

В. Г. САМОЙЛОВ

## ИЗМЕНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВ ПОД ВЛИЯНИЕМ ПРОДУКТОВ ГИДРОЛИЗА ПОРТЛАНД-ЦЕМЕНТА

До сих пор для механической прочности оснований автодорог укладывался бетон, для производства которого требуется, кроме цемента, песок, гравий, щебень и т. п.

Подвозка большого количества этих материалов в значительной мере замедляет и удорожает строительство.

В связи с этим вытекает необходимость использования под основания дорог естественных грунтов на месте постройки, придав им неразмокаемость и достаточную механическую прочность в водонасыщенном состоянии.

В целях изменения физико-механических свойств глинистых и суглинистых грунтов советскими грунтоведами (проф. М. М. Филатов [1] и др.) в числе многих других методов был предложен метод цементации грунтов портланд-цементом как химически активным и гидравлически вяжущим веществом.

Известно, что гидравлически вяжущие вещества способны затвердевать из жидкого или тестообразного состояния в камневидное тело не только на воздухе, но и в воде [8].

В выполненных под руководством проф. М. М. Филатова трудах Д. А. Рождественского [2] и Б. Л. Шкляринского [3] в 1938—1941 гг., а также в работах проф. С. С. Морозова [4] и В. М. Безрук [5, 6] в 1941—1944 гг., была доказана возможность цементации песчаных, супесчаных, пылевато-суглинистых, подзолистых и черноземных грунтов. В этих работах выяснены также методы приготовления и испытаний грунтово-цементных смесей в лабораторных и полевых условиях.

Однако остались неизученными многие важнейшие вопросы:

1. Характер взаимодействия продуктов гидролиза портланд-цемента с активными компонентами грунтов (глинисто-коллоидальными частицами, солями, кислотами, органическими веществами, минералами, поверхностями частиц и т. д.).

2. Степень влияния химико-минералогического и гранулометрического состава грунтов на изменение физико-механических свойств грунтов при их взаимодействии с продуктами гидролиза портланд-цементов.

3. Влияние среды и времени на свойства грунтово-цементных смесей в процессе их использования или хранения и т. д.

Наши исследования проводились с 1944 г. по 1949 г. на кафедре грунтоведения МГУ. Мы поставили перед собой задачу выяснить характер взаимодействия продуктов гидролиза портланд-цемента с активными компонентами типичных грунтов северной и южной полос Советского Союза.

Вместе с этим мы ставили своей задачей выяснение степени влияния химико-минералогического состава гранулометрических фракций на изменение физико-механических свойств этих грунтов при их взаимодействии с продуктами гидролиза портланд-цемента.

Мы исходили из того, что в затворенных водой грунтово-цементных смесях со стороны грунтов в химических и физико-химических реакциях взаимодействия будут принимать участие активные компоненты сложного химико-минералогического состава, различной степени раздробленности, а со стороны портланд-цемента в этих реакциях взаимодействия будут участвовать продукты гидролиза его минералов.

Из работ С. Д. Огорокова [7] и других авторов известно, что портланд-цементы состоят из следующих основных минералов:

трехкальциевого силиката— $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	}	до 75%
двухкальциевого силиката— $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$		
трехкальциевого алюмината— $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	}	до 25%
пятикальциевого триалюмината— $5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$		
четырекальциевого алюмоферрата— $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$		

Эти главнейшие минералы портланд-цемента состоят, как видно, из следующих окислов:  $\text{CaO}$ —до 66%;  $\text{SiO}_2$ —до 21%;  $\text{Al}_2\text{O}_3$ —до 7%;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ —до 3% и других примесей.

Исходя из такого состава портланд-цемента, проф. Б. Г. Скрамтаев [8] и другие исследователи цементов считают, что вяжущие и гидравлические свойства портланд-цементного вещества зависят от соотношения в нем вяжущих и гидравлических факторов. При этом вяжущие факторы зависят от количества окиси кальция— $\text{CaO}$ , а гидравлические—от количества кремнезема и глинозема, т. е.  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ . Соотношение вяжущих и гидравлических свойств в цементном веществе характеризуется разностью вяжущих и гидравлических факторов:  $\text{CaO} - (\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ . Если эта разность будет меньше нуля, то вяжущие свойства цементного вещества исчезают, и оно превращается в гидравлическую добавку.

Иначе говоря, при затворении портланд-цемента водой вяжущие и гидравлические свойства продуктов его гидролиза зависят от соотношения в них количества окиси кальция и количества кремнезема и глинозема, выделяющихся в виде гидратов или алюмосиликатов кальция и других соединений при гидролизе вышеупомянутых главнейших минералов.

В связи с этим обозначим нормальное соотношение вяжущих и гидравлических свойств продуктов гидролиза портланд-цемента в грунтово-цементных смесях через следующее выражение:

$$f(\text{CaO}) - [f(\text{SiO}_2) + f(\text{Al}_2\text{O}_3)] = X.$$

Из этого соотношения следует, что в тех случаях, когда по каким-либо причинам количество кальция в продуктах гидролиза портланд-цемента в грунтово-цементных смесях окажется меньше нормального, и эта разность станет меньше  $X$ , или  $X$  будет стремиться к нулю, тогда вяжущие

свойства продуктов гидролиза портланд-цемента понизятся. Если количество кальция в продуктах гидролиза портланд-цемента станет таким, что эта разность будет меньше нуля, тогда продукты гидролиза будут обладать только гидравлическими, а не вяжущими свойствами.

Отдельные минералы портланд-цемента при их гидролизе могут, как известно, выделять следующие продукты:

1.  $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 4,5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O} + 2\text{Ca}(\text{OH})_2$ ;
2.  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + 3,5\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O} + \text{Ca}(\text{OH})_2$ ;
3.  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 + 6\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{Ca}(\text{OH})_2 + 2\text{Al}(\text{OH})_3$  и т. д.

Поскольку глинисто-коллоидальная часть грунтов при химических и физико-химических реакциях, в процессах коагуляции и агрегирования способна поглощать [9] из растворов кальция больше обменного количества, то, видимо, и в грунтово-цементных смесях из глинистых и суглинистых грунтов поглощается часть кальция из продуктов гидролиза портланд-цемента.

В этом случае нормальное соотношение вяжущих и гидравлических свойств продуктов гидролиза портланд-цемента в той или иной мере нарушится в сторону уменьшения вяжущих свойств, т. е.

$$f(\text{CaO}) - [f(\text{SiO}_2) + f(\text{Al}_2\text{O}_3)] < X.$$

При этом степень уменьшения вяжущих свойств продуктов гидролиза портланд-цемента в грунтово-цементных смесях будет обуславливаться количеством кальция (не только обменного) в глинистых и суглинистых грунтах, подвергаемых цементации.

В верхних горизонтах естественных глинистых и суглинистых грунтов северной полосы (подзолистые почвы) кальция практически отсутствует, а водный раствор этих грунтов имеет кислотный характер. Глинистые и суглинистые грунты южной полосы (сероземы, лессы) имеют в своем составе значительное количество поглощенного кальция, а также карбонатов кальция и других соединений.

Следовательно, и прочность грунтово-цементных смесей из этих грунтов при одних и тех же дозировках портланд-цемента нужно ожидать различную: большую—у грунтово-цементных смесей из карбонатных суглинистых и глинистых грунтов южной полосы, и меньшую у грунтово-цементных смесей из бескарбонатных суглинистых и глинистых грунтов северной полосы, водный раствор которых имеет кислую реакцию.

Вместе с этим прочность грунтово-цементных смесей, видимо, будет обуславливаться еще прочностью и устойчивостью микроагрегатов, а также влиянием другого состава грунтов на продукты гидролиза портланд-цемента, например, ионов водорода, натрия и других, выделяющихся из грунтов, наконец, силой необратимого сцепления и связности новообразований из продуктов гидролиза портланд-цемента и химико-минералогического состава гранулометрических фракций грунтов.

Все эти соображения явились предпосылкой нашей экспериментальной работы.

#### ХАРАКТЕРИСТИКА ИСХОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ, ВЗЯТЫХ ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

В соответствии с поставленными задачами для экспериментальной работы были взяты следующие грунты:

а) Северной полосы Советского Союза

1. Горизонты  $A_1 + A_2$  подзолистой почвы, развитой на бескарбонатном покровном суглинке, с глубины от 0 до 35 см. В дальнейшем будем называть этот грунт просто «подзол».

2. Покровный бескарбонатный суглинок с глубины от 90 до 125 см.

3. Моренный бескарбонатный суглинок с глубины от 300 до 330 см.

б) Южной полосы Советского Союза

4. Серозем карбонатный, развитый на карбонатном лессовидном суглинке, с глубины от 0 до 20 см.

5. Солончак карбонатный, содовый, развитый на карбонатном суглинке, с глубины от 0 до 35 см.

6. Лесс суглинистый, карбонатный с глубины от 200 до 245 см.

в) Глины разного минералогического состава

7. Бентонитовая глина третичного возраста, карьерная, слабокарбонатная, называемая просто бентонит.

8. Каолиновая глина четвертичного возраста, карьерная, слабокарбонатная, называемая просто каолин.

Гранулометрический состав, химический состав и физические свойства этих грунтов видны из данных табл. 1, 2 и 3.

Таблица 1

Гранулометрический состав грунтов по Робинзон-Земятченскому (с добавкой аммиака при кипячении) в % сухой навески

№ п/п.	Название грунта	Глубина взятия образца в см	Гранулометрические фракции диаметром в мм								всего
			от 1 до 0,5 мм	от 0,5 до 0,25 мм	от 0,25 до 0,1 мм	от 0,1 до 0,05 мм	от 0,05 до 0,01 мм	от 0,01 до 0,005 мм	от 0,005 до 0,001 мм	меньше 0,001 мм	
1	Подзол . . .	0—35	0,69	1,12	1,14	7,54	44,48	30,48	3,83	10,72	100
2	Покровный суглинок . .	90—125	0,40	0,97	1,17	1,56	37,70	24,60	10,20	23,40	100
3	Моренный суглинок .	300—330	1,83	14,23	28,82	14,92	13,96	17,12	3,52	5,60	100
4	Серозем . . .	0—20	0,00	3,83	8,07	41,07	16,09	12,61	4,71	13,62	100
5	Солончак . . .	0—35	0,00	0,00	8,64	12,15	34,28	15,82	3,82	25,32	100
6	Лесс . . . . .	200—245	0,00	7,43	12,00	12,41	31,84	19,92	5,44	10,96	100
7	Бентонитовая глина . . . .	карьерн.	0,00	0,00	1,12	1,48	9,00	23,20	11,30	53,90	100
8	Каолин . . . .	карьерн.	0,00	0,00	1,10	1,00	54,60	35,00	3,00	5,30	100

Портланд-цемент был взят нормальный, марки «400».

**СПОСОБЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ГРУНТОВО-ЦЕМЕНТНЫХ СМЕСЕЙ**

Для определения физико-механических свойств грунтово-цементных смесей готовились образцы по способу, установившемуся на кафедре грунтоведения МГУ. Он заключается в следующем: грунты в воздушно-сухом состоянии растираются и просеиваются через сито с круглыми миллиметровыми отверстиями.

## Физические свойства грунтов

№ п/п.	Название грунта	Глубина взятия образца	Удельный вес	Объемный вес брикетов	Пористость брикетов в %	Гигроскопическая вода в %	Константы Аттерберга			Набухаемость в % (приращение на ед- ницу первоначального объема)	Линейная усадка с нарушенной струк- турой в %	Временное сопротив- ление сжатию брике- тов в кг/см <sup>2</sup>	Скорость размокания брикетов в минутах
							нижняя граница текучести	граница раска- тывания в шнур	число пластич- ности				
1	Подзол . . . . .	0—35	2,50	1,79	30,80	3,00	28,67	18,67	10,0	22,20	4,00	29,0	20
2	Покровный су- глинок . . . . .	90—125	2,50	2,10	20,00	4,76	37,09	15,12	21,97	58,30	10,00	86,0	20
3	Моренный сугли- нок . . . . .	300—330	2,66	2,20	20,30	3,68	30,10	10,10	20,00	53,30	7,84	50,0	15
4	Серозем . . . . .	0—20	2,78	2,01	28,41	0,97	24,16	14,07	10,09	40,00	2,00	28,0	25
5	Солончак . . . . .	0—35	2,73	2,09	25,60	2,71	34,50	10,39	24,11	207,00	7,80	70,0	270
6	Лесс . . . . .	200—245	2,50	2,08	20,00	2,60	26,85	10,82	16,03	37,50	4,00	50,0	18
7	Бентонит . . . . .	карьерн.	2,47	1,57	43,31	12,20	127,39	42,57	84,82	625,00	19,80	45,0	10
8	Каолин . . . . .	карьерн.	2,47	1,54	39,60	3,35	44,41	32,89	11,52	12,50	3,92	9,0	13

Таблица 3

№ п/п	Название грунта	Глубина, взятия образца в см.	Гигроскопическая вода в %	Составные части									Потери от прокалив- ния	Емкость поглощения в м. э. на 100 г сухой навески	рН Хингидрон- ный метод		
				SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	CaO	MgO	гумус	CO <sub>2</sub> карбонатов	CaCO <sub>3</sub> по CO <sub>2</sub> карбонатов			водной вытяжки	солевой вытяжки	
8	Каолин	карьерн.	5'11	1'24	30'00	3'32	11'11	35'88	11'25	15'20							
1	Бентонит	карьерн.	5'11	1'24	13'31	15'50	151'38	15'21	21'25	21'25							
2	Лесс	500—512	5'20	5'08	50'00	5'00	50'82	10'85									
3	Солончак	0—32	5'13	3'00	52'00	5'21	31'20										
3	Сбросовый	0—50	5'13	3'00	58'11	0'11											
3	Моренный суглинок	300—330	5'13	3'00	50'30												
3	Линдоч	80—132	5'20	5'10													
1	Подзол	0—35	3,00	79,52	3,45	8,42	1,03	0,80	0,52	1,32	0,30	0,69	10,08	10,50	4,93	4,14	
2	Покровный суглинок	90—125	4,76	72,49	4,99	11,80	0,26	0,74	1,11	—	0,36	0,82	7,42	18,7	4,58	3,58	
3	Моренный суглинок	300—330	3,68	76,50	3,40	8,70	—	1,89	1,13	—	0,27	0,62	8,11	18,8	5,78	4,02	
4	Серозем	0—20	0,97	63,08	3,67	12,82	0,05	7,42	1,92	0,40	5,94	13,50	8,35	4,8	7,44	—	
5	Солончак	0—35	2,71	68,61	1,96	12,58	0,05	4,46	2,01	0,88	2,87	6,52	8,15	16,5	8,54	—	
6	Лесс	200—245	2,60	72,94	2,40	9,36	—	5,23	1,88	—	4,25	9,64	6,78	10,5	7,91	—	
7	Бентонит	карьерн.	12,20	67,88	0,56	16,47	—	1,81	3,65	—	0,27	0,61	6,58	70,8	7,66	—	
8	Каолин	карьерн.	3,35	41,67	—	34,36	—	5,16	1,03	—	1,40	3,19	12,21	2,5	7,32	—	

В определенную навеску (100, 200 или 300 г) просеянного грунта вносится нужный весовой процент портланд-цемента и тщательно перемешивается до однородной на вид смеси. К этой смеси приливается дистиллированная вода в количестве, которое отвечает заранее определенной «влажности рабочего состояния» грунтово-цементной смеси.

После приливания дистиллированной воды грунтово-цементная смесь тщательно перемешивается, а затем укладывается в специальные формы для приготовления цилиндрических образцов, диаметр и высота которых после прессования равны 25 мм. Нагрузка при уплотнении образца дается из расчета 30 кг/см<sup>2</sup> в течение 5 минут. Приготовленные таким способом грунтово-цементные образцы помещаются во влажную среду (в эксикатор над водой, во влажные опилки, или над водой в закрывающемся ящике) на 7 суток, затем в течение 7 суток просушиваются в воздушно-сухой среде, после чего подвергаются различным испытаниям.

### РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛАВНЕЙШИХ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГРУНТОВО-ЦЕМЕНТНЫХ СМЕСЕЙ

Главнейшими физико-механическими свойствами грунтово-цементных смесей являются прочность в воздушно-сухом и особенно в водонасыщенном состоянии, морозостойчивость и т. д.

Количественное определение этих свойств дает возможность судить о характере взаимодействия продуктов гидролиза портланд-цемента с активными компонентами глинистых и суглинистых грунтов, а также о влиянии химико-минералогического состава грунтов на свойства грунтово-цементных смесей из них.

Испытания на водостойкость показали, что образцы грунтово-цементных смесей из подзола с дозировкой портланд-цемента 3% распались через месяц после их погружения в воду, а с дозировками 6% и выше сохранились; образцы грунтово-цементных смесей из покровного суглинка с дозировками портланд-цемента 3 и 6% распались через сутки после их погружения в воду, а с дозировками 9% и выше сохранились и после месячного водонасыщения; образцы грунтово-цементных смесей из моренного суглинка с дозировками портланд-цемента 3 и 6% распались через сутки после их погружения в воду, с дозировкой 9% распались через месяц, а с дозировкой 12% и выше сохранились и после месячного водонасыщения; образцы грунтово-цементных смесей из серозема с дозировкой портланд-цемента 3% и выше сохранились после суточного и месячного водонасыщения; образцы грунтово-цементных смесей из солончака с дозировками портланд-цемента 3% распались через сутки после погружения в воду, а с дозировками 6% и выше сохранились и после месячного водонасыщения; образцы грунтово-цементных смесей из лесса с дозировками портланд-цемента 3% распались через сутки после их погружения в воду, а с дозировками 6% и выше сохранились и после месячного водонасыщения; образцы грунтово-цементных смесей из каолина с дозировками портланд-цемента 3% распались через сутки после их погружения в воду, с дозировками 6% распались через месяц, а с дозировками 9% и выше сохранились после суточного и месячного водонасыщения; образцы грунтово-цементных смесей из бентонитовой глины с дозировками портланд-цемента от 3 до 24% распались через 20 минут после погружения их в воду, т. е. оказались неводостойкие. Это явление, на объяснении которого мы остановимся несколько ниже, чрезвычайно интересно и важно для грунтово-цементных смесей.

Результаты испытаний на прочность приводятся в табл. 4.

## Прочность на сжатие грунтово-цементных смесей в воздушно-сухом состоянии после суточного и месячного водонасыщения

№ п/п.	Название грунта	Временное сопротивление сжатию грунтово-цементных смесей в кг/см <sup>2</sup>																							
		цемента 3%			цемента 6%			цемента 9%			цемента 12%			цемента 15%			цемента 18%			цемента 21%			цемента 24%		
		воздушно-сухие	после суточного водонасыщения	после месячного водонасыщения	воздушно-сухие	после суточного водонасыщения	после месячного водонасыщения	воздушно-сухие	после суточного водонасыщения	после месячного водонасыщения	воздушно-сухие	после суточного водонасыщения	после месячного водонасыщения	воздушно-сухие	после суточного водонасыщения	после месячного водонасыщения	воздушно-сухие	после суточного водонасыщения	после месячного водонасыщения	воздушно-сухие	после суточного водонасыщения	после месячного водонасыщения	воздушно-сухие	после суточного водонасыщения	после месячного водонасыщения
1	Подзол . . . . .	13	2	0	15	6,0	9	16	8	10	19	10	15	20	12	16	30	13	18	25	14	20	33	15	22
2	Покровный суглинок	50	0	0	45	0	0	40	2	11	40	10	27	40	16	32	55	22	48	50	33	63	65	35	70
3	Моренный суглинок .	35	0	0	50	0	0	55	3	0	60	5	5	60	10	17	80	12	51	80	14	65	80	16	80
4	Серозем . . . . .	52	15	30	54	25	45	70	30	75	100	38	85	110	65	113	150	70	143	155	83	148	170	88	160
5	Солончак . . . . .	60	0	0	85	11	12	95	31	33	100	45	65	115	60	90	100	50	70	110	65	100	110	75	135
6	Лесс . . . . .	53	0	0	70	17	19	90	25	28	100	30	68	123	35	100	140	45	135	125	35	120	120	40	150
7	Бентонит . . . . .	50	0	0	50	0	0	50	0	0	50	0	0	63	0	0	93	0	0	88	0	0	95	0	0
8	Каолин . . . . .	23	0	0	34	3	0	38	9	25	55	15	35	60	19	40	65	30	58	80	40	70	85	50	100

Примечание. Нулем обозначены образцы, распавшиеся в воде.

Из данных табл. 4 видно, что прочность на сжатие грунтово-цементных смесей в воздушно-сухом состоянии, особенно после суточного и месячного водонасыщения, различная. Это различие заключается в следующем:

1. При одних и тех же дозировках портланд-цемента прочность грунтово-цементных смесей из грунтов южной полосы, т. е. из серозема, солончака и лесса, выше, чем прочность грунтово-цементных смесей из грунтов северной полосы, т. е. из подзола, покровного суглинка и моренного суглинка.

Это подтверждает изложенные нами выше соображения о том, что прочность грунтово-цементных смесей из грунтов со значительным содержанием кальция и его карбонатов должна быть выше, чем прочность грунтово-цементных смесей из бескарбонатных и обедненных кальцием грунтов, так как в первом случае нормальное соотношение вяжущих и гидравлических свойств продуктов гидролиза портланд-цемента, выражаемое разностью

$$f(\text{CaO}) - [f(\text{SiO}_2) + \text{Al}_2\text{O}_3] = X,$$

нарушается меньше, чем во втором случае.

Чтобы проверить еще раз справедливость этого вывода, нами проделан следующий дополнительный опыт: в подзол и покровный суглинок мы внесли сначала по 3% химически чистого гидрата окиси кальция  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и после тщательного перемешивания затворили водой до текучего состояния. Затем эти грунты просушивались, растирались и просеивались через сито с миллиметровыми отверстиями. Из приготовленных таким путем грунтов были сделаны образцы грунтово-цементных смесей по вышеописанному способу с дозировками нашего портланд-цемента 12 и 18%.

Результаты испытания этих грунтово-цементных смесей на временное сопротивление сжатию в воздушно-сухом состоянии и после суточного водонасыщения показали следующее:

С дозировкой портланд-цемента 12% грунтово-цементные смеси из подзола с добавкой 3% гидрата окиси кальция имели временное сопротивление сжатию в воздушно-сухом состоянии  $36 \text{ кг/см}^2$  и после суточного водонасыщения— $15 \text{ кг/см}^2$ , а без добавки гидрата окиси кальция соответственно имели только 18 и  $10 \text{ кг/см}^2$ ; грунтово-цементные смеси из покровного суглинка с добавкой 3% гидрата окиси кальция и дозировкой портланд-цемента 12% имели временное сопротивление сжатию в воздушно-сухом состоянии  $45 \text{ кг/см}^2$  и после суточного водонасыщения— $26 \text{ кг/см}^2$ , а без добавки гидрата окиси кальция соответственно имели только 40 и  $10 \text{ кг/см}^2$ .

С дозировкой портланд-цемента 18% грунтово-цементные смеси из подзола с добавкой 3% гидрата окиси кальция имели временное сопротивление сжатию в воздушно-сухом состоянии  $38 \text{ кг/см}^2$  и после суточного водонасыщения— $26 \text{ кг/см}^2$ , а без добавки гидрата окиси кальция соответственно имели только 30 и  $13 \text{ кг/см}^2$ ; грунтово-цементные смеси из покровного суглинка с добавкой 3% гидрата окиси кальция и дозировкой портланд-цемента 18% имели временное сопротивление сжатию в воздушно-сухом состоянии  $60 \text{ кг/см}^2$  и после суточного водонасыщения— $32 \text{ кг/см}^2$ , а без добавки гидрата окиси кальция соответственно имели только 55 и  $22 \text{ кг/см}^2$ .

Введением гидрата окиси кальция в подзол и покровный суглинок мы вызвали обменные реакции, при которых часть катионов кальция поглотилась этими грунтами. В то же время мы понизили кислотность этих грунтов и нейтрализовали действие ионов водорода. Когда после этого был внесен портланд-цемент, то кальция этими грунтами из продуктов его гидролиза поглотилось меньше. Следовательно, в этом случае нормальное соотношение вяжущих и гидравлических свойств продуктов гидролиза цемента в грунтово-цементных смесях нарушилось меньше, а количество микроагрегатов, насыщенных кальцием, стало больше. Вследствие

этого и прочность грунтово-цементных смесей с добавками 3% гидрата окиси кальция стала выше.

Таким образом, и дополнительный опыт подтверждает высказанные нами выше соображения о большем нарушении нормального соотношения вяжущих и гидравлических свойств продуктов гидролиза портланд-цемента в грунтово-цементных смесях из бескарбонатных грунтов северной полосы с кислой реакцией их водного раствора (см. рН в табл. 3).

В то же время все это подтверждает влияние химико-минералогического состава грунтов на изменение физико-механических свойств грунтово-цементных смесей из них.

2. Чем выше дозировка портланд-цемента в грунтово-цементных смесях, тем выше их прочность.

Это также указывает на два важных явления.

Во-первых, при больших дозировках портланд-цемента выделяется большее количество продуктов гидролиза портланд-цемента и, следовательно, большее количество активных компонентов грунта вступает с ними во взаимодействие, больше получается новообразований с новыми физико-механическими свойствами (неразмокаемостью, механической прочностью, гидравлическостью и т. д.).

Во-вторых, кальция в продуктах гидролиза портланд-цемента после его поглощения активными компонентами грунтов в этом случае остается больше, а из этого следует, что вяжущие свойства этих продуктов гидролиза портланд-цемента понижаются меньше и прочность грунтово-цементных смесей становится выше.

3. Прочность грунтово-цементных смесей со всеми дозировками портланд-цемента в воздушно-сухом состоянии и после месячного водонасыщения выше, чем после суточного водонасыщения (кроме бентонитовой глины).

Объяснения этому мы находим в следующих явлениях. При затворении грунтово-цементных смесей водой и последующей их гидратации мельчайшие частицы минералов трехкальциевого силиката, трехкальциевого алюмината и пятикальциевого триалюмината портланд-цемента разлагаются быстрее, чем частицы других минералов, а тем более крупного размола [7, 8]. Малые дозировки портланд-цемента и неполное разложение его частиц обуславливают недостаточное количество продуктов его гидролиза в грунтово-цементных смесях. Поэтому во взаимодействие с продуктами гидролиза портланд-цемента вступают не все глинисто-коллоидальные частицы и другие активные компоненты грунтов, а только какая-то часть из них, другая же часть глинисто-коллоидальных частиц остается со своими прежними свойствами гидрофильности.

При суточном водонасыщении грунтово-цементных смесей остатки глинисто-коллоидальных частиц в них гидратируются, набухают и этим вызывают ослабление сцепления и связности, вследствие чего прочность грунтово-цементных смесей после суточного водонасыщения понижается. Неразложившиеся же частицы портланд-цемента в грунтово-цементных смесях не успевают за суточное водонасыщение разложиться. Но в течение месячного водонасыщения они, подвергаясь гидратации, выделяют продукты гидролиза. Эти дополнительные продукты гидролиза портланд-цемента и обуславливают увеличение новообразований с необратимым сцеплением и связностью, а отсюда — увеличение прочности грунтово-цементных смесей после месячного водонасыщения.

4. Грунтово-цементные смеси из каолина с дозировками портланд-цемента от 9 до 24% после суточного и месячного водонасыщения не только внешне сохранились, но и обладали прочностью на сжатие от 25 до 100 кг/см<sup>2</sup>. Грунтово-цементные смеси из бентонита с дозировками портланд-

цемента от 3 до 24%, как уже отмечалось выше, распались через 20 минут после погружения их в воду.

Как известно, основная масса каолина состоит из минералов каолиновой группы, а у бентонита основная масса состоит из минералов монтмориллонитовой группы. Отличительной чертой минералов монтмориллонитовой группы является то, что пакеты их кристаллической решетки обладают свойствами подвижности. Это обуславливает способность таких частиц поглощать большое количество воды и сильно набухать (см. табл. 2) не только за счет гидратации их поверхности, но и за счет проникновения воды в межпакетное пространство кристаллической решетки [10].

При сильном набухании таких частиц создается большое давление, разрушающее сцепление и связь между отдельными частицами или агрегатами в грунтово-цементных смесях из бентонитовой глины.

Минералы каолиновой группы не обладают такой подвижностью кристаллической решетки, как минералы монтмориллонитовой группы. Поэтому грунтово-цементные смеси из каолина с дозировками портланд-цемента от 9% и выше после месячного водонасыщения обладают большей прочностью.

Из этого следует, что если в глинистых и суглинистых грунтах будет содержаться значительное количество минералов монтмориллонитовой группы и они будут обладать большой набухаемостью, то грунтово-цементные смеси из таких грунтов в водонасыщенном состоянии не будут иметь достаточного сцепления, связности и прочности.

5. Грунтово-цементные смеси из солончака, в составе которого имеется натрий в обменном состоянии и в виде карбонатов натрия, имеют значительно большую прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии, чем грунтово-цементные смеси из подзола, из покровного и моренного суглинков, в составе растворов которых имеется значительное количество ионов водорода (см. рН в табл. 3), а также активного кремнезема и глинозема, усиливающих гидравлический фактор и ослабляющих вяжущий фактор.

Это указывает на следующие важные явления:

В о-п е р в ы х, наличие в небольших количествах солей карбонатов натрия в грунте не является вредным фактором для производства грунтово-цементных смесей из таких грунтов и не мешает нарастанию их прочности в водонасыщенном состоянии.

В о-в т о р ы х, ионы водорода, а также активный кремнезем и глинозем, выделяемые в раствор грунтами с кислой реакцией (подзол, моренный суглинок, покровный суглинок), видимо, значительно понижают вяжущие свойства продуктов гидролиза портланд-цемента в грунтово-цементных смесях из таких грунтов и мешают процессам кристаллизации и твердения новообразований в них.

6. Величина прочности на сжатие у грунтово-цементных смесей после месячного водонасыщения, особенно с дозировками портланд-цемента от 15 до 24%, примерно такая же, как у бетонов (т. е. 90—160 кг/см<sup>2</sup> у грунтово-цементных смесей из карбонатных грунтов южной полосы, и от 16 до 80 кг/см<sup>2</sup> у грунтово-цементных смесей из бескарбонатных грунтов северной полосы).

Это указывает на то, что грунтово-цементные смеси могут быть использованы для оснований дорог и аэродромов, а также как строительные материалы в виде безобжигового кирпича или грунтоблоков и т. п.

Результаты испытаний на морозоустойчивость помещены в табл. 5.

Из данных табл. 5 видно следующее:

1. Грунтово-цементные смеси из карбонатных грунтов южной полосы (серозем, солончак, лесс) проявили достаточную морозоустойчивость



с дозировками портланд-цемента от 9 до 24% и имели прочность на сжатие в водонасыщенном состоянии после 12 циклов испытаний на морозоустойчивость от 5 до 80 кг/см<sup>2</sup>.

2. Грунтово-цементные смеси из бескарбонатных грунтов северной полосы (подзол, покровный и моренный суглинки) с дозировками портланд-цемента от 12 до 24% оказались менее морозоустойчивыми (а из моренного суглинка практически совсем не морозоустойчивыми). Прочность на сжатие этих грунтово-цементных смесей в водонасыщенном состоянии после 12 циклов испытаний на морозоустойчивость не превысила 20 кг/см<sup>2</sup>.

3. Грунтово-цементные смеси из каолина с дозировками портланд-цемента до 24% не выдержали 12 циклов испытаний на морозоустойчивость, хотя после месячного водонасыщения имели прочность на сжатие до 100 кг/см<sup>2</sup>.

4. Из данных морозоустойчивости грунтово-цементных смесей следует, что сила необратимого сцепления и связности в грунтово-цементных смесях не одинакова и при одних и тех же дозировках портланд-цемента зависит от химико-минералогического состава гранулометрических фракций грунтов.

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

1. Под влиянием продуктов гидролиза портланд-цемента марки «400» в грунтово-цементных смесях с дозировками цемента свыше 6% физико-механические свойства грунтов изменяются; грунты приобретают необратимое сцепление и связность, свойства неразмокаемости, механическую прочность в водонасыщенном состоянии, гидравличность, морозоустойчивость и т. п.

2. Наибольшая водостойкость, механическая прочность в водонасыщенном состоянии и морозоустойчивость у грунтов в грунтово-цементных смесях, приобретаемые при дозировках портланд-цемента свыше 15%, зависят от химико-минералогического состава грунтов (при одном и том же составе и дозировках портланд-цемента).

3. Грунтово-цементные смеси из карбонатных грунтов южной полосы (серозем, солончак, лесс) обладают большей водостойкостью, механической прочностью в водонасыщенном состоянии, морозоустойчивостью и т. д., чем грунтово-цементные смеси из бескарбонатных грунтов северной полосы (подзол, покровный и моренный суглинки), если эти грунты не содержат значительного количества минералов монтмориллонита.

4. Грунты, обедненные кальцием и способные поглощать в грунтово-цементных смесях значительное количество кальция из продуктов гидролиза портланд-цемента, понижают тем самым вяжущие свойства в продуктах гидролиза портланд-цемента. Отсюда вытекает, что сила необратимого сцепления и связность, а следовательно, и прочность в грунтово-цементных смесях из таких грунтов, невысокие.

5. Наличие солей карбонатов натрия в грунте (содовый солончак) с примесью небольшого количества других солей не является вредным и препятствующим фактором для производства грунтово-цементных смесей из таких грунтов и нарастанию их прочности в водонасыщенном состоянии.

6. Ионы водорода, а также активный кремнезем и глинозем, находящиеся в растворе грунтов, понижают вяжущие свойства продуктов гидролиза портланд-цемента в грунтово-цементных смесях из таких грунтов (подзол, покровный и моренный суглинки) и тормозят процессы кристаллизации и твердения новообразований в них в первые сроки твердения.

7. Если в глинистых и суглинистых грунтах содержится значительное количество минералов монтмориллонитовой группы (как в бентонитовой

глине) и они способны к сильному увеличению своего объема при набухании, то грунтово-цементные смеси из таких грунтов будут не водостойкие и не морозостойкие.

8. Грунтово-цементные смеси из грунтов, в минеральном составе которых преобладает каолинит (каолиновые глины), приобретают свойства водоустойчивости и механической прочности в водонасыщенном состоянии, но имеют слабую морозоустойчивость.

9. Сила необратимого сцепления и связности новообразований в грунтово-цементных смесях не одинакова (судя по морозоустойчивости) и зависит не только от количества и качества продуктов гидролиза портланд-цемента (дозировки и степени гидролиза), но в значительной степени и от химико-минералогического состава гранулометрических фракций грунтов (пример с бентонитом, каолином, южными и северными грунтами).

10. Величина прочности на сжатие у грунтово-цементных смесей после месячного водонасыщения, особенно с дозировками портланд-цемента от 15 до 24%, примерно такая же, как у бетонов, т. е.  $90-160 \text{ кг/см}^2$  у грунтово-цементных смесей из карбонатных грунтов южной полосы и  $16-80 \text{ кг/см}^2$  у грунтово-цементных смесей из бескарбонатных грунтов северной полосы (подзолистой зоны).

Это дает возможность использовать такие грунтово-цементные смеси для оснований дорог и т. п.

В заключение выражаю искреннюю признательность своему руководителю, заведующему кафедрой грунтоведения МГУ, профессору, доктору С. С. Морозову.

Поступила в редакцию  
4.7.1949 г.

Кафедра  
грунтоведения геологического  
факультета МГУ

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Филатов М. М. Основы дорожного грунтоведения, Гострансиздат, 1936.
2. Рождественский Д. А. и Триадский. Стабилизация грунтов для применения их в качестве оснований под асфальто-бетон способом цементирования. Рукопись. Трест Гордорстрой, 1939.
3. Шкляринский Б. Л. Укрепление некоторых грунтов шлако-портланд-цементом (в дорожных целях). Рукопись кандидатской диссертации, НИИП МГУ, 1941.
4. Морозов С. С. Почвы и грунты Калининской области (докторская диссертация), НИИП МГУ, 1944.
5. Безрук В. М. Обработка чернозема портланд-цементом. Рукописи научно-технических отчетов ДОРНИИ за 1941—1944 гг.
6. Безрук В. М. и Тулаев А. Я. Дорожные основания из стабилизированных грунтов. Дориздат, 1948.
7. Окороков С. Д. Взаимодействие минералов портланд-цементного клинкера в процессе твердения цемента, Стройиздат, 1945.
8. Скрамтаев Б. Г. Строительные материалы и изделия, ч. 1, ОНТИ, 1935.
9. Гедройц К. К. Учение о поглотительной способности почв, Госиздат, 1933.
10. Неметаллические ископаемые СССР, т. IV, Издание Академии наук СССР, 1941.