (3)$$

$$l = L_{пл} - 1,1 m H - m_1 h_0 \quad \dots (10)$$

*Случай 2* — когда для верхового клина  $h + T \leq r_1$  или  $h + T < \frac{H}{\cos \alpha_1}$  и для низового клина  $h_0 + T > r_2$  или  $h_0 + T > \frac{h_0}{\cos \alpha_1}$

При средней мощности проницаемого слоя самая нижняя линия тока выклинивается из верхового откоса и вклинивается на линию дна нижнего бьефа (см. черт. 3). Этот случай, повидимому,



является наиболее распространенным в плотиностроении. Уравнение для низового клина в этом случае приобретает более сложную структуру и система переписывается так:

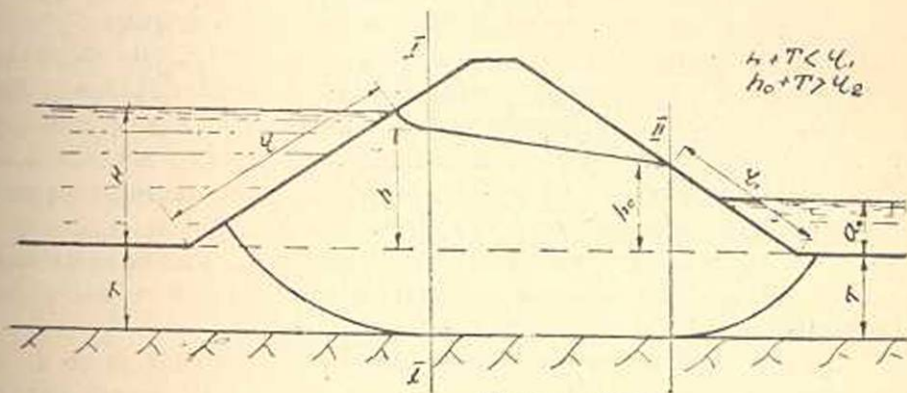
$$\frac{q}{k} = \frac{H-h}{g_1} \ln \frac{1,1 H + T}{1,1 H - h} \quad \dots (6)$$

$$\frac{q}{k} l = T(h - h_0) + \frac{h^2 - h_0^2}{2} \quad \dots (3)$$

$$\frac{q}{k} = \frac{h_0 - a_0}{g_3} \left\{ \ln \frac{h_0 \cdot e}{h_0 - a_0} + \right. \\ \left. + \frac{g_3}{g_3 + g_4} \ln \left[ \cos z_1 \left( 1 + \frac{g_4}{g_3} \right) \left( 1 + \frac{T}{h_0} \right) - \frac{g_4}{g_3} \right] \right\} \quad \dots (4)$$

$$l = L_{пл} - 1,1 m H - m_1 h_0 \quad \dots (10)$$

Случай 3 — При большой мощности проникаемого слоя, когда для низового клина  $h_0 + T > r_2$  или  $h_0 + T > \frac{h_0}{\cos z_1}$  и для верхового клина  $h + T > r_1$  или  $h + T > \frac{H}{\cos z}$ .



Черт. № 4

Самая нижняя линия тока выклинивается из дна верхнего бьефа и вклинивается на дно нижнего бьефа.

Система уравнений по причине сложности очертаний фильтрующей среды приобретает наиболее сложный вид, а именно:

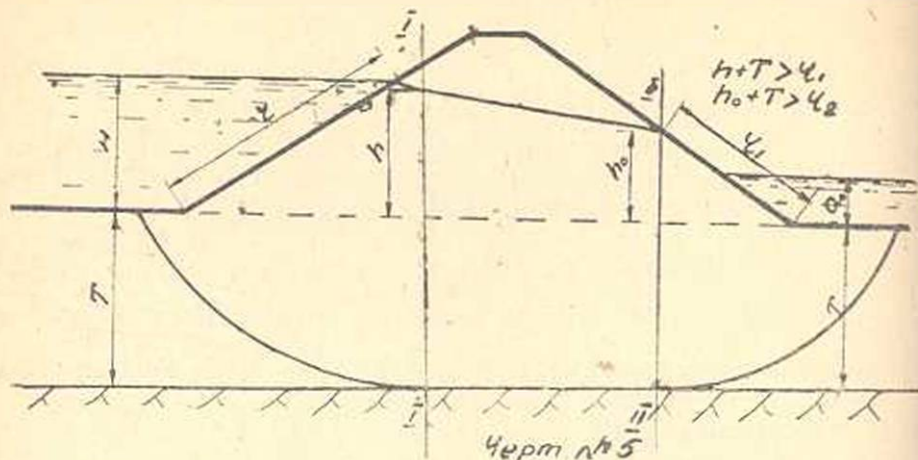
$$\frac{g}{k} = \frac{H-h}{g_1} \left[ \ln \frac{H \left( \frac{1}{\cos z} + 1,1 \right) - h}{1,1 H - h} + \right. \\ \left. + \frac{g_1}{g_1 + g_2} \ln \frac{(g_1 + g_2) T + g_2 h + 1,1 g_1 H - g_2 \frac{H}{\cos z}}{g_1 H \left( \frac{1}{\cos z} + 1,1 \right) - g h} \right] \quad \dots (8)$$

$$\frac{g}{k} \cdot l = T(h - h_0) + \frac{h^2 - h_0^2}{2} \quad \dots (3)$$

$$\frac{g}{k} = \frac{h_0 - a_0}{g_3} \left\{ \ln \frac{h_0 \cdot e}{h_0 - a_0} + \right. \\ \left. + \frac{g_3}{g_3 + g_4} \ln \left[ \cos z_1 \left( 1 + \frac{g_4}{g_3} \right) \left( 1 + \frac{T}{h_0} \right) - \frac{g_4}{g_3} \right] \right\} \quad \dots (4)$$

$$l = L_{пл} - 1,1 m H - m_1 h_0 \quad \dots (10)$$





Полученные нами уравнения несравненно сложнее уравнения акад. Павловского и уравнения для плотин при  $a_0 = 0$ , полученных нами ранее [9], причем как в нашей другой работе [9], так и здесь, с ростом глубины проникаемого слоя  $T$  меняется и сама структура расчетных уравнений. Этого и следовало ожидать, поскольку контуры фильтрующей среды в рассмотренной нами задаче отличаются сложностью и изменяются с увеличением  $T$ .

Эти системы не решаются аналитическим способом; их можно решать только при помощи составления графиков и таблиц и номографирования.

Ввиду перегрузки настоящей статьи, эти решения здесь не приводятся. Этот вопрос будет освещен в следующих наших работах.

Решение аналогичных уравнений даны нами в нашей предыдущей работе [9].

Поступило 15 VII 1948.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Павловский Н. Н. — О фильтрации воды через земляные плотины на непроницаемых основаниях. Москва, 1931.
2. Dachler — Die Wasserwirtschaft, № 4—6, August, 1934.
3. Schaffernak — Allgemeine Bauzeitung, Heft 4, 1917.
4. Угинчус А. А. — Расчет фильтрации через земляные плотины. Москва, 1940.
5. Casagrande — № 46 Rapport, Доклады международного конгресса в Стокгольме, 1932.
6. Дж. Джестин — Земляные плотины. Перевод с англ. ОНТИ, 1936.
7. Ведерников В. В. — Фильтрация через земляные плотины на непроницаемых основаниях. ДАН СССР, т. 56, 1945.
8. Нельсон-Скорняков Ф. Б. — Фильтрация в однородной среде. Москва, 1947.
9. Мхитарян А. М. — Фильтрация воды через земляные плотины на проницаемых основаниях. Изв. АН Арм. ССР (Естеств. науки) № 5, 1947.

Ա. Մ. Մխիթարյան

# ՋՐԻ ՖԻԼՏՐԱՑԻԱՆ ՋՐԱԹԱՓԱՆՑ ՀԻՄՔԵՐԻ ՎՐԱ ԳՏՆՎՈՂ ՊԱՏՎԱՐՆԵՐԻ ՄԱՐՄՆՈՎ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Ջրի ֆիլտրացիայի հարցերը հողային պատվարների մարմնով համարվում են շատ կարևոր՝ կառուցվածքի կայունությունը և ապահովությունը ճիշտ գնահատելու և ջրամբարից հնարավոր կորուստները որոշելու համար։

Հողվածում տրված է ակնարկ ինչպես ջրաթափանց, այնպես էլ ջրանթափանց հիմքերի վրա գտնվող պատվարների մարմնով կատարվող ֆիլտրացիային նվիրված աշխատանքների։ Բերված է հեղինակի լուծումը ջրաթափանց հիմքերի վրա գտնվող հողային պատվարների մարմնով կատարվող ֆիլտրացիայի վերաբերյալ՝ ներքին բեյֆում ջրի ասկայության դեպքում։ Այս դեպքին պրակտիկայում ամենից հաճախ ենք հանդիպում և այն դրականության մեջ ամենից քիչ է լուսաբանված։ Ստացված հավասարումներն անհամեմատ բարդ են, քան ակադեմիկոս Պաշլուկու հավասարումները և հեղինակի նախորդ հավասարումները, բայց սրանց նույնպես հաշվումը միանգամայն հնարավոր է։

Այդ լուծումները հողվածում չեն բերված. նրանք կլուսաբանվեն հեղինակի հետագա աշխատանքներում։





А. М. Осепян

## К вопросу о комплексных экономических характеристиках энергетического использования неза- регулированных водотоков

В настоящей статье приняты следующие условные обозначения:

$K$ —капиталовложения по станции;

$K_n$ —удельные капиталовложения (на тонну продукции);

$\Pi$ —производительность труда рабочего;

$\mathcal{E}$ —количество электроэнергии;

$d$ —себестоимость тонны продукции;

$h$ —число часов использования энергетической мощности электропечей;

$t$ —срок компенсирования дополнительных капиталовложений.

Индекс  $o$ —при буквенных выражениях  $K$ ,  $\Pi$ ,  $\mathcal{E}$ ,  $d$  и  $h$  обозначает работу электропечи на нормальном графике, а индекс  $c$ —работу печи на сезонном графике.

$\frac{h_c}{h_o}$ —степень обеспечения карбидной и ферросплавной электропечи электроэнергией.

Поправочные коэффициенты для определения основных экономических показателей электропечей, работающих на сезонной гидроэнергии:

$\alpha$ —при определении удельных капиталовложений;

$\beta$ —при определении производительности труда;

$\gamma$ —при определении себестоимости продукции.

Советский Союз—богатейшая в мире страна по запасам водной энергии. На его долю приходится около трети гидроэнергетических ресурсов мира, что в 3—4 раза превышает потенциальные ресурсы США.

За годы сталинских пятилеток проведена колоссальная работа по гидростроительству. За предвоенные 15 лет мощность ГЭС возросла в 140 раз, а удельный вес гидроэлектрических станций в суммарной мощности и выработка электроэнергии возросли до 10% против 0,7—0,8%.

План первой послевоенной пятилетки обеспечивает большое развитие гидроэнергетики страны: предстоит ввести в строй 3,3 млн. квт мощности. Удельный вес гидроэнергии в электробалансе страны должен возрасти в полтора раза. Надо ожидать, что на период генерального плана, примерно в ближайшие три пятилетки, будут



введены в эксплуатацию гидростанции с новой мощностью около 15 млн. квт, а удельный вес гидроэнергии в суммарном электробалансе страны составит около 35%.

Советский и мировой опыт показывают высокую экономическую эффективность гидростанций, что наглядно иллюстрируют следующие показатели: при современной экономике строительства и эксплуатации электростанций каждый млн. квт мощности гидростанции обеспечивает ежегодно экономию около 3 млн. тонн высокосортного, или около 5 млн. тонн низкосортного топлива, высвобождение около 20000—25000 человек на участках добычи топлива, необходимое для эксплуатации станций, сокращение работы железнодорожного транспорта в объеме около 2,5 млрд. тонно-километров (из расчета среднего жел. дор. пробега топлива в 500 км) и годовую экономию на издержках производства электроэнергии около 200 млн. рублей при дополнительных капитальных затратах около 2 млрд. рублей.

Характерной особенностью гидростанций является, как известно, высокий удельный вес сезонной гидроэнергии, определяемый водным режимом рек. Гидроэнергетические ресурсы Советского Союза составляют: при 95% обеспеченности 58,5, а при 50% обеспеченности—280,6 млн. квт брутто [10].

Как видим, проблема рационального направления и использования сезонной гидроэнергии является одной из коренных проблем экономики гидроэнергетики. Одним из эффективных методов решения проблемы сезонной гидроэнергии является использование специальных потребителей гидроэнергии. В определенных условиях, связанных с топливно-энергетическим балансом районов размещения гидростанций, проблема использования сезонной гидроэнергии может быть снята выбором мощности гидростанций по круглогодичному обеспеченному расходу воды ценой увеличения удельных капиталовложений и себестоимости квтч гидроэнергии. Кроме того, выбор мощности ГЭС по минимальному круглогодичному обеспеченному расходу воды приводит к прямой потере для народного хозяйства энергетического ресурса. Гидравлическая энергия без регулирования редко может быть использована, ибо незарегулированный минимальный расход для большинства рек ничтожен по сравнению с расходом, требующимся для рентабельной работы станций.

Актуальность проблемы специальных потребителей сезонной гидроэнергии возрастает для районов, богатых гидроэнергетическими ресурсами и с напряженным топливным балансом, в особенности на первых этапах освоения крупных гидроэнергетических ресурсов на период до вступления в эксплуатацию развитых районных и межрайонных электросистем. К таким районам относятся: Таджикистан, Киргизия, Восточный Казахстан, Северный Кавказ, Закавказье, северо-западные районы и др.



Как известно, потребителем сезонной гидроэнергии может явиться электроемкая промышленность где электровооруженность труда очень высокая и неравномерный режим энергоснабжения не вызывает больших простоев рабочих. Проблема специальных потребителей сезонной гидроэнергии осложняется сложным характером энергэкономических взаимосвязей между потребителем и гидростанцией, с учетом особенностей топливно-энергетического баланса районов размещения гидростанций. Между отдельными частями энергетического хозяйства, начиная от выработки электроэнергии до ее потребления, существует сложная технико-экономическая взаимосвязь. Исследование этой взаимосвязи и установление комплексных энергэкономических характеристик гидростанция—потребитель, по-новому решает задачи выбора основных параметров гидростанций.

Электроэнергия не является конечной продукцией, следовательно, только по показателю себестоимости ее нельзя судить об экономичности той или другой гидростанции, той или иной мощности, работающей по сезонному энергетическому графику. „Рассматривая энергоснабжение, необходимо стремиться, во-первых, к правильному народно-хозяйственному использованию ресурсов энергии, во-вторых, к экономичности этого использования, т. е. к удешевлению отданного потребителю комбинированного киловатт-часа“ [1, стр. 300]. Экономичность электроемких производств зависит не только от цены электроэнергии, но и в значительной степени от режима энергоснабжения, в свою очередь определяемого водным режимом рек. Отсюда электроемкая промышленность, как потребитель—регулятор сезонной электроэнергии, приобретает роль важнейшего фактора при выборе мощности гидростанций. Роль этого фактора особенно велика для экономических районов, бедных запасами минерального топлива, но относительно богатых гидроэнергетическими ресурсами, где тяжелая индустрия может развиваться по линии электроемкой промышленности (карбид-кальция, ферросплавы, электролитический аммиак и т. д.). Гидроэнергия в этих районах является основной базой индустриализации страны, а потому максимально полное использование этих ресурсов приобретает особо важное значение для развития экономики этих районов.

Настоящей статьей мы задались целью разработать методику расчетов для составления экономических характеристик энергетического использования незарегулированных водотоков. В качестве основного критерия при оценке экономической эффективности гидростанций принят минимум суммарных издержек народного хозяйства, связанных со строительством и эксплуатацией станции, причем в издержки включен также ущерб, полученный электроемкой промышленностью при работе на сезонном графике.

Для разрешения поставленной задачи мы должны, в первую очередь, установить основные экономические показатели работы электроемкой промышленности в условиях сезонного ограничения



режима электропотребления. В работах Энергетического Института Академии Наук Союза ССР и Московского Энергетического Института (1934—1935 г.г.) дана научная постановка проблемы использования сезонной гидроэнергии и разработаны графоаналитические схемы исследования вопроса о предельном использовании электроемких производств как потребителей сезонной гидроэнергии. [2—8]. Однако необходимо отметить, что все эти исследования в значительной степени дают лишь качественный анализ проблемы, основанный на чисто дедуктивном методе анализа, без всякой опоры в действительном опытно-эксплуатационном материале электроемких производств и гидростанций, работающих по сезонному графику. (Ко времени, когда были проведены эти исследования, еще не было в СССР соответствующих экспериментальных данных). Отсюда неизбежность схематизации и спорность ряда основных экономических зависимостей, выведенных чисто дедуктивным методом без опоры в эксплуатационном материале [9, 11].

Обобщение длительного опыта работы карбидного и ферросплавного заводов в условиях ограничения режима электропотребления дало нам возможность установить новые энергоэкономические зависимости работы завода на сезонном энергетическом графике гидростанций, принципиально отличающихся от зависимостей, принятых в литературе до наших исследований. Все экономические уравнения выражают функциональную зависимость экономических показателей от фактора работы электроемкого производства по сезонному графику, который выражен показателем  $\frac{h_c}{h_0}$ . Установлено, что рост удельных капиталовложений на единицу продукции не находится в прямой зависимости от величины  $\frac{h_c}{h_0}$ .  $K_{nc} = \alpha \cdot \frac{h_0}{h_c} \cdot K_{no}$ , где  $\alpha < 1$  и определяется структурой завода и наличием в нем таких цехов, которые могут при правильной организации эксплуатации работать круглый год с равномерной нагрузкой, независимо от сезонности энергетического графика. Численные значения коэффициентов  $\alpha$  приводим ниже:

| При $\frac{h_0}{h_c}$<br>в %/о | Для производства<br>карбида кальция | Для производства<br>ферросилиция |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 100                            | 1,0                                 | 1,0                              |
| 111                            | 0,99                                | 0,97                             |
| 125                            | 0,98                                | 0,93                             |
| 143                            | 0,97                                | 0,89                             |
| 167                            | 0,96                                | 0,84                             |
| 200                            | 0,95                                | 0,77                             |

Наши исследования показали, что показатель производительности труда изменяется не прямо пропорционально к годовому



коэффициенту использования мощности электропечи, а с учетом коэффициента  $\beta$ , который больше 1.

$$П_c = П_0 \cdot \beta \cdot \frac{h_c}{h_0}$$

$\beta$  имеет следующие численные значения:

| При $\frac{h_c}{h_0}$<br>в %/о | Для производства<br>карбида кальция | Для производства<br>ферросилиция |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 100                            | 1,00                                | 1,00                             |
| 90                             | 1,04                                | 1,08                             |
| 80                             | 1,10                                | 1,17                             |
| 70                             | 1,16                                | 1,29                             |
| 60                             | 1,24                                | 1,46                             |
| 50                             | 1,35                                | 1,69                             |

Наши исследования показали, что удельный расход электроэнергии при работе по сезонному графику изменяется в узких пределах, т. е. до 3—7% и только в исключительных случаях—до 10%. Большую роль в этом вопросе играет правильный выбор мощности единичных агрегатов по заводу. Установка печей высокой мощности при работе на сезонном энергетическом графике обычно приводит к сильному недоиспользованию мощности ГЭС. С другой стороны, установка печей малой мощности неизбежно приводит к резкому повышению удельных норм расхода электроэнергии печами, что, в свою очередь, приводит к повышению удельных капиталовложений на тонну продукции. Экономическая минимальная мощность карбидных печей равна 4,5 мвт, а печей по производству ферросилиция—7,5 мвт, причем допустимо в числе печей иметь одну карбидную печь в 3 мвт, или ферросплавную в 4 мвт.

На долголетнем отчетном материале заводов, работающих на сезонном энергетическом графике, установлена степень повышения себестоимости продукции в зависимости от фактора  $\frac{h_c}{h_0}$ . Установлено, что в расчетные формулы себестоимости карбида кальция на сезонной гидроэнергии должен быть введен коэффициент  $\gamma$ .  $d_c = d_0 \cdot \gamma \cdot \frac{h_0}{h_c}$ . Численные значения коэффициента  $\gamma$  приводим ниже:

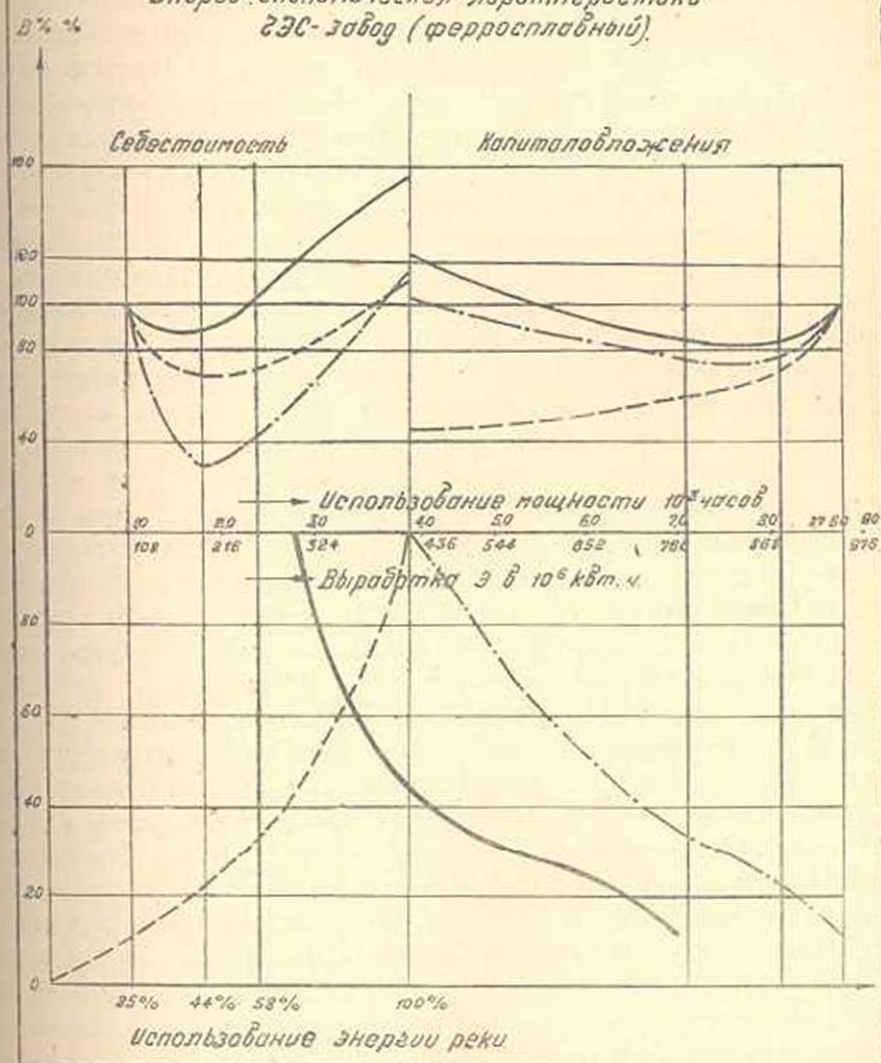
| При $\frac{h_0}{h_c}$<br>в %/о | При производстве<br>карбида кальция | При производстве<br>ферросилиция |
|--------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 100                            | 1,00                                | 1,00                             |
| 111                            | 0,93                                | 0,95                             |
| 125                            | 0,85                                | 0,88                             |
| 143                            | 0,78                                | 0,81                             |
| 167                            | 0,70                                | 0,74                             |
| 200                            | 0,62                                | 0,67                             |





Фиг. 2.

*Энерго-экономическая характеристика  
ДЭС-завод (ферросплавный).*



## Условные обозначения:

- — — — — выработка электроэнергии по водотоку,
- . - . - . — число часов использования мощности станции по водотоку,
- число часов использования энергетической мощности потребителя—регулятора.

## Себестоимость

## Капиталовложения

- ферросплава,
- — — — — электроэнергии.
- . - . - . — электроэнергии дополнительной.

На тонну ферросплава в комплексе завод—станция,  
на квт установленной мощности станции,  
на квтч электроэнергии.

Приведенные выше экономические показатели работы электропечей по сезонному энергетическому графику дают возможность установить комплексные энергоэкономические характеристики водотока, которые в свою очередь должны определить рациональные схемы использования энергетического ресурса. В качестве иллюстративного материала приводим энергоэкономические характеристики исследованных нами комплексов гидростанция—электропечь (по производству карбида кальция и ферросилиция) (см. табл. 1 и 2 и фигуры 1 и 2). Анализ этих материалов показывает, что удельные капиталовложения на установленный кВт снижаются с увеличением мощности электроустановки. С другой стороны, электроотдача на установленный кВт для станций, работающих на незарегулированном водотоке, уменьшается с увеличением мощности потому, что чем больше используемый расход, тем меньше его продолжительность.

Соответственно резко изменяются экономические показатели как гидростанции, так и электроемкого производства, причем кривые, характеризующие изменение технико-экономических показателей гидростанций, в зависимости от степени использования водотока, резко расходятся с кривыми, характеризующими показатели конечной продукции, выработанной по графику этого водотока. Все это подтверждает наш вывод о том, что правильное суждение об экономической характеристике водотоков, как объектов гидроэнергетического использования, в связи с изменением продолжительности используемого расхода мы можем иметь только при разработке технико-экономических показателей, характеризующих данный водоток в комплексе гидростанция—потребитель (электропечь).

Ограничение энергоэкономических показателей рамками производителя электроэнергии неизбежно приводит к односторонним и неправильным выводам. (В соответствии с этим энергоэкономическую характеристику ГЭС, данную проф. Золотаревым, [2, фиг. 53, стр. 51] мы дополнили новыми кривыми, характеризующими гидростанции комплексными показателями). Отсюда, электропечь или другой вид электроемкой промышленности, являющейся единственно возможным потребителем сезонной электроэнергии, выступает в качестве серьезного фактора, влияющего на выбор основных параметров гидростанции, проектируемой для работы на незарегулированном водотоке. Для полной характеристики электропечи, как потребителя сезонной гидроэнергии необходимо проанализировать еще один важнейший показатель—производительность труда.

При проработке вопросов эффективности использования сезонной гидроэнергии в электроемкой промышленности, естественно, возникает вопрос о целесообразности рекомендовать, с точки зрения необходимости повышения общего уровня производительности труда в народном хозяйстве, строительство предприятий, работающих на сезонном энергетическом графике, т. е. с неполной загрузкой. Для разрешения этого вопроса в условиях социалистической



Энерго-экономическая характеристика комплекса гидроэлектростанций—завод по производству карбида кальция

Таблица 1

| Мощность гидроэлектростанции |      | Коэффициент использования энергии реки |     | Мощность |     | Выработка электроэнергии за средний гидрологический год. |     | Продолжительность (обеспеченность) мощности |    | Число часов использования мощности по водотоку |    | Удельные капитальные вложения |      | Себестоимость кВтч электроэнергии |      | Себестоимость тонны карбида кальция |     |     |      |      |      |      |      |      |     |      |      |      |     |     |     |     |     |
|------------------------------|------|----------------------------------------|-----|----------|-----|----------------------------------------------------------|-----|---------------------------------------------|----|------------------------------------------------|----|-------------------------------|------|-----------------------------------|------|-------------------------------------|-----|-----|------|------|------|------|------|------|-----|------|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 1                            | 2    | 3                                      | 4   | 5        | 6   | 7                                                        | 8   | 9                                           | 10 | 11                                             | 12 | 13                            | 14   | 15                                | 16   | 17                                  | 18  | 19  | 20   | 21   | 22   | 23   | 24   | 25   | 26  | 27   | 28   | 29   | 30  | 31  | 32  | 33  | 34  |
| $P_0 = 12$<br>мвт            | 0,25 | 105                                    | 100 | 8760     | 100 | 8760                                                     | 100 | 100                                         | —  | 335                                            | 76 | 7000                          | 100  | 6950                              | 100  | 79                                  | 100 | 730 | 100  | 2370 | 100  | 2100 | 100  | 3,1  | 100 | 416  | 100  | 416  | 100 | 416 | 100 | 416 | 100 |
|                              |      |                                        |     |          |     |                                                          |     |                                             |    |                                                |    |                               |      |                                   |      |                                     |     |     |      |      |      |      |      |      |     |      |      |      |     |     |     |     |     |
| $P_1 = 24$<br>мвт            | 0,44 | 194                                    | 185 | 6520     | 75  | 8100                                                     | 93  | 7100                                        | 85 | 89                                             | 16 | 246                           | 56   | 6430                              | 93   | 4860                                | 70  | 60  | 76   | 790  | 107  | 1830 | 77   | 2610 | 84  | 2,1  | 68   | 0,92 | 30  | 426 | 103 | 360 | 86  |
|                              |      |                                        |     |          |     |                                                          |     |                                             |    |                                                |    |                               |      |                                   |      |                                     |     |     |      |      |      |      |      |      |     |      |      |      |     |     |     |     |     |
| $P_2 = 36$<br>мвт            | 0,58 | 255                                    | 242 | 3650     | 41  | 7100                                                     | 58  | 150                                         | 59 | 185                                            | 42 | 5230                          | 75   | 4160                              | 60   | 59                                  | 75  | 985 | 135  | 1830 | 77   | 2815 | 91   | 2,2  | 71  | 2,49 | 60   | 454  | 109 | 398 | 96  |     |     |
|                              |      |                                        |     |          |     |                                                          |     |                                             |    |                                                |    |                               |      |                                   |      |                                     |     |     |      |      |      |      |      |      |     |      |      |      |     |     |     |     |     |
| $P_3 = 108$<br>мвт           | 1,00 | 440                                    | 420 | 1460     | 17  | 4060                                                     | 46  | 2570                                        | 29 | 335                                            | 76 | —                             | 2420 | 35                                | 3240 | 46                                  | 80  | 101 | 2080 | 285  | 2540 | 111  | 4720 | 152  | 3,4 | 110  | 5,03 | 104  | 556 | 143 | 612 | 148 |     |
|                              |      |                                        |     |          |     |                                                          |     |                                             |    |                                                |    |                               |      |                                   |      |                                     |     |     |      |      |      |      |      |      |     |      |      |      |     |     |     |     |     |

Примечание: 1)  $\frac{\Delta_0 - \Delta_1}{P_0 - P_1}$ ; 2)  $\frac{\Delta_1 - \Delta_2}{P_1 - P_2}$ ; 3)  $\frac{\Delta_2 - \Delta_3}{P_2 - P_3}$ ; 4)  $\frac{\Delta_3 - \Delta_4}{P_3 - P_4}$ ; 5) Технологический максимум; 6) числитель и знаменатель

для мощности  $P_1$ ; 7) числитель для мощности  $P_2$ ; знаменатель для мощности от  $P_2$  до  $P_1$  включительно; 8) числитель для мощности  $P_3$ ; знаменатель для мощности от  $P_3$  до  $P_1$  включительно.

Энерго-экономическая характеристика комплекса гидростаций — завод ферросплавный

Таблица 2

[illegible]

Примеры:

- 1)  $\frac{Z_0 - Z_0}{P_0 - P_0}$ ;
- 2)  $\frac{Z_1 - Z_0}{P_1 - P_0}$ ;
- 3)  $\frac{Z_2 - Z_1}{P_2 - P_1}$ ;
- 4)  $\frac{Z_2 - Z_2}{P_2 - P_2}$ ;
- 5) Технологический максимум;
- 6) числитель и знаменатель для мощности  $P_1$ ;
- 7) числитель для мощности  $P_2$ ;
- 8) знаменатель для мощности  $P_2$ ;
- 9) числитель для мощности  $P_2$ ;
- 10) знаменатель для мощности от  $P_2$  до  $P_1$  включительно.



экономики производительность труда должна исчисляться не в рамках одной отрасли, т. е. электроемкой промышленности, а в комплексе завод—электростанция. Для сравнительных характеристик вводится понятие „заменяющей станции“, которая энергетически заменит гидростанцию в случае отказа от ее строительства, причем в качестве заменяющей станции в расчетах приняты различного типа тепловые станции. „Гидроэлектрическая энергия экономит не только топливо, но и человеческий труд“. Стр. 283 (1).

Рассматривая вопрос производительности труда в электроемком производстве, организованном на базе сезонной энергии, необходимо учесть фактор изменения производительности труда в худшую сторону по линии потребителя электроэнергии и в лучшую по линии производителя электроэнергии. В наших расчетах учтено, что гидростанция для своей эксплуатации, в отличие от тепловых, не требует трудовых затрат на добычу и транспортировку топлива, а также на обслуживание котельной.

Наши исследования показали, что условия равенства производительности труда в комплексе завод—гидростанция и завод—тепловая станция при работе заводов по сезонному и нормальному графику соответствует  $\frac{h_c}{h_0} \geq 50\%$ , что видно из фигур 3 и 4. Отсутствие трудовых затрат по добыче топлива на гидростанциях и наличие меньших затрат при эксплуатации гидростанций, по сравнению с тепловой, компенсирует потери, полученные на электроемком производстве из-за работы последнего на сезонном энергетическом графике.

### ВЫВОДЫ

1. Проблема рационального направления и использования сезонной гидроэнергии является одной из коренных проблем экономики гидроэнергетики. Одним из эффективных методов решения проблемы сезонной гидроэнергии является создание специальных потребителей гидроэнергии.

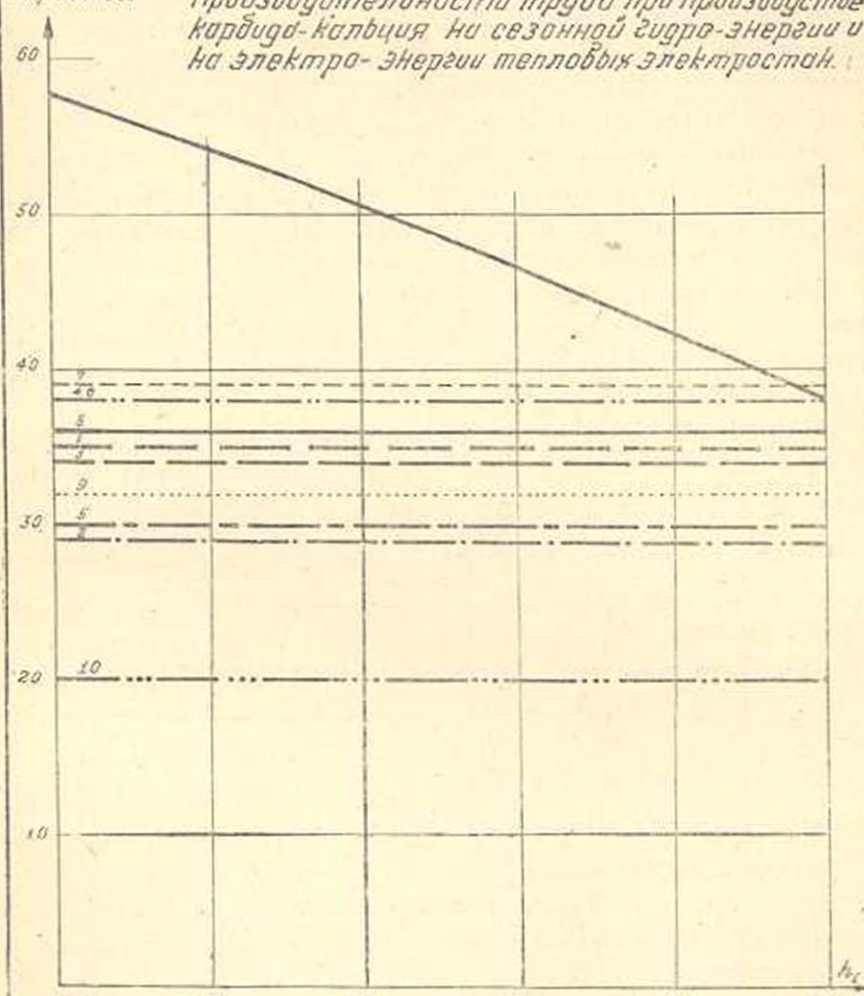
2. Основным критерием оценки экономической эффективности гидростанции является минимум суммарных издержек в народном хозяйстве, связанных со строительством и эксплуатацией станции, причем в издержки производства должен быть включен и ущерб, полученный от работы электроемкой промышленности на сезонном графике.

3. Обобщение длительного опыта работы карбидного и ферросплавного заводов в условиях ограничения режима электропотребления дало возможность установить новые энергоэкономические зависимости работы завода на сезонном энергетическом графике гидростанций, принципиально отличающихся от зависимостей, принятых в литературе до этих исследований. Приведенные исследования показали, что

рис. 3.

Тонна  
на рабочего

Прибеденные показатели  
Производительности труда при производстве  
карбид-кальция на сезонной гидро-энергии и  
на электро-энергии тепловых электростан.



При работе тепловой электростанции на

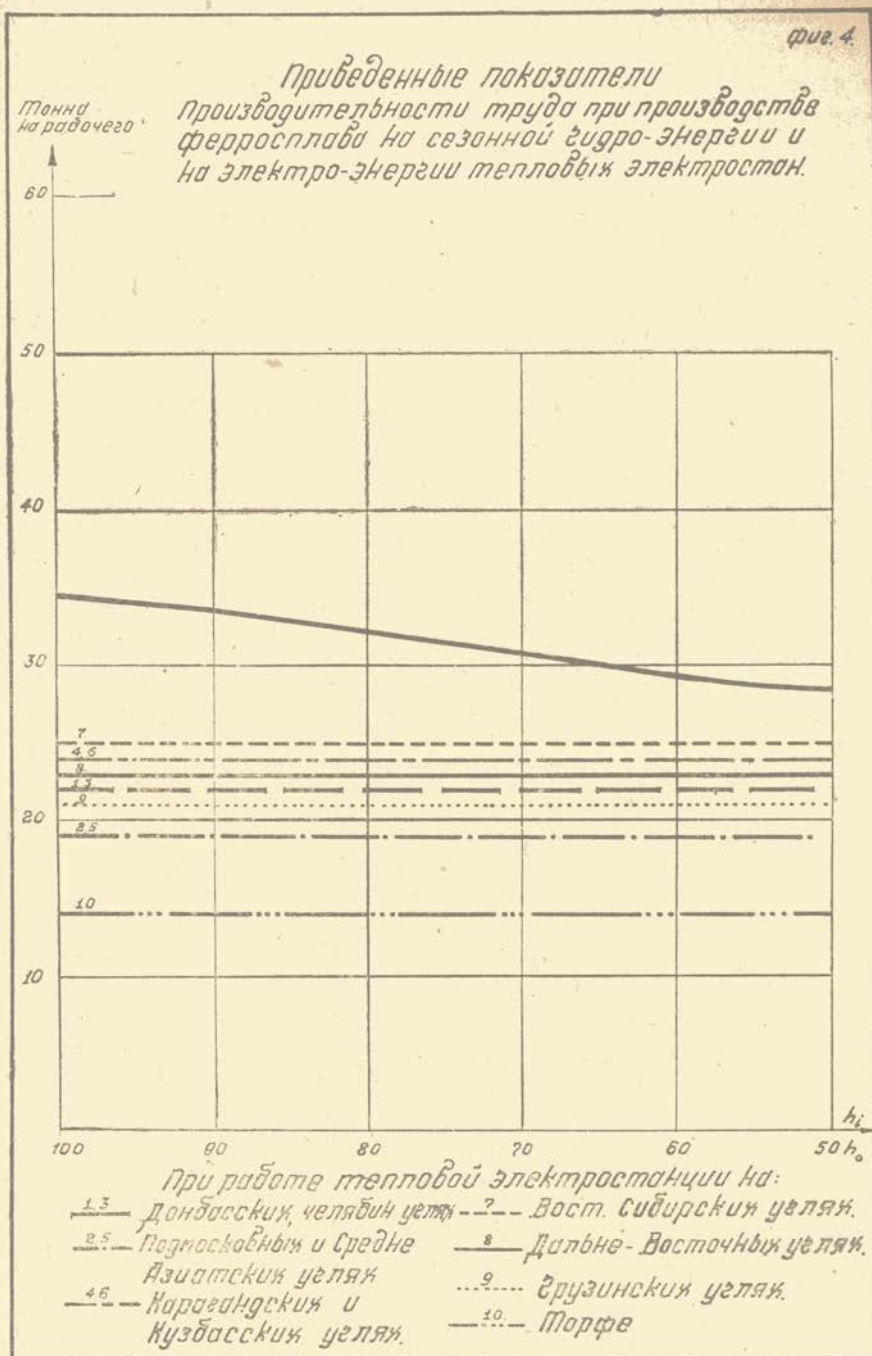
- |                        |                           |
|------------------------|---------------------------|
| 1 — Донбасский уголь   | 5 — Ср. Азиатский уголь   |
| 2 — Подмосковный уголь | 7 — Вост. Сибирский уголь |
| 3 — Челябинский уголь  | 8 — Дальне Восточ. уголь  |
| 4 — Караганский и      | 9 — Грузинский уголь      |
| Кузбасский уголь       | 10 — Торф                 |

а) по энергетическим и технологическим условиям электропечь (карбидная, ферросплавная) допускает эксплуатацию на сезонном энергетическом графике;

б) отсутствие трудовых затрат по добыче топлива для гидро-станций и наличие меньших затрат при их эксплуатации по сравнению с тепловой компенсирует потери на электроемком заводе из-за



рис. 4



работы последнего на сезонном энергетическом графике. Условия равенства производительности труда в комплексе завод—гидростанция и завод—тепловая станция при работе завода на сезонном и нормальном графике соответствуют  $\frac{h_c}{h_0} \geq 50\%$ ;

в) электроемкая промышленность, как потребитель—регулятор сезонной электроэнергии, приобретает роль важнейшего фактора в деле индустриализации экономических районов, бедных запасами минерального топлива.

4. Разработанные экономические показатели работы электростанций по сезонному графику дают возможность установить комплексные энергоэкономические характеристики водотока, по-новому определяющие рациональные схемы использования энергетического ресурса.

5. Правильную экономическую характеристику водотоков, как объектов гидроэнергетического использования, в связи с изменением продолжительности используемого расхода, можно получить только при разработке технико-экономических показателей, характеризующих данный водоток в комплексе гидростанция—потребитель.

Ограничение энерго-экономических показателей в рамках производителя электроэнергии приводит к односторонним и неправильным выводам.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Егiazаров И. В.—Гидроэлектрические силовые установки, ч. 1, 1934. Техничко-экономический анализ ДнепроГЭС'а, 1935. (рукопись).
2. Золотарев Т. А.—Гидроцентрality в электроэнергетической системе. 1939. Москва.
3. Кикодзе Б. И.—Проблема использования периодической энергии электрических станций. 1952. Тбилиси.
4. Болотов В. В. и Фельдман М. Н.—Использование сезонной мощности и сезонной энергии гидроэлектрических станций. Изв. Энерг. Ин-та АН СССР им. Кржижановского, 1939.
5. Фельдман М. Н.—Исследование экономики потребления сезонной энергии. Изв. Энерг. Ин-та АН СССР. 1935.
6. Кукель-Кравский С. А.—Техничко-экономические основы планирования потребителей—регуляторов нагрузки. Изв. Энерг. Ин-та АН СССР, 1935.
7. Золотарев Т. А.—К экономическому расчету потребителей—регуляторов сезонной гидроэнергии. Изв. Энерг. Ин-та АН СССР. 1935.
8. Элькинд М. Л.—Потребители—регуляторы электрической нагрузки в энергосистеме. ОНТИ, 1935. Москва.
9. Осепян А. М.—Использование сезонной гидроэнергии в производстве карбиды кальция. ДАН Арм. ССР, № 2, 1945.
10. Нестерук Ф. Я.—Гидроэнергетические ресурсы мира. 1946. Москва.
11. Осепян А. М.—Использование гидроэнергии в производстве ферросплавов при сезонных ограничениях режима электропотребления. ДАН Арм. ССР, IX, № 2, 55, 1948.

#### Ա. Մ. Օսեփյան

### ԶԿԱՐԳԱՎՈՐՎԱԾ ԶՐԶՈՍՔԵՐԻ ԷՆԵՐԳԵՏԻԿ ԾԳՏԱԳՈՐԾՄԱՆ ԿՈՄՊԼԵՔՍԱՅԻՆ ԲՆՈՒԹԱԳՐՈՒՄԸ

#### Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Սեզոնային-հիդրո-էներգիան ռացիոնալ ճանապարհով ուղղելու և օգտագործելու պրոբլեմը հիդրո-էներգետիկայի էկոնոմիկայի հիմնական պրոբլեմերից մեկն է։ Այն լուծելու էֆեկտիվ միջոցներից մեկը հանդիսանում է հիդրո-էներգիայի հատուկ սպառողների կազմակերպումը։



Էներգետիկական գրականություն մեջ առաջին անգամ մեր կատարած ընդհանրացումները՝ կարբիդի և ֆերոձուլվածքների զործարանների երկարամյա շահագործման փորձի հիման վրա, հնարավորություն է տվել սահմանել նոր էներգետիկական կախումներ հիդրոկայանի սեզոնային ուժի մի աշխատանքի պայմաններում, որոնք սկզբունքորեն տարբերվում են գրականություն մեջ մինչև մեր ուսումնասիրություններն ընդունված սահմանումները:

Այս բնագավառում մեր ուսումնասիրությունները ցույց տվին, որ՝ ա) էլեկտրական վառարանի (կարբիդի ֆերոձուլվածքի) էներգետիկ և տեխնոլոգիական պայմանները թույլ են տալիս նրանց շահագործումը սեզոնային ուժի մի պայմաններում:

բ) Հիդրո-կայաններում վառելանյութ չծախսելը և ջերմային կայանի համեմատությամբ հիդրոկայանների շահագործման բանվորական ուժի քիչ ծախսը փոխադասում են էլեկտրատարող զործարաններում շնորհիվ նրանց աշխատանքի սեզոնային ուժի մի տեղի ունեցող էներգիայի կուրուստները:

Գործարանը սեզոնային և նորմալ գրաֆիկով աշխատելու դեպքում զործարան-հիդրոկայան և զործարան-ջերմային կայան կոմպլեքսում աշխատանքի արտադրողականության հավասարման պայմանները հանդիսանում են  $\geq 50\%$ :

զ) էլեկտրունակ արդյունաբերությունը, որպես սեզոնային էլեկտրո-էներգիայի սպառող-կարգավորիչ, հանքային վառելանյութի պաշարներով աղքատ տնտեսական ռազմերի ինդուստրիալ զործում ձեռք է բերում կարևորագույն ֆակտորի դեր:

դ) Հողմածուր բերված էներգետիկ աղբյուրի օգտագործման էներգետիկական սխեմաները ցույց են տալիս, որ ջրահոսքի տնտեսական ճիշտ բնորոշումը՝ որպես հիդրոէներգիայի օգտագործման օբեկտ, կարելի է ստանալ միայն մշակելով վերջինիս տեխնիկո-տնտեսական ցուցանիշները՝ հիդրոկայան—սպառող կոմպլեքսում:

Էներգո-տնտեսական ցուցանիշներն էլեկտրոէներգիայի արտադրողի շրջանակներում սահմանափակելը բերում է միակողմանի և ոչ ճիշտ եզրակացությունների:

СТРОИТЕЛЬНАЯ МЕХАНИКА

В. В. Пинаджян

Формулы для расчета центрально-сжатых  
стальных стержней

В совершенно прямых сжатых стержнях при центральном осевом приложении нагрузки прогибы по существу должны возникнуть только при достижении критической нагрузки. Между тем опыты ЦАГИ, Берлин-Далемской лаборатории, Роша, автора настоящей статьи и многих других исследователей показали, что при самой тщательной центрировке осевой нагрузки в прямых гибких стальных стержнях возникают существенные прогибы при достижении сжимающего осевого усилия 40—80% от критической (разрушающей) нагрузки.

Действительная работа гибких сжатых стержней протекает в условиях неизбежного эксцентриситета приложения нагрузки, неоднородности материала, наличия начальной кривизны стержня и ряда других факторов.

В связи с этими обстоятельствами действительная несущая способность гибких центрально-сжатых стержней всегда меньше критической силы, определяемой обобщенной теоретической формулой Эйлера—Энгессера.

За последние годы теория прочности и устойчивости сжатых гибких элементов металлических конструкций получила серьезное развитие в трудах советских исследователей.

Нормативные формулы для определения расчетной нагрузки центрально-сжатых стальных стержней базируются на одном из следующих методов:

1) В основу расчета принимаются эмпирические формулы, полученные в результате многочисленных испытаний до разрушения сжатых стоек.

2) В основу расчета принимается теоретическая формула Эйлера—Энгессера, в которую вносится дополнительный коэффициент запаса, изменяющийся в зависимости от гибкости сжатого стержня. Дополнительным коэффициентом запаса учитываются несовершенства реальных элементов конструкций.

3) В основу принимается формула для расчета сжато-изогнутых стержней с заданным начальным эксцентриситетом или прогибом,



учитывающим действительную работу сжатых элементов строительных конструкций.

Современными опытно-теоретическими исследованиями доказано, что последний метод построения расчетных формул для центрально-сжатых элементов строительных конструкций является наиболее правильным [1, 2, 3].

Критическая (разрушающая) нагрузка для центрально-сжатых прямых гибких стержней вычисляется по следующим формулам:

$$N_p = \varphi \cdot F_{op} \cdot \sigma_T \quad (1)$$

$$N'_p = F_{нт} \cdot \sigma_T \quad (2)$$

Расчетной разрушающей нагрузкой является меньшая из величин, вычисленных по формулам (1) и (2).

Допускаемая нагрузка при коэффициенте запаса  $k = \frac{\sigma_T}{[\sigma]}$  равна:

$$N = \frac{N_p}{k} = \varphi \cdot F_{op} \cdot [\sigma] \quad (3)$$

$$N' = \frac{N'_p}{k} = F_{нт} \cdot [\sigma] \quad (4)$$

Таким образом, при заданных  $F$  и  $[\sigma]$  задача определения допускаемой нагрузки для сжатых стержней сводится по существу к установлению величины  $\varphi$  — наименьшего коэффициента понижения допускаемых напряжений при продольном изгибе.

Для установления величины  $\varphi$  будем исходить из следующих основных предпосылок:

а) Стержень сжат внецентренно; внецентренность приложения нагрузки изменяется в зависимости от гибкости стержня; ось стержня изогнута по синусоиде.

б) До предела текучести материал стержня подчиняется закону Гука; за пределом текучести материал приобретает свойство идеальной пластичности (диаграмма Прандтля).

в) Сечения элемента при изгибе остаются плоскими (гипотеза Бернулли).

Рассмотрим стержень со свободно поворачивающимися концами, сжатый продольными силами  $N$ , приложенными по концам с одинаковым эксцентриситетом  $e = \Phi(\lambda)$ . Для рассматриваемого случая, в пределах закона Гука, зависимость между силами  $N$  и максимальными фибровыми сжимающими напряжениями  $\sigma$  может быть найдена из условия:

$$\frac{N}{F_{op}} + \frac{Ne}{W_{op}} \left( 1 + \frac{1,23\alpha}{1-\alpha} \right) = \sigma, \quad (5)$$

$$\text{где: } \alpha = \frac{N}{N_s}; \quad N_s = \frac{\pi^2 EI}{l^2}.$$

Для дальнейших рассуждений воспользуемся понятием об идеальном профиле (рис. 1), успешно примененным А. Г. Назаровым при решении некоторых задач строительной механики [4].

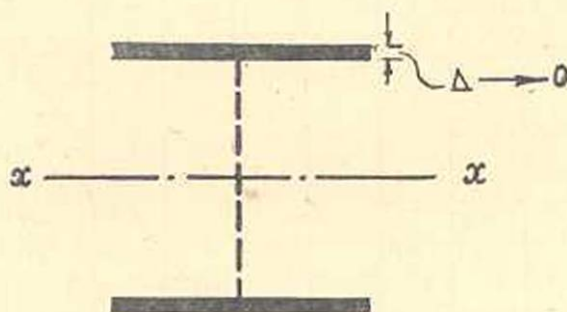


Рис. 1.

В случае, когда поперечное сечение стержня состоит из очень тонких полосок параллельных нейтральному слою („идеальный профиль“), полагая  $\sigma = \sigma_r$ , из условия (5) находим следующую формулу для определения критической (разрушающей) нагрузки:

$$\frac{N_p}{F_{\text{ср}}} + \frac{N_a e}{W_{\text{ср}}} \left( 1 + \frac{1,23z}{1-\alpha} \right) = \sigma_r \quad (6)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{N_p}{N_a}$$

Введем следующие обозначения:

$S = \frac{W_{\text{ср}}}{F_{\text{ср}}}$  — радиус ядра сечения сжатой зоны;

$m = \frac{e}{S}$  — относительный эксцентриситет приложения продольной нагрузки;

$\lambda$  — гибкость стержня;

Из уравнения (6) находим величину коэффициента:

$$\varphi = \frac{(m + n + 1) - \sqrt{(m + n + 1)^2 - 4n(1 + 0,23m)}}{2n(1 + 0,23m)} \quad (7)$$

$$\text{где: } n = \frac{\sigma_r \lambda^2}{\pi^2 \cdot E} \quad (8)$$

Нами, на основании опытных исследований [1,7], предлагается следующая формула для начального относительного эксцентриситета при продольном изгибе центрально сжатых стальных стержней:

$$m = \frac{e}{S} = \left[ 0,275 - 0,075 \left( \frac{\lambda}{100} \right) \right] \left( \frac{\lambda}{100} \right)^2 \quad (9)$$

где:  $e$  — эксцентриситет приложения осевой сжимающей силы.



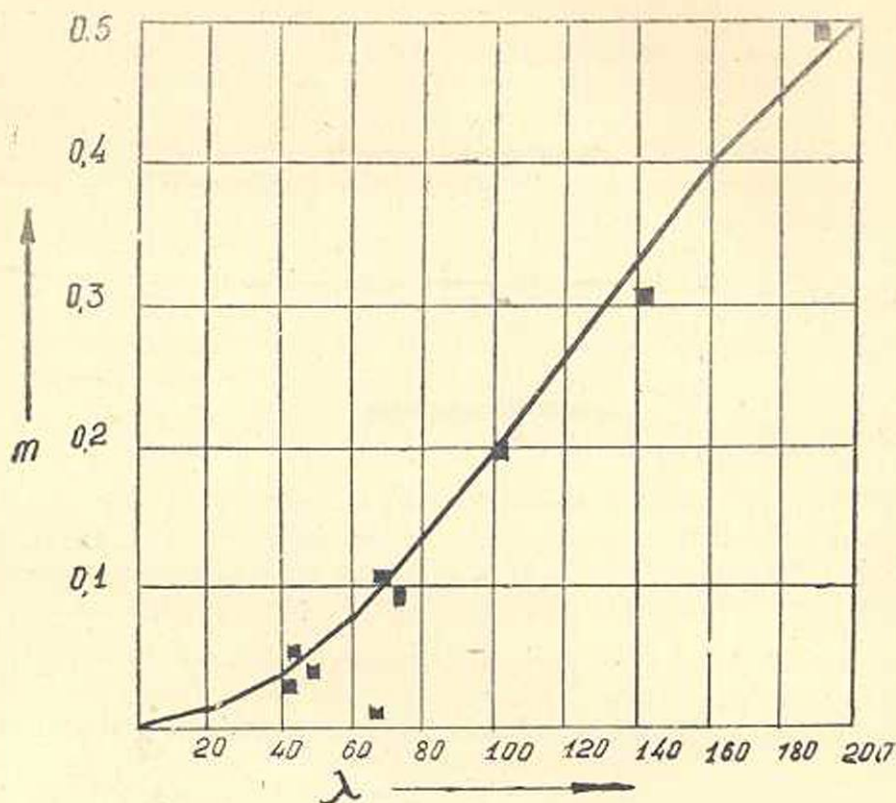


Рис. 2.

На рис. 2 показана кривая, вычисленная по формуле (9). На этом же рисунке точками показаны величины начальных относительных эксцентриситетов в зависимости от гибкости сжатого стержня, полученные Никифоровым на основании тщательных экспериментальных исследований.

Сопоставление коэффициентов  $\varphi$ , полученных по приближенной формуле (7) с аналогичными коэффициентами, полученными К. С. Завриевым (3) более точным путем, на базе метода „максимальных краевых напряжений“ и интегрирования дифференциального уравнения изогнутой оси балки показывает, что при  $m \leq 0,5$  расхождение между ними не превышает 1—2%.

Следует подчеркнуть, что формула (7), базирующаяся на методе „максимальных краевых напряжений“, остается достаточно строгой для „идеального профиля“.

Для внецентренно-сжатых стержней реальных профилей коэффициенты  $\varphi$  должны быть установлены с учетом пластических деформаций. Попытка определения коэффициентов  $\varphi$  для реальных профилей с учетом пластических деформаций была предпринята Хвалой [5], Ечеком [6] и рядом других исследователей.

Теоретическими исследованиями автора настоящей статьи и

произведенными им испытаниями до разрушения 57 внецентренно-сжатых стальных стержней [8] было установлено следующее.

1) Способ установления величины разрушающей нагрузки сжато-изогнутых стержней по методу „максимальных краевых напряжений“ является справедливым только для идеального профиля; величина разрушающей нагрузки для сжато-изогнутых стержней реальных профилей должна быть установлена с учетом пластических деформаций.

2) Величина разрушающей нагрузки для сжато-изогнутых элементов реальных профилей может быть установлена по формулам, основанным на методе „максимальных краевых напряжений“ при условии подстановки в эти формулы величины  $m$  вместо  $m$  ( $m$  — относительный эксцентриситет приложения осевой нагрузки;  $\eta$  — коэффициент, учитывающий пластические деформации).

3) Коэффициент  $\eta$  для профилей, применяемых в стальных строительных конструкциях, в зависимости от распределения массы сечения по отношению к экваториальным осям сечения, колеблется в пределах от 0,85 до 0,45; в частности, для прокатных двутавровых профилей при изгибе элемента в плоскости стенки двутавра  $\eta = 0,85$ ; для крестового сечения  $\eta = 0,45$ .

В подавляющем большинстве случаев в сжато-изогнутых элементах современных строительных стальных конструкций, с целью уменьшения веса и увеличения жесткости их, применяют профили, для которых коэффициент  $\eta = 0,75-0,85$ .

Подсчеты показывают, что при  $\lambda > 40$ ,  $m \leq 0,5$  и  $\eta = 0,75-0,85$  величины  $\varphi$ , вычисленные по формулам, основанным на методе „максимальных краевых напряжений“, в частности по приближенной формуле (7), совершенно незначительно отличаются от аналогичных величин, вычисленных по методу Хвалла и Ечек. При этом, по формулам, основанным на методе „максимальных краевых напряжений“, получаются заниженные величины  $\varphi$ .

На основании изложенных соображений, учитывая, что при  $\lambda \leq 200$  по формуле (9)  $m < 0,5$ , в запас прочности можно влияние формы сечения на величину  $\varphi$  не учитывать, т. е. принять  $\eta = 1$  и расчет производить по формуле (7). В случае, когда  $m$  определяется выражением (9), величиной 0,23  $m$ , входящей в формулу (7), можно также пренебречь. В этом случае:

$$\varphi = \frac{(m + n + 1) - \sqrt{(m + n + 1)^2 - 4n}}{2n} \quad (10)$$

Подсчеты показывают, что максимальное расхождение между величинами  $\varphi$ , вычисленными по формулам (7) и (10), не превышает 4%.

Перепишем формулу (10) в следующем виде:

$$\varphi = \frac{(m + n + 1) - \sqrt{1 + [2m + (m + n)^2 - 2n]}}{2n} \quad (10a)$$



В формуле (10а) выражение под радикалом, заключенное в квадратные скобки, при  $\lambda \leq 110$  и  $m$ , определяемом по формуле (9), меньше 0,5.

Разлагая радикал в формуле (10а) в биномиальный ряд и подставляя два первых члена этого ряда в формулу, получим:

$$\varphi = 1 - \frac{(m+n)^2}{4n} \quad (11)$$

Подставляя в формулу (11) значения  $m$  и  $n$  из (8) и (9) и принимая в формуле (8)  $E = 2100000 \text{ кг/см}^2$  и  $\sigma_s = 2400 \text{ кг/см}^2$ , получим:

$$\varphi = 1 - \frac{(1,435 - 0,075 \frac{\lambda}{100})^2}{4,64} \cdot \left(\frac{\lambda}{100}\right)^2 \quad (12)$$

В формуле (12) множитель, стоящий перед  $\left(\frac{\lambda}{100}\right)^2$ , при изменении  $\lambda$  в пределах от 0 до 110, колеблется в пределах от 0,44 до 0,40.

На основании изложенного нами предлагается следующая расчетная формула для вычисления коэффициента  $\varphi$  при продольном изгибе центрально-сжатых элементов из обычной строительной стали при  $\lambda \leq 110$ :

$$\boxed{\varphi = 1 - 0,4 \left(\frac{\lambda}{100}\right)^2} \quad (I)$$

Для нахождения расчетной формулы  $\varphi$  при значениях  $\lambda > 110$  перепишем формулу (10) в следующем виде.

$$\varphi = \frac{m+1}{2n} + C, \quad (10б)$$

$$\text{где } C = \frac{1}{2} - \frac{1}{2n} \sqrt{(m+n+1)^2 - 4n} \quad (13)$$

Формула (13) при значениях  $m$  и  $n$ , заданных уравнением (8) и (9), на участке от  $\lambda = 100$  до  $\lambda = 200$ , выражает кривую очень малой кривизны. С достаточной точностью на этом участке кривую можно заменить хордой:

$$C = 0,142 - 0,56 \left(\frac{\lambda}{1000}\right) \quad (14)$$

Подставляя в формулу (10б) значения  $m$ ,  $n$ , и  $C$  из (8), (9) и (14), находим следующую расчетную формулу для  $\varphi$  при продольном изгибе центрально-сжатых элементов из обычной строительной стали для случая, когда  $\lambda > 110$ :

$$\boxed{\varphi = 0,25 + \frac{4300}{\lambda^2} - 0,8 \left(\frac{\lambda}{1000}\right)} \quad (II)$$

В таблице 1 коэффициенты  $\varphi$ , вычисленные по исходной формуле (7), сопоставлены с аналогичными величинами по формулам (10),

(I) и (II). Анализ табличных данных (см. табл. 1 и 2) позволяет констатировать, что расхождение между исходной формулой (7) и предлагаемыми расчетными формулами (I) и (II), невелико.

Таблица 1

| Гибкость<br>$\lambda$ | Коэффициенты $\varphi$ |                 |                |                 | Расхождение в %<br>между (3) и<br>(I), (II) |
|-----------------------|------------------------|-----------------|----------------|-----------------|---------------------------------------------|
|                       | По формуле (7)         | По формуле (10) | По формуле (I) | По формуле (II) |                                             |
| 20                    | 0,99                   | 0,99            | 0,98           | —               | 1,01                                        |
| 40                    | 0,95                   | 0,97            | 0,94           | —               | 1,05                                        |
| 60                    | 0,89                   | 0,89            | 0,86           | —               | 3,4                                         |
| 80                    | 0,77                   | 0,80            | 0,74           | —               | 3,4                                         |
| 100                   | 0,62                   | 0,60            | 0,6            | 0,6             | 3,2                                         |
| 120                   | 0,47                   | 0,45            | —              | 0,45            | 4,3                                         |
| 140                   | 0,37                   | 0,36            | —              | 0,36            | 2,7                                         |
| 160                   | 0,29                   | 0,28            | —              | 0,29            | 0                                           |
| 180                   | 0,24                   | 0,23            | —              | 0,24            | 0                                           |
| 200                   | 0,196                  | 0,189           | —              | 0,197           | 0,5                                         |

Сопоставление величин  $\varphi$ , вычисленных по расчетным формулам (I) и (II) и аналогичным величинам ГОСТ 960—46, приводится в таблице 2.

Таблица 2

| Гибкость<br>$\lambda$ | Коэффициенты $\varphi$ |                 |             | Расхождение в %         |                          |
|-----------------------|------------------------|-----------------|-------------|-------------------------|--------------------------|
|                       | По формуле (I)         | По формуле (II) | ГОСТ 960—46 | Между (I) и ГОСТ 960—46 | Между (II) и ГОСТ 960—46 |
| 0                     | 1,00                   | —               | 1,00        | 0                       | —                        |
| 10                    | 0,99                   | —               | 0,99        | 0                       | —                        |
| 20                    | 0,98                   | —               | 0,96        | -2,1                    | —                        |
| 30                    | 0,96                   | —               | 0,94        | -2,1                    | —                        |
| 40                    | 0,94                   | —               | 0,92        | -2,2                    | —                        |
| 50                    | 0,90                   | —               | 0,89        | -1,1                    | —                        |
| 60                    | 0,86                   | —               | 0,85        | 0                       | —                        |
| 70                    | 0,80                   | —               | 0,81        | +1,2                    | —                        |
| 80                    | 0,74                   | —               | 0,75        | +1,3                    | —                        |
| 90                    | 0,68                   | —               | 0,69        | +1,5                    | —                        |
| 100                   | 0,60                   | 0,60            | 0,60        | 0                       | 0                        |
| 110                   | 0,52                   | 0,52            | 0,52        | 0                       | 0                        |
| 120                   | —                      | 0,45            | 0,45        | —                       | 0                        |
| 130                   | —                      | 0,40            | 0,40        | —                       | 0                        |
| 140                   | —                      | 0,36            | 0,36        | —                       | 0                        |
| 150                   | —                      | 0,32            | 0,32        | —                       | 0                        |
| 160                   | —                      | 0,29            | 0,29        | —                       | 0                        |
| 170                   | —                      | 0,26            | 0,26        | —                       | 0                        |
| 180                   | —                      | 0,24            | 0,23        | —                       | -4,3                     |
| 190                   | —                      | 0,22            | 0,21        | —                       | -4,7                     |
| 200                   | —                      | 0,197           | 0,190       | —                       | -3,7                     |



Анализ данных таблицы 2 показывает, что расхождение между коэффициентами  $\varphi$  для строительной стали, приведенными в ГОСТ 960—46 и по предлагаемым нами расчетным формулам (I) и (II) при  $\lambda < 170$  не превышает 2,2%.

Насколько нам известно, коэффициенты  $\varphi$  ГОСТ 960—46 получены на основании теории Хвалла [5] и опытно-теоретических исследований, произведенных С. Н. Никифоровым [7]. В основу этих исследований была положена действительная индикаторная диаграмма строительной стали, полученная в результате массового испытания стержней.

Коэффициенты  $\varphi$  Хвалла были получены на основании безупречных и, вместе с тем, кропотливых и трудоемких расчетных построений, связанных с исследовательскими попытками при определении «кривых внутреннего сопротивления» графо-аналитического интегрирования дифференциальных уравнений и т. д. Удовлетворительное совпадение результатов наших расчетных построений с данными ГОСТ 960—46 и теорий Хвалла позволяет сделать следующие выводы.

1. Коэффициенты  $\varphi$  понижения допускаемых напряжений при продольном изгибе центрально-сжатых стальных элементов в таблице 9 ГОСТ 860—46 следует признать теоретически обоснованными.

2. При составлении Общесоюзного «Урочного Положения» по строительству взамен таблиц  $\varphi$  (или наряду с таблицами) могут быть с успехом использованы предлагаемые нами расчетные формулы (I) и (II) для определения коэффициентов  $\varphi$  понижения допускаемых напряжений центрально-сжатых стальных элементов. При этом надо учесть, что эти формулы могут быть распространены на все строительные стали, предел текучести которых не превышает 2400 кг/см<sup>2</sup>.

3. На основании формул (8), (9) и (10) по предлагаемому нами методу, без особых затруднений, могут быть составлены простые расчетные формулы коэффициента  $\varphi$  центрально-сжатых элементов любой марки стали с хорошо развитой площадкой текучести.

\* \* \*

В действующих Т. У. и Н. имеются существенные противоречия по определению величины поперечной силы для центрально-сжатых составных стержней при продольном изгибе.

Следуя методу К. С. Завриева [3], попытаемся составить обоснованную расчетную формулу поперечной силы.

Критическое состояние сжатого элемента при продольном изгибе определяется из условия:

$$\frac{N_p}{F_{\sigma p}} + \frac{N_p \cdot Y_0}{W_{\sigma p}} = \sigma_c \quad (a)$$

При введенных выше обозначениях, из условия (а) находим следующее выражение для стрелы прогиба при критическом состоянии сжатого элемента:

$$Y_0 = \frac{1-\varphi}{\varphi} \cdot S \quad (в)$$

Исходя из предположения, что ось стержня изогнута по синусоиде, получим следующее значение критической поперечной силы:

$$Q_p = N_p \cdot \text{mdx} \left( \frac{dy}{dx} \right) = N_p \cdot Y_0 \cdot \frac{\pi}{l} \quad (с)$$

Подставляя значение  $Y_0$  из (в) в (с) и принимая во внимание что  $\lambda = \frac{l}{r}$ , получим:

$$Q_p = \frac{\pi \cdot S}{\lambda r} \cdot \left( \frac{1}{\varphi} - 1 \right) \cdot N_p \quad (d)$$

Допускаемая поперечная сила:

$$Q = \frac{Q_p}{k} = \frac{\pi \cdot S}{\lambda r} \left( \frac{1}{\varphi} - 1 \right) \cdot N_{доп} \quad (e)$$

Принимая во внимание выражение (3), получим:

$$Q = \frac{\pi S \cdot [\sigma]}{\lambda r} (1 - \varphi) \cdot F_{6p} \quad (15)$$

Для основных типов сечений металлоконструкций можно принять  $\frac{S}{r} = 0,85$ .

Подставляя в формулу (15) значения коэффициента  $\varphi$  из (I) и (II) и принимая  $[\sigma] = 1400 \text{ кг/см}^2$ , и  $\frac{S}{r} = 0,85$ , находим:

при гибкости элемента  $\lambda \leq 110$ :

$$\boxed{Q = 0,15 \lambda \cdot F_{6p}} \quad (III)$$

при гибкости элемента  $\lambda > 110$ :

$$Q = \left[ 3 + \frac{2800}{\lambda} - \left( \frac{252}{\lambda} \right)^3 \right] F_{6p} \quad (16)$$

Исследование выражения (16) показывает, что при изменении  $\lambda$  в пределах от 110 до 200  $Q$  колеблется в пределах от  $15 F_{6p}$  до  $17,2 F_{6p}$ . Поэтому при  $\lambda > 110$  можем принять:

$$\boxed{Q = 17 F_{6p}} \quad (IV)$$



## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Тимошенко С. П.—Устойчивость упругих систем. Москва—Ленинград, 1946.
2. Стрелецкий Н. С.—Курс металлических конструкций, ч. 1, Москва, 1940.
3. Завриев К. С.—Расчетные формулы прочности в особых случаях. Москва, 1935.
4. Назаров А. Г.—О применении понятия „идеального профиля“ к анализу несущей способности статически неопределимых систем. Сб. тр. АН СССР, Москва, 1937.
5. Chwalla E.—Die Theorie des aussermittig gedrückten Stabes aus Baustahl. Stahlbau, H. 21—23, 1934.
6. Jezek K.—Die Festigkeit von Druckstäben aus Stahl. Wien, 1937.
7. Никуфоров С. Н.—Устойчивость сжатых стержней сварных ферм. Москва—Ленинград, 1938.
8. Пинадзян В. В.—К вопросу о несущей способности сжато-изогнутых стержней. Проект и стандарт, № 1, 1938. Экспериментальное исследование устойчивости внецентренно-сжатых стальных стержней. Строительная промышленность, № 11, 1938;  
Сб. тр. по строительной механике под ред. К. С. Завриева, Москва, 1940.  
ДАН Армянской ССР, VIII, № 1, 11, 1942.

## Վ. Վ. Փինաջյան

ԲԱՆԱԶԵՎԵՐԻ ԿԵՆՏՐՈՆԱԿԱՆ ՍԵՂՄՎԱԾ ՊՈՂՊԱՏՅԱ ԶՈՂԵՐԻ  
ՀԱՇՎՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

## Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հենվելով ժամանակակից տեսական և փորձնական հետազոտությունների վրա, հեղինակն առաջարկում է բանաձևեր, որոնց միջոցով կարելի է հաշվել ընդերկայանական ծոման ժամանակ թուլյատրելի լարումների իջեցման ֆորմակիցը:

Բերված բանաձևերն օգտագործելի են սովորական շինարարական պողպատից ( $\sigma_r = 2400$  կգ/սմ<sup>2</sup>) պատրաստված, ընդերկայանական ծոման աշխատող ձողերի համար:

Հեղինակի առաջարկված մեթոդը հաջողությամբ կիրառվում է տալիս առանց դժվարություն կազմելու հաշվային բանաձևերը՝ այլ մարկանների պողպատներից պատրաստված ձողերի համար, որոնց նյութներն ունեն զգալի զարգացած հոսունություն հարթակ:

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ

С. А. Шагинян

**Опытное исследование преднапряженных армокаменных  
балок из туфовых блоков**

Армения имеет неисчерпаемые запасы естественного строительного камня; поэтому рациональное и широкое применение каменных конструкций имеет первостепенное значение в вопросе успешного выполнения плана строительных работ по Республике.

До настоящего времени неармированная каменная кладка применялась преимущественно в сжатых элементах конструкций (колонны, стены, арки).

В изгибаемых элементах сооружений неармированная рядовая кладка не нашла практического применения вследствие плохой сопротивляемости кладки растяжению, а также по условиям сейсмостойкости. Опыт строительства и произведенные исследования [1] показали, что обычную армированную рядовую туфовую кладку „мидис“ можно применять для перемычек пролетом до 1,5 метра.

Возможность применения армированной туфовой кладки из блоков правильной формы для изгибаемых элементов пролетом более 4,0 метров нам представляется сомнительным, поскольку как показали опыты [6], при таких пролетах в растянутой зоне конструкций возникают недопустимые трещины (щели), могущие вызвать коррозию арматуры. Трещиноустойчивость и жесткость изгибаемых элементов каменных конструкций пролетом до 5—7 метров можно обеспечить применением предварительно напряженной арматуры.

Насколько известно, идея применения преднапряженной армированной каменной кладки была впервые высказана А. Л. Чураяном, однако это предложение не имело экспериментального подтверждения.

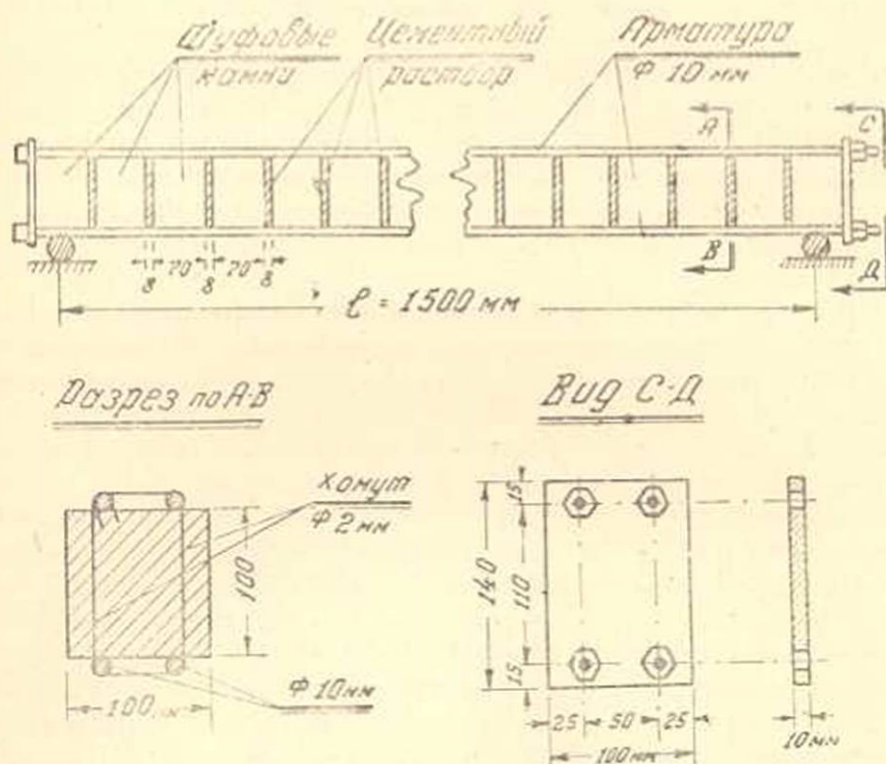
С 1944 года в Институте Сооружений Академии Наук Арм. ССР были начаты экспериментально-теоретические исследования с целью выявления технической эффективности преднапряженных изгибаемых армокаменных элементов с применением туфовых блоков правильной формы.

В данной статье автор пытается осветить вкратце результаты экспериментальных работ [6], на основе которых были разработаны формулы для расчета армокаменных преднапряженных конструкций [5] и одновременно сделать ряд практических выводов.



Для предварительной проверки правильности теоретических предпосылок автора, а также для выяснения возможности практического осуществления предложенной конструкции было решено сначала поставить опыты над модельной балкой.

Модельная балка с расчетным пролетом  $l=1500$  см, из туфовых камней правильной формы была сложена на цементном растворе. Сечение балки  $10 \times 10$  см (фиг. 1). По концам балки прикладывались металлические прижимные плиты 10 мм толщины, с четырьмя отверстиями для арматуры. Последняя состояла из четырех болтов



Фиг. 1.

круглого сечения диаметром 10 мм, снабженных с одного конца мертвой головкой, а с другого конца длинной резьбой. На резьбу с наружной стороны плиты одевались шестигранные натяжные гайки. Сжатие кладки осуществлялось завинчиванием натяжных гаек посредством гаечного ключа. Напряжение в арматуре контролировалось тензометрами.

Модельная балка с предварительным напряжением арматуры была испытана на изгиб двумя сосредоточенными силами, расположенными в третях пролета. Результаты предварительных испытаний показали справедливость теоретических предпосылок автора, а также

возможность практического осуществления напряженно-армированных балок из туфовых блоков.

Туф обладает прекрасными строительными качествами. Он легко обрабатывается, имеет небольшой объемный вес, хорошо сопротивляется сжатию, хороший изолятор тепла и звука, плохой проводник электричества, химически стойкий, жаростойкий, плохо поддается выветриванию, морозостойкий, хорошо сцепляется с раствором. Благодаря этим качествам туф, в особенности арктик-туф, приобрел широкое применение не только в пределах Армянской ССР, но и в других республиках Советского Союза. Единственный его недостаток это неоднородность. Объемный вес арктик-туфа ориентировочно колеблется от 1000 до 1500 кг/м<sup>3</sup>, а прочность на сжатие — от 50 до 150 кг/см<sup>2</sup>. Объемный вес местных туфов колеблется от 1200 до 1900 кг/м<sup>3</sup>, а прочность на сжатие — от 10 до 240 кг/см<sup>2</sup>. Чтобы иметь возможность по объемному весу судить о его прочности, экспериментально установлен график зависимости прочности туфа на сжатие от его объемного веса как для арктик-туфа, так и для местных туфов (фиг. 2).

Для обобщения указанного графика на фиг. 2 нанесены результаты испытаний туфовых кубиков другими исследователями. Как видно из чертежа, нанесенные точки закономерно ложатся вокруг нашей кривой. Пользуясь этими графиками, можно без испытания непосредственно определить прочность камня по его объемному весу.

Поскольку вопрос прочности и упругих свойств кладки из туфа исследован очень слабо, было решено поставить предварительные опыты по изучению этих величин. Были изготовлены призмы из туфовой кладки, на цементном растворе, высотой 77 см, состоящие из четырех камней. Сечение призмы 18×30 см. Призмы были испытаны на 200-тонном гидравлическом прессе. Нагрузка давалась ступенями, отвечающими приращению напряжения на 5 кг/см<sup>2</sup>. Продольные деформации измерялись специально сконструированным в АИС'е деформометром системы Максимова-Лисиченко. Сопоставление опытных данных с расчетными данными, полученными по формуле Онищика-Котова:

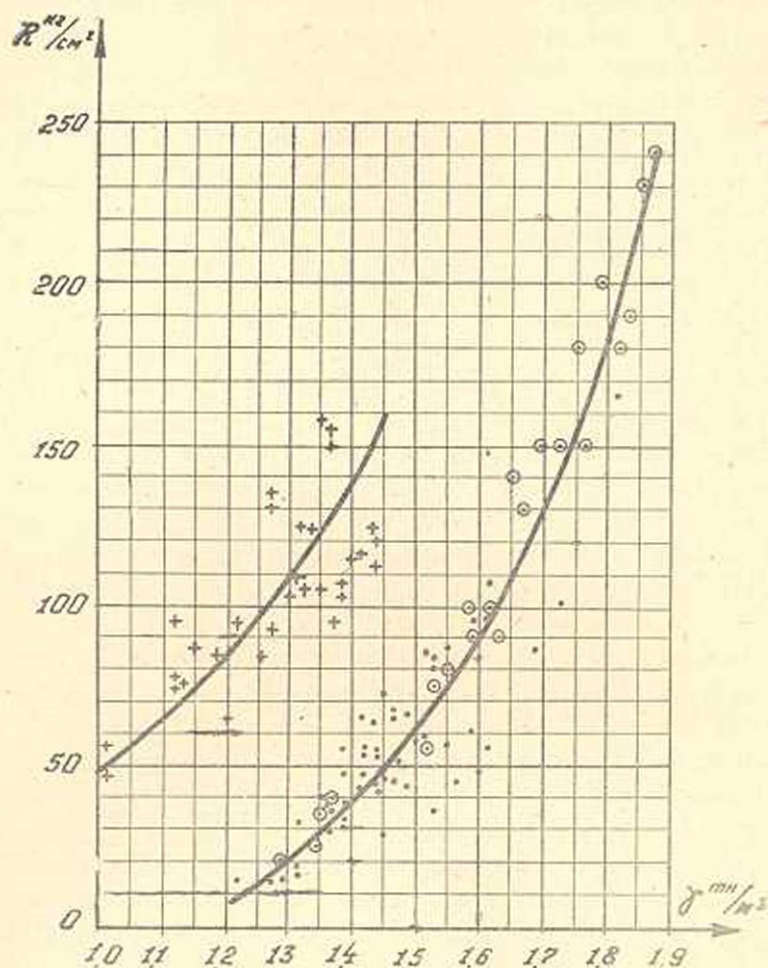
$$R_{ка} = 0,53 \left( 1 - \frac{0,15}{0,4 + \frac{R_p}{R_{ка}}} \right) R_{ка} \quad . . . . . (1)$$

показало их хорошее совпадение. Расхождение между опытными данными и формулой (1) не превышает 4%.

На фиг. 3 показан график зависимости деформаций кладки от ее напряжения, а на фиг. 4 — зависимость модуля упругости кладки от ее напряжения. Как видно из последнего графика, модуль упругости кладки из туфа является переменной величиной, зависящей от напряжения. Она меняется от 125000 кг/см<sup>2</sup> при напряжении



8,5 кг/см<sup>2</sup> до 30000 кг/см<sup>2</sup> при напряжении 35 кг/см<sup>2</sup>, причем характерно, что модуль упругости туфовой кладки в начальной стадии нагрузки сильно падает с возрастанием напряжения и только при напряжениях, близких к 0,5 R<sub>кл</sub>, становится почти постоянной и рав-



Фиг. 2. График зависимости прочности туфа на сжатие от его объемного веса.

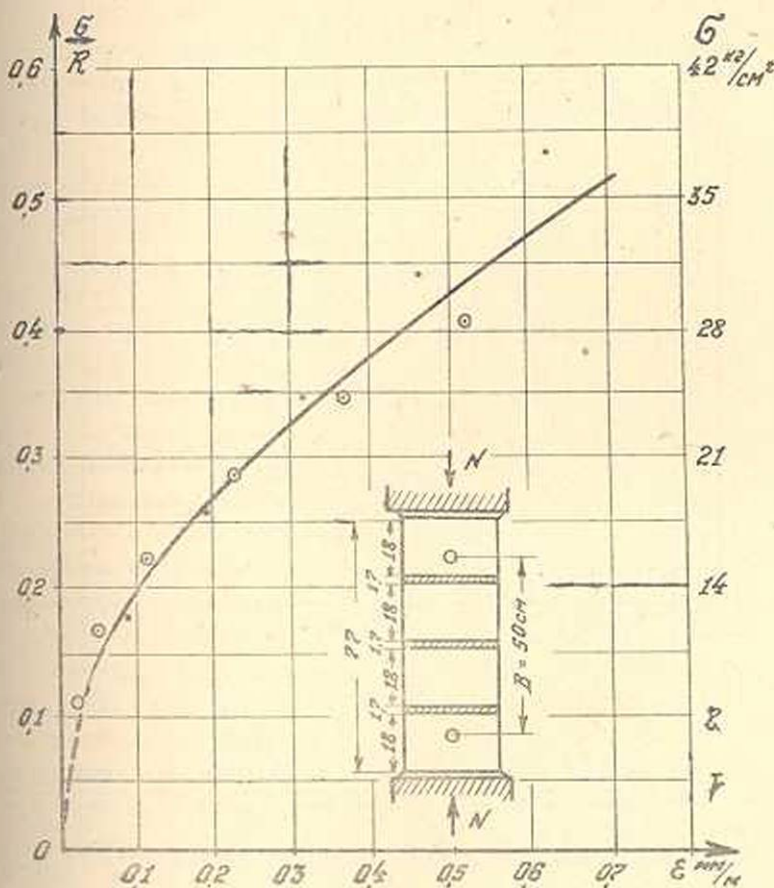
Местный туф ○ по данным автора [6],  
 • по данным Геворкяна Х. О.,  
 Анагюрцян З. А. и Никули-  
 ной Ю. Т. [2] [3].

Артник-туф + по данным Касабова А. Н. [4]

ной 30000 кг/см<sup>2</sup>. Интересно отметить, что модуль упругости кладки модельной балки равнялся 37000 кг/см<sup>2</sup>.

Для испытания балок были изготовлены еще три одинаковых балки с расчетным пролетом  $l=360$  см. Балки № 1 и № 2 предназначались для испытания с предварительным напряжением арматуры,

а балка № 3 — без таковой. Балки состояли из трех частей (фиг. 5): средней части из туфовой кладки длиной 295 см и двух бетонных оголовков для анкерки концов арматуры, снабженных крюками Консидера. Поперечное сечение балок было прямоугольное, разме-



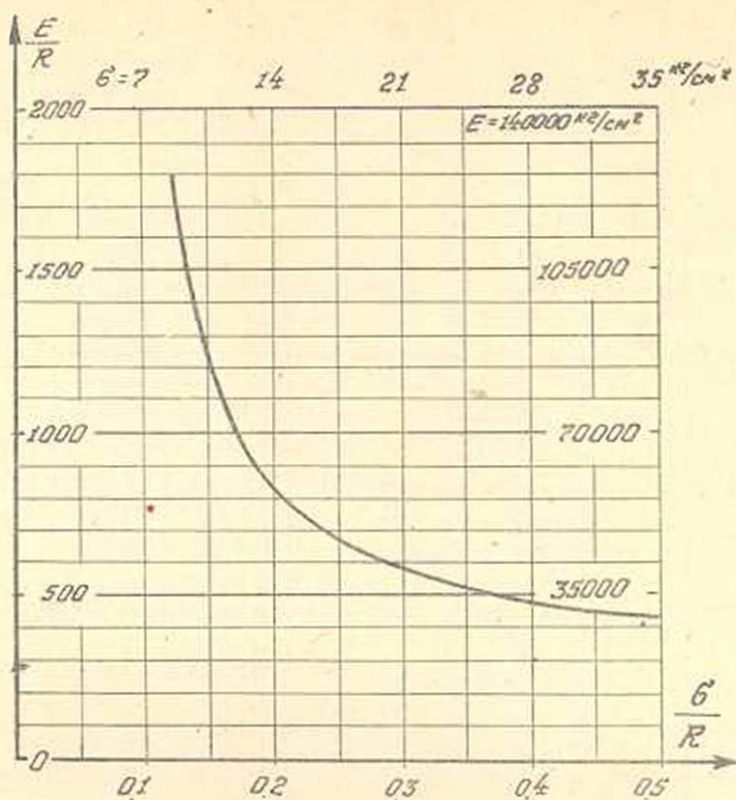
Фиг. 3.

рами  $18 \times 30 \text{ см}$  (фиг. 6). Туфовые глыбы были привезены из Аванского карьера (близ г. Ереван) и подвергались чистой теске со всех сторон до получения правильных параллелепипедов размерами  $18 \times 30 \times 23 \text{ см}$ , после чего снимались пазы для укладывания арматуры. Сборка балки № 1 производилась непосредственно на месте испытания при помощи подмостей, опирающихся на деревянные клинья (фиг. 7). Камни для каждой балки подбирались и устанавливались с таким расчетом, чтобы их объемный вес, а следовательно их прочность, повышалась от опор к середине балки и тем самым получалась как бы балка равного сопротивления (фиг. 5).

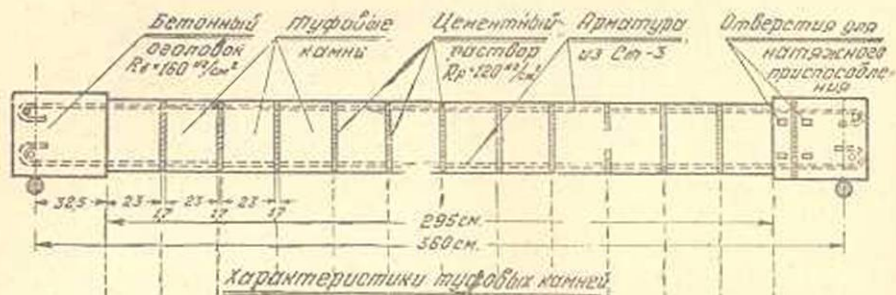
После окончания производства кладки по концам балок устанавливались опалубки и специально запроектированные съемные натяжные приспособления, а затем производилась бетонировка ого-

Известия I, 4—23





Фиг. 4.



Характеристики тuffовых камней

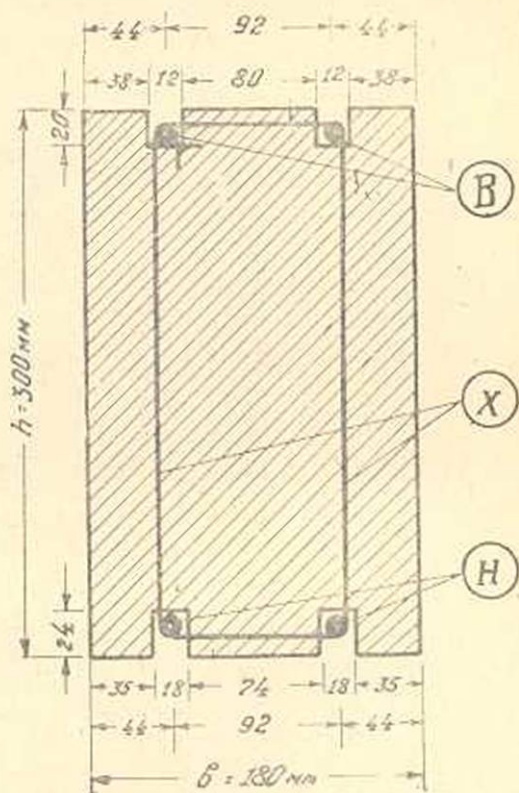
| Бетон | γ              | 1630 | 1660 | 1660 | 1660 | 1690 | 1720 | 1770 | 1890 | 1670 | 1670 | 1660 | 1630 | Объемный вес кг/м³     |
|-------|----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------------------------|
| №1    | R <sub>c</sub> | 100  | 110  | 110  | 110  | 130  | 160  | 180  | 130  | 110  | 110  | 110  | 100  | Прочность камня кг/см² |
| Бетон | γ              | 1760 | 1770 | 1780 | 1790 | 1790 | 1810 | 1810 | 1800 | 1780 | 1770 | 1770 | 1760 | Объемный вес кг/м³     |
| №2    | R <sub>c</sub> | 160  | 160  | 170  | 180  | 180  | 190  | 190  | 180  | 170  | 160  | 160  | 160  | Прочность камня кг/см² |
| Бетон | γ              | 1830 | 1850 | 1860 | 1860 | 1890 | 1900 | 1900 | 1890 | 1870 | 1860 | 1860 | 1840 | Объемный вес кг/м³     |
| №3    | R <sub>c</sub> | 190  | 190  | 230  | 240  | 250  | 250  | 250  | 250  | 240  | 250  | 220  | 190  | Прочность камня кг/см² |

Фиг. 5.

ловков. Один из оголовков имел поперечную сквозную щель шириной около 2 см, которая делила балку на две части, связанные между собой только стержнями арматуры. Само приспособление для предварительного натяжения арматуры, конструкция которого приведена на фиг. 8, представляет собой специальный винтовой домкрат, при помощи которого очень легко удастся осуществить предварительное натяжение.\* При осуществлении предварительного напряжения арматуры ширина щели увеличивается за счет удлинения арматуры и обжатия кладки.

Степень натяжения арматуры контролировалась тензосенсорами. Для сохранения полученных напряжений щель заполнялась цементным раствором с добавлением соляной кислоты в качестве ускорителя твердения. После того как раствор затвердел и достигал расчетной прочности, натяжные болты и клиновые балочки удалялись.

Для испытания балок было запроектировано и осуществлено специальное рычажное приспособление. Основной частью указанного приспособления является двутавр, который играет роль рычага. На свободном конце двутавра подвешена деревянная платформа для груза, перемещая которую вдоль двутавра можно получить разные коэффициенты увеличения груза. Это дает возможность на этом приспособлении испытывать образцы разной несущей способности небольшими грузами на платформе, а так же регулировать ступени нагрузки. Основным преимуществом указанного рычажного приспособления является то, что при его помощи можно испытывать образцы под длительной постоянной нагрузкой с любой продолжительностью



Фиг. 6. В—в балке № 1—2Ø15;  $\sigma_t = 2500 \text{ кг/см}^2$   
в балке № 2 и 3—2Ø10;

$\sigma_t = 3000 \text{ кг/см}^2$

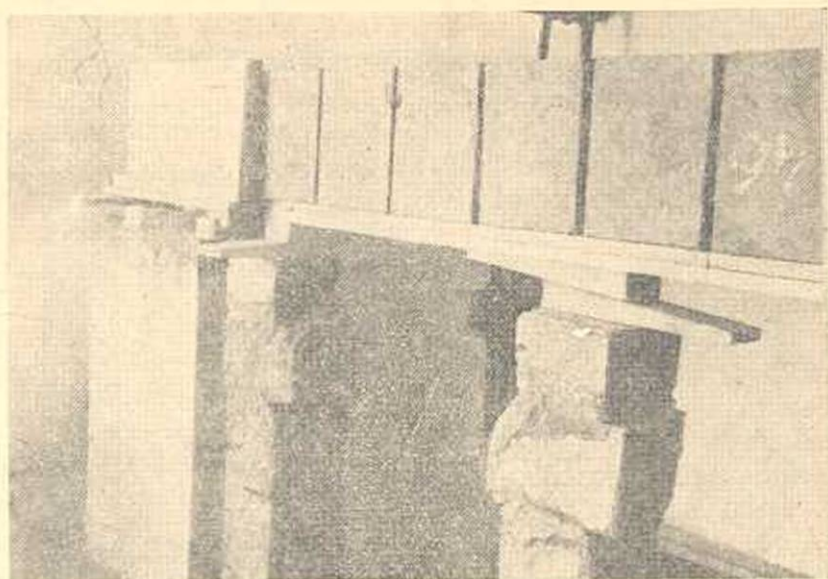
Н—во всех трех балках 2Ø16;

$\sigma_t = 2500 \text{ кг/см}^2$

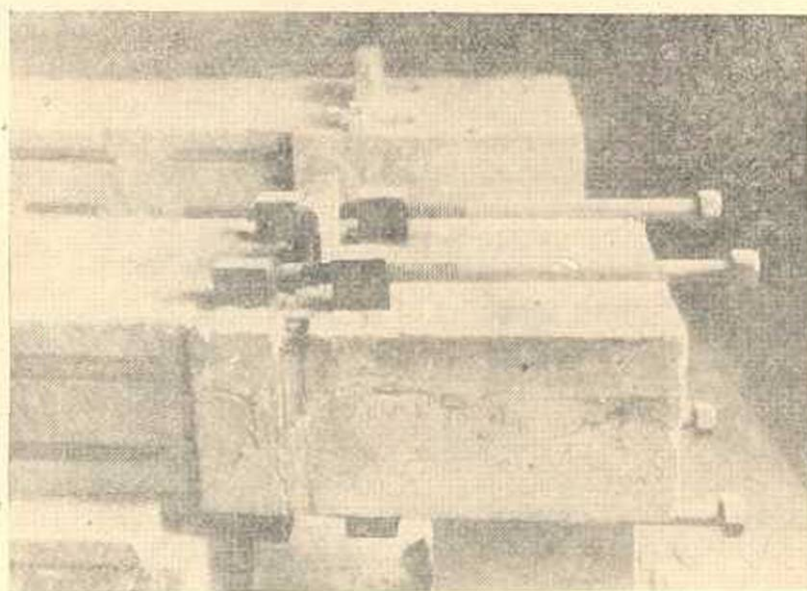
Х—монтажные хомуты Ø2 мм через 24,7 см.

\* Натяжное приспособление запроектировано по нашей просьбе инж. мех. А. К. Шаншиным.





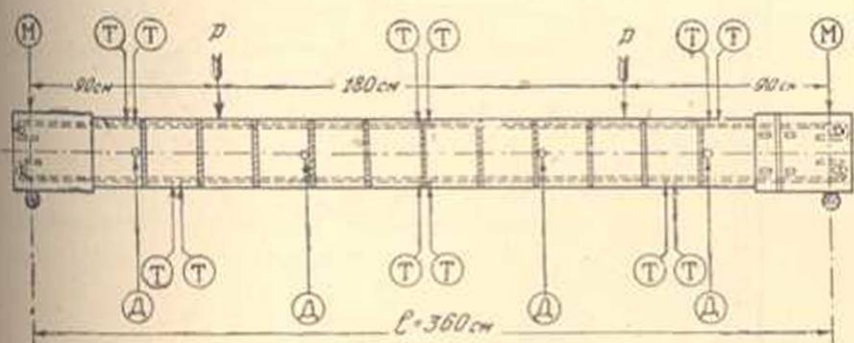
Фиг. 7.



Фиг. 8.

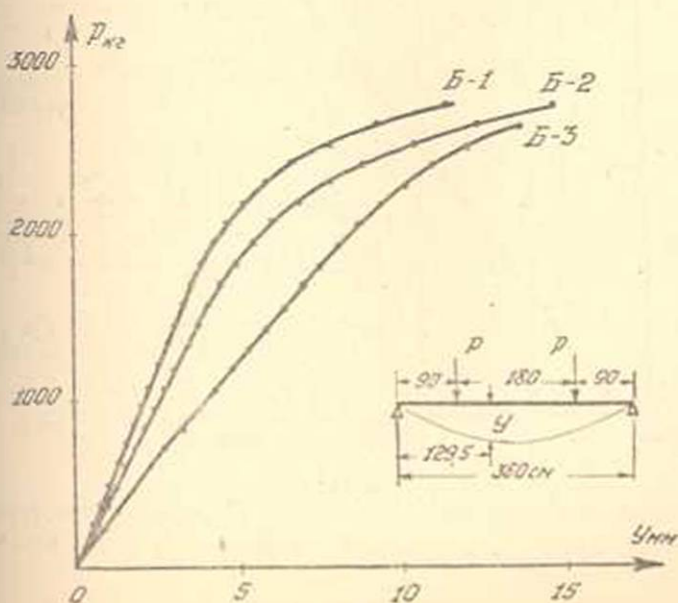
времени, чего нельзя достигнуть обычными гидравлическими прессами.

При испытании балок был использован ряд измерительных приборов, расстановка которых указана на фиг. 9.



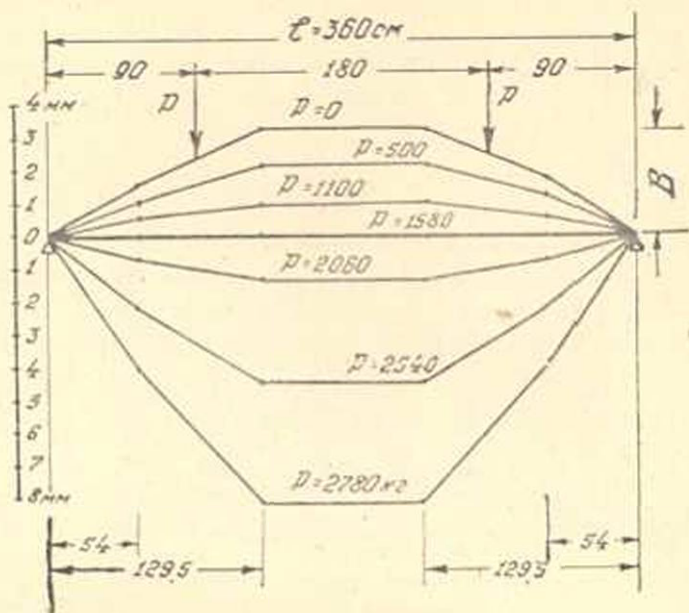
Фиг. 9. М—Мессуры,  
Т—Тензометры,  
Д—Марки деформометра  
(прогибомера)

С целью получения большого участка балки с чистым изгибом испытание балок производилось двумя сосредоточенными силами в четвертях пролета. Нагрузка  $P$  увеличивалась ступенями через 120 кг, что составляет около 4% от разрушающей. После каждой ступени нагрузки снимались отсчеты по всем приборам.

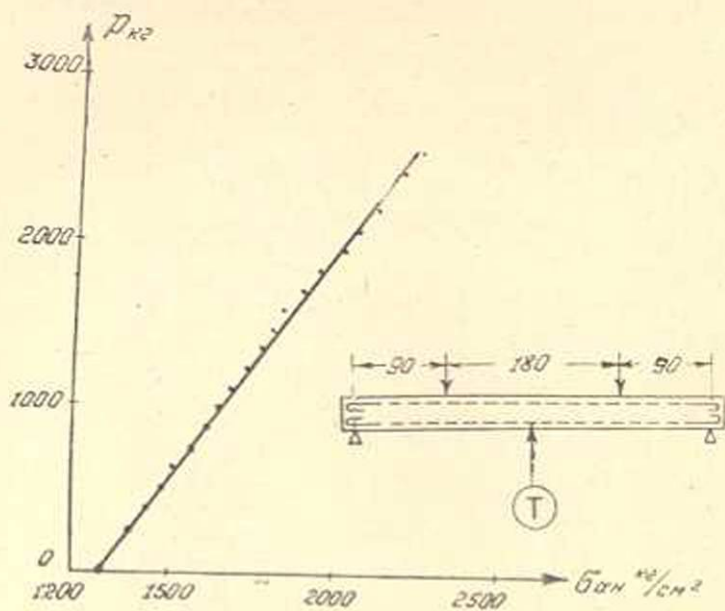


Фиг. 10.





Фиг. 11. В-выгиб балки от предварительного напряжения арматуры.



Фиг. 12.

По результатам испытаний, для каждой балки в отдельности, составлены графики: прогибов в четырех точках; изменений формы упругой оси балки; напряжений в арматуре по показаниям каждого тензомера в отдельности; определения положения нейтральной оси балки по напряжениям в арматуре.

Не имея возможности показать в настоящей статье все указанные графики, общим количеством около 70 [6], приводим здесь три наиболее необходимые из них: график прогибов трех балок (фиг. 10), график изменения формы упругой оси балки № 1 (фиг. 11) и график напряжений в нижней (рабочей) арматуре (фиг. 12).

Пользуясь результатами испытаний и уравнениями упругой оси однопролетной, свободно лежащей балки для случая двух симметричных сосредоточенных сил в пролете:

$$(E_{кл} J_{пр}) = \frac{P_x}{6y} [3a(1-a) - x^2], \text{ где } 0 \leq x \leq a \quad (2)$$

$$(E_{кл} J_{пр}) = \frac{P_a}{6y} [3x(1-x) - a^2], \text{ где } a \leq x \leq (1-a) \quad (3)$$

мы определили величину жесткости балок (табл. 1).

Таблица 1

| №№ точек                         |                                                | 2    | 3     | 4     | 5    |         |
|----------------------------------|------------------------------------------------|------|-------|-------|------|---------|
| $X_{см}$                         |                                                | 54   | 129,5 | 129,5 | 54   | Средняя |
| Балка № 1<br>$P=1820 \text{ кг}$ | $U_{мм}$                                       | 1,90 | 3,84  | 3,90  | 2,06 | —       |
|                                  | $\frac{(E_{кл} J_{пр})}{10^6} \text{ кг/см}^2$ | 6033 | 5791  | 5701  | 5565 | 5770    |
|                                  | Разница от среднего $\%$                       | +4,5 | +0,3  | -1,2  | -3,6 | 0       |
|                                  |                                                |      |       |       |      |         |
| Балка № 2<br>$P=1220 \text{ кг}$ | $U_{мм}$                                       | 1,50 | 3,05  | 2,80  | 1,50 | —       |
|                                  | $\frac{(E_{кл} J_{пр})}{10^6} \text{ кг/см}^2$ | 5123 | 4887  | 5323  | 5123 | 5120    |
|                                  | Разница от среднего $\%$                       | +0,2 | -4,4  | +4,1  | +0,2 | 0       |
|                                  |                                                |      |       |       |      |         |

Имея величину жесткости балок, определяем условный модуль упругости кладки при изгибе следующим образом. Как известно [5]:

$$F_p = \frac{bh^3}{12} + bh \left( x - \frac{h}{2} \right)^2 + n[F_{ан}(h-x-a)^2 + F_{ан}(x-a)^2]; \quad (4)$$



$$X = \frac{0,5 bh^2 + n[F_{an}(h-a) + F_{av}a]}{bh + n(F_{an} + F_{av})}, \quad (5)$$

$$J_{np} = \frac{(E_{кл} J_{np})}{E_a} n \quad (6); \quad n = \frac{E_a}{E_{кл}} \quad (7)$$

При совместном решении этих четырех уравнений получим следующее кубическое уравнение:

$$J_k F_n E_{кл}^3 + [(2r_k^2 + e_a^2) F_{ac} - J_k] F_k E_a \cdot E_{кл}^2 + \\ + [r_k^2 F_{ac}^2 + e_a^2 (F_{ap}^2 + 8 F_{an} F_{av}) - 2 J_k F_{ac}] E_{кл}^2 E_a + \\ + (4 l^2 F_{an} F_{av} - J_k F_{ac}) \frac{F_{ac}}{F_k} E_a^3 = 0; \quad (8)$$

$$\text{где } J_k = \frac{(E_{кл} J_{np})}{E_a}; \quad e_a = 0,5 h - a; \quad r_k^2 = \frac{h^2}{12}; \quad J_k = \frac{bh^2}{12}.$$

Подставляя в последнее уравнение соответствующие величины из опытных балок и решая кубическое уравнение, получим величины условного модуля упругости кладки при изгибе: для балки № 1— $E_{кл} = 70.000 \text{ кг/см}^2$ , а для балки № 2— $E_{кл} = 75000 \text{ кг/см}^2$ .

Результаты проведенных нами опытов показывают, что

1. До момента, непосредственно предшествующего появлению трещин в растянутой зоне напряженно-армированной балки из туфовых блоков, прогибы и напряжения в арматуре растут пропорционально нагрузке, с отклонениями, не превышающими 5–8% (фиг. 10 и 12).

Следовательно напряженно-армированная балка из туфовых блоков обладает явно выраженными упругими свойствами и при расчете подобного рода конструкций, в период монолитности, то есть, до появления трещин в растянутой зоне, могут быть использованы все предпосылки обычной теории сопротивления материалов.

Сопоставляя теоретическое [5] и экспериментальное [6] положение нейтральной оси, будем иметь:

| № балок | X в см      |           | Разница<br>в % |
|---------|-------------|-----------|----------------|
|         | По расчетам | По опытам |                |
| 1       | 15,3        | 15,7      | 2,6            |
| 2       | 16,3        | 16,2      | 0,6            |

Как видно из таблицы, расхождение между теоретическими и опытными данными не превосходит 3%.

Сопоставление величин напряжения в арматуре, полученных из опытов с соответствующими расчетными величинами, вычисленными

по формуле  $\sigma_a'' = \sigma_a' + \frac{M}{W_a}$  [5] показывает их хорошую сходимость:

расхождения не превышают 8%.

2. Прогибы напряженно-армированных балок из туфовых блоков под действием допускаемых нагрузок ( $0,5 P_p$ ) составляют

$f = \frac{1}{900}$  (табл. 2). Следовательно предложенная конструкция, несмотря

на ее сборность, обладает достаточной жесткостью и может быть применена в перекрытиях, имеющих значительные пролеты (до 5—7 м), что недостижимо при применении обыкновенных армокаменных конструкций.

3. Полученный из опыта с балкой № 3 небольшой прогиб

$f = \frac{1}{600}$  (табл. 2) показывает возможность перекрытия пролетов до

4 м армокаменными балками из туфовой кладки без предварительного напряжения, при условии применения туфовых блоков правильной формы и при устройстве бетонных оголовков для заанкерования концов арматуры, снабженных крюками Консидера. Однако, ввиду малочисленности опытов, необходимо это положение подтвердить путем постановки дополнительных опытов с армокаменными балками из туфовой кладки, без предварительного напряжения арматуры.

4. С целью выяснения влияния степени предварительного напряжения арматуры на величину момента образования трещин, на жесткость балки, а также на величину разрушающего момента, были осуществлены в разных балках разные величины предварительного напряжения арматуры.

Результаты испытаний помещены в таблице 2.

Анализируя данные, приведенные в таблице 2, приходим к выводу, что:

а) В балке без предварительного напряжения трещины в растянутой зоне балки появляются при очень низких нагрузках ( $M_{тр} \approx \frac{M}{3}$ )

б) При применении предварительного напряжения трещиностойчивость сильно повышается; чем выше степень предварительного напряжения, тем выше и трещиностойчивость, следовательно тем больше коэффициент запаса против образования трещин.

в) Жесткость напряженно-армированной балки примерно в 1,5 раза больше жесткости обыкновенной армокаменной балки без предварительного напряжения, причем с повышением коэффициента запаса против образования трещины повышается жесткость балки при эксплуатационной нагрузке.



Таблица 2

| №№ балок                                       |            |                          | 1               | 2               | 3                               |
|------------------------------------------------|------------|--------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|
| Предварительное напряжение $\text{кг/см}^2$    |            | $\sigma_{\text{ан}}$     | 1400            | 1100            | Без предварительного напряжения |
|                                                |            | $\sigma_{\text{ав}}$     | 660             | 860             |                                 |
|                                                |            | $\sigma_{\text{ки}}$     | -31             | -26             |                                 |
| Момент образования трещин                      | По опыту   | $M_{\text{тр}}$<br>т. м. | 2,45            | 1,69            | 0,50                            |
|                                                |            | $K_{\text{тр}}$          | 1,64            | 1,18            | 0,36                            |
|                                                | По расчету | $M_{\text{тр}}$<br>т. м. | 2,30            | 1,84            | —                               |
|                                                |            | Разница                  | $\%$            | +7              | -8                              |
| Максимальные прогибы под допускаемой нагрузкой |            | $f$<br>мм                | 3,8             | 4,2             | 6,0                             |
|                                                |            | $\frac{f}{l}$            | $\frac{1}{950}$ | $\frac{1}{850}$ | $\frac{1}{600}$                 |
| Разрушающий изгибающий момент                  | По опыту   | $M_p$<br>т. м.           | 2,99            | 2,88            | 2,77                            |
|                                                | По расчету | $M_p$<br>т. м.           | 2,71            | 2,70            | 2,70                            |
|                                                | Разница    | $\%$                     | +10             | +7              | +3                              |

г) Коэффициент запаса против образования трещины в наших опытах, как видно из таблицы, доходил до 1,64; следовательно, напряженно-армированная балка из туфовых блоков, даже при применении стали обычной марки СТ-3 с  $\sigma_t = 2500 \text{ кг/см}^2$ , обладает высокой трещиноустойчивостью и ее можно применять в конструкциях, где требуется особая стойкость против трещинообразования: в резервуарах, трубопроводах, акведуках и т. д.

При желании еще большего повышения указанного коэффициента без перерасхода арматуры, следует применять сталь с повышенным пределом текучести ( $\sigma_t \approx 5000 \text{ кг/см}^2$ ). В последнем случае, как показывают проведенные расчеты, можно достигнуть очень высокой трещиноустойчивости, вплоть до совмещения момента образования трещины с моментом разрушения балки. Кроме того, высокая трещиноустойчивость, как уже было указано выше, еще повысит жесткость конструкции; следовательно возможно применение напряженно-армированной балки из туфовых блоков в перекрытиях еще больших пролетов, чем 5—7 м.

д) Несущая способность всех трех балок при испытании оказалась почти одинаковой, с отклонениями от средней величины, не превышающими 4%. При сопоставлении расчетных величин разрушающего момента, вычисленных по схеме Лолейта [5], с соответствующими величинами, полученными из опытов, видно, что последние превышают расчетные величины в среднем на 7% (табл. 2). Эти два обстоятельства подтверждают, что разрушающая нагрузка не зависит от степени предварительного напряжения и может быть определена по расчетной схеме Лолейта.

### В ы в о д ы

1. Произведенное нами расчетно-экспериментальное исследование показало, что применение напряженного армирования к каменным конструкциям, в частности к кладке из туфовых блоков, является эффективным как в отношении жесткости и трещиностойкости, так и возможности перекрытия значительных пролетов напряженно-армированной кладкой.

2. Напряженно-армированная кладка с применением блоков правильной формы может быть применена в перекрытиях и перемычках значительных пролетов, в антисейсмических поясах, а также при усилении и реставрации старинных каменных сооружений.

3. В настоящее время в Институте Сооружений АН Арм. ССР успешно разрешается проблема по механической обработке естественных строительных камней. При эффективном разрешении этой проблемы и получении блоков правильной формы напряженно-армированные конструкции с применением естественных камней могут найти широкое применение в строительстве Армянской ССР, богатой естественными камнями.

4. Результаты опытов над преднапряженными армированными балками из туфовых блоков могут быть с успехом распространены на балки из искусственных камней (бетон, керамика и пр.).

Автор выражает благодарность чл.-корресп. АН Арм. ССР, доктору технических наук, проф. Назарову А. Г. за ценные указания, данные автору при выполнении настоящей работы, а также кандидатам техн. наук Пинаджяну В. В. и Григоряну Г. С. за полезные советы.

### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ацагорцян З. А.—Армирование туфовой кладки. Закавказская конференция по антисейсмическому строительству. Сборник докладов. 1942.
2. Ацагорцян З. А.—Туф и пемза в железобетонных конструкциях. Отчеты АИСК'а за 1933 г. (не опубликована).
3. Геворкян Х. О. и Никулина Ю. Т.—Исследование некоторых туфов Армении. Отчеты Института Сооружений АН Арм. ССР за 1946 г. (не опубликована).



4. Касабов А. Н.—Установление модулей упругости артикуфа и известняка и кладки из них. Отчеты Закавказского Института Сооружений за 1935 г. (не опубликована).
5. Шагинян С. А.—Расчет предварительно-напряженных армокаменных конструкций. Изв. АН Арм. ССР. I, № 2, 143 1948.
6. Шагинян С. А.—Напряженно-армированные каменные конструкции. Диссертация, 1947.

Институт Строительных  
Материалов и Сооружений  
Академии Наук Армянской ССР

Поступило 8 VI 1948.

Ա. Ա. Շահինյան

## ՏՈՒՖԱՔԱՐ ՆԱԽԱԼԱՐՎԱԾ ՀԵԾԱՆՆԵՐԻ ՓՈՐՁՆԱԿԱՆ ՈՒՍՈՒՄՆԱՍԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հոգիվածում ցույց է տրվում Հայկական ՍՍՌ տեղական շինանյութերի օգտագործման ակտուալ պրոբլեմներից մեկը:

Հեղինակը պատրաստել է փորձարկել է 4 արմոքարային հեծաններ, որոնցից երեքը նախալարված, իսկ մեկն՝ առանց նախնական լարման:

Հոգիվածում սեղմ ձևով տրված են հեղինակի կատարած փորձնական աշխատանքների արդյունքները:

Փորձնական ավյալները ցույց են տալիս, որ նախապես լարման մեթոդի կիրառությունը քարի կոնստրուկցիաներում, մասնավորապես սուֆաքար կոնստրուկցիաներում, տալիս է մեծ էֆեկտ: Նախապես լարված սուֆաքար հեծաններն ունեն բարձր կոշտություն, ճեղքակայուն են և կարող են կիրառվել զգալի թափվածիկ ծածկելու համար:

МАШИНОВЕДЕНИЕ

А. А. Акопов

Краткий анализ работы действующих в Армянский ССР  
туфорезных станков

В строительной промышленности Армянской ССР для возведения сооружений широко применяются естественные камни, запасы которых в Республике неисчерпаемы.

Однако добыча и обработка камня до сих пор механизированы слабо и большей частью производятся вручную.

Для получения дешевого строительного и декоративного камня нужна высокоразвитая камнедобывающая и камнеобрабатывающая промышленность, где внедрение комплексной механизации потребует создания новых типов механизмов и в первую очередь механизмов для добычи и обработки камня.

Конструирование новых типов механизмов, в частности камнерезных машин (построечных, заводских и карьерных), должно базироваться на результатах экспериментально-теоретических исследований по выявлению рациональных режимов резания и конструкции режущего инструмента. Наряду с лабораторными исследованиями необходимо произвести технико-экономический анализ существующих способов механической добычи и обработки камня. При решении указанного комплекса вопросов следует учесть не только эксплуатационные качества машин, но и условия их изготовления.

В Советском Союзе проблемой механической добычи и обработки камня занимаются: Лаборатория строительного и декоративного камня Академии Архитектуры СССР [1], НИС Главтопсель Метрострой [2], МПСМ Украинской ССР [3], Институт Стройматериалов и Сооружений АН Армянской ССР [4] и ряд других организаций. Следует отметить также работу отдельных новаторов строительного производства-конструкторов: Столярова, Зильберглит, Петрик, Рагозинского, Шматкова, Михайлова [5] и многих других, создавших новые конструкции машин.

В Армянской ССР новаторами в этом вопросе являются: инж. Г. Пасоян, произведший в 1944 г. предварительные опыты по фрезерованию камня, механик С. Карагезян, сконструировавший и изготовивший комбинированный туфорезный станок, инж. Коваленко,



сконструировавший и изготовивший двухдисковый туфорезный станок и ряд других специалистов.

В Институте Сооружений АН Армянской ССР под руководством доктора технических наук профессора М. В. Касьяна ведется научно-исследовательская работа по проблеме механической обработки естественных камней.

В данной статье автор ограничивается анализом работы трех действующих в Армении построечных туфорезных станков.

### Краткое описание станков

1. Комбинированный туфорезный станок конструкции Карагеяна. Станок предназначен для обработки блоков из Артекского туфа с трех сторон. Технологически обработка разделяется на две самостоятельные операции. Сначала ведется обработка двух постелей дисковыми фрезами (пилами), затем специальной торцевой фрезой обрабатывается лицевая сторона камня. Привод станка осуществляется электродвигателем мощностью 11 *квт*. Подача камня в процессе распиловки осуществляется столом, подвешенным к тележке. Тележка на катках перемещается по специальным направляющим. Кинематическая схема станка приведена на фиг. 1.

Стол дисковой части станка имеет следующие возможности:

а) Перемещение при рабочем ходе, осуществляемое механизмом подачи;

б) пневматический ускоренный обратный ход;

в) ускоренное ручное холостое перемещение в рабочую сторону. После обработки постелей распиливанием блок по горизонтальным рольгангам подается к фрезе.

Фрезерная часть станка имеет стол, свободно покоящийся на катках. Рабочий ход стола осуществляется от главного вала через кинематическую пару—рейка—шестерня; холостой ход вручную.

Для удобства обработки угловых камней стол снабжен специальным фиксирующим приспособлением. Крепление камня к столу в обеих операциях осуществляется пневматическим зажимом.

Давление воздуха, подаваемого к станку 4—5 *атм*. Усилие зажима камня составляет 700—800 *кг*.

2. Двухдисковый станок конструкции Коваленко. Станок представляет собой несколько измененную по конструкции дисковую часть ранее описанного станка. Особенности станка:

а) Для обработки камней разных размеров имеется возможность с помощью специального механизма регулировать расстояние между дисками. Регулировка производится вращением маховика вручную.

б) Подача стола осуществляется от главного вала специальным фрикционным механизмом. Конструкция механизма подачи осуществляет периодическую неравномерную подачу.

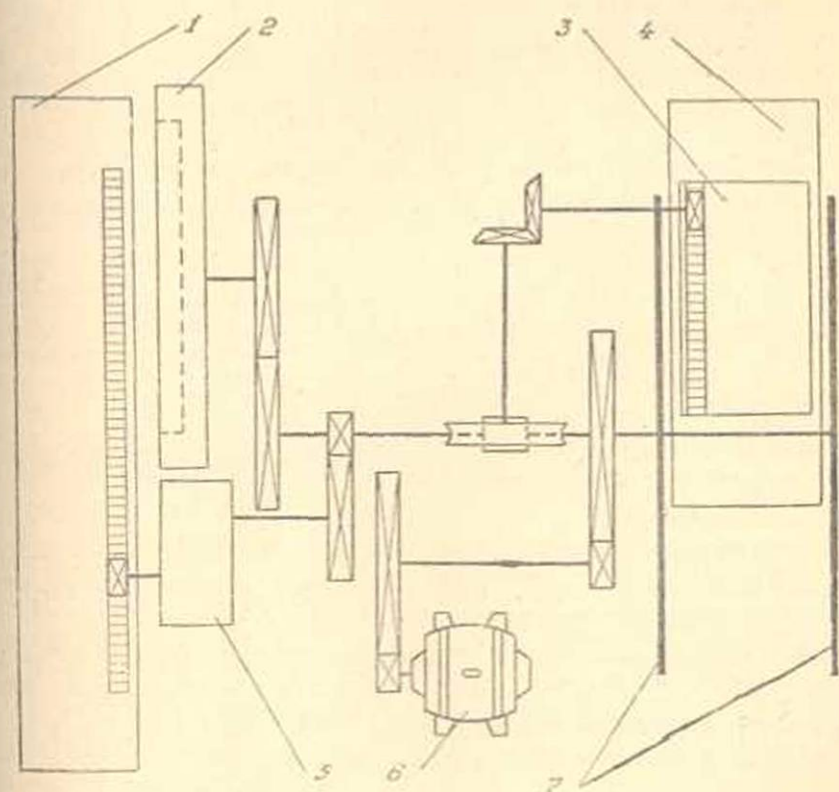
в) Крепление камня производится одногильчатым зажимным приспособлением вручную, через маховик—шестерню—рейку.

3. Продольно фрезерный станок 3-да им. Дзержинского. Станок представляет собой несколько измененную по конструкции фрезерную часть камбинированного станка. Особенности станка:

а) Станок почти целиком собран из деталей и узлов токарно-винторезного станка 16—15.

б) Подача стола осуществляется от отдельного электродвигателя через гитару, холловый винт и гайку. Стол ускоренного обратного хода не имеет.

в) Зажим камня осуществляется с помощью четырех болтов, двух накладок и четырех гаек. Закладка камня ручная.



Фиг. 3.

1—Стол фрезерной части станка; 2.—четырёхступенчатая торцевая фреза; 3—гет-  
лежка подачи; 4—подвесной стол дисковой части и станина —редуктор подачи  
5—электродвигатель; 7—дисковые фрезы (пилы).



## Характеристика станков

## 1. Дисковые фрезы (пилы)

Таблица 1

| Наименование                              | Измер.     | Комбинированный станок | Двухдисковый станок |
|-------------------------------------------|------------|------------------------|---------------------|
| 1. Число дисков                           | шт.        | 2                      | 2                   |
| 2. Расстояние между дисками               | мм         | 350                    | регулируется        |
| 3. Диаметр дисков                         | "          | 1100                   | 1050                |
| 4. Толщина дисков                         | "          | 15                     | 6                   |
| 5. Число режущих зубьев на каждом диске   | шт.        | 46                     | 40                  |
| 6. Шаг зубьев                             | мм         | 70                     | 55—110*             |
| 7. Число оборотов главного вала с дисками | об/мин.    | 68                     | 200                 |
| 8. Скорость резания                       | м/мин.     | 235                    | 660                 |
| 9. Ширина пропила в тупе                  | мм         | 23                     | 12                  |
| 10. Скорость подачи стола                 | мм/мин.    | 9,5                    | 2150**              |
| 11. Подача на один оборот дисков          | мм/оборот. | 13,5                   | 10,8                |
| 12. Подача на один зуб                    | мм/зуб.    | 0,3                    | 0,18—0,36           |

Как дисковые, так и торцевые фрезы на всех трех станках армированы пластинками из металло-керамического твердого сплава.

## 2. Торцевые фрезы

Таблица 2.

| Наименование                                            | Измер.  | Комбинированный станок | Продольно фрезерный станок |
|---------------------------------------------------------|---------|------------------------|----------------------------|
| 1. Число фрез                                           | шт.     | 1                      | 1                          |
| 2. Число ступеней фрезы                                 | "       | 4                      | 4                          |
| 3. Диаметры ступеней                                    | мм      | 565;565;815;825        | 410;400;390;380            |
| 4. Число резцов по ступеням соответственно              | шт.     | 4;8;16;32              | 4;4;4;4                    |
| 5. Общее число резцов                                   | "       | 60                     | 16                         |
| 6. Превышение зубьев по торцу                           | мм      | 20;35;55;62            | 15;25;30;35                |
| 7. Глубина резания, приходящаяся на каждую ступень      | "       | 20;15;20;7             | ***10;5;5                  |
| 8. Максимальный припуск, снимаемый фрезой в один проход | "       | 60                     | 20****                     |
| 9. Число оборотов фрезы                                 | об/мин. | 68                     | 30—70****                  |
| 10. Средняя скорость резания                            | м/мин.  | 126                    | 37,5—62                    |
| 11. Скорость подачи стола                               | "       | 600                    | 350                        |
| 12. Подача на один оборот фрезы                         | мм/об   | 8,8                    | 11,6—7                     |
| 13. Подача на 1 зуб фрезы по ступеням                   | "       | 2,2;1,1;0,55;0,275     | 2,9—1,75                   |

\* Зубья расположены с переменным шагом  $t_2n-l=55$  мм;  $t_2n=110$ .

\*\* Имеется в виду средняя скорость.

\*\*\* Глубина резания конструктивно не ограничена.

\*\*\*\* Лимитирующим является недостаточная жесткость и мощность станка. Фреза может снимать припуск до 35 мм.

\*\*\*\*\* Станок имеет 4 скорости (коробка скоростей токарно-винторезного станка 16—15). Используются только нижние 2 скорости.

### Результаты инструментального обследования работы станков

Потребляемая мощность. Измерения мощностей производились по схеме Арона. В табл. 3 приведены средние показатели при различных режимах работы станков.

Таблица 3

| Режимы работы                                       | Мощность в квт                   |                          |                                 |
|-----------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
|                                                     | Комбини-<br>рованный ста-<br>нок | Двухдиско-<br>вый станок | Продольно-фре-<br>зерный станок |
| 1. Холостой ход станка                              | 0,75                             | 3,36                     | 0,9                             |
| 2. Рабочий ход (обработка<br>ведется одним диском)  | 4,2                              | 12,6                     | —                               |
| 3. Рабочий ход (обработка<br>ведется двумя дисками) | 7,0                              | 17,6                     | —                               |
| 4. Рабочий ход (обработка<br>ведется фрезой)*       | 4,9                              | —                        | 1,53/1,85**                     |
| 5. Рабочий ход (работают 2<br>диска и фреза)        | 11,85                            | —                        | —                               |

Усилия резания при фрезеровании. Мощность, затрачиваемую на собственно резание, можно с некоторым допущением считать равной разности

$$4,9 - 0,75 = 4,15 \text{ квт} \quad . . . . . (\text{см. табл. 3 комбинированный станок}).$$

$$\text{или } 4,15 \times 102 = 425 \text{ кгм/сек.}$$

При средней скорости резания 2,1 м/сек будет справедливо  $425 \text{ кгм/сек} = 2,1 \text{ м/сек} \text{ Акг}$ , т. е. суммарное усилие резания всех резцов составляет 210 кг.

В работе одновременно находятся в среднем 15 зубьев, расположенных по ступеням в следующих количествах: 1; 2; 4 и 8 шт.

При приведенных в характеристике станка режимах работы фрезы условное максимальное суммарное сечение всех одновременно снимаемых фрезой стружек будет:

$$1 \times 2,2 \times 20 + 2 \times 1,1 \times 15 + 4 \times 0,55 \times 20 + 8 \times 0,275 \times 7 = 136,4 \text{ мм}^2.$$

Усилие, приходящееся на 1 мм<sup>2</sup> сечения стружки при этом составляет 1,55 кг/мм<sup>2</sup>.

\* Припуск, снимаемый на комбинированном станке, равен 60 мм, на продольно-фрезерном станке — 10 мм.

\*\* В числителе указана мощность, потребляемая станком при 30, а в знаменателе при 50 оборотах шпинделя в минуту.



**Средние показатели расхода времени на производство отдельных этапов работ, выведенные на основе хронометража**

Таблица 4

| Этапы работ                                                               | С т а н к и     |        |              |        |                     |        |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------|--------|--------------|--------|---------------------|--------|
|                                                                           | Комбинированный |        | Двухдисковый |        | Продольно-фрезерный |        |
|                                                                           | Время в сек.    | % 0/0* | Время в сек. | % 0/0* | Время в сек.        | % 0/0* |
| 1. Подноска камня с расстояния 3—10 м. на стол станка**                   | 86              | 30,7   | 130          | 48     | 92,7                | 15,1   |
| 2. Установка камня в зажимах стола и крепление                            | 23              | 8,3    | 64           | 23,5   | —                   | —      |
| 3. Рабочий ход (обработка ведется дисками)                                | 26              | 9,3    | 15           | 5,5    | —                   | —      |
| 4. Холостой ход стола                                                     | 3               | 1,05   | 2,5          | 1,0    | —                   | —      |
| 5. Освобождение камня                                                     | 2               | 0,9    | 2,5          | 1,0    | —                   | —      |
| 6. Транспортировка камня со стола дисковой части на стол фрезы.           | 17,5            | 6,3    | —            | —      | —                   | —      |
| 7. Установка и крепление камня                                            | 13,1            | 4,7    | —            | —      | 166,3               | 27,4   |
| 8. Рабочий ход (обработка ведется фрезой)                                 | 41,4            | 14,4   | —            | —      | 92                  | 15     |
| 9. Холостой ход стола                                                     | 9,4             | 3,57   | —            | —      | 92                  | 15     |
| 10. Освобождение камня                                                    | 2,7             | 0,98   | —            | —      | 113,7               | 18,8   |
| 11. Переноска обработанного камня со стола в штабель на расстоянии 4—6 м. | 54,4            | 19,67  | 57           | 21     | 53                  | 8,7    |

Приведенные показатели расхода времени на обработку одного квадратного метра туфа на станке

Таблица 5

| Режимы работы                                 | С т а н к и     |      |              |      |                     |      |
|-----------------------------------------------|-----------------|------|--------------|------|---------------------|------|
|                                               | Комбинированный |      | Двухдисковый |      | Продольно-фрезерный |      |
|                                               | мин.            | сек. | мин.         | сек. | мин.                | сек. |
| Обработка ведется дисками                     | 16              | 45   | 31           | 40   | —                   | —    |
| Обработка ведется фрезой                      | 25              | 55   | —            | —    | 123                 | 20   |
| Обработка ведется дисками и фрезой:           |                 |      |              |      |                     |      |
| 1. С учетом площади обработанных постелей     |                 |      |              |      |                     |      |
| а) При параллельной работе дисков и фрезы     | 7               | 17   | —            | —    | —                   | —    |
| б) При последовательной работе дисков и фрезы | 14              | 25   | —            | —    | —                   | —    |
| 2. Без учета площади постелей                 |                 |      |              |      |                     |      |
| а) При параллельной работе дисков и фрезы     | 18              | 20   | —            | —    | —                   | —    |
| б) При последовательной работе дисков и фрезы | 36              | 20   | —            | —    | —                   | —    |

\* Имеется в виду расход времени на производство отдельных этапов работ в % 0/0 от времени одного цикла.

\*\* На комбинированном станке, для удобства подноски камня на стол, устроен наклонный рольганг.

Расход электрической энергии на станочную обработку 1 м<sup>2</sup> туфа  
в квт часах

Таблица 6

| Способ обработки                                                               | Комбини-<br>рованный<br>станок | Двухдис-<br>ковый<br>станок | Продольно-<br>фрезерный<br>станок |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| Обработка ведется дисками                                                      | 0,442                          | 1,95                        | —                                 |
| Обработка ведется фрезой                                                       | 0,71                           | —                           | 1,9/2,14*                         |
| Обработка ведется дисками и фрезой последовательно (с учетом площади постелей) | 0,472                          | —                           | —                                 |

Данные, приведенные в таблицах 3—6, говорят о нижеследующем:

1. Мощность, потребляемая комбинированным станком Карагезяна при дисковой распиловке туфа, в 2,5—3 раза меньше, чем при выполнении той же работы на двухдисковом станке Коваленко (табл. 3);

2. приведенная мощность, потребляемая комбинированным станком при фрезеровании, почти в 2 раза меньше, чем при выполнении той же работы на продольно-фрезерном станке з-да им. Дзержинского (табл. 3.);

3. расход электрической энергии на обработку 1 м<sup>2</sup> поверхности туфа на комбинированном станке (с учетом площади обработанных постелей) почти в 4 раза меньше, чем на двухдисковом или на продольно-фрезерном станке (табл. 6);

4. производительность комбинированного станка при параллельной работе дисков и фрезы, с учетом площади обработанных постелей, более чем в 4 раза выше производительности двухдискового станка и почти в 17 раз выше производительности продольно-фрезерного станка (табл. 5).

## В ы в о д ы

Произведенные исследования позволяют сделать следующие предварительные выводы:

1. Характерной особенностью станка Карагезяна является комбинированный способ обработки камня. На станке впервые весьма успешно применен в производственных масштабах принцип торцевого фрезерования. В станке осуществлена оригинальная конструкция многоступенчатой, многорезцовой торцевой фрезы, имеющей превышение зубьев по торцу и по диаметру. Такая фреза дает

\* В числителе дан расход электроэнергии при работе станка на 1-ой скорости (30 об/мин.), в знаменателе на 2-ой (50 об/мин.)



возможность снимать с одного прохода припуск до 60 мм при ширине фрезерования 350 мм. Как с точки зрения потребляемой мощности, так и износа инструмента, ввиду имеющего место свободного резания, торцевое фрезерование при обработке лицевой стороны камня является более выгодным по сравнению с дисковой распиловкой.

К сказанному следует также добавить, что качество обработки камня при фрезеровании получается значительно выше, чем при распиловке.

Конструктором станка сравнительно успешно решен также вопрос сохранения кромок.

Обрабатываемый камень устанавливается примерно по центру фрезы и рабочий ход направлен от центра на выход. Таким образом сначала входит в работу ступень меньшего диаметра с минимальным превышением резцов по торцу. Последующие ступени возрастают по диаметру, по числу резцов и по превышению по торцу. Последняя ступень имеет наибольшее число резцов при меньшей подаче на зуб и меньшей глубине резания.

В итоге последняя, т. е. чистовая ступень, по сравнению с черновыми, работает в значительно лучших условиях.

Для сравнения приведем режимы резания первой и последней ступеней.

| Режимы резания.  | 1-ая ступень. | 4-ая ступень. |
|------------------|---------------|---------------|
| Скорость резания | 120 м/мин.    | 134 м/мин.    |
| Подача на 1 зуб  | 2,2 мм/зуб.   | 0,275 мм/зуб. |
| Глубина резания  | 20 мм         | 7 мм          |

Таким образом как принцип обработки—торцевое фрезерование, так и конструкцию фрезы следует одобрить и рекомендовать для применения.

В 1947 г. при составлении исходных данных и изготовления на заводе им. Дзержинского продольно-фрезерного станка для обработки камня, Институт Строматериалов и Сооружений, базируясь на опыте комбинированного станка, рекомендовал принцип обработки камня многоступенчатой торцевой фрезой.

Второй особенностью станка является применение пневматического зажима камня. Преимущество пневматического зажима камня заключается в том, что после установки зажим и открепление осуществляются весьма быстро и надежно, занимая лишь 2—3 сек. времени, что существенно отражается на производительность станка в сторону ее повышения.

Не без пользы в станке применен сжатый воздух для осуществления пневматического обратного хода стола.



Существенным недостатком этого способа является необходимость в наличии специальной компрессорной установки, выход из строя которой вызывает простой машины. Станок страдает некоторой громоздкостью и неудачной кинематикой в части синхронности работы оборотов дисков и фрезы. К недостаткам станка следует также отнести частые поломки зубьев шестерен, что объясняется малыми модулями и некачественностью материалов, из которых они изготовлены.

2. Двухдисковый Станок Коваленко почти целиком изготовлен из стали, в результате чего в процессе работы имеет место значительная вибрация станка. При изготовлении станины следует отдавать предпочтение чугуну, учитывая его высокие амортизирующие качества. Общая жесткость системы станок—инструмент—изделие крайне недостаточная.

Крепление камня на станке осуществляется одноигльчатым зажимом. В процессе резания возникают значительные усилия. Мы обратим внимание на действие горизонтальных составляющих этих усилий, направленных перпендикулярно к оси игльчатого зажима, против движения стола.

Так как эти усилия лежат в плоскости дисков, а последние отстоят на величину 150—200 мм от оси игльчатого зажима, то естественно они создают вращающий момент, стремящийся повернуть камень вокруг вертикальной оси, причем во время работы двух дисков результирующий момент меньше, чем при работе одним диском, ибо в первом случае мы имеем два противоположно направленных момента, создаваемых усилиями резания каждого диска самостоятельно: малейший поворот камня вокруг оси зажима вызывает защемление диска, что приводит к трению боковой поверхности диска о камень, а следовательно и резкому повышению потребляемой мощности.

Недостаточно жесткое крепление камня также отрицательно влияет на качество обработанной поверхности. Из изложенного явствует, что конструкция зажимного приспособления не отвечает предъявляемым требованиям и поэтому не может быть рекомендована для дальнейшего применения.

Подача стола осуществляется фрикционным механизмом, обеспечивающим лишь прерывистую подачу рывками. Величина подачи на зуб в связи с неравномерной подачей стола резко меняется во времени и, таким образом, создаются совершенно неравные условия резания для отдельных зубьев одного и того же диска. Во время производства замера потребляемой мощности стрелки электроизмерительных приборов колебались в диапазоне 50—70% от номинальной мощности.

Эти колебания в большей степени объясняются неравномерностью подачи стола. Наконец, в замере 19 [5] двигатель остановился.

Остановка произошла согласно показаниям приборов после по-



требления э/двигателем мощности, превышающей 40 квт. Это обстоятельство так же объясняется неравномерностью подачи стола, вызывающей заклинивание режущих зубьев в тело распиливаемого блока в момент, когда толщина стружки приближается или равна максимуму.

К сказанному следует добавить и то обстоятельство, что указанный способ подачи камня создает дополнительную динамическую нагрузку на режущие пластинки, чем частично объясняются имеющие место поломки пластинок твердого сплава. Таким образом принятая конструкция механизма подачи стола не отвечает предъявляемым требованиям и поэтому не может быть рекомендована. Подача должна осуществляться механизмом, обеспечивающим равномерную скорость стола, причем желательно наличие 2—3 ступеней.

Станок при распиловке туфа потребляет мощность в 2,5—3 раза больше, чем комбинированный станок при выполнении той же работы.

Базируясь на вышеизложенном, такую большую разницу следует объяснить тем, что на двухдисковом станке расходуется дополнительная мощность на трение дисков о камень и на преодоление сил сопротивления, возникающих в результате неравномерной скорости подачи стола.

Одним из наиболее существенных факторов, повышающих потребляемую станком мощность, является высокая (660 м/мин.) скорость резания.

3. Продольно-фрезерный станок. Изготовлен станкоинструментальным заводом им. Дзержинского по проектному заданию Института Сооружений.

При составлении проектного задания в основу был положен принцип обработки камня многоступенчатой торцевой фрезой, впервые примененной для этой цели Карагезяном. Конструкция фрезы для нового станка была разработана кандидатом технических наук лауреатом Сталинской премии К. П. Стаевым.

Инструментальное изучение станка в работе показало, что хотя он, по сравнению с фрезерной частью комбинированного станка несколько улучшен, конструктивно все же отличается наличием ряда серьезных недостатков, резко снижающих производительность и качество обработки камня. К числу недостатков станка следует в первую очередь отнести:

- а) отсутствие ускоренного обратного хода стола,
- б) отсутствие приспособления для быстрого и надежного крепления камня,
- в) неудачная конструкция торцевой фрезы и
- г) недостаточная мощность и жесткость станка.

Из табл. 4 пункты 7, 9 и 10 видно, что обратный ход, крепление и открепление камня занимают много времени, резко понижая

производительность станка и, поэтому, узлы станка, выполняющие эти операции, должны быть пересмотрены.

Недостатки в конструкции торцевой фрезы:

а) Устройство для крепления съемных резцов занимает много места и поэтому число резцов, помещающихся на корпусе головки очень мало: следовательно удельная работа, приходящаяся на долю каждого резца, велика.

б) число зубьев в чистовой ступени (4 шт.) очень мало; поэтому при сравнительно большой подаче (табл. 2) получается недостаточно качественная поверхность камня.

в) Выход из строя одного чистового резца сильно ухудшает фрезерованную поверхность, так как при этом подача на зуб достигает недопустимой величины 5,8 мм. В этих случаях необходимо производить дополнительную зачищающую проходку, что резко снижает производительность станка.

г) Конструкция клинового зажима не обеспечивает достаточно жесткого крепления резцов, в результате чего в процессе работы станка зачастую наблюдается отход резцов вдоль своей оси, что приводит к результатам, указанным в предыдущем пункте.

Учитывая изложенное, следует либо улучшить конструкцию фрезерной головки станка внесением изменений, исключающих указанные недостатки, либо перейти на изготовление фрезерных головок, конструктивно не отличающихся от фрезы Карагезяна.

Институт Строительных  
Материалов и Сооружений  
Академии Наук Армянской ССР.

Поступило 4 VI 1948.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Мамуровский—Основные задачи реконструкции промышленности облицовочного камня. Материалы к VII Сессии Акад. Архит. СССР. Москва, 1946.
2. НИС Главтоннель метрострой—сб. статей № 1, Москва, 1947.
3. С. М. Зильберглим—Механизация добычи и обработки естественных нерудно-стенных материалов, ракушечника и мергелей. Доклад на Респ. Совещ. раб. МПСМ УССР.
4. Технические отчеты по теме „Механическая обработка строительных камней“ Институт Стройматериалов и Сооружений АН Арм. ССР, 1947—48.
5. „Механическая обработка известняка-ракушечника“. Гипрооргстрой Наркомстрой. Москва, 1945.



Ա. Ա. Ակոպով

# ՀԱՅԿԱԿԱՆ ՍՍՌ-ՈՒՄ ԳՈՐԾՈՂ ՏՈՒՖ ԿՏՐՈՂ ԴԱԶԳԱՆՆԵՐԻ ԳՈՐԾԻՔԱՅԻՆ ՀԵՏԱԶՈՏՈՒԹՅՈՒՆԸ

Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Աշխատանքում տրված են Հայկական ՍՍՌ-ում դորժող տուֆ կտրող զազգահների գործիքային հետադրություն արդյունքները Ցույց են տրված այդ զազգահների առավելություններն ու բացասական կողմերը և քար կտրող զազգահների կենսամտիկայի ու գինամիկայի գիտական մշակման առաջնակարգ ուղիները:

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

Г. А. Арзуманян

Устранение искрообразования в деформометрах,  
включаемых в цепь электрического тока.

Сигнализирующим звеном в тензометрах, клинометрах и сдвигомерх системы проф. Аистова, а так же в экстензометрах Henning (Олсен) служит большей частью электрический звонок или лампочка накаливания. Вследствие замыкания и размыкания цепи прерывателем звонка возникают экстротоки, которые вызывают сильное искрообразование между контактами включенного прибора. Искрение наблюдается также и при включении лампочки накаливания. Под микроскопом можно наблюдать, как при искрообразовании происходит разрушение металла на конце микрометрического винта, служащего одним из контактов, а также и на другом контакте, прикрепленном к перу. Частицы образующейся окалины покрывают контакт, увеличивая искрообразование и ухудшая прохождение тока. Такое же искрообразование имеет место на контактах прерывателя самого звонка. Это также создает плохое прохождение тока, вследствие чего не всегда в момент замыкания цепи прибором получается сигнал. В результате, если при включении мы имеем одно показание на лимбе прибора, то при повторном включении при одном и том же положении пера получаем другое показание, отличающееся от первого на величину, не соответствующую конструктивной точности и чувствительности прибора.

Отказавшись от такого грубого сигнализирующего приспособления, каким является электрический звонок, нам удалось довольно простым способом достигнуть полного устранения искрообразования между контактами прибора.

1. Берутся батарея элементов 4—6 вольт и гальванометр или вольтметр постоянного тока. Включение производится по схеме 1.

Момент замыкания фиксируется отклонением стрелки гальванометра.

2. Если включение производится в сеть переменного тока, то следует это сделать как показано на схеме 2.

Здесь в сеть включается первичная обмотка понижающего трансформатора, имеющего на концах вторичной обмотки 6—12 вольт. При отсутствии вольтметра переменного тока, можно включить вы-



сокоомный телефон (пунктир). При замыкании цепи в телефоне достаточно громко и отчетливо слышен фон переменного тока.

3. Если имеется только вольтметр постоянного тока, то для его включения, при переменном токе, к предыдущей схеме нужно добавить соответствующий купроксовый выпрямитель (Схема 3).

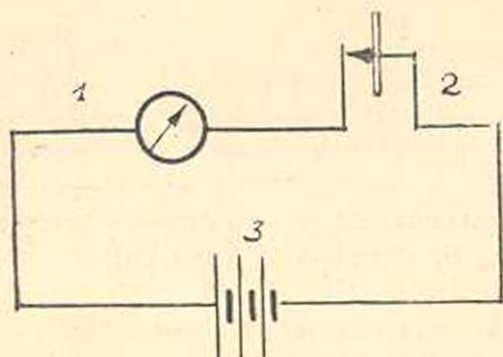


Схема 1

1. Гальванометр. 2. Прибор 3. Батарея

этом отсчеты совершенно не отличились друг от друга. Для замыкания или размыкания было достаточно самое незначительное вращение диска в том или ином направлении, измеряемом долями одного

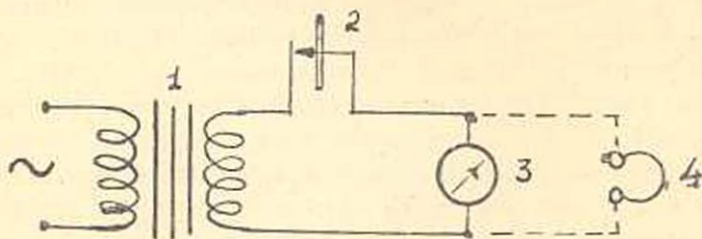


Схема 2

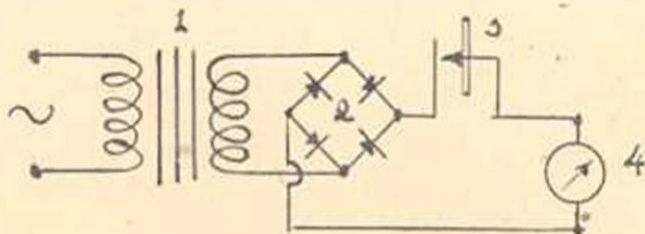
1. Трансформатор. 2. Прибор. 3. Вольтметр. 4. Телефон.

деления лимба. Искрение между контактами не наблюдалось даже вооруженным глазом.

Следует отметить, что точное определение силы тока, при которой не наблюдается искрообразование, связано с установлением действительной площади соприкосновения конца микрометрического винта с плоскостью контакта пера. Экспериментально установлено, что эта сила тока не должна превышать 25—30 миллиампер, что и соответствует предложенным сигнализирующим приспособлениям.

Многие исследователи и экспериментаторы из-за неточности отсчетов, вызванной искрением, не пользовались прибором проф.

Аистова, отдавая предпочтение прибору Гугенбергера, между тем как прибор системы Аистова имеет ряд преимуществ перед прибором Гугенбергера, заключающихся в большой простоте установки прибора на испытываемом объекте и в меньших количествах шарнирных сочленений, подвергающихся износу в процессе эксплуата-



Охема 3

1. Трансформатор. 2. Купроксовые элементы. 3. Прибор.  
4. Вольтметр постоянного тока.

ции. Единственный же недостаток прибора Аистова, заключающийся в искрообразовании в точке соприкосновения контактов, устраняется при указанных нами выше способах включения. Этим отечественный прибор Аистова получает определенные преимущества перед прибором Гугенбергера.

Институт строительных материалов и сооружений  
Академии Наук Армянской ССР

Поступило 5 VI 1948.

#### ЛИТЕРАТУРА

Н. Н. Аистов—Испытание статической нагрузкой строительных конструкций—1938 г.

Գ. Ս. Արզումանյան

### ԿԱՅԾԻ ՎԵՐԱՑՈՒՄԸ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ՀՈՍԱՆՔԻ ՇՂԹԱՅԻ ՀԵՏ ՄԻԱՑՎՈՂ ԴԵՖՈՐՄՈՄԵՏՐՆԵՐՈՒՄ Ա Մ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Դեֆորմացիաներ չափող որոշ գործիքներում (Ախտովի և ուրիշ սխեմաների), որոնք միացվում են էլեկտրական հոսանքի հետ, որպես ազդանշան ծառայում են էլեկտրական զանգը կամ էլեկտրոշամպը, որոնց օգտագործման դեպքում գործիքի կոնտակտների միջև առաջանում է կայծ. վերջինս ազդում է գործիքի չափումների ճշտության վրա:

Վերջինս կամ հեռախոսի օգտագործումով մեզ հաջողվել է վերացնել կայծի առաջացումը նշված դեֆորմոմետրներում ու այդպիսով պահպանել գործիքի ճշտությունը:

Մշտական հոսանքի աղբյուր ունենալու դեպքում միացումներն արվում են ըստ № 1 սքեմայի, փոփոխական հոսանքի դեպքում՝ ըստ № 2 և № 3 սքեմաների: