

С. С. С. Р. — Н. К. П. С.

ЦЕНТРАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШОССЕЙНЫХ И ГРУНТОВЫХ ДОРОГ  
И АВТОМОБИЛЬНОГО ТРАНСПОРТА  
**(ЦУДОРГРАНС)**

ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ДОРОЖНОЕ БЮРО

---

ЛАБОРАТОРИЯ

В. В. ОХОТИН

ЛАБОРАТОРНЫЕ ОПЫТЫ  
ПО СОСТАВЛЕНИЮ  
ДОРОЖНЫХ ГРУНТОВЫХ СМЕСЕЙ  
ПО ПРИНЦИПУ  
НАИМЕНЬШЕЙ ПОРИСТОСТИ

ТРАНСПЕЧАТЬ — НКПС  
МОСКВА — 1929

## Зависимость сопротивления грунтов раздавливанию и вдавливанию от пористости.

Работами Лаборатории Исследовательского Дорожного Бюро выяснено, что сопротивление грунта образованию деформаций зависит: 1) от содержания в нем глинистых частиц ( $< 0,005 \text{ мм}$ ), являющихся цементирующим веществом, и 2) от механического состава скелетной части. Второй фактор имеет особенно важное значение, так как увеличивает устойчивость грунта как в сухом, так и во влажном состоянии; глина же, будучи твердой в сухом состоянии, в сырое время от воды размокает, делается липкой и легко деформируется.

Насколько сильно можно изменить прочность грунта, варьируя механический состав скелета, видно из опытов на раздавливание кубиков<sup>1)</sup>. Так, кубик, приготовленный из 80% крупного песка (фракция 2—1  $\text{мм}$ ) и 20% Глуховского каолина, — одной из самых тяжелых глин, дает сопротивление раздавливанию 23  $\text{кг}$ ; такой же кубик, но в котором половина крупного песка заменена пылью (фракция 0,05—0,01  $\text{мм}$ ), т. е. кубик, состоящий из 40% фр. 2—1  $\text{мм}$ , 40% фр. 0,05—0,01 и 20% Глуховского каолина, потребовал для своего раздавливания 125  $\text{кг}$ .<sup>2)</sup> Таким образом, сопротивление раздавливанию увеличилось более, чем в пять раз.

Также существенно меняется и сопротивление грунта вдавливанию при изменении механического состава скелета. Смесь из 90% крупного песка (фр. 2—1) и 10% Глуховского каолина дала максимальное сопротивление вдавливанию штампа в 1  $\text{кв. см}$  на глубину 2,5  $\text{мм}$ , 10,8  $\text{кг}$  смесь же, в которой половина крупного песка заменена пылью (фр. 0,05—0,01  $\text{мм}$ ), дала сопротивление вдавливанию 28  $\text{кг}$ .<sup>3)</sup>.

Несомненно, одною из причин, обусловливающих различное сопротивление грунта раздавливанию и вдавливанию является величина трения в грунте. Эта величина между прочими условиями зависит и от площади соприкасающихся частиц, — с увеличением поверхности соприкасания трение увеличивается. При заполнении пор песчаного грунта материалом более мелким, будет увеличиваться площадь соприкосновения частиц, а потому увеличится и величина трения в грунте. Отсюда должна существовать связь между пористостью грунта, с одной стороны, и сопротивлением грунта механическим воздействиям на него — с другой. С уменьшением пористости грунта должно увеличиваться его сопротивление раздавливанию и вдавливанию.

<sup>1)</sup> В Лаборатории при испытании на раздавливание применяются кубики, имеющие ребро в 2  $\text{см}$ , высушенные при 105° С и предварительно уплотненные нагрузкой в 64  $\text{кг}$  на 1  $\text{кв. см}$ , так как только при таком уплотнении можно сравнивать результаты на раздавливание различных грунтов. См. Рутковский С. И. „Влияние предварительного уплотнения на сопротивление раздавливанию и другие физические свойства“. Сборник Цумт'a № 19 1928 г.

<sup>2)</sup> Проф Земятченский, П. А. К вопросу о физико-механических свойствах грунтов. Сборник Цумт'a № 13—1926 г.

<sup>3)</sup> В. В. Охотин. Сопротивление грунтов вдавливанию в зависимости от механического состава. Сборник Цумт'a № 19—1928 г.

С целью выяснить указанную зависимость между пористостью грунта и его сопротивлением образованию деформаций были взяты три ряда искусственно составленных смесей: 1) смеси, состоящие из 5% Глуховского каолина и меняющихся количеств крупного песка (фр. 2—1) и пыли (фр. 0,05—0,01); 2) смеси, подобные первым, но только количество каолина в смеси было 10%, 3) смеси из 5% каолина, и меняющихся количеств фракций песка — 2—1 м.м. и 1—0,5 м.м. Эти смеси были испытаны в отношении их пористости и сопротивления раздавливанию кубиков.

Чтобы иметь возможность судить о пористости смесей в том же состоянии уплотнения, в каком они (смеси) испытываются на раздавливание, пористость определялась следующим образом: Из смеси в рабочем состоянии приготавлялся цилиндр, имевший основание 2 кв. см и высоту 2 см, утрамбовывался нагрузкой в 64 кг на 1 кв. см основания, высушивался и взвешивался. Затем, его объем определялся погружением в ртуть в мензурке. Удельный вес фракций, входящих в смесь, определялся в пионометре. Зная  $V$  объем цилиндра, веса фракций  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  и удельные веса их ( $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta_3$ ), можно вычислить пористость ( $A$ ) по формуле.

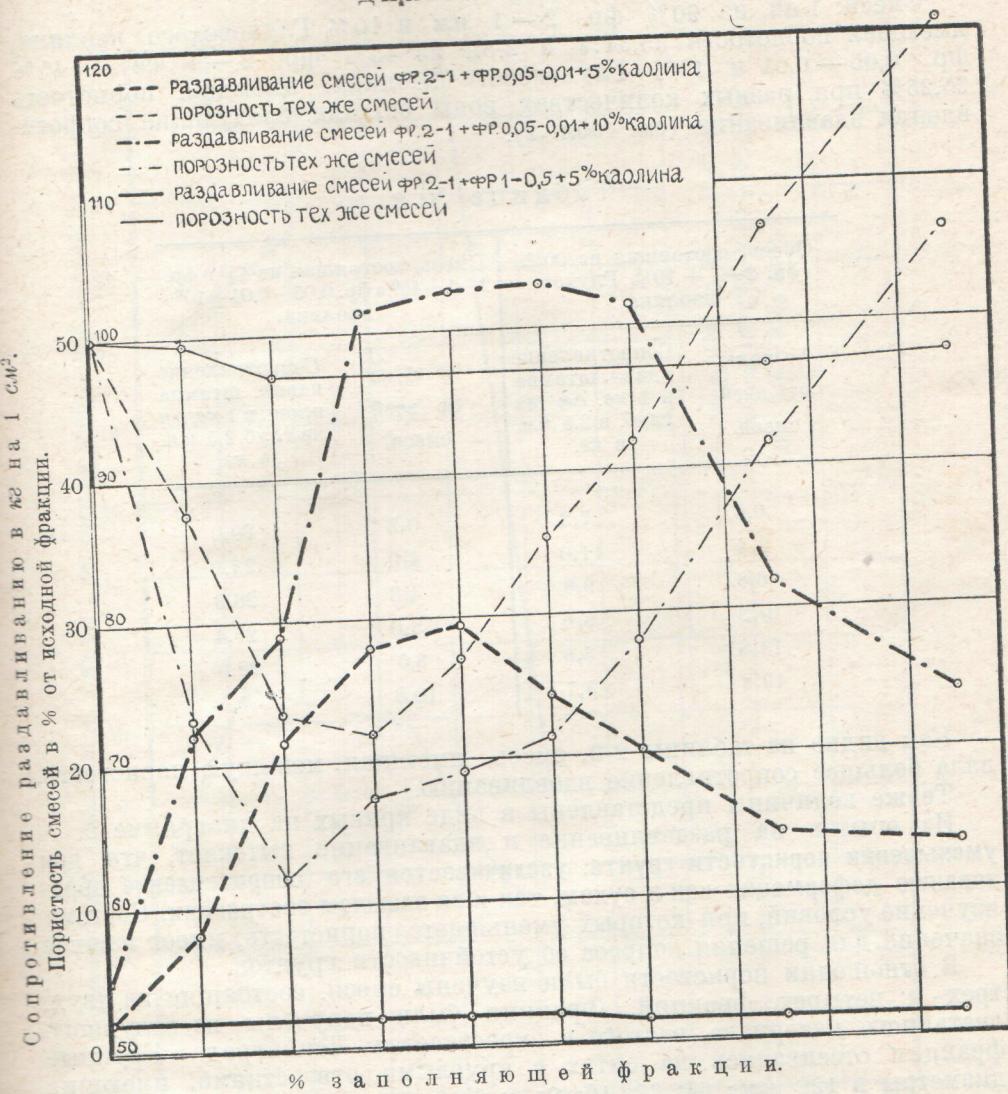
$$A = 100 \cdot \frac{V - \left( \frac{P_1}{\Delta_1} + \frac{P_2}{\Delta_2} + \frac{P_3}{\Delta_3} \right)}{V} \dots \quad (I)$$

Результаты испытаний приводятся на таблице 1-й и в виде кривых на диаграмме № 1.

Таблица № 1.

Смесь, состоящая из фр. 2—1 м.м. + 0,05—0,01 м.м. и 5% Глухов. каолина.					Смесь, состоящая из фр. 2—1 м.м. + 0,05—0,01 м.м. и 10% Глухов. каолина.					Смесь, состоящая из фр. 2—1 м.м. + 1—0,5 м.м. и 5% Глухов. каолина.					Смесь, состоящая из фр. 2—1 м.м. + 1—0,5 м.м. и 5% Глухов. каолина.					Смесь, состоящая из фр. 2—1 м.м. + 1—0,5 м.м. и 5% Глухов. каолина.				
% фр. 2—1 м.м.	% фр. 0,05—0,01	Сопротивление раздавливанию кубика с ребром в 2 см, в кг.			% фр. 2—1 м.м.	% фр. 0,05—0,01	Сопротивление раздавливанию кубика с ребром в 2 см, в кг.			% фр. 2—1 м.м.	% фр. 1—0,55	Сопротивление раздавливанию кубика с ребром в 2 см, в кг.			% фр. 2—1 м.м.	% фр. 1—0,55	Сопротивление раздавливанию кубика с ребром в 2 см, в кг.			% фр. 2—1 м.м.	% фр. 0,05—0,01	Сопротивление раздавливанию кубика с ребром в 2 см, в кг.		
95	0	7,4	34,70	100%	90	0	18,5	35,34	100%	95	0	7,4	34,8	100%	95	0	7,4	34,7	99,71%	95	0	7,4	34,7	99,71%
85	10	31,7	30,47	87,81%	80	10	88,0	25,94	73,40%	85	10	7,5	34,7	99,71%	85	10	7,5	34,7	99,71%	85	10	7,5	34,7	99,71%
75	20	74,1	25,55	73,34%	70	20	114,6	21,89	61,94%	75	20	—	—	—	75	20	—	—	—	75	20	—	—	—
65	30	112,2	25,03	72,13%	60	30	205,2	23,91	67,65%	65	30	7,5	33,7	96,84%	65	30	7,5	33,7	96,84%	65	30	7,5	33,7	96,84%
55	40	117,3	26,76	77,12%	50	40	210,8	24,49	69,30%	55	40	8,8	32,5	93,4%	55	40	8,8	32,5	93,4%	55	40	8,8	32,5	93,4%
45	50	97,25	29,61	85,33%	45	45	212,6	25,25	71,44%	45	50	8,8	—	—	45	50	8,8	—	—	45	50	8,8	—	—
35	60	82,10	31,98	92,16%	30	60	206,1	27,62	78,15%	35	60	5,6	—	—	35	60	5,6	—	—	35	60	5,6	—	—
20	75	57,3	37,11	107,00%	20	70	127,70	32,45	91,42%	20	75	5,6	33,7	96,84%	20	75	5,6	33,7	96,84%	20	75	5,6	33,7	96,84%
0	95	54,3	41,99	121%	0	90	97,2	37,66	106,56%	0	95	5,7	34,0	97,7%	0	95	5,7	34,0	97,7%	0	95	5,7	34,0	97,7%

ДИАГРАММА № 1.



Как видно из таблицы 1-й в смесях из крупного песка, пыли и каолина, при содержании пыли от 20% до 50% сопротивление раздавливанию сильно увеличилось, пористость же этих комбинаций достигает минимальной величины. В смесях же из фракций 2 — 1 мм, 1 — 0,5 мм и каолина, сопротивление раздавливанию изменяется очень незначительно, весьма слабое увеличение имеется при содержании в смесях фракции 1 — 0,5 мм, от 30 до 60%, и пористость в этих смесях при всех комбинациях фракций скелета остается почти неизменной, очень незначительно уменьшаясь в тех комбинациях, которые дали наибольшее сопротивление.

Из этих опытов видно, что с уменьшением пористости грунта увеличивается его сопротивление раздавливанию.

Та же картина наблюдается при сравнении пористости грунтов и их сопротивления вдавливанию<sup>1)</sup>.

Смеси: 1-ая из 90% фр. 2—1 мм и 10% Глуховского каолина, имеющая пористость 35,34% и 2-ая из 45% фр. 2—1 мм + 45% фр. 0,05—0,01 и 10% Глуховского каолина, имеющая пористость 25,25% при разных количествах воды оказали следующие сопротивления вдавливанию (см. табл. 2).

Таблица № 2.

Смесь, состоящая из 90% фр. 2—1 + 10% Глухов. каолина.		Смесь, состоящая из 45% фр. 2—1 + 45% фр. 0,05—0,01 + 10% каолина.	
% воды от всей смеси.	Сопротивление вдавл. штампа в 1 кг. см на глуб. в 2,5 мм, в кг.	% воды от всей смеси.	Сопротивление вдавл. штампа плош. в 1 кг. см на глуб. 2,5 мм, в кг.
0,5	7,2	0,2	20,0
2,4	11,0	4,0	23,0
6,8	9,8	4,3	26,3
9,3	5,6	6,0	27,4
13,8	3,6	8,0	28,0
19,8	3,7	10,6	7,5

Как видно из таблицы 2-й, смесь, имеющая меньшую пористость, дала большее сопротивление вдавливанию.

Те же величины представлены в виде кривых на диаграмме 2.

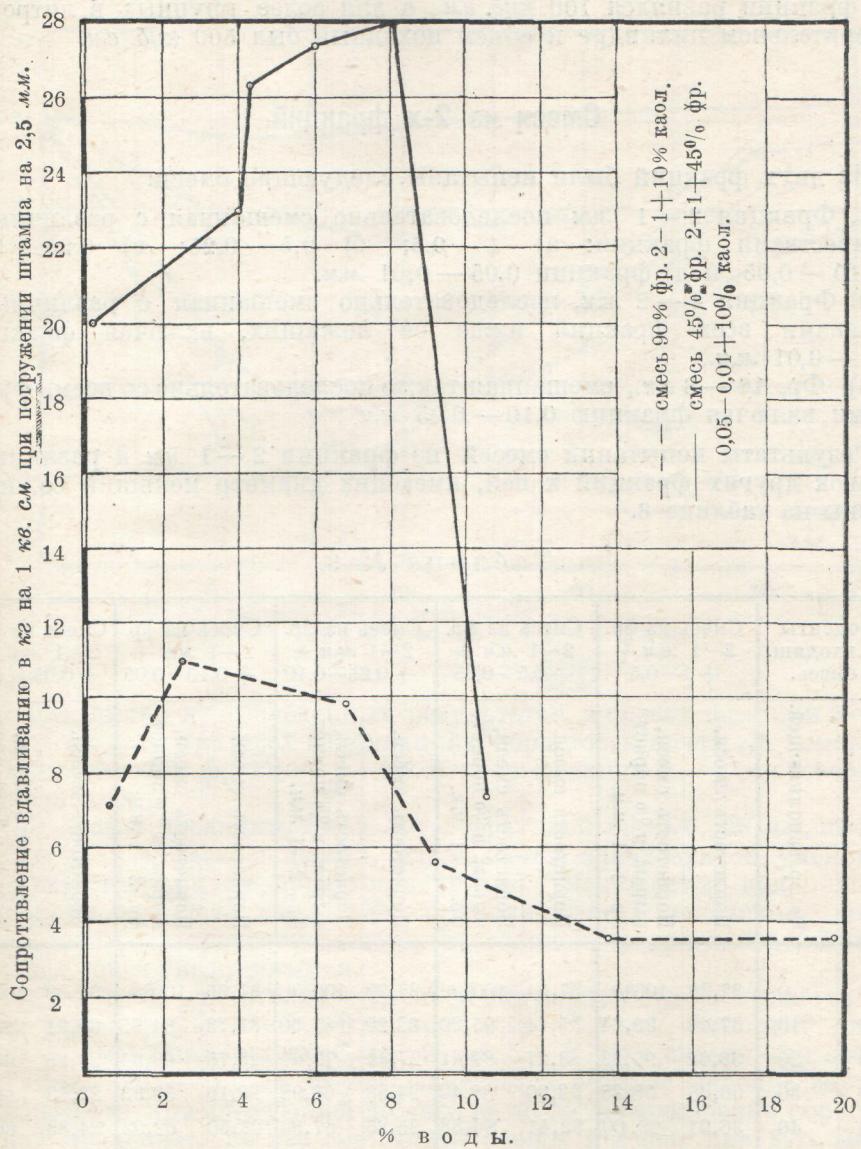
Из опытов на раздавливание и вдавливание вытекает, что при уменьшении пористости грунта, увеличивается его сопротивление образованию деформации как в сухом, так и во влажном состоянии. Поэтому изучение условий, при которых уменьшается пористость, имеет важное значение для решения вопроса об устойчивости грунтов.

В отношении пористости были изучены смеси, состоящие из двух, трех и четырех фракций. Фракции были получены из валунного окатанного материала, взятого в окрестностях Ленинграда. Крупные фракции отсеивались на ситах с круглыми отверстиями, имеющих диаметры в 128 мм.; 64; 32; 16; 8; 4; 2; 1; 0,5; 0,25 и 0,1, мм., фракции <0,1 мм отмучивались по методу Сабанина.

Определение пористости производилось следующим образом: Исследуемая фракция или смесь, взятая в определенных весовых отношениях, насыпалась в мензурку; сверху смеси клалась пробка, свободно входившая в мензурку, на нее накладывался груз и затем легкими постукиваниями резиновым молоточком по мензурке смесь доводилась до постоянного объема. Сверху пробка с тяжестью накладывалась для того, чтобы при постукивании крупные фракции не поднимались кверху. Истинный удельный вес каждой фракции был определен в пикнометре.

<sup>1)</sup> Охотин В. В. Сопротивление вдавливанию грунтов. Сборник Цумт'a № 19.

ДИАГРАММА № 2.



Зная объем смеси, вес каждой фракции в смеси и ее истинный удельный вес, пористость можно вычислить по формуле (I).

Если в смесь входили фракции, отношение диаметров которых было менее 16:1, то такие смеси предварительно тщательно смешивались в фарфоровой чашке и затем уже переносились в мензурку; если же отношение диаметров было 16:1 или больше, то насыпалась в мензурку сначала крупная фракция, а затем сверху мелкая, при постуковании она постепенно проникала вниз и занимала поры крупной фракции.

Для смесей из фракций, имевших диаметр 4 *мм* и меньше пористость определялась в мензурке на 200 *куб. см.*, при чем объем исходной фракции равнялся 100 *куб. см.*, а для более крупных в литровом измерительном цилиндре и объем исходный был 500 *куб. см.*

### Смеси из 2-х фракций.

Из двух фракций были испытаны следующие смеси:

1. Фракция 2—1 *мм* последовательно смешанная с различными количествами фракции: а) 1—0,5; б) 0,5—0,25; в) 0,25—0,1; г) 0,10—0,05, и д) фракции 0,05—0,01 *мм.*.

2. Фракция 4—2 *мм*, последовательно смешанная с различными добавками всех фракций ниже ее лежащих, включая фракцию 0,05—0,01 *мм..*

3) Фр. 16—8 *см.*, смешанная также последовательно со всеми фракциями, включая фракцию 0,10—0,05 *мм.*.

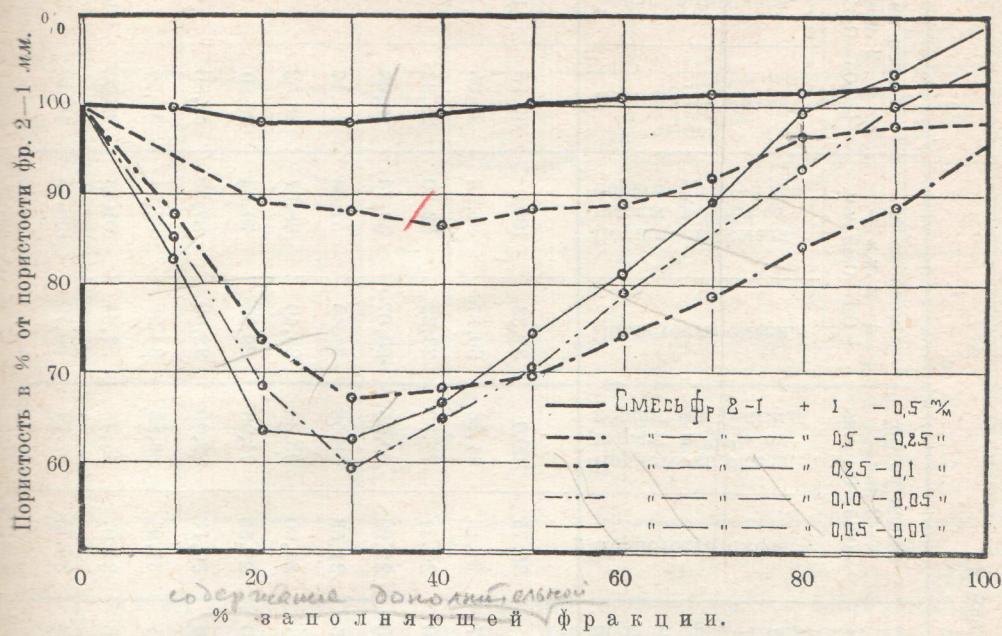
Результаты испытаний смесей из фракции 2—1 *мм* и различных добавок других фракций к ней, имеющих диаметр меньший ее, приведены на таблице 3.

Таблица № 3.

<i>% фр. 2—1</i>	<i>% фр. заполняющей.</i>	Проценты фр., входящ. в смесь.	Смесь из фр. 2—1 <i>мм</i> + + 1—0,5	Смесь из фр. 2—1 <i>мм</i> + + 0,5—0,25	Смесь из фр. 2—1 <i>мм</i> + + 0,25—0,10	Смесь из фр. 2—1 <i>мм</i> + + 0,10—0,05	Смесь из фр. 2—1 <i>мм</i> + + 0,05—0,01		
<i>% фр. 2—1</i>	<i>% фр. заполняющей.</i>	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в <i>%</i> порист. фр. 2—1 <i>мм.</i>	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в <i>%</i> порист. фр. 2—1 <i>мм.</i>	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в <i>%</i> порист. фр. 2—1 <i>мм.</i>	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в <i>%</i> порист. фр. 2—1 <i>мм.</i>
100	0	37,28	100 <sup>0/0</sup>	37,54	100 <sup>0/0</sup>	37,22	100 <sup>0/0</sup>	37,35	100 <sup>0/0</sup>
90	10	37,22	99,84	35,74	95,20	32,29	87,50	31,73	84,95
80	20	36,62	98,23	33,27	89,41	27,32	73,67	25,75	68,94
70	30	36,68	98,28	32,90	88,40	24,93	66,98	22,16	59,33
60	40	36,91	99,00	32,41	86,33	25,25	67,84	23,50	62,92
50	50	37,25	99,92	33,20	88,33	26,13	70,20	26,30	70,41
40	60	37,62	100,88	33,40	88,97	27,55	74,02	29,03	79,33
30	70	37,95	101,71	34,58	91,84	29,32	78,77	34,59	92,61
20	80	37,83	101,44	36,29	96,67	31,30	84,09	34,94	93,54
10	90	38,07	102,09	36,72	97,81	32,92	88,45	37,35	100,0
0	100	38,24	102,89	36,77	97,95	35,49	95,49	39,10	104,68

Данные таблицы 3-й, выраженные в *%* пористости фракций 2—1 *мм* представлены в виде кривых на диаграмме № 3.

ДИАГРАММА № 3.



Фиг.

Как видно из приведенных результатов, в смесях фракции 2—1 м.м. и 1—0,5 м.м., при всех комбинациях пористость почти не изменяется. Следовательно, фракция 1—0,5 м.м. пор. фракции 2—1 м.м. совершенно не заполняет.

В смесях фракции 2—1 м.м. с фракцией 0,5—0, 25 м.м., имеющей диаметр в 4 раза меньший, наблюдается значительное уменьшение пористости, причем пористость сильно уменьшается при прибавках фракции 0,5—0,25 м.м до 20%, при следующих прибавках, (до 60%) пористость практически остается постоянной, и при дальнейших прибавках снова увеличивается.

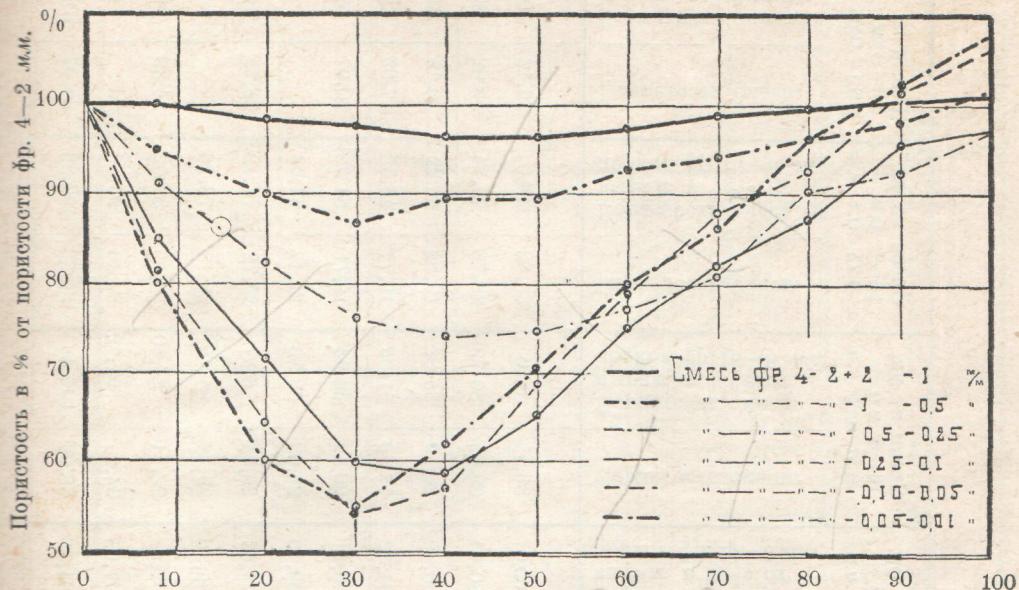
Еще более значительное уменьшение пористости наблюдается в смесях фракции 2—1 м.м. с фракцией 0,25—0,1 м.м., имеющей диаметр в 8 раз меньший диаметра фр. 2—1 м.м. В этих смесях при добавках фракции 0,25—0,1 м.м до 20% замечается быстрое падение величины пористости, при следующей добавке ее до 30% уменьшение пористости, идет медленнее, но все еще значительное и здесь при 30% имеется минимум, при 40% пористость равна той же величине, что и при 30%, при дальнейших добавках она увеличивается сначала (при добавке до 50%) медленно, а при следующих добавках (до 60%, 70% и т. д.) быстрее, при чем одинаковые добавки вызывают и равные приращения пористости.

Максимальное уменьшение пористости получается в смесях фракции 2—1 м.м с фракцией 0,1—0,05 м.м. При добавках фракции 0,1—0,05 м.м от 0 до 30% пористость быстро и равномерно убывает, при 30% имеется минимум пористости, при дальнейших добавках она снова равномерно увеличивается.

Таблица № 4.

Проценты фракций, входящих в смесь.		Смеси из фр. 4—2 м.м. + 2—1 м.м.		Смеси из фр. 4—2 м.м. + 1—0,5 м.м.		Смеси из фр. 4—2 м.м. + 0,5—0,25 м.м.		Смеси из фр. 4—2 м.м. + 0,25—0,1 м.м.		Смеси из фр. 4—2 м.м. + 0,1—0,05 м.м.		Смеси из фр. 4—2 м.м. + 0,05—0,01 м.м.	
0/0/0 фракции 4—2 м.м.	0/0/0 фракции, заполняющей.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в 0/0/0 от порист. фр. 4—2 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в 0/0/0 от порист. фр. 4—2 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в 0/0/0 от порист. фр. 4—2 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в 0/0/0 от порист. фр. 4—2 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в 0/0/0 от порист. фр. 4—2 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в 0/0/0 от порист. фр. 4—2 м.м.
100	0	57,43	100,0	37,33	100,0	37,10	100,0	36,75	100,0	37,33	100,0	37,18	100,0
90	10	37,37	99,84	35,23	94,37	33,75	90,97	31,15	84,76	30,37	81,35	30,06	80,08
80	20	36,68	98,00	33,62	90,06	30,42	82,00	26,21	71,32	23,22	62,20	22,32	60,03
70	30	36,60	97,80	32,33	86,66	28,17	75,93	22,29	60,65	20,07	53,76	20,08	54,00
60	40	36,10	96,45	33,49	89,71	27,40	73,85	21,53	58,58	21,30	57,06	23,17	62,32
50	50	36,07	96,36	33,57	89,90	27,70	74,66	24,00	65,36	25,40	68,97	26,52	71,07
40	60	36,50	97,51	34,75	93,09	28,75	77,50	27,55	74,96	29,62	79,34	29,80	80,12
30	70	36,93	98,66	35,22	94,34	30,26	81,56	30,17	82,09	32,62	87,38	32,80	88,22
20	80	37,24	99,50	35,82	95,95	33,41	90,05	31,91	86,83	34,98	92,74	35,55	95,61
10	90	37,68	100,66	36,73	98,39	34,27	92,56	35,07	95,43	37,94	101,63	38,02	102,26
0	100	37,75	100,88	37,8	101,25	35,94	96,88	35,75	97,19	39,70	106,35	40,48	108,87

## ДИАГРАММА № 4.



В смесях фракции 2—1 м.м. с фракцией 0,05—0,01 м.м. минимальная величина пористости почти равна (несколько больше) минимальной величине предыдущей смеси, и практически она уже имеется при содержании в смеси фракции 0,05—0,01 м.м. 20%; при следующей добавке до 30% она уменьшается на ничтожную величину, а затем начинает увеличиваться.

Чтобы видеть, насколько данные изменения пористости смесей фракции 2—1 с нижележащими ее фракциями будут соответствовать подобным же комбинациям, составленным из других фракций, были исследованы смеси фракции 4—2 м.м. со всеми фракциями ниже ее лежащими, т. е. с фракциями 2—1 м.м.; 1—0,5; 0,5—0,25; 0,25—0,1; 0,1—0,05; и 0,05—0,01 м.м.

Результаты испытаний приводятся на таблице № 4.

Те же результаты изображены в виде кривых на диаграмме № 4, при чем пористость каждой смеси взята в процентах от пористости исходной фракции — 4—2 м.м.

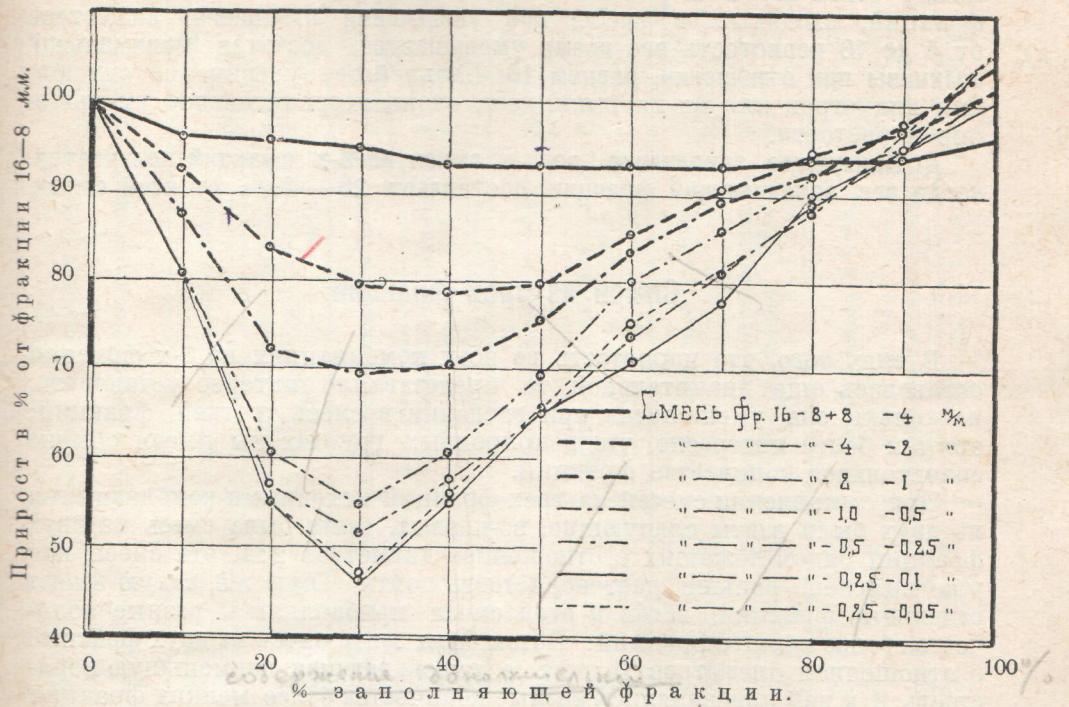
Как видно из приведенных результатов, характер изменения пористости смесей фракции 4—2 м.м. с ниже ее лежащим очень близок к таковому же смесей предыдущих. Некоторое различие наблюдается в поведении кривой 3-ей (смеси фракции 4—2 с фракцией 0,5—0,25 м.м.) по сравнению с кривой 3 диаграммы 3-ей (смеси фракции 2—1 м.м. с фракцией 0,26—0,1 м.м.), а именно максимальное уменьшение в первой кривой достигает только 74% величины пористости фракции 4—2 м.м., в то время, как максимальное уменьшение в кривой 3 диаграммы 3-ей равняется 67% пористости фракции 2—1 м.м.

Второе отличие заключается в том, что в то время, как кривая 5-ая диаграммы 4-ой еще дает уменьшение пористости по сравнению с предыдущей кривой 4-ой, хотя и незначительное, кривая 5-ая диаграммы 3-ей не дает никакого уменьшения пористости по сравнению с 4-ой.

Таблица № 5.

% фракции заполняющей. 16—8 м.м.	Проценты фракций, входящих в смесь.	Смеси из фр. 16—8 м.м. + + 8—4 м.м.		Смеси из фр. 16—8 м.м. + + 4—2 м.м.		Смеси из фр. 16—8 м.м. + + 2—1 м.м.		Смеси из фр. 16—8 м.м. + + 1—0,5 м.м.		Смеси из фр. 16—8 м.м. + + 0,5—0,25 м.м.		Смеси из фр. 16—8 м.м. + + 0,25—0,1 м.м.		Смеси из фр. 16—8 м.м. + + 0,1—0,05 м.м.	
		Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в % от порист. фр. 16—8 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в % от порист. фр. 16—8 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в % от порист. фр. 16—8 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в % от порист. фр. 16—8 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в % от порист. фр. 16—8 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в % от порист. фр. 16—8 м.м.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраж. в % от порист. фр. 16—8 м.м.
100	0	36,02	100,0	36,02	100,0	35,79	100,0	36,02	100,0	36,16	100,0	36,02	100,0	36,12	100,0
90	10	35,39	98,25	32,94	91,95	31,40	87,73	29,05	80,64	29,05	80,33	28,76	79,84	29,02	80,34
80	20	34,45	95,64	29,87	82,92	25,68	71,75	21,77	60,43	20,19	55,83	19,89	55,22	20,15	55,23
70	30	34,23	95,03	28,63	79,48	24,81	69,32	19,58	54,33	18,58	51,05	16,77	46,55	17,03	47,14
60	40	33,35	92,59	28,00	77,73	25,17	70,33	21,76	60,41	20,59	56,94	19,71	54,72	20,07	55,51
50	50	33,32	92,50	28,58	79,34	27,02	75,49	24,90	69,13	23,08	63,83	23,17	64,33	--	--
40	60	33,37	92,64	30,67	85,14	29,75	83,12	28,68	79,62	26,75	73,97	25,72	71,12	28,55	75,09
30	70	33,51	93,03	32,60	90,53	32,01	89,38	30,80	85,50	29,36	81,19	28,19	78,26	--	--
20	80	33,95	94,26	34,14	94,78	33,43	92,82	33,25	92,31	32,11	88,80	32,39	89,92	34,39	90,45
10	90	34,01	94,41	34,95	97,03	35,32	98,11	35,12	97,05	34,25	94,72	34,36	95,39	--	--
0	100	34,66	96,22	36,77	102,08	37,14	103,77	37,52	104,16	36,69	101,46	36,32	100,83	39,67	104,34

ДИАГРАММА № 5.



Чтобы убедиться, что смеси более крупных фракций изменяют пористость таким же образом, как и разобранные, была взята фракция 16—8 м.м., и последовательно смешивалась с более мелкими 8—4 м.м.; 4—2 м.м. и т. д. до 0,1—0,05 м.м. включительно.

Результаты испытаний приводятся на таблице 5-ой.

Те же результаты представлены в виде кривых диаграммы 5, при чем пористость каждой комбинации выражена в процентах от пористости фр. 16—8 м.м.

Из полученных результатов видно, что изменение пористости данных смесей соответствует подобным комбинациям смесей фракции 4—2 с ниже ее лежащими. Некоторое отличие представляют собой кривые 2, а именно кривая 2 диаграммы 5 дает большее уменьшение пористости, чем кривая 2 диаграммы 4. Второе отличие состоит в том, что кривая 6 диагр. 5 дает еще небольшое уменьшение пористости по сравнению с кривой 5-ой, в то время, как кривая 6-ая диаграммы 4-ой не дает уменьшения по сравнению с кривой 5.

Сравнивая результаты опытов, приведенных в таблицах 3, 4 и 5, видно:

1) Пористость всех фракций гравелистых и песчанистых одинакова и равняется 36—37%; пористость же пылеватых больше, при чем она возрастает с уменьшением диаметра зерен фракции.

2) Пористость смесей из двух фракций как песчанистых, так гравелистых и каменистых при одинаковом отношении диаметров фракций, входящих в смесь, и при одних и тех же весовых отношениях, одинакова.

3) Пористость смеси из двух фракций, диаметры которых относятся между собой как 2:1, равняется средней арифметической пористости фракций, входящих в смесь; при увеличении отношения диаметров от 4 до 16 пористость все время уменьшается, достигая минимальной величины при отношении, равном 16. Дальнейшее увеличение отношения диаметров или не дает или дает, очень незначительное уменьшение пористости.

4) Наилучшее заполнение пор в смеси из 2-х фракций получается, когда вес, заполняющий фракции, составляет 20—40% от всей смеси.

### Смеси из трех фракций.

В виду того, что пористость во всех комбинациях из 2-х фракций оставалась еще значительной, то представляло интерес установить, насколько она уменьшится при введении в смесь третьей фракции; это тем более интересно, что в природных грунтах мы имеем обычно значительное количество фракций.

При составлении смесей из трех фракций исходными комбинациями из двух были взяты следующие: во-первых, взята была смесь из двух фракций рядом лежащих с отношением диаметров 2:1, эта смесь, как уже выяснено раньше, дает пористость почти такую же, какую имеют отдельные фракции, затем к этой смеси прибавлялись разные количества более мелких фракций. Потом была взята смесь из двух фракций с отношением диаметров 16:1, т. е. смесь, дающая наименьшую пористость и к ней прибавлялись разные количества более мелких фракций и, наконец, были взяты смеси из двух фракций промежуточные, а именно с отношением диаметров 8:1 и 4:1, которые последовательно заполнялись так же мелкими фракциями.

Во всех исходных комбинациях из 2-х фракций весовые количества их были взяты в таких отношениях, при которых получалась наименьшая пористость.

Первые смеси были составлены так: исходная смесь составлена была из фракций 4—1 мм и 2—1 мм с весовым отношением 7:3, и к ней прибавлялись разные количества всех более мелких фракций, начиная от 1—0,5 мм и кончая фракцией 0,05—0,01 мм. Результаты испытаний приведены на таблице 6 (см. стр. 15).

Данные таблицы 6-ой представлены в виде кривых на диаграмме 6-ой (см. стр. 16).

Как видно из таблицы, изменение пористости данных смесей в общем представляет собой ту же картину, что и при заполнении пор отдельной фракции: с уменьшением диаметра заполняющей фракции пористость смеси уменьшается и достигает минимума, когда диаметр, заполняющей фракции в 16 раз меньше диаметра мелкой фракции (2—1 мм), входящей в смесь, при дальнейшем уменьшении диаметра заполняющей фракции пористость не изменяется.

Останавливаясь более подробно на каждой кривой, видно, что, при заполнении пор исходной смеси фракцией 1—0,5 мм (столб. 4, табл. 6 и кривая 1, диагр. 6), происходит некоторое уменьшение пористости, при чем это уменьшение, полученное опытным путем, близко совпадает, как это видно из таблицы 7-ой столбцы 2 и 3, с величинами пористости, вычисленными на основании данных, полученных при запол-

Таблица № 6.

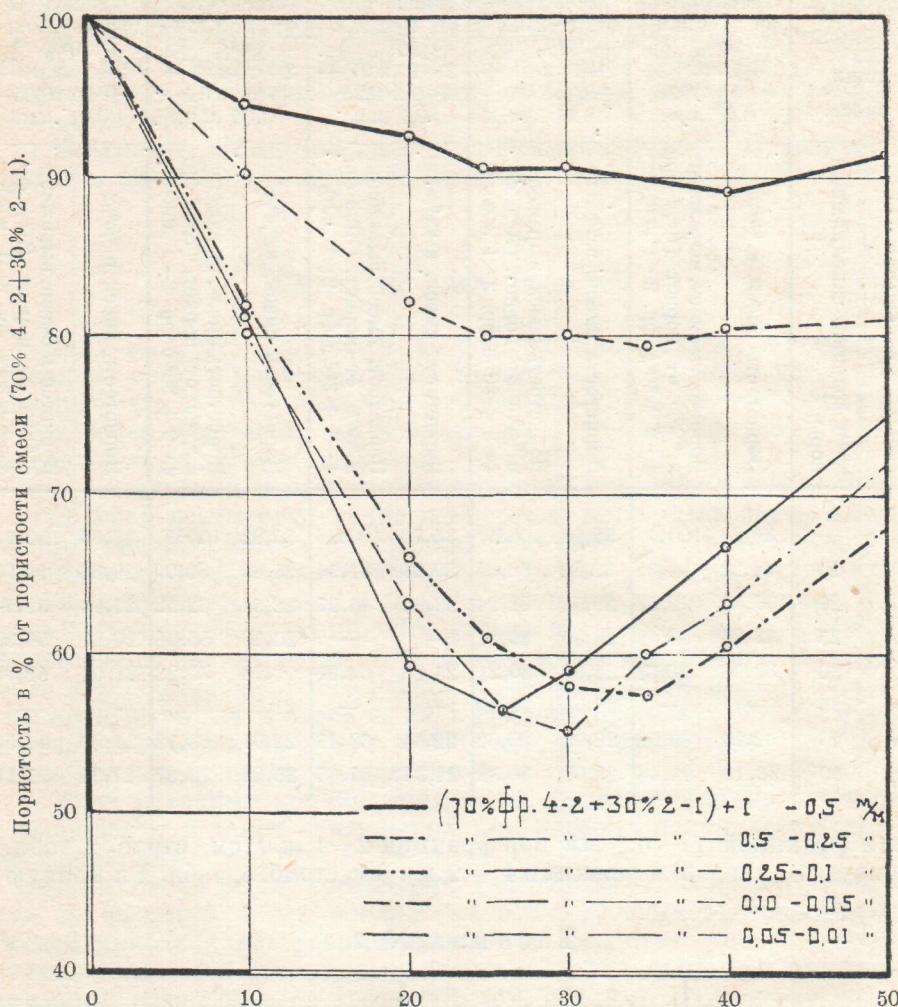
$\frac{\%}{\%}$ смеси 4—2 м.м. + 2—1 м.м. взятых в отношении 7 : 3.		$\frac{\%}{\%}$ фракции, заполняющей поры.		$\frac{\%}{\%}$ смеси, выраженн. в $\frac{\%}{\%}$ от порист. (70%) фр. 4—2 + 30% фр. 2—1 м.м.		$\frac{\%}{\%}$ смеси, выраженн. в $\frac{\%}{\%}$ от порист. (70%) фр. 4—2 + 30% фр. 2—1 м.м.		$\frac{\%}{\%}$ смеси, выраженн. в $\frac{\%}{\%}$ от порист. (70%) фр. 4—2 + 30% фр. 2—1 м.м.		$\frac{\%}{\%}$ смеси, выраженн. в $\frac{\%}{\%}$ от порист. (70%) фр. 4—2 + 30% фр. 2—1 м.м.	
100	—	36,28	100%	35,98	100%	35,86	100%	35,82	100%	36,65	100%
90	10	34,22	94,32	32,60	90,66	29,24	81,54	28,69	80,09	29,68	80,98
80	20	33,59	92,58	29,57	82,24	23,95	65,97	22,54	62,92	21,84	59,59
75	25	32,83	90,49	28,85	80,21	—	—	20,16	56,28	20,67	56,39
70	30	32,90	90,68	28,85	80,21	23,26	64,86	19,78	55,22	21,62	58,99
65	35	—	—	28,54	79,60	—	—	21,59	60,27	—	—
60	40	32,29	89,00	28,99	80,62	22,64	63,13	22,61	63,12	24,39	66,55
50	50	33,19	91,48	29,08	80,82	24,34	67,87	25,88	72,27	27,54	75,11

нении фракций 1 — 0,5 м.м. пор фракции 2—1 м.м. (см. столб. 2 табл. 2 и кривую 1 диагр. 3) и фракции 4 — 2 м.м. (см. столб. 5, табл. 4 и кривую 2 диагр. 4).

Таблица № 7.

$\frac{\%}{\%}$ прибавки фракции, добавляе- мой к ос- новной смеси.	Фр. 4—2 м.м. + фр. 2—1 м.м., взятые в отнош. 7 : 3 с разными колич. фр. 1—0,5 м.м.		Фр. 4—2 м.м. + фр. 2—1 м.м., взятые в отнош. 7 : 3 с прибавками разн. коли- честв фр. 0,5—0,25 м.м.	
	Пористость, полученная опытом.	Пористость вычислен- ная.	Пористость, полученная опытом.	Пористость вычислен- ная.
10	32,22	35,82	32,60	34,35
20	33,50	34,52	29,57	31,28
30	32,96	33,61	28,85	29,52
40	32,29	34,52	28,99	28,90
50	33,19	34,67	29,08	29,35

ДИАГРАММА № 6.



Точно также и кривая 2-я является средней между кривой 2-ой диаграммы 3-ей и кривой 3-ей диаграммы 4; величины пористости этой кривой, как видно из той же таблицы (7) столбцы 4 и 5, хорошо сходятся с величинами, полученными вычислением из данных заполнения фракцией 0,5 — 0,25 мм пор фракции 2 — 1 мм (см. таблицу 3 столб. 4) и фракции 4 — 2 (см. табл. 4, столб. 7). Остальные кривые 3, 4 и 5 по величине их пористости занимают также промежуточное положение между соответствующими кривыми диаграммы 3-ей и 4-ой, приближаясь более к кривым последней. Нужно отметить, что ни при одной комбинации смесей диаграммы 6-ой не было получено пористости, которая была бы меньше пористости кривых диаграммы 4-ой. Следовательно, пористости смесей из 3-х фракций имеют не только не меньшую пористость смесей из 2-х фракций без третьей промежуточной, но во многих

случаях большую, а потому наличие такой промежуточной фракции ухудшает устойчивость грунта.

Второй ряд смесей из трех фракций был составлен следующим образом: была взята смесь из 70% фракции 32—16 м.м и 30% фр. 2—1 м.м (т. е. смесь из фракций, имеющих отношение диаметров 16:1, и дающая минимальную пористость). К этой смеси последовательно прибавлялись разные количества фракций от 1—0,5 м.м до 0,10—0,05 м.м включительно. Данные опытов сведены в таблицу 8.

Таблица № 8.

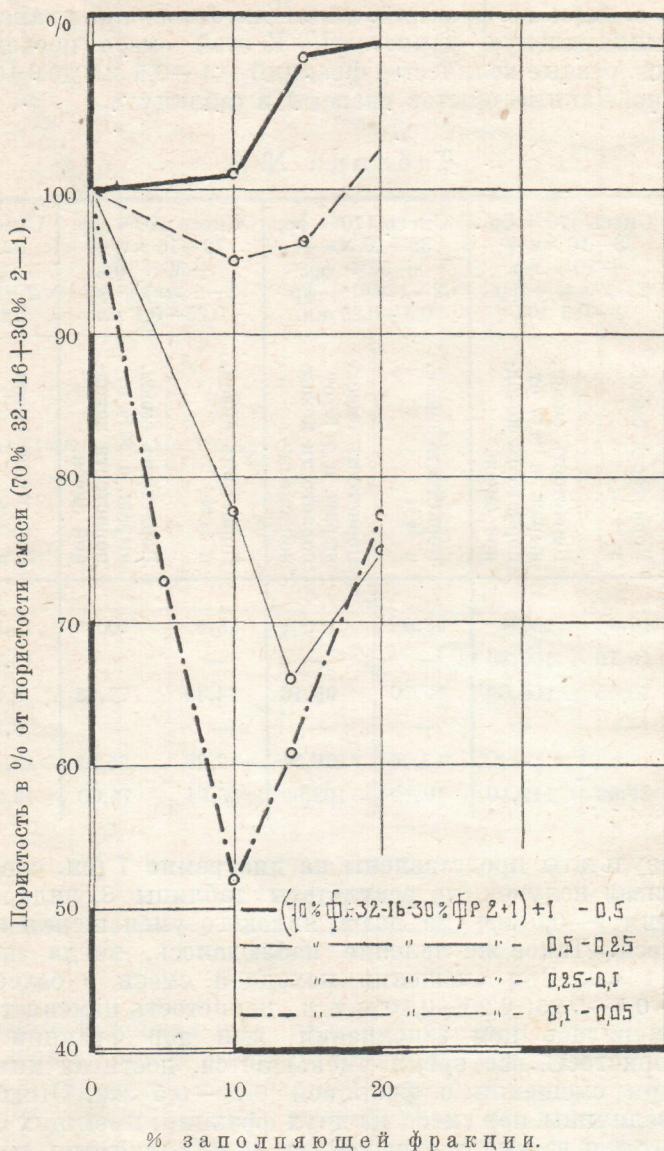
% % смеси 32—16 и 2—1 м.м, взятых в отношении 7:3.		Смесь (70% фр. 32—16 м.м + + 30% фр. 2—1 м.м) + фр. 1—0,5 м.м.	Смесь (70% фр. 32—16 м.м + + 30% фр. 2—1 м.м) + фр. 0,5—0,25 м.м.	Смесь (70% фр. 32—16 м.м + + 30% фр. 2—1 м.м) + фр. 0,25—0,1 м.м.	Смесь (70% фр. 32—16 м.м + + 30% фр. 2—1 м.м) + фр. 0,1—0,05 м.м.				
% % фракций, входящих в смесь.	% % фракции, заполняющей поры.	Пористость смеси, в % %.	Пористость смеси, выраж. в % от пористости исходной смеси.	Пористость смеси, в % %.	Пористость смеси, выраж. в % от пористости исходной смеси.	Пористость смеси, в % %.	Пористость смеси, выраж. в % от пористости исходной смеси.	Пористость смеси, в % %.	Пористость смеси, выраж. в % от пористости исходной смеси.
100%	—	18,6	100%	18,6	100%	18,6	100%	17,08	100%
95	5	18,76	100,86	—	—	—	—	12,7	74,35
90	10	20,45	109,00	17,70	95,16	14,45	77,65	8,93	52,28
88,44	11,56	—	—	—	—	—	—	9,36	54,80
85	15	—	—	17,96	96,54	12,26	65,91	10,44	61,12
80	20	21,03	112,10	19,10	102,69	13,94	75,00	13,21	77,34

Те же результаты представлены на диаграмме 7 (см. след. стр.).

Рассматривая полученные результаты таблицы 8, видно, что прибавки фракции 1—0,5 м.м не дают никакого уменьшения пористости исходной смеси. Такое же явление наблюдалось, когда заполнялась фракция 2—1 м.м. При смешении исходной смеси с более мелкими фракциями—0,5—0,25; 0,25—0,10 и т. д., пористость изменяется так же, как она изменялась при заполнении ими пор фракции 2—1 м.м, а именно, пористость все время уменьшается, достигая минимальной величины при смешении с фракцией 0,10—0,5 м.м. Отсюда можно думать, что величины пор смеси из двух фракций, имеющих отношение диаметров 16:1 и взятых в отношениях 7:3, равняются порам меньшей фракции, входящей в смесь.

Второе, что необходимо отметить в данных смесях, это малая величина пористости. Пористость в полученных смесях, в наиболее удачных комбинациях, уменьшилась в два раза по сравнению с исходной, по сравнению же с отдельными фракциями в четыре раза, следовательно, здесь достигнута пористость, какой нельзя было получить ни при каких комбинациях из двух фракций. В смесях из двух фракций наименьшая пористость равнялась 16,5%, здесь она равняется 9%.

ДИАГРАММА № 7.



Для того, чтобы убедиться, что подобная комбинация и всяких других трех фракций дает такое же изменение пористости, была взята исходная смесь, подобная первой, но только диаметры фракции были крупнее, а именно взята была смесь из 70% фракции 128—64 м.м. и 30% 8—4 м.м. и к ней прибавлены разные количества фракции 0,5—0,25 м.м., результаты опытов видны из таблицы 9.

Таблица № 9.

% фракций, входящих в смесь.		Смесь (70% фр. 128—64 мм. + 30% фр. 8—4) + фр. 0,5—0,25 мм.	
% смеси (70% фр. 128—64+30% фр. 8—4) мм.	% фр. 0,5—0,25 мм.	Пористость смеси.	Пористость смеси, выраженная в % от пористости смеси исходной.
100	—	16,5	100
90	10	9,01	54,6
87,5	12,5 <sup>1)</sup>	8,50	51,51

Как видно из таблицы 9-й, изменение пористости вполне совпадает с изменением пористости исходной смеси таблицы 8-й при смешении ее с фракцией 0,1—0,05 мм.

Третий ряд смесей из 3-х фракций был составлен таким образом: взяты были две фракции с отношением диаметров 8 : 1, именно 16—8 мм и 2—1 мм и из них составлена смесь, содержащая 70% первой и 30% второй, к этой смеси прибавлялись последовательно фракции 1—0,5; 0,5—0,25 и т. д. до 0,05—0,01 включительно. Результаты опытов приводятся на таблице 10.

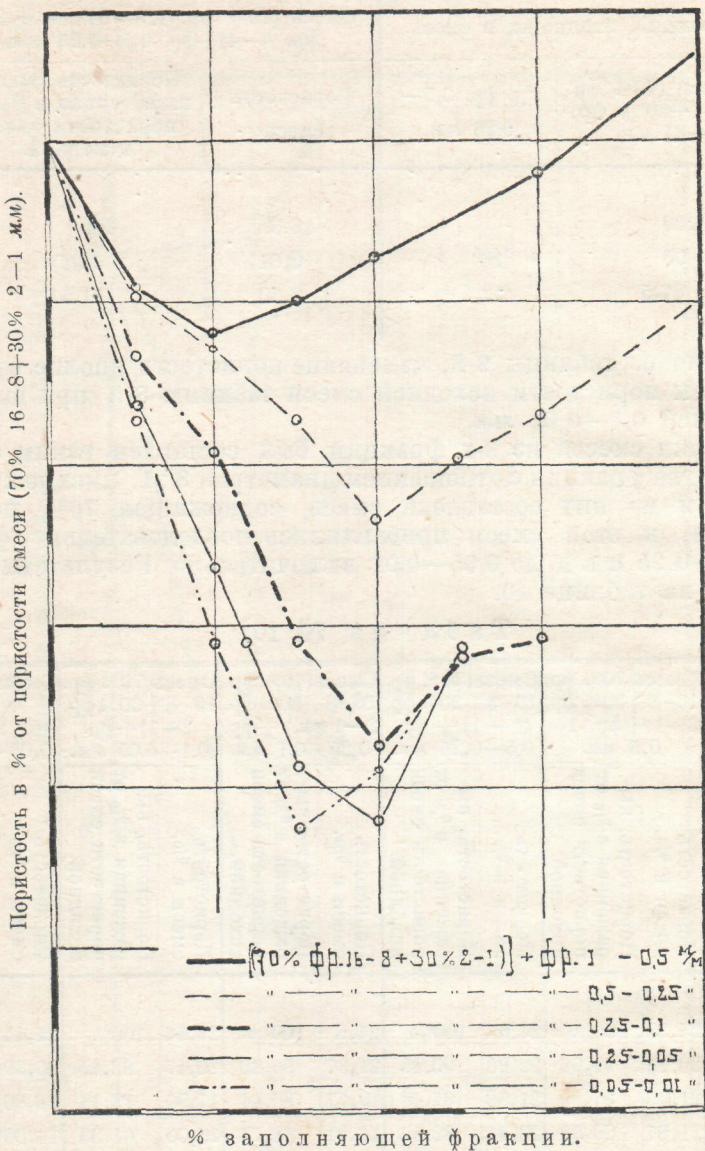
Таблица № 10.

% фракций, входящих в смесь.	Смесь (70% фр. 16—8+30% фр. 2—1)+фр. 1—0,5 мм.		Смесь (70% фр. 16—8+30% фр. 2—1)+фр. 0,5—0,25 мм.		Смесь (70% фр. 16—8+30% фр. 2—1)+фр. 0,25—0,1 мм.		Смесь (70% фр. 16—8+30% фр. 2—1)+фр. 0,1—0,05 мм.		Смесь (70% фр. 16—8+30% фр. 2—1)+фр. 0,05—0,01 мм.		
	% фракции, за- полняющей поры.	Пористость смеси в %.	% фракции, за- полняющей поры.	Пористость смеси в %.	% фракции, за- полняющей поры.	Пористость смеси в %.	% фракции, за- полняющей поры.	Пористость смеси в %.	% фракции, за- полняющей поры.	Пористость смеси в %.	
100	—	24,32	100%	24,6	100%	24,6	100%	24,44	100%	24,44	100%
95	5	22,15	91,06	22,26	90,49	21,37	86,86	20,47	83,75	20,39	83,43
90	10	21,39	87,95	21,52	87,48	19,77	80,44	17,90	73,48	16,86	68,98
85	15	21,87	89,92	20,41	82,56	16,91	68,74	15,00	61,33	14,06	57,53
80	20	22,52	92,60	18,78	76,34	15,39	62,15	14,18	57,81	15,07	61,66
75	25	—	—	19,80	80,49	16,72	67,96	16,70	68,33	—	—
70	30	23,89	98,13	20,48	83,21	16,97	68,98	—	—	—	—
60	40	25,70	105,6	22,13	90,00	—	—	—	—	—	—

Те же результаты представлены в виде кривых на диаграмме 8-й.

<sup>1)</sup> В последнем случае фр. 0,5—0,25 распределилась по всему объему исходной смеси до самой поверхности и дальнейшие прибавки ложились сверх смеси, увеличивая пористость.

ДИАГРАММА № 8.



Как видно из таблицы при смешении исходной смеси с фракцией 1—0,5 м.м. происходит значительное уменьшение пористости, при смешении с более мелкими фракциями величина пористости все время убывает и достигает минимума, когда заполнителем служит фракция 0,1—0,05 м.м. Изменение пористости данных смесей очень близко по величине к изменениям пористости фракции 4—2 м.м., когда она смешивается с теми же фракциями. Отсюда можно думать, что величины пор исходной смеси равняются порам фракции 4—2 м.м.

Пористость данных смесей, являясь очень незначительной, меньшей, чем самая малая в смесях из двух фракций, все же не достигает той

величины, какая была получена в комбинациях из трех фракций, из коих диаметр каждой предыдущей в 16 раз был больше диаметра последующей.

Кроме комбинаций, представленных на таблице 10-й были испытаны подобные же комбинации из других фракций: исходной была взята смесь из двух фракций—65% 32—16 *мм* и 35% 4—2 *мм* и к ней прибавлялись разные количества фракции 0,5—0,25 *мм*, имеющей диаметр в 8 раз меньший, чем диаметр фракции 4—2. Результаты приведены на таблице 11-ой.

Таблица № 11.

% фракций, входящих в смесь	Смесь (65% фр. 32—16 + 35% фр. 4—2) + фракция 0,5—0,25 <i>мм</i> .		
% смеси (65% фракция 32—16 + 35% фракция 4—2 <i>мм</i> )	% заполняющей фракции	Пористость смеси в %	Пористость в % от пористости смеси исходной
100	—	22,43	100%
90	10	16,17	72,09
87,5	12,5	16,00	71,33
85	15,0	15,96	71,11
80	20	17,03	75,92

Как видно из таблицы, результаты уменьшения пористости совпадают с данными таблицы 10 при заполнении пор исходной смеси фракцией 0,25—0,10 *мм*. Это еще раз подтверждает, что какой бы величины фракции в смесь не были взяты, при одинаковых комбинациях, т. е. при одинаковых соотношениях диаметров фракций, входящих в смесь, и при одинаковых весовых отношениях их величины пористости будут близки между собой.

Наконец, были составлены смеси из таких трех фракций, в которых диаметр каждой предыдущей был в четыре раза больше последующей фракции; для чего взята была смесь из 40% фракции 16—8 и 40% фракции 4—2. Эта комбинация дала наименьшую пористость (из данных двух фракций, см. табл. 5) и к ней прибавлялись разные количества фракции 1—0,5 *мм*, результаты получились следующие (см. табл. 12).

Таблица № 12.

% фракции в смеси.		Пористость смеси (60% фр. 16—8 + 40% фр. 4—2) + фр. 1—0,5 <i>мм</i> .	
% смеси (60% фр. 16—8 + 40% фр. 4—2 <i>мм</i> )	% фракции 1—0,5 <i>мм</i> .	Пористость смеси в %	Пористость смеси, выраженная в % от пористой смеси исходной.
100	—	28,00	100
90	10	26,72	95,42
85	15	24,50	87,50
80	20	24,45	87,20

Из таблицы видно, что величины изменения пористости меньше, чем в предыдущих смесях.

При рассмотрении результатов изменения пористости всех комбинаций из 3-х фракций видно, что самое незначительное изменение получается, если диаметры фракций входящих в смесь, относятся между собой как 4 : 2 : 1; более значительное уменьшение пористости получается при отношении диаметров фракции, 16 : 4 : 1; еще более значительное при отношении 64 : 8 : 1 и, наконец, **наименьшая пористость получается в том случае, когда диаметры фракций, входящих в смесь, относятся между собой как 16<sup>2</sup> : 16 : 1.** В этом случае внесение третьей фракции уменьшает пористость смеси так же, как внесение второй в первую.

Определенная закономерность наблюдается и в отношении весовых количеств фракций, входящих в смесь. В смеси, составленной из трех фракций и дающей наименьшую пористость, весовые отношения первой фракции к второй и второй к третьей равны между собой. Так, напр., если вес первой фракции к весу второй относится как 7 к 8, то это отношение сохраняется также между второй и третьей фракциями.

### Смеси из 4-х фракций.

В виду того, что изучение различных комбинаций из двух и трех фракций выяснило закономерности, изменения величины пористости, а также весовых количеств фракций, входящих в смесь при минимальной пористости, то при рассмотрении более сложных смесей из четырех и пяти компонентов были взяты только такие, на которых можно было бы проверить, что закономерности остаются в силе и при любом количестве фракций в смеси. С этой целью из четырех фракций были изучены три ряда смесей, при чем исходными смесями из 3-х были взяты такие, которые дают наименьшую пористость.

Первый ряд представлял собой смесь из 4-х фракций с отношением величины диаметра каждой предыдущей к последующей, равным 4. А именно, была составлена смесь из 48% фракции 16 : 8 мм, 32% фракции 4—2 мм и 20% фракции 1—0,5 мм и к этой смеси, давшей наименьшую пористость (см. табл. 12), прибавлялись разные количества фракции 0,25—0,10 мм. Результаты опытов приведены в таблице 13-ой.

Таблица № 13.

% фракции в смеси.		Смесь (48% фр. 16—8+32% фр. 4—2+20% фр. 1,0—0,5 мм.)	
% смеси (48% фр. 16—8+32% фракц. 4—2+20% фр. 1,0—0,5 мм.).	% фракции 0,25—0,10.	Пористость смеси в %.	Пористость, выраженная в % от пористости исходной смеси.
100	—	24,45	100%
95	5	22,70	92,84
90	10	19,43	79,46
85	15	18,90	77,30
80	20	18,95	77,54

Как видно из таблицы, внесение четвертой фракции уменьшило пористость смеси так же, как и внесение третьей фракции в смесь из двух. То же наблюдается и при внесении в комбинацию из четырех фракций с наименьшей пористостью пятой фракции, как это видно из таблицы 14-ой.

Таблица № 14.

% фракций, входящих в смесь.		Смесь (40,8% фр. 16—8+27,2% фр. 4—2+17% фр. 1—0,5 и 15% фр. 0,25—0,1)+фр. 0,05—0,01.	
% смеси (40/0,8% фр. 16—8+27,2% фр. 4—2+17% фр. 1—0,5+15% фр. 0,25—0,1).	% фракции	Пористость смеси, в %.	Пористость смеси в % от пористости исходной смеси из 4-х фракций.
100	—	18,9	100%
95	5	17,64	93,33
90	10	16,24	85,92
85	15	17,22	91,11

Второй ряд был составлен из фракций, имеющих отношение диаметров, равное 8 Для этого была взята смесь, состоящая из 55,25% фракции 32—16 мм, 29,75% фракции 4—2 мм и 15% фракции 0,5—0,25 мм и к этой смеси прибавлялись разные количества фракции 0,05—0,01 мм. Результаты приведены на таблице 15-ой.

Таблица № 15.

% фракций, входящих в смесь.		Смесь (55,25% фр. 32—16 мм+29,75% фр. 4—2+15% фр. 0,5—0,25 мм)+фр. 0,05—0,01 мм.	
% смеси (55,25% фр. 32—16+29,75% фр. 4—2+15% фр. 0,5—0,25 мм).	% фракции	Пористость смеси, в %.	Пористость выраженная, в % от пористости исходной смеси.
100	—	15,96	100%
95	5	12,76	80%
92	8	11,53	72,24
91,5	8,5	11,95	24,81

Как видно из таблицы, смесь из 4 компонентов дает такое же уменьшение пористости, какое давало внесение третьей фракции в смесь из двух.

Наконец, третий ряд смесей из фракций с отношением диаметров 16, был составлен так: взята смесь из 61,12% фракции 128—64 мм.,

26,38% фракции 8—4 *мм* и 12,5% фракции 0,5—0,25 *мм* как дающая наименьшую пористость (см. подробную смесь табл. 8) и к ней была прибавлена фракция 0,05—0,01 *мм*. Полученные результаты видны из таблицы 16-ой.

Таблица № 16.

% фракций, входящих в смесь.		Смесь (61,12% фр. 128—64+26,38% фр. 8—4+12,5% фр. 0,5—0,25 м.) + фр. 0,05—0,01 м.	
% смеси (61,12% фр. 128—64+26,38% фр. 8—4+12,5% фр. 0,5—0,25).	% фракции 0,05—0,01.	Пористость смеси, в %.	Пористость смеси, выраженная в % от пористости исходной смеси.
100	--	8,5	100%
95	5	4,5	52,94
93	7	5,1	60,00

И в данном ряде изменение пористости с прибавлением четвертой фракции происходит такое же, какое наблюдалось при внесении третьей фракции.

Из рассмотрения всех комбинаций из 4-х фракций видно, что они вполне подтверждают закономерности изменения пористости, которые были замечены в комбинациях из двух и трех фракций. Эти закономерности могут быть выражены аналитически.

### Аналитическое выражение пористости смесей и количеств фракций в них.

Прежде чем попытаться вывести аналитическое выражение изменения пористости, необходимо определить точность метода, по которому производилось определение пористости, дабы знать, можно ли отсутствия от намечаемой законности объяснить неточностью метода или же они вызываются самим существом явления.

При составлении всех смесей пористость исходных фракций каждый раз определялась опытно, благодаря чему накопилось большое число определений одной и той же фракции. Всего больше повторных определений было произведено с фракцией 2—1 *мм*, а именно 31. На основании этих данных были вычислены: 1) средняя (квадратичная) ошибка—она равна 0,44% и предельная ошибка—1,32%.

Пористость фракции 4—2 определялась тридцать раз и из этих определений средняя (квадратичная) ошибка равнялась 0,48, а предельная 1,44; как видно, величины ошибок очень близки между собой.

Зная точность метода, рассмотрим изменения пористости смесей, которые состоят из 2, 3 и 4 фракций, имеют отношение диаметров фракций 16 и дают минимальную пористость.

Одной из исходных фракций в таких смесях была фракция 128—64 *мм*, она заполнялась фракцией 8—4 *мм*, к полученной смеси прибавлялась фракция 0,5—0,25 *мм*, а затем фракция 0,05—0,01 *мм*.

Пористости этих комбинаций из одной, двух, трех и четырех фракций представлены на таблице 17, столб. 2.

Таблица № 17.

% фракций, входящих в смесь.	Пористость, полученная опытом.	Пористость вычислена.	Разница.
100% фр. 128—64 . . . . .	36	—	—
70% гр. 128—64+30% фр. 8—4 . .	16,5	18	+ 1,5
61,12% фр. 128—64+26,38% фр. 8—4+12,5% фр. 0,5—0,25 . .	8,5	9	+ 0,5
58,06% фр. 128—64+25,06% фр. 8—4+11,88% фр. 0,5—0,25+5% фр. 0,05—0,01 . . . . .	4,6	4,5	+ 0,1

Величина пористости ( $x$ ), как видно из таблицы, является функцией от количества фракций ( $n$ ), входящих в смесь. Из данных опытов вытекает, что с увеличением числа фракций на единицу, пористость примерно уменьшается в два раза, но не точно в два раза; если бы она каждый раз уменьшалась в два раза, то должны были бы получиться величины, приведенные в столбце 3 таблицы 17. Сравнивая величины, полученные опытно, и вычисленные, видно, что разница между ними не превышает предельной ошибки опыта и, следовательно, пористость смесей при увеличении числа входящих в них фракций будет представлять собой убывающую геометрическую прогрессию со знаменателем отношения 0,5. Отсюда зависимость между числом фракций в смеси и величиной пористости можно выразить формулой:

$$X = aq^n \dots \text{ (II)}$$

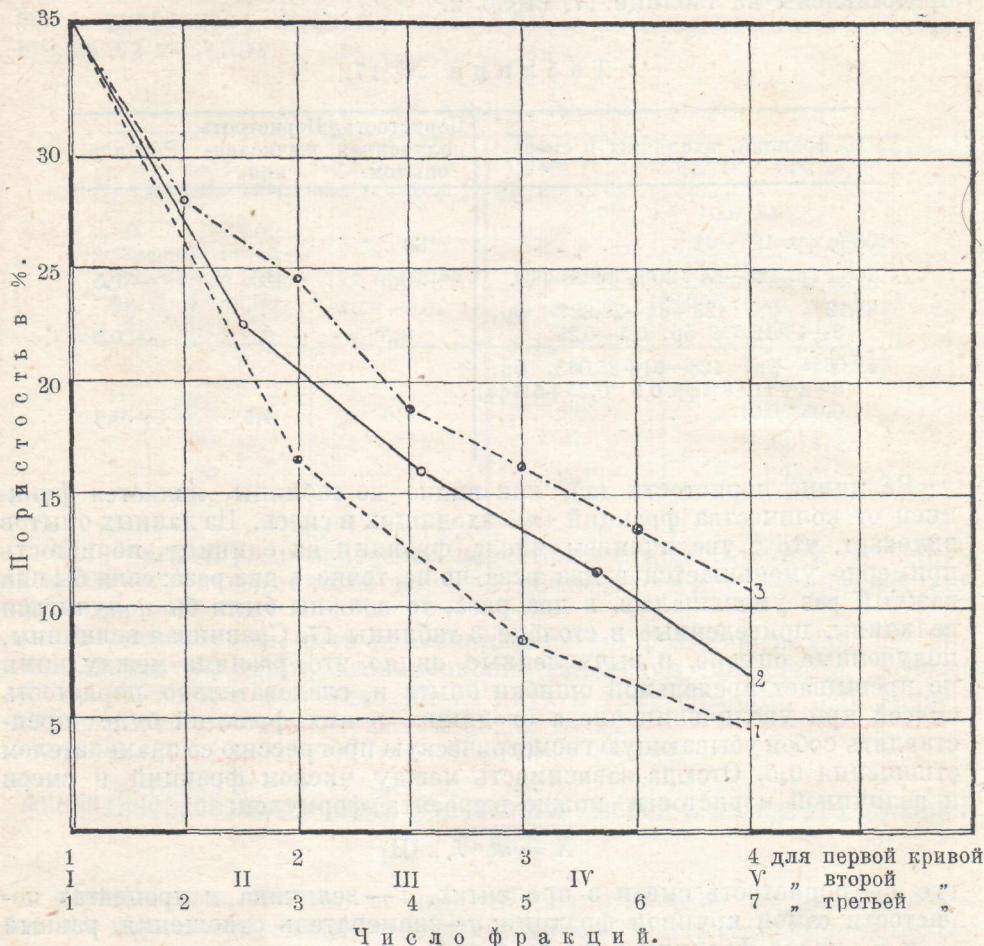
где  $x$  — пористость смеси в процентах,  $a$  — величина в процентах пористости самой крупной фракции;  $q$  — знаменатель отношения, равный  $\frac{1}{2}$  и  $n$  — число фракций в смеси без 1.

Эта закономерность изменения пористости наблюдается и при другой подобной же комбинации, как это видно из таблицы 18-ой.

Таблица № 18.

Состав смеси.	Величина по-ристости, полу-ченной опытом.	Пористость, полу-ченная вычислением.	Разница.
Фр. 32—16—100% . . . . .	36,00	—	—
70% фр. 32—16+30% фр. 2—1 . . . . .	18,6	18	+ 0,6
63% фр. 32—16+27% фр. 2—1+10% фр. 0,10—0,05 . . . . .	8,93	9	0,07

ДИАГРАММА № 9.



Изменения пористости смесей, представленных на таблице 17-ой, могут быть выражены кривой (см. диагр. 9, кривая 1), на которой точки 1, 2, 3 и 4 обозначают пористость смесей, содержащих 1, 2, 3 и 4 фракции в комбинациях, дающих наименьшую пористость, часть кривой между 1 и 2 указывает пористость при разных добавках, второй фракции, взятой в количествах от 0 до 30%, часть — между точками 2 и 3 — пористость при разных добавках третьей фракции и т. д.

Между весовыми количествами фракций, входящих в эти смеси, тоже наблюдается закономерность — отношение веса каждой последующей к весу предыдущей, примерно, одно и то же и равняется 0,428 (в некоторых случаях оно поднимается до 0,48 и падает до 0,37).

Если принять это отношение 0,428 между фракциями, то % фракции в смеси из 2-х, должны быть таковы: первой 70 и второй 30, в смеси из 3-х — первый 62,05, второй — 26,59 и третьей — 11,40%, в смеси из четырех: первой 59,14, второй 23,92, третьей 10,25 и четвертой 4,4.

Опытно минимальные пористости в смесях из 2-х фракций получались при тех же отношениях (см. табл. 17 и 18, столб 1), в смесях из 3-х

фракций — в одном случае: первой фракции 61,12%, второй 26,38 и третьей 12,5% (см. табл. 9), в другом случае — 63%, 27 и 10% (см. табл. 8, столб. 9). В смесях из 4-х фракций: первой фракции 58,06%, второй 25,06, третьей 11,88 и четвертой 5% (см. табл. 16). Интерполированием при вышеуказанных теоретических процентах фракций получим следующие величины пористости: в смеси из 2-х фракций те же, что получались и опытно, а именно 16,5 и 18,6 из 3-х — в первом случае 8,73, во втором 9,36 и из четырех 5%. Эти величины почти совпадают с минимальными величинами пористости, полученными опытным путем, во всяком случае, разница значительно меньше предельной ошибки опыта. Таким образом весовое отношение каждой последующей фракции к предыдущей, имеющих отношение диаметров 16, можно принять равным 0,428, а отсюда вытекает, что веса фракций, входящих в такие смеси, можно рассматривать, как члены убывающей геометрической прогрессии и их величина в %, может быть выражена формулой:

$$x = aq^{n-1} \quad (\text{III}),$$

где  $x = \%$  данной фракции,  $a = \%$  первой, самой крупной фракции,  $q$  — знаменатель отношения равный 0,428 и  $n$  — порядок данной фракции в смеси по ее крупности.

Процент первой фракции ( $a$ ) меняется в зависимости от количества фракций в смеси и может быть выражен формулой:

$$a = \frac{100(1-q)}{1-q^n} \quad (\text{IV}),$$

где  $a$  и  $q$  имеют значение, что и в предыдущей формуле, а  $n$  означает число фракций в смеси.

Изменения пористости и весов фракций в смесях, с отношением диаметров фракций равным 8, приведены в таблице 19-ой.

Таблица № 19.

Диаметры и % фракций, входящих в смесь.	Пористость полученная опытно.	Пористость вычисленная.	Разница.
100% — 32—16 м.м . . . . .	36	—	—
65% фр. 32 — 16 + <sup>1)</sup> 35% фр. 4—2 м.м . . .	22,43	23,76	+ 1,33
55,25% фр. 32 — 16 + 29,75 фр. 4 — 2 + 15% фр. 0,5 — 0,25 м.м . . . . .	15,96	15,68	+ 0,28
50,85% фр. 32 — 16 + 27,37% фр. 4 — 2 + 13,8 фр. 0,5 — 0,25 + 8% фр. 0,05—0,01 м.м . . .	11,53	10,35	+ 1,18

Те же величины представлены кривой 2-ой, диагр. 9.

Как видно из таблицы, пористость с увеличением в смеси фракций уменьшается и представляет собой также убывающую геометрическую прогрессию со знаменателем отношения 0,66 и величина ее может быть выражена тою же формулой (II), как и в предыдущих смесях, но только там знаменатель отношения ( $q$ ) был 0,5, здесь он равняется 0,66.

Точно также и веса фракций этих смесей могут быть определены формулой (III), приняв знаменателя отношения равным 7/13.

1) Смесь взята с процентным отношением 13 : 7 потому, что при этих соотношениях получилась пористость наименьшая.

Такое же изменение пористости происходит и в других подобных смесях, как это видно из таблицы 20, при заполнении пор фракции 16—8 м.м.

Таблица № 20.

Диаметр и % фракций, входящих в смесь.	Пористость полученная опытно.	Пористость вычислена.	Разница.
100% фр. 16—8 м.м . . . . .	36	—	—
70% фр. 16—8 м.м + 30% фр. 2—1 м.м . . . . .	24,60	23,76	+ 0,84
56% фр. 16—8 м.м + 24% фр. 2—1 + 20% фр. 0,25—0,1 . . . . .	15,39	15,68	— 0,29

Пористость здесь представляет собой также убывающий ряд со знаменателем отношения 0,66, но отношения весов колеблются от 0,43 до 0,83; происходит это оттого, что величина пористости при изменяющихся количествах заполняющей фракции в данных смесях изменяется не резко, и потому точно уловить минимальную пористость труднее. Так, напр., при заполнении пор смеси из 70% фр. 16—8 м.м и 30% 2—1 м.м фракцией 0,25—0,10 м.м, при изменении последней в смеси от 15% до 25% (см. табл. 10) пористость изменяется от 16,61% до 15,39%, т. е. разница (1,22) меньше предельной ошибки опыта и, следовательно, при всех этих количествах можно принять пористость за минимальную.

Изменение пористости в смесях из фракций с отношением диаметров 4 представлено на таблице 21.

Таблица № 21.

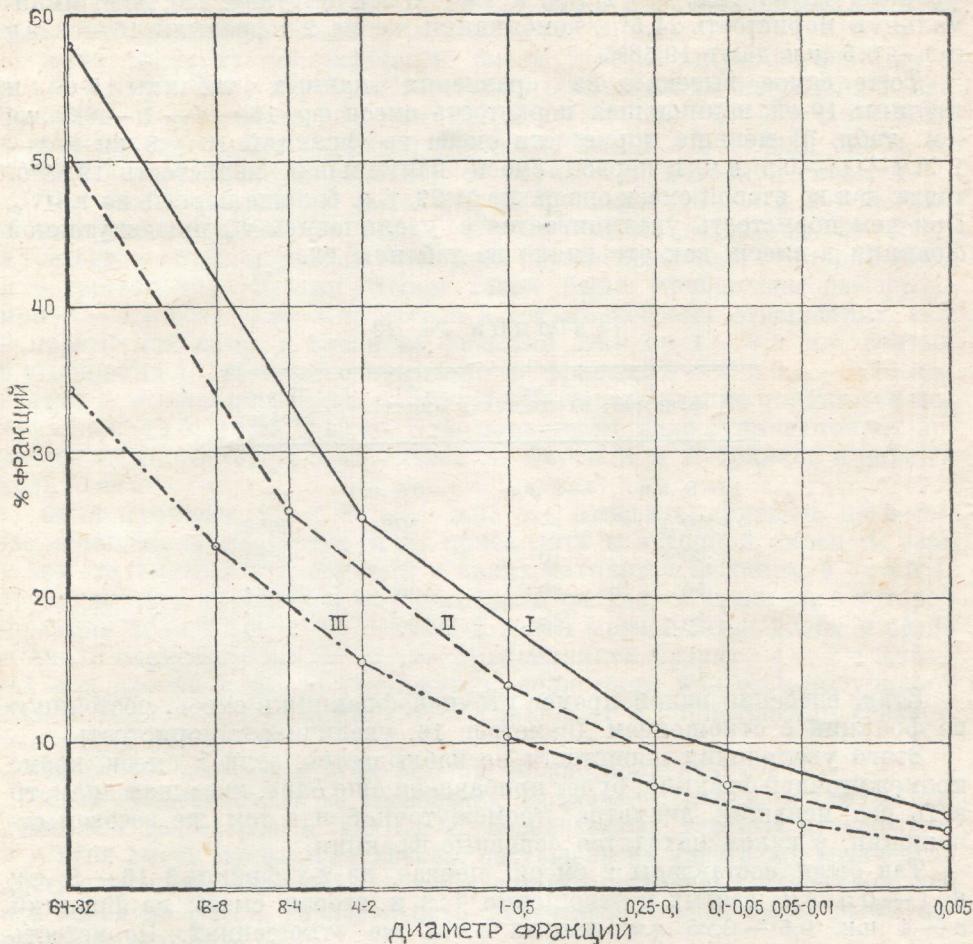
Диаметр и % фракций, входящих в смесь.	Пористость полученная опытно.	Пористость вычислена.	Разница.
100% фр. 16—8 . . . . .	36	—	—
60% фр. 16—8 м.м + 40% 4—2 м.м. . . . .	28,00	29,52	— 1,52
48% фр. 16—8 м.м + 32% фр. 4—2 м.м + 20% фр. 1—0,5 м.м. . . . .	24,45	24,21	+ 0,24
40,8% фр. 16—8 м.м. + 27,2% фр. 4—2 м.м + 17% фр. 1—0,5 м.м + 15% фр. 0,25—0,1 . . . . .	18,90	19,85	— 0,9
36,72% фр. 16—8 м.м 24,48% фр. 4—2 м.м + 15,3% фр. 1—0,5 м.м + 13,5% 0,25—0,10 м.м + 10% фр. 0,05—0,01 м.м. . . . .	16,24	16,27	— 0,03

Эти же величины представлены в виде кривой 3 на диаграмме 9-ой.

Как видно из таблицы, пористость здесь также выражается формулой (II), приняв знаменателя отношения равным 0,82, и весовые количества фракций формулой (III) со знаменателем отношения 2/3.

Интересным представляется выяснить, который из трех рядов даст наименьшую пористость, если имеются фракции, употребляемые в грунтовых и гравийных дорогах, начиная от фракции 64—32 м.м и кончая фракцией 0,01—0,005 м.м.

ДИАГРАММА № 10.



В указанном интервале фракций можно получить смесь из фракций с отношением диаметров 16, из 4 членов, при отношении диаметров 8, смесь из 5 членов и, наконец, при отношении 4 из 7 членов; в первом случае минимальная пористость будет 4,5%, во втором случае она равна будет 7,1% и, наконец, в третьем ряде пористость равнялась бы 9,78; таким образом наиболее выгодной является смесь из фракций с отношением диаметров 16.

Бесовые количества фракций, входящих в эти смеси, наглядно видны из кривых диаграммы 10-ой. Кривая 1-ая дает представление о процентах фракций, взятых в смеси с отношением диаметров 16; кривая 2-ая с отношением 8 и кривая 3 с отношением 4.

### Влияние на пористость промежуточных фракций.

В виду того, что в естественных грунтах в большем или меньшем количестве имеется несколько рядом лежащих фракций, интересным является выяснить,— каким образом будет влиять на пористость смеси

присутствие промежуточных фракций. Комбинации, состоящие из 3-х фракций 16 — 8 *мм*, 4 — 2 *мм*, и 1 — 0,5 *мм* (см. табл. 12), дают минимальную пористость 24,5%, комбинации же из 2-х фракций 16 — 8 *мм* и 1 — 0,5 *мм* дают 19,58%.

Тоже самое вытекает из сравнения данных таблицы 5-ой и таблицы 10-ой; наименьшая пористость смеси фр. 16 — 8 + 1 — 0,5 *мм* (см. табл. 5) меньше пористости смеси из фракций 16 — 8 *мм* + 2 — 1 *мм* + 1 — 0,5 *мм*, в первой смеси наименьшая пористость 19,58%, тогда как во второй смеси она равна 21,39, т. е. больше первой на 1,81%. При чем пористость увеличивается с увеличением % промежуточной фракции в смеси, как это видно из таблицы 22.

Таблица № 22.

% фракций, входящих в смесь.			Пористость.
16 — 8 <i>мм</i>	4 — 2 <i>мм</i>	1 — 0,5 <i>мм</i>	—
70%	—	30%	19,58
60	10	30	22,53
50	20	30	23,54
40	30	30	24,40

Итак, внесение одной промежуточной фракции в смесь, состоящую из фракций с отношением диаметров 16, увеличивает пористость.

Этого увеличения пористости не наблюдается, если к смеси, кроме промежуточной фракции, будет прибавлена еще одна, имеющая диаметр в 16 раз меньший диаметра промежуточной и в том же весовом отношении, в каком находятся основные фракции.

Так были составлены 2 смеси: первая из 2-х фракций 16 — 8 *мм* и 1 — 0,5 *мм*, взятых в отношении 7:3 и вторая смесь из фракций 8 — 4 *мм*, 0,5 — 0,25 *мм*, взятых в тех же отношениях. Пористость первой смеси равнялась 19,58% и пористость второй — 20,84%. Затем эти две смеси смешивались между собой в разных отношениях; полученные пористости приведены на таблице 23, где *A* обозначает первую смесь и *B* вторую.

Таблица № 23.

Состав смеси.		Пористость смеси, полученная опытом.	Пористость, вычисленная из исходных смесей.
% смеси A.	% смеси B.		
100	—	19,58	—
80	20	19,95	19,91
66,66	33,33	19,44	20,18
50	50	19,25	20,41
—	100	21,24	—

Как видно из таблицы, пористости всех полученных смесей очень близки между собой и разность между ними и вычисленными не пре-восходит предельной ошибки опыта.

Если взять ту же исходную смесь А состоящую из фр. 16—8 и 1—0,5 *м.м.*, но с другими весовыми отношениями входящих в нее фракций, и смешивать ее со смесью В из фракций 8—4 и 0,5—0,25, в которой отношение фракций такое же, как и в исходной смеси, то прибавка этой смеси В не изменяет пористости исходной смеси А.

Так были составлены смеси (*A*) из фракций 16—8 и 1—0,5 *м.м.* с отношением весов: в одном случае 75:25, в другом 70:30 и в третьем — 65:35, пористость в первом случае была 20,4, во втором 19,58 и в третьем 20,7. К этим смесям затем были прибавлены две фракции 8—4 и 0,5—0,25 *м.м.*; взятые в тех же весовых отношениях, как и первые; так напр. к смеси из фракций 17—8 и 1—0,5 *м.м.*, взятых в отношении 75:25, прибавлена смесь из фракций 8—4 и 0,5—0,25 *м.м.*, взятых в отношении таком же 75:25. Соответствующие пористости получились 19,9; 19,25 и 19,49. Эти пористости мало отличаются от пористостей соответствующих смесей *A*. Смеси *A* и *B* брались в равных количествах.

Если фракции 8—4 и 0,5—0,25 *м.м.* заменить другими, но с тем же отношением диаметров, и их прибавлять к исходной смеси *A*, взяв в тех же весовых отношениях, в каких находятся фракции в смеси *A*, то пористость смеси *A* также не изменится. Так, к смеси *A*, в которой фракции 16—8 и 1—0,5 *м.м.* были взяты в отношении: 70:30 и 66:34 и имели пористость: 19,58 и 20,45, прибавлялись фракции 4—2 и 0,25—0,1 *м.м.*, взятые в тех же отношениях, пористости при этом получались 20,0 и 20,27; эти величины почти совпадают с пористостями соответствующих смесей *A*.

Итак, на основании этих опытов, можно полагать:

Если имеется смесь из нескольких фракций, с одним и тем же отношением диаметров и взятых в определенных весовых отношениях, и к этой смеси прибавлена другая, состоящая из такого же количества других фракций, имеющих те же весовые и размерные отношения, как и в исходной смеси, то пористость полученной смеси будет равна пористости исходной.

### Влияние на пористость прибавок глинистых частиц.

До сих пор рассматривались пористости смесей, составленных из гравелистых, песчаных и пылеватых фракций; интересным представляется выяснить, как будут влиять на пористость глинистые частицы, по своим физическим свойствам совершенно отличные от остальных.

Уже на основании предыдущих опытов можно считать, что при прибавках глинистых частиц изменение пористости не будет подчиняться тем законностям, какие наблюдались при смешении фракций более крупных; так, например, смесь из 60% фр. 2—1; 30% 0,05—0,01 *м.м.* и 10% каол. дает пористость 23,91. Смесь же из 65% фракции 2—1 и 35% фр. 0,05—0,01 *м.м.* равна 23,68% (см. табл. 3). Таким образом прибавка каолина, в котором 88,63% частиц < 0,001 *м.м.*, т. е. частиц, диаметр которых в 50 раз мельче диаметра пылеватой фракции смеси, не дало никакого уменьшения пористости.

С целью выяснить влияние разных добавок глинистых частиц была определена пористость одной и той же смеси, содержащая разные количества Глуховского каолина, а именно была взята смесь из 70% фр. 2—1 *мм* и 30% фр. 0,25—0,1 *м* к ней прибавлялся каолин. Результаты опытов приводятся на таблице 24-ой.

Таблица № 24.

% смеси из (70% фр. 2-1 + + 30% фр. 0,25— 0,1).	% каолина.	Пористость смеси
100	—	24,93
95	5	22,56
90	10	22,45
85	15	21,07
80	20	22,83
70	30	23,99
60	40	25,84

Как видно из таблицы, прибавка каолина до 15% немножко уменьшает пористость, дальнейшие же прибавки начинают ее увеличивать. Но уменьшение пористости не то, какого можно было бы ожидать на основании величины частиц каолина. В каолине частиц  $< 0,01 \text{ м} \text{м}$  97,5%, т. е. практически все частицы в нем мельче фракции 0,25—0,1 *мм* более чем в 25 раз и, на основании формулы II, его прибавка должна была бы уменьшить пористость на 12,46%, в действительности она уменьшилась только на 3,86%. Это очевидно объясняется тем, что частицы каолина и всякой другой глинистой субстанции обладающие липкостью, не столько заполняют поры, сколько обволакивают частицы пыли и песка со всех сторон и через это раздвигают их.

\*  
2-я типография  
Транспечати НКПС.  
Ленинград  
Ул. Правды, 15.  
Главлит № А 4424.  
Тираж 1.500 экз. 2 л.  
Заказ № 8704.