

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

А. А. АРАКЕЛЯН

О ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТИ ПОРИСТОГО КАМНЯ  
 ОТ СТРУКТУРЫ ЕГО ПОР

Прочность, водопроницаемость (фильтрация), морозостойкость, теплопроводность, звукопроводность пористых материалов находятся в определенной зависимости от их структуры.

В этой статье делается попытка установить зависимость прочности некоторых естественных пористых камней (туф, пемза и т. д.), являющихся заполнителями для легких бетонов и растворов от структуры их пор.

Для решения этой задачи автор использовал метод введения жидкого вещества в пористую среду, в частности метод введения воды в поры материалов подсосом.

Истечение жидкости по капилляру описывается формулой [1]:

$$dV = \frac{\pi r^4 p}{8 \cdot \eta \cdot h} dt, \quad (1)$$

где  $dV$  — элементарный объем протекаемой воды в  $см^3$  за время  $dt$ ;

$r$  — радиус капилляра ( $см$ );

$h$  — часть капилляра, заполненная водой ( $см$ );

$p$  — давление в капилляре ( $дин/см^2$ );

$\eta$  — вязкость воды ( $0,01$   $г/см \cdot сек$ ).

В силу (1) предполагая, что сечение пор круглое ( $dV = \pi r^2 dh$ ) после интегрирования получается:

$$h = k \sqrt{t}, \quad (2)$$

где

$$k = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{p}{\eta}}$$

Из формулы (2) видно, что перемещение воды по капилляру, как функция квадратного корня времени, выражается прямой линией, проходящей через начало координат с угловым коэффициентом  $k$ .

Давление в капилляре [1]  $p = \frac{2\sigma}{r}$  ( $\sigma$  — поверхностное натяжение жидкости) можно принять равной  $73$   $дин/см$ .

Для значения углового коэффициента  $k$  при  $p = \frac{2\sigma}{r}$ ;  $\sigma = 73$  и  $\eta = 0,01$  получим:

$$k = \sqrt{\frac{r \sigma}{2 \cdot \eta}} \approx 60.4 \sqrt{r}. \quad (3)$$

откуда

$$r = \frac{k^2}{3650}$$

Как видно из выражения (3) угловой коэффициент  $k$  формулы (2) зависит лишь от величины радиуса капилляра.

Если, противоположный движению воды, конец капилляра закрыть, то воздух находящийся в капилляре при перемещении воды, постепенно будет сжиматься, вследствие чего создастся противодавление капиллярной силы.

Значение капиллярной силы  $p$  в этом случае будет иметь следующий вид:

$$p = \frac{2\sigma}{r} - \Delta p = \frac{2\sigma}{r} - \frac{p_0 h}{l - h}, \quad (3a)$$

где  $p_0$  — атмосферное давление, равное  $1033 \times g$  дин/см<sup>2</sup>;

$\Delta p$  — избыточное давление газовой фазы в капиллярах в дин/см<sup>2</sup>;

$l$  — полная длина капилляра.

Анализ (2) и (3a) показывает, что для случая закрытого торца капилляра движение воды по капилляру будет происходить не по прямолинейному, а по криволинейному закону.

При вертикальном расположении капилляра и при движении воды вверх, капиллярная сила будет претерпевать некоторое противодавление равное весу столбика воды.

В связи с тем, что капилляры имеют весьма малый радиус и, что высота подъема воды в рассматриваемом случае будет также мала (10—12 см), противодавление от веса воды по сравнению с капиллярным давлением  $\frac{2\sigma}{r}$  будет пренебрежительно мало.

Нами были проведены опыты над пористыми вулканическими камнями (туфы ереванского и арктикского типа, литондная пемза), строение которых представляет собой сложную систему, состоящую из многочисленных капилляров различного радиуса, расположенным по всевозможным направлениям.

При соприкосновении следуемых нами пористых камней с водой в их капиллярах возникают силы, заставляющие воду двигаться по капиллярам.

Опытные данные, приведенные на рис. 1, показывают, что подъем воды по капиллярам туфов ереванского и арктикского типа выражается прямой линией и полностью описывается формулой (2).

Из того же рисунка видно, что движение воды по капиллярам литондной пемзы происходит по криволинейному закону. Это соответствует случаю, когда движение воды происходит по капиллярам с закрытыми торцами, приводящим к созданию избыточного давления воздуха в капиллярах.

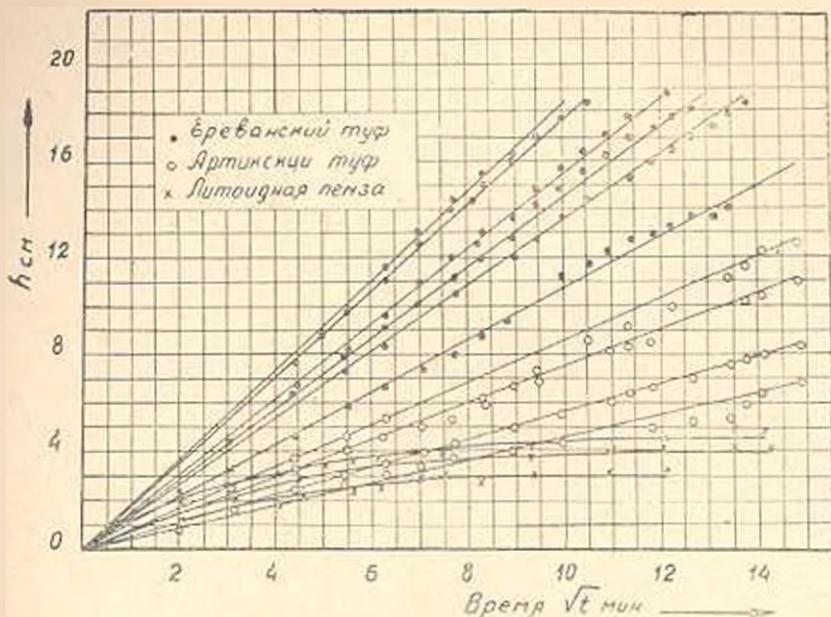


Рис. 1. Высота подъема воды ( $h$ ) по капиллярам пористых камней при одностороннем подсосе в атмосферной среде в зависимости от  $\sqrt{t}$ .

Опыты показали, что если из капилляров литоидной пемзы снять газовую фазу, т. е. если подсос литоидной пемзы осуществить в вакууме, подъем воды произойдет по прямолинейному закону, показанному на рис. 2.

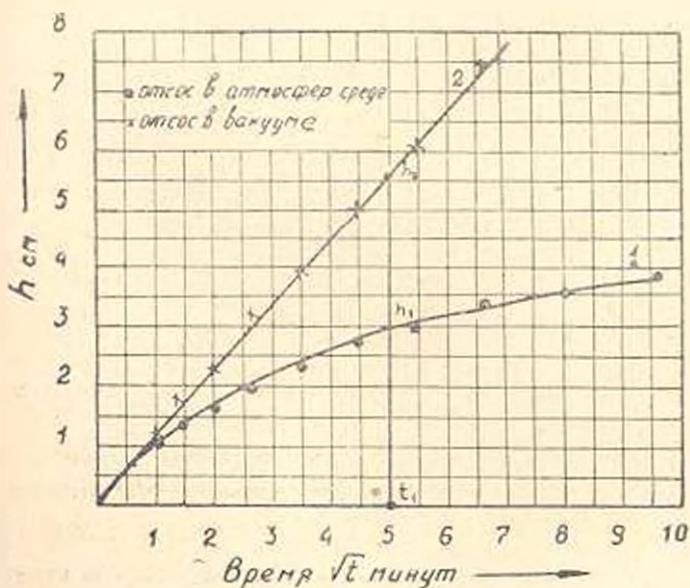


Рис. 2. Высота подъема воды ( $h$ ) по капиллярам литоидной пемзы при одностороннем подсосе в атмосферной среде и вакууме и зависимости от  $\sqrt{t}$ .

Из рис. 2 видно, что прямая линия, полученная для подъема воды по капиллярам литоидной пемзы в вакууме является касательной

в точке  $t = 0$  к кривой-линии, соответствующей подъему воды в атмосферной среде.

Далее исследовалось движение воды по капиллярам туфов ереванского, арктического и фельзитового типа при атмосферном давлении и в вакууме. Результаты этих опытов приведены на рис. 3. Из фигу-

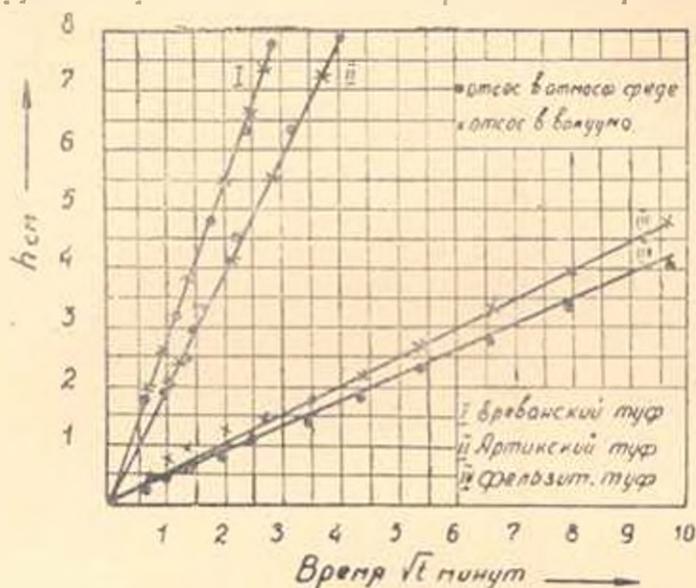


Рис. 3. Высота подъема воды ( $h$ ) по капиллярам пористых камней при одностороннем подсосе в атмосферной среде и вакууме в зависимости от  $\sqrt{t}$ .

ры видно, что если характер движения воды по капиллярам в атмосферной среде получается линейным, то тот же закон с тем же угловым коэффициентом остается справедливым и для движения воды в вакууме. Для фельзитового туфа угловой коэффициент линии отсоса в вакууме получается несколько больше, чем при отсосе в атмосферной среде. Надо полагать, что являясь сравнительно малой величины капилляров фельзитового туфа, создается некоторое сопротивление воздуха при движении воды по капиллярам (сила трения воздуха по стенкам капилляра).

На основании произведенных опытов можно прийти к следующим выводам:

1. Движение воды по капиллярам пористого камня можно рассматривать как движение воды в одном средне-эффективном капилляре с приведенным радиусом  $r$ . Средне-эффективный капилляр, с приведенным радиусом  $r$ , может служить характеристикой структуры материала.

2. Движение воды по капиллярам пористого камня (при одностороннем подсосе) как функция от квадратного корня времени будет выпрямиться прямой линией, если в капиллярах будет отсутствовать избыточное давление газовой фазы (воздуха).

3. Отсутствие избыточного давления газовой фазы в капиллярах обуславливается отсутствием воздуха в капиллярах (подсос пористого камня в вакууме) или расположением капилляров в камне со значительно меньшей извилистостью (туфы среванского, арктикского, фельзитового типа и т. д.).

4. В пористых камнях с неравномерной структурой и большей извилистостью капилляров, характер подъема воды в атмосферной среде будет криволинейным (литоидная пемза). Касательная в начале координат этой кривой будет характеризовать движение воды при отсутствии в капиллярах избыточного давления воздуха, т. е. в случае подсоса воды в вакууме (рис. 2).

5. Угловой коэффициент  $k$  касательный в начале координат к кривой линии подсоса воды, зависит лишь только от величины приведенного радиуса  $r$  средне эффективного капилляра пористого камня. Средне-эффективный, приведенный радиус  $r$  определяется формулой (2).

Коэффициент  $k$  условно назван нами [2] коэффициентом скорости капиллярной всасываемости.

Переходим к вопросу установления связи между прочностью пористого камня и его структурой. Вполне логично, что прочность пористого материала будет зависеть от его структуры, т. е. от степени и характера его пористости [2, 3]. Степень пористости материала ( $n$ ) обычно устанавливается достаточно точно по удельному и объемному весам, а характер пористости можно выразить коэффициентом скорости капиллярной всасываемости  $k$ .

При постоянном удельном весе, пористость, как фактор влияющий на прочность материала, можно заменить обратной величиной его объемного веса.

Проведенные нами предварительные опыты показали, что при постоянном удельном весе прочность пористого материала  $R$  в зависимости от объемного веса  $\gamma$  и коэффициента  $k$  можно выразить формулой:

$$R = A \frac{\gamma}{k} + B, \quad (4)$$

где  $R$  — предел прочности материала при сжатии;

$\gamma$  — объемный вес материала;

$k$  — коэффициент скорости капиллярной всасываемости по направлению испытания камня на сжатие;

$A$  и  $B$  — опытные коэффициенты, характеризующие породу камня.

Для определения коэффициента скорости капиллярной всасываемости ( $k$ ) нами [2] была принята следующая методика. Сухой камень приводится в соприкосновение с поверхностью воды. Обеспечив постоянство соприкосновения камня с водой, измеряется средняя высота  $h$  подъема воды по камню через каждый определенный проме-

жуток времени  $t$ . Зная  $h$  и  $t$  по формуле (2) определяется величина коэффициента  $k$ .

Опыт показал, что не только естественные, но и искусственные камни (из бетона раствора и цемента) обладают неоднородной структурой, выражающейся в том, что вода по капиллярам поднимается неравномерно. Неоднородность структуры камня вынудила нас прибегнуть к определению среднего коэффициента  $k$  для каждого образца и определение произвести не визуально, а взвешиванием количества отсосанной воды. С этой целью боковые поверхности исследуемого образца цилиндрической формы изолировались водонепроницаемым материалом — резиной. Далее образец, после предварительного взвешивания, погружался в воду. Вода проникала в образец по двум не изолированным торцам. Через короткий промежуток времени образец извешивался и устанавливалось количество воды поглощенной образцом. Проведенные нами опыты [4] показали, что при таком способе подсоса интенсивность водопоглощаемости образца, как функция от квадратного корня времени получается криволинейной. Вполне понятно, что вода, проникающая в капилляры с торцов, защемляет воздух и создает в капиллярах избыточное противодавление. Опыты показывают [4], что если поглощение воды образцов с изолированными боковыми поверхностями произвести в вакууме, движение воды происходит по прямой линии, которая в начале координат будет касательной к кривой интенсивности водопоглощаемости. Угловой коэффициент касательной будет соответствовать удвоенной величине коэффициента скорости капиллярной всасываемости  $k$ .

Для получения данных соответствующих угловому коэффициенту касательной, необходимо измерение водопоглощаемости образца произвести в самом начале  $\Delta t$  времени, при котором ординаты водопоглощаемости будут ближе к началу координат.

Длину средне-эффективного приведенного капилляра, заполненного водой ( $h$ ) можно определить по следующей формуле.

$$h = \frac{\Delta q}{2F \cdot n} \quad (5)$$

где  $\Delta q$  — начальное количество воды в  $см^3$  поглощенной образцом за время  $\Delta t$  в минутах;

$n$  — степень пустотности образца;

$2F$  — площадь торцов образца, соприкасающихся с водой в  $см^2$ .

При известных  $h$  и  $\Delta t$  (в минутах) по (2) можно вычислить коэффициент  $k$ , который будет средней величиной, характеризующей структуру образца по направлению капилляров, параллельных направлению испытания образца на сжатие.

В таблице 1 приведены результаты опытов по водонасыщаемости образцов при их подсосе в вакууме. Эти данные подтверждают, что почти все поры образца насыщаются водой и формула (5) для определения  $h$  вполне приемлема.

Таблица 1

Степень водонасыщаемости образца при погружении на полную его высоту в вакууме и атмосферной среде

№ пп	Наименование образца	Объем, литр	Вес в г				Количество впитанной воды в г		Объем образца в см <sup>3</sup>	Пустотность	Суммарный объем пустотности в см <sup>3</sup>	Отношение количества впитанной воды к суммарному объему пустотности в %	
			сухой	насыщенный водой состоянием в		в атмосфере	в вакууме	в атмосфере				в вакууме	
				атмосфере	вакууме								атмосфере
1	Ереванский туф	1,45	950	1055	1099	205	249	592	0,43	252	92	99	
2	Арктический туф	1,10	654	913	993	259	339	395	0,57	339	85	100	
3	Литонидная пемза	1,37	522	942	1036	120	245	601	0,43	262	46	94	
4	"	1,31	771	—	1032	—	261	593	0,46	272	—	93	
5	Феялит	1,75	1051	1225	1210	173	159	505	0,32	190	91	99	
6	"	1,50	1063	1249	1265	166	182	595	0,31	185	30	100	

Как видно из данных таблицы 1, в атмосферной среде наименьшую степень водонасыщаемости имеет литонидная пемза, что полностью соответствует результатам опытов (рис. 2).

Для проверки формулы (4) и установления величин коэффициентов  $A$  и  $B$  для пористых камней, были испытаны 3 партии цилиндров из туфов ереванского и арктического типов и литонидной пемзы. Цилиндры, высотой и диаметром 7,5 см предварительно высушивались. После изоляции резиной боковых поверхностей определялась интенсивность их водопоглощаемости по описанной выше методике.

Степень пустотности цилиндров  $n$  определялась по объемному весу ( $\gamma$ ) и удельному весу  $G$  камня. Удельный вес оказался равным: для арктического туфа — 2,60; для ереванского — 2,55; и для литонидной пемзы — 2,40.

Значение  $h$  устанавливалось по (5) для двух первых точек  $\Delta q_1$  и  $\Delta q_2$  соответственно при времени поглощения для литонидной пемзы  $\Delta t_1 = 0,5$  и  $\Delta t_2 = 1$  мин; для туфов  $\Delta t_1 = 0,25$  и  $\Delta t_2 = 0,5$  мин.

При полученных величинах  $k_1$  и  $h_2$  и соответственно  $\Delta t_1$  и  $\Delta t_2$  по формуле (2) определялись коэффициенты  $k_1$  и  $k_2$ .

Для наших целей было принято средне-арифметическое значение  $k_1$  и  $k_2$ .

После установления степени пористости ( $n$ ) объемного веса ( $\gamma$ ) и коэффициента ( $k$ ), образцы были высушены и испытаны на сжатие для установления их прочности ( $R$ ). Значение величин  $n$ ,  $\gamma$ ,  $k$  и  $R$  для трех групп пористых камней приведены в табл. 2, 3 и 4.

Из данных табл. 2, 3 и 4 видно, что значение коэффициентов  $k$  колеблется для ереванского туфа от 0,65 до 1,85 (среднее 1,25) для арктического туфа от 0,55 до 1,75 (среднее 1,15) и для литонидной пемзы 0,07 до 0,22 (среднее 0,15).

Таблица

Значения предела прочности при сжатии ( $R$ ), объемного веса ( $\gamma$ ) и коэффициента скорости капиллярной впитываемости ( $k$ ) для ереванского туфа

№ обр.	Предел прочн. при сжатии $R$ в кг/см <sup>2</sup>	Объемный вес $\gamma$ в т/м <sup>3</sup>	Пустотность $\lambda = 1 - \frac{\gamma}{G}$	Коэффициент $k$ в см. мин <sup>-1</sup>	$\frac{\gamma}{k}$
1	145	1,50	0,41	1,53	0,99
2	325	1,79	0,30	0,66	2,72
3	56	1,32	0,48	1,95	0,72
4	90	1,51	0,40	1,57	0,99
6	121	1,47	0,42	1,46	1,00
6	59	1,52	0,41	2,15	0,70
7	130	1,64	0,35	1,75	0,94
8	135	1,47	0,42	1,59	0,94
9	380	1,85	0,28	0,62	3,00
10	350	1,80	0,30	0,57	3,15
11	375	1,96	0,27	0,64	2,90
12	433	1,83	0,29	0,56	3,25
13	110	1,51	0,41	1,65	0,92
14	69	1,40	0,45	1,80	0,79
15	96	1,46	0,43	1,74	0,84
16	224	1,62	0,36	1,03	1,56
17	232	1,65	0,35	1,16	1,42
18	229	1,64	0,35	1,04	1,59
19	450	1,80	0,30	0,47	3,95
20	410	1,84	0,29	0,65	2,95

\* Удельный вес  $G = 2,55$  г/см<sup>3</sup>

Таблица 3

Значения предела прочности при сжатии ( $R$ ), объемного веса ( $\gamma$ ) и коэффициента скорости капиллярной впитываемости ( $k$ ) для артекского туфа

№ обр.	Предел прочн. при сжатии $R$ в кг/см <sup>2</sup>	Объемный вес $\gamma$ в т/м <sup>3</sup>	Пустотность $\lambda = 1 - \frac{\gamma}{G}$	Коэффициент $k$ в см. мин <sup>-1</sup>	$\frac{\gamma}{k}$
1	96,5	1,48	0,43	0,93	1,60
2	76	1,24	0,52	0,76	1,61
3	75	1,54	0,41	1,0	1,54
4	146	1,43	0,45	0,55	2,62
5	92,5	1,55	0,40	1,25	1,24
6	60	1,22	0,53	1,50	0,82
7	63	1,33	0,49	1,15	1,16
8	36	1,00	0,61	1,76	0,57
9	23	0,93	0,64	1,65	0,56
10	122	1,15	0,44	0,63	2,30
11	96	1,29	0,50	0,75	1,72
12	97	1,44	0,45	1,00	1,44
13	105	1,56	0,40	1,40	1,42
14	82	1,55	0,40	1,10	1,10
15	72	1,21	0,53	1,25	0,97
16	79	1,35	0,48	0,80	1,68
17	335	1,00	0,61	1,75	0,57

\* Удельный вес  $G = 2,60$  г/см<sup>3</sup>

Таблица 4

Значения предела прочности при сжатии ( $R$ ), объемного веса ( $\gamma$ ) и коэффициента скорости капиллярной впитываемости ( $k$ ) для лантонной пемзы

№ обр.	Предел прочности при сжатии $R$ в кг/см <sup>2</sup>	Объемный вес $\gamma$ в г/см <sup>3</sup>	Пустотность $n = 1 - \frac{\gamma}{G}$	Коэффициент $k$ в см. мин <sup>-1/2</sup>	$\frac{\gamma}{k}$
1	270	1,35	0,44	0,069	19,5
2	208	1,51	0,25	0,130	14,0
3	230	1,35	0,44	0,104	12,9
4	121	1,40	0,42	0,163	8,6
5	96	1,21	0,49	0,144	9,6
6	234	1,29	0,46	0,075	17,2
7	171	1,19	0,51	0,116	10,2
8	140	1,27	0,47	0,084	15,0
9	82	1,21	0,50	0,217	5,6
10	213	1,55	0,36	0,091	17,0
11	90	1,10	0,54	0,175	6,3
12	124	1,40	0,42	0,200	7,0
13	209	1,51	0,37	0,100	15,0
14	172	1,28	0,47	0,135	9,5
15	67	1,11	0,54	0,160	7,0
16	170	1,11	0,42	0,160	8,8
17	145	1,39	0,42	0,210	6,8
18	232	1,61	0,33	0,110	14,8
19	119	0,99	0,59	0,105	9,4
20	164	1,25	0,48	0,090	12,9
21	215	1,50	0,38	0,135	11,0
22	180	1,35	0,43	0,150	9,2

\* Удельный вес  $G = 2,4$  г/см<sup>3</sup>.

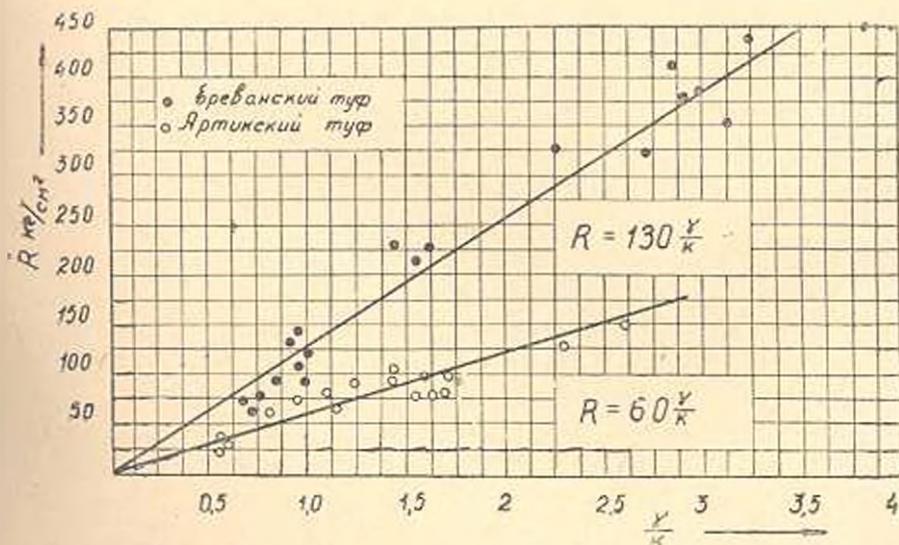


Рис. 4. Зависимость прочности туфа ( $R$ ) от его объемного веса ( $\gamma$ ) и коэффициента скорости капиллярной впитываемости ( $k$ ).

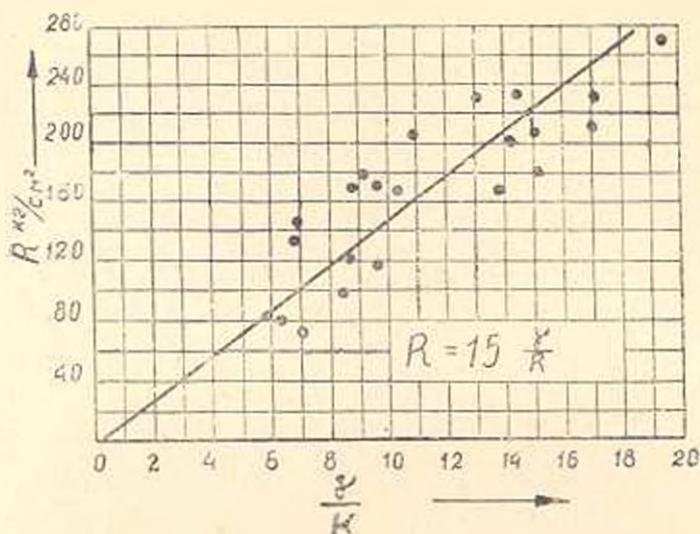


Рис. 5. Зависимость прочности литонной пемзы ( $R$ ) от объемного веса ( $\gamma$ ) и коэффициента скорости капиллярной всасываемости ( $k$ ).

На основании данных табл. 2, 3 и 4 построены графики зависимости  $\left( R_1 \frac{\gamma}{k} \right)$  для туфов и литонной пемзы, показанные на рис. 4 и 5.

Из рис. 4 и 5 видно, что опытные точки довольно близко расположены к прямой, проходящей через начало координат. При этом опытный коэффициент в формуле (1)  $B \approx 0$ , а опытный коэффициент  $A = 130$  для ереванского туфа,  $A = 60$  для арктического туфа и  $A = 15$  для литонной пемзы.

Нами было установлено, что коэффициент корреляции для зависимости  $\left( R_1 \frac{\gamma}{k} \right)$  близок к единице (равен 0,92 – 0,96), что подтверждает существование прямолинейной зависимости между  $R$  и  $\frac{\gamma}{k}$  [5].

Предварительные опыты показали, что подобная зависимость справедлива и для пористых искусственных камней из бетона и раствора.

Հ. Ա. ԱՄԷՔԻՂՅԱՆ.

ՈՒՆԿՈՏԿՆԵՐ ԲՈՒՐՆԻ ԱՐՐՈՒԹՅԱՆ ԵՎ ՆՐԱ ԵՄԿՈՏԻՆԵՐԻ ՍՏՐՈՒԿՏՈՒՐԱՅԻ ՄԻՋԻՆԷՆՆԵՐԻ ԵՂՈՑ ԿԱԳԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Հողվածում բերված են Հայկական ՄՄԻ Դիտու թյունների ակադեմիայի նիւնանյութերի և կառուցվածքների ինստիտուտում կատարված Լքայերիմեն-ապ աշխատանքների արդյունքները՝ ծակոտկեն քարի ամրության և նրա ծակոտկենների սարակտուրայի միջև եղած կապի որոշման վերաբերյալ:

Փորձնական առյալների հիման վրա զույգ և արված, որ ծակոտկեն քարի սարակտուրան կարելի է բնորոշել ոչ միայն ծակոտկենության աստիճանով (կամ հաստատուն տեսակարար քաշի ղեկքում նրա ծախսային քաշով  $\gamma$ ), այլև քարի կապիլյար ձմողականության արագության գործակցով ( $k$ ):

Քարի կապիլյարներիով ձմող ջրի սյուն բարձրությունը որպես մամու-նակի ֆունկցիա հանած քառակուսի արժատով ստացվում է բոլոր ղեկքերում ուղիղ զծի օրենքով, եթև ողի ներկայությունը կապիլյարներում հակա-ճնշում չի առաջացնում, կամ այդ կապիլյարների միջից լուսակալում է (ձմումը կատարվում է անող միջավայրում):

Կապիլյար ձմողականության արագության գործակցը կլինի այդ ուղիղ զծի անկյան տանկերը:

Քարի սեղման մամանակավոր ղիմադրությունը եթև արտահայտելու լի-նենք ծախսային քաշի ( $\gamma$ ) (հաստատուն տեսակարար քաշի ղեկքում) և կա-պիլյար ձմողականության արագության գործակցի ( $k$ ) միջոցով, ապա, ինչ-պես ցույց են տալիս փորձերը, կարելի է գրել հետևյալ բանաճեր՝

$$R = A \frac{1}{k} + B.$$

որտեղ՝  $R$  — քարի սեղման մամանակավոր ղիմադրությունն է կգ./սմ.<sup>2</sup>-ով.

$\gamma$  — քարի ծախսային քաշն է գր. սմ.<sup>3</sup>-ով.

$k$  — կապիլյար ձմողականության արագության գործակցն է և հա-վասար է՝  $\frac{h}{l}$  (սմ բույն <sup>2</sup>),

$h$  — ձմված ջրի սյուն բարձրությունն է սմ-ով,  $l$  — մամանակը բույն-ներով:

$A$  — և  $B$  — հաստատուն գործակցներ են, որոնք ընտրվում են քարի էությունը և ստացվում են փորձնական ճանապարհով:

Ատորև բերված են  $A$  և  $B$  գործակցների թվային արժևքները մի քա-նի քարերի համար՝

- տեղական տուֆի համար (Երևանի) — 130
- Արթիկ տուֆի համար . . . . . — 60
- լիտուիդային պեմզայի համար . . . . . — 15

վերը նշված քարերի համար  $B$  գործակցը հավասար է գերուլի Վերև բեր-ված քանաճեր ճիշտ է՝ (ինչպես ցույց են տվել նախնական փորձերը) նաև արևատական բևառնից և շագաթից պատրաստված ծակոտկեն քարերի համար:

Իկը հանգամանքը տնի մեճ գործնական և տեսնական նշանակություն, բևառնի վերաբերյալ եղած պիտությունը պարզացնելու տեսակետից:

## Л И Т Е Р А Т У Р А

1. *Липатис С. И.* Физико-химия коллоидов., М., 1948.
2. *Аракелян А. А. и Инджикян Е. А.* Определение прочности пористого камня по скорости капиллярной впитываемости. „Известия АН АрмССР“, в. II, № 6, 1949.
3. *Ацагорцян Э. А.* Корреляционная связь прочности пористого материала со степенью и характером его пористости. „ДАН АрмССР“, т. XVI, № 5, 1953.
4. *Аракелян А. А.* Водонепроницаемость легкого бетона, отчет (АИСМ), 1954 г.
5. *Романовский В. И.* Применение математической статистики в опытной деле. М.—Л., 1917.