

МВД-ССР  
ГЛАВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ШОССЕЙНЫХ ДОРОГ  
ДОРОЖНЫЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ  
ДОРИНИ

# СТАБИЛИЗАЦИЯ ГРУНТОВ

Сборник статей

Москва

ИЗДАНИЕ ГУШОСДОРА

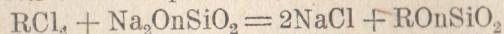
1938

Проф. В. В. Охотин и А. И. Кульвинская

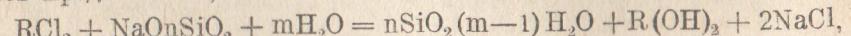
## СТАБИЛИЗАЦИЯ ГРУНТОВ МЕТОДОМ СИЛИКАТИРОВАНИЯ

В последние годы за границей получил большое распространение способ укрепления грунтов химическими веществами. Начало этих работ в Европе, а именно в Германии, относится к 1924 г. (патент инж. Иостена). В 1931 г. появилась в печати работа Стаматиу, в которой излагаются методы укрепления горных пород и грунтов химическим путем<sup>1</sup>. Сущность этих методов заключается в обработке грунтов и горных пород двумя растворами, вводимыми под давлением последовательно один за другим через сделанные в грунте скважины. Соответственно подобранные инъектируемые растворы, вступая в реакцию друг с другом, образуют нерастворимые осадки, связывающие грунты.

Реакция между жидким стеклом и вторым вводимым веществом разными исследователями понимается неодинаково. Стаматиу полагает, что при введении в жидкое стекло солей щелочно-земельных оснований происходит реакция взаимного обмена, в результате которой получается соль натрия и щелочно-земельный силикат.

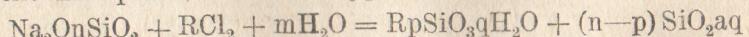


Другое толкование реакции дается В. В. Аскалоновым<sup>2</sup>. Аскалонов предполагает, что основная реакция протекает по схеме:



т. е. в результате реакции получается гель кремнезема, гидрат щелочно-земельного основания и хлористый натрий.

Между этими двумя толкованиями реакции как бы промежуточное место занимает мнение А. И. Озерецковского<sup>3</sup>. Озерецковский на основании своих аналитических работ приходит к выводу, что основная реакция идет по уравнению:



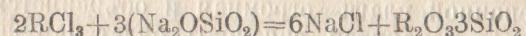
<sup>1</sup> Стаматиу, Исследование вопроса о химическом способе укрепления горных пород и бетонной кладки.

<sup>2</sup> В. В. Аскалонов, Химическое закрепление грунтов и значение модуля силиката натрия. Жур. «Строительная промышленность».

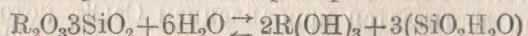
<sup>3</sup> А. И. Озерецковский и В. Л. Волкова, Химическое закрепление лессов. Жур. «Строительная промышленность» 1936 г.

Из этого уравнения вытекает, что в результате воздействия на жидкое стекло соли щелочно-земельного основания образуется гидросиликат щелочно-земельного основания, гель кремнекислоты и хлористый натрий, причем в зависимости от модуля стекла выделение геля кремнекислоты различно.

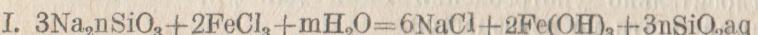
При применении в качестве второго реагента соли трехвалентного металла по исследованиям Григорьева<sup>1</sup> реакция идет по уравнению:



Не исключена, по его мнению, возможность и того, что образовавшийся таким образом силикат трехвалентного металла претерпевает дальнейшее разложение, примерно по схеме:



Озерецковский при введении в жидкое стекло хлорного и сернокислого железа вторую стадию реакции, рассматриваемую Григорьевым как возможную, принимает за основную. Реакция по его данным между этими веществами идет по схеме:



Эти реакции значительно усложняются, когда они протекают в грунте. В грунте, можно предполагать, наряду с химическими реакциями имеет место адсорбция введенных веществ поверхностью частиц грунта и относительное значение адсорбции будет тем больше, чем меньше вносится в грунт стабилизатора.

В качестве 1-го из укрепляющих растворов Стаматиу употреблял силикат натрия, так называемое жидкое стекло  $Na_2OnSiO_2$ , а в качестве 2-го компонента —  $CaCl_2$ ,  $MgCl_2$ ,  $MgSO_4$ ,  $AlCl_3$ ,  $Al_2(SiF_6)_3$  и др.

По отношению к грунтам оказалось, что при употреблении каждой из вышеупомянутых солей в виде 2-го компонента результат зависит от механического и отчасти химического состава грунта. Так  $CaCl_2$  и  $MgCl_2$  дали лучшие результаты с известняками и песками,  $AlCl_3$  и  $Al_2(SiF_6)_3$  — с глиной.

Таким образом, приняв за основной раствор жидкое стекло, 2-й компонент к нему следует подобрать, сообразуясь со свойствами обрабатываемого грунта.

В США для укрепления грунтов в очень широких размерах применяется один  $CaCl_2$ . Известный теоретик по дорожному делу в США Hogentogler дает следующую теорию действия хлористого кальция на грунты. Устойчивость грунта и боковое смещение являются функциями внутреннего трения и сцепления. Когда внутреннее трение и сцепление наибольшие, то и устойчивость наибольшая. Это достигается удачным подбором оптимальной гранулометрической пропорции.

<sup>1</sup>) См. ЦИТ. 1.

трической смеси. В этой смеси трение обусловлено крупными агрегатами, а связность—глинистыми частицами.

Глинистые частицы должны связывать крупные агрегаты. Наивысшая связность достигается укаткой грунта, при определенной оптимальной влажности, а оптимальной влажностью считается такая, при которой каждая глинистая частица оказывается окруженной пленочной влагой, являющейся причиной связности глины во влажном состоянии, легко восстанавливаясь при сдвиге. Сила сцепления пленочной влаги—огромная и объясняется адсорбцией. Как только влага испарится, связность будет нарушена, в грунте может легко произойти сдвиг, после чего связность уже не восстановится. Значит необходимым условием наибольшей связности грунта является сохранение глинистыми частицами постоянной влажности, что достигается прибавлением  $\text{CaCl}_2$ , который как соль тигроскопична легко поглощает влагу из воздуха. Таким образом, укрепляющее действие  $\text{CaCl}_2$  на грунт сводится к способностям его сохранять влагу. Это свойство  $\text{CaCl}_2$  наиболее полезно в засушливых местностях для дорожных покрытий.

Относительно употребления  $\text{CaCl}_2$  для укрепления оснований указаний почти не встречается.

В Союзе неоднократно прибегали к укреплению грунтов силикатом.

Так, при постройке московского метрополитена в 1933 г. для укрепления плавунных грунтов с успехом были употреблены растворы жидкого стекла концентрации 40—50° по Боме, при модуле

$$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} = 2,5-3,5$$

и

34—37° по Боме<sup>1</sup>.

Растворы вводились путем инъекции, причем каждого брали поровну.

Л. Серебряным<sup>2</sup> были заложены опытные участки около Института пути, где он изучал укрепление грунтов путем инъекции в тута пути, где он изучал укрепление грунтов путем инъекции в них растворов силиката и соли. В забойные отверстия при помощи перфорированной трубы вливалось по 150 л каждого из растворов. Результаты получились не вполне удовлетворительными, так как отверстия, через которые производилась инъекция, были расположены далеко друг от друга и часть грунта оказалась незакрепленной. На основании этих опытов автор пришел к убеждению, что лучше вливать в каждое отверстие меньшее количество растворов, но сделать этих отверстий больше, ближе расположив их друг к другу.

<sup>1</sup> Абель и Вонн, Курс оснований и фундаментов.

<sup>2</sup> Л. Серебряный, Полевые опыты укрепления грунтов инъекцией. «Автомобиль и дорога», 1935 г.

Имеются также данные об укреплении нефтяных буровых скважин в Азербайджане<sup>1</sup> путем обработки их стенок сначала раствором жидкого стекла, а затем известью с глиной. Результаты получались в данном случае вполне удовлетворительные. Автор рекомендует при данном методе закрепления грунтов избегать сильного разжижения водой вводимых в грунт растворов.

Во всех опытах по закреплению грунтов химическими веществами, имевших место до настоящего времени, замечается стремление достигнуть этим путем большой прочности грунтов, так сказать «закаменить» грунты, однако такой эффект не всегда требуется. Так, в дорожных основаниях нет надобности закаменять грунты, достаточно укрепить их до известной степени и сделать стабильными в известном пределе влажности. Последнее свойство особенно важно для оснований дорог, расположенных во влажных областях, где они (основания) находятся значительную часть времени года в сырье состоянии.

В своей работе мы стремились достичь достаточной стабилизации грунтов при введении в них веществ в возможно минимальных количествах. Во всех испытаниях первым компонентом было взято жидкое стекло с модулем  $(\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}}) = 2,63$ . В качестве второго компонента брались хлористый кальций ( $\text{CaCl}_2$ ), серно-кислый аллюминий  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , железный купорос ( $\text{FeSO}_4$ ) и гидрат залиси железа  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ .

Грунты, обработанные последовательно двумя растворами, испытывались на временное сопротивление сжатию, сопротивление вдавливанию и размокание. При изготовлении образцов влажность грунтов соответствовала рабочему состоянию и колебалась в пределах от 16 до 20 %.

Подготовка образцов к испытаниям производилась следующим образом: вода, которую нужно было прибавить к грунту, делилась на две равные части, одна часть смешивалась с жидким стеклом, а в другой растворялся второй компонент. Затем к грунту, просяянному через сито в 2 м.м., прибавлялся раствор жидкого стекла, смесь тщательно перемешивалась, к ней добавлялся раствор второго компонента, и все еще раз перемешивалось. Формование образцов производилось под нагрузкой 7 кг/см<sup>2</sup>. Во время работы выяснилось, что формовку необходимо производить непосредственно после введения в грунт второго компонента, в противном случае грунт, сконглированный в крупные агрегаты, плохо поддается прессованию в компактную массу, так как оболочка каждого агрегата затвердевает. Для испытаний на временное сопротивление сжатию и размокание готовились кубики 2 × 2 × 2 см. Часть их сушилась на воздухе и испытывалась через разные сроки, часть же образцов помещалась во влажную камеру (закрытый эксикатор, на дно которого налита вода) и выдерживалась в ней несколько суток,

<sup>1</sup> А. А. Линевский, Борьба с потерями циркуляции в буровых скважинах. «Азербайджанское нефтяное хоз-во» 9-Х—1935 г.

Таблица 1

Наименование грунта	Диаметры фракций в мм		2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001
	2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	0,005-0,001	<0,001		
1. Иловатый легкий суглинок .	5,0	1,0	14,50	—	22,28	13,56	22,07	15,649	15,04		
2. Пылеватый тяжелый суглинок . . . . .	4,90		4,75		42,80	13,31		34	24		
3. Иловатая тяжелая супесь .	—	—	4,30		16,33	27,62	41,00		9,55		
4. Мелко-пылеватая легкая супесь . . . . .	—	—	18,30		10,20	67,0		3,5	1,0		
5. Мелко-пылеватый грунт .	—	—	3,21		15,86	48,84	28,75	4,50	0		

Таблица 2

Наименование грунта	% добавок жидкого стекла	% добавок $\text{CaCl}_2$	Время выдерживания образцов (в сутках)				Время размокания	Примечание
			Во влажной камере	На воздухе	В воде	Сопротивление раздавливанию в $\text{kg}/\text{cm}^2$		
Иловатый легкий суглинок . . . . .	—	—	—	1	—	18,5	—	
То же . . . . .	—	—	—	2	—	—	через $1\frac{1}{2}$ часа	
» . . . . .	—	—	—	5	—	30,0	» $1\frac{1}{2}$ »	
» . . . . .	$1\frac{1}{2}$	0,6	—	2	—	17,0	» $1\frac{1}{4}$ »	
» . . . . .	1	1,2	—	5	—	23,66	» $1\frac{1}{4}$ »	
Легкая пылеватая супесь . . . . .	—	—	—	1	—	10,5	—	Сопротивление раздавливанию определялось ввиду полной неудовлетворительности результатов по отношению к размоканию
То же . . . . .	—	—	—	2	—	—	3 мин.	
» . . . . .	1	—	1	2	—	—	5 »	
» . . . . .	1	—	1	1	—	—	4 »	
» . . . . .	$1\frac{1}{2}$	1,8	1	1	—	—	4 »	
» . . . . .	$1\frac{1}{2}$	1,8	4	4	—	—	3 »	

чтобы дать время прореагировать введенным в грунт растворам. Эти образцы затем испытывались во влажном состоянии и некоторые из них предварительно ставились в воду.

Для испытаний были взяты следующие грунты:

1. Легкий иловатый суглинок.
2. Тяжелый пылеватый суглинок.
3. Тяжелая иловатая супесь.
4. Легкая мелко-пылеватая супесь и
5. Мелко-пылеватый грунт.

Гранулометрический состав всех испытанных грунтов приведен в таблице 1.

При испытаниях образцов иловатого легкого суглинка с добавками жидкого стекла 0,5; 1,0 и 1,5% и эквивалентными натрию в жидким стекле количествами хлористого кальция оказалось, что прочность их не только не возрастает, а, наоборот, уменьшается, скорость же размокания увеличивается (см. табл. 2).

Была испробована добавка к тем же смесям только половины эквивалентного количества хлористого кальция. При этом прочность образцов несколько повысилась по сравнению с прежней смесью, однако прочности естественного грунта не достигла, а скорость размокания уменьшилась очень незначительно. Еще менее удовлетворительные результаты получились при испытаниях образцов мелко-пылеватой легкой супеси.

Добавки в качестве 2-го компонента сернокислого алюминия дали лучшие результаты, но, принимая во внимание его дорогоизнну и невозможность получить в больших количествах для производства, подробных исследований с ним не производилось.

Были сделаны испытания с имевшимися под руками аммонийно-железными квасцами  $(\text{NH}_4)_2 \text{Fe}(\text{SO}_4)_2$ , результаты получились неудовлетворительные, вследствие того, что при реакции с жидким стеклом образовалось много сернокислых солей  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , которые при высыхании грунта выкристаллизовывались в его теле и на поверхности и тем уменьшали его прочность.

Наиболее подробные испытания грунтов были произведены с применением в качестве второго реагента железного купороса, исходя из тех соображений, что: 1) ион железа является более сильным коагулятором, чем кальций, 2) что соединения железа являются очень стойкими и накопец 3) что по опытам Стаматиу глина закреплялась сильнее тогда, когда в нее вторым реагентом вводились соединения железа.

Примечание. В последнее время А. О. Озерецковский и В. Л. Волков<sup>1</sup> на основании подробных лабораторных исследований по закреплению лесса также пришли к выводу, что после длительного воздействия воды в засиликатированных образцах лесса снижение прочности меньше там, где в качестве второго реагента применялись соли железа.

Нами испытания были проведены со всеми грунтами, гранулометрический состав которых приведен в табл. 1.

К иловатому легкому суглинку жидкого стекла прибавлялось 0,5; 1,0 и 1,5% от веса грунта и железного купороса соответственно 0,6; 1,2 и 1,8%. При указанных добавках жидкого стекла стабилизация грунта получалась удовлетворительной, причем добавка в 0,5% изменяла свойства грунта медленнее, чем большие добавки. Это явление, повидимому, объясняется тем, что при малых количествах введенных в грунт реагентов за короткий срок количество прореагированных веществ является недостаточным для того, чтобы дать заметную стабилизацию грунта, с течением же времени количество их увеличивается (если этому благоприятствуют обстоятельства, грунт находится во влажном состоянии) и, как видно из таблицы, образцы с добавками 0,5% жидкого стекла после стояния во влажной камере в течение 6 суток становятся вполне водоустойчивыми (в воде не размокали в течение 30 суток).

Сопротивление сжатию сухих образцов грунта, обработанных жидким стеклом и железным купоросом, увеличилось по сравнению с естественным грунтом почти в два раза, и сопротивление сжатию образцов, испытанных в сыром состоянии непосредственно после того, как они были вынуты из воды, равнялось 1 кг/см<sup>2</sup> (цифровой материал приведен на таблице 3).

Результаты испытаний по стабилизации тяжелого пылеватого суглинка (гранулометрический состав дан в табл. 1 под № 2) приведен в таблице 4. Как видно из этой таблицы, введение в данный грунт жидкого стекла и железного купороса вызывает изменение свойств грунта, подобное тому, что наблюдалось в легком иловатом суглинке, несколько ниже только временное сопротивление сжатию образцов, испытанных непосредственно после того, как они были вынуты из воды: а именно оно здесь в среднем 0,75 кг/см<sup>2</sup>, при введении жидкого стекла 0,5% и больших, при введении же жидкого стекла 0,25% оно падает до 0,5 кг/см<sup>2</sup>. Что касается водоустойчивости, то все образцы влажные, после выдерживания их во влажной камере, не размокали в воде в течение 10 суток, однако если они перед испытанием были просушены, то водоустойчивость их пропадала и они размокали в течение 15—20 мин. Существенным образом изменилось в грунте после введения в него жидкого стекла и железного купороса сопротивление вдавливанию. В образцах, где было введено жидкое стекло 2% сопротивление вдавливанию увеличилось по сравнению с естественным грунтом (при одинаковых примерно влажностях) в два раза, при уменьшении вводимых количеств пропорционально падает и сопротивление вдавливанию.

При обработке тяжелой иловатой супеси результаты получаются подобные тем, какие были получены с предыдущими грунтами, однако временное сопротивление сжатию как сырых образцов, выдержаных во влажной камере, так и образцов, испытанных непосредственно после того, как они были вынуты из воды, больше,

<sup>1</sup> См. ЦИТ. 3.

Таблица 3

Наименование грунта	% добавки жидк. стекла	% доб. железн. купороса	Врем. выдерживание образцов			Сопротивление сжатию в кг/см²		Время размокания
			Во влажн. камере	В воде	На воздухе	Сухих кубик.	Только что вынутых из воды	
Иловатый легкий суглиночок . . . . .	—	—	—	—	1	18,5	0	1/2 час.
То же . . . . .	—	—	—	—	5	30,0	0	1/2 »
» . . . . .	1/2	0,6	—	—	2	28,0	0	2 часа
» . . . . .	1/2	0,6	6	—	5	30,0	—	—
» . . . . .	1/2	0,6	1	3	1	45,86	—	Дает трещину через 1 сутки, не разм.
» . . . . .	1/2	0,6	2	3	1	46,83	1	То же
» . . . . .	1/2	0,6	2	5	1	45,00	1	»
» . . . . .	1/2	0,6	4	6	1	46,83	1	Дает трещину через 2 часа
» . . . . .	1	1,2	—	—	2	25	—	То же
» . . . . .	1	1,2	—	—	5	50	—	—
» . . . . .	1	1,2	5	—	1	41,58	—	То же
» . . . . .	1	1,2	8	—	2	55,20	—	Не разм. в течение 30 сут.
» . . . . .	1	1,2	1	1	2	57,00	—	То же
» . . . . .	1	1,2	2	7	1	45,83	—	»
» . . . . .	1	1,2	3	11	7	52,08	—	»
» . . . . .	1	1,2	3	12	2	56,25	—	»
» . . . . .	1	1,2	6	30	—	—	1	»
	1,5	1,8	25	—	2	54,15	—	—
	—	—	1	—	—	—	—	—
	—	—	3	1	—	—	—	—
								1 час даёт трещину через 1 сутки

Таблица 4

Наименование грунта	% добавок жидкого стекла	% добавок железного купороса	Врем. выдерживание образцов (в сутках)			Время сопротивления сжатию в кг/см²	Время размокания	Сопротивление давл. в кг/см² при нагруж. штамп. на 2,5 мм
			Во влажн. камере	Под водой	На воздухе			
Пылеватый тяжелый суглинок . . . . .	0	0	3	—	—	0,21	1 сутки	—
То же . . . . .	0	0	10	—	—	0,20	1 »	2,28
» . . . . .	0	0	0	—	10	26,3	45 минут	—
» . . . . .	2	2,4	3	—	—	1,26	10 сут.	—
» . . . . .	2	2,4	10	—	—	0,69	10 »	4,31
» . . . . .	2	2,4	10	10	—	0,76	10 »	—
» . . . . .	2	2,4	—	—	10	12,7	20 минут	—
» . . . . .	1	1,2	3	—	—	1,26	10 сут.	—
» . . . . .	1	1,2	10	—	—	1,01	10 »	3,42
» . . . . .	1	1,2	10	10	—	0,88	10 »	—
» . . . . .	1	1,2	—	—	10	17,8	16 мин.	—
» . . . . .	0,5	0,6	3	—	—	0,57	10 сут.	—
» . . . . .	0,5	0,6	10	—	—	1,22	10 »	3,29
» . . . . .	0,5	0,6	10	10	—	0,75	10 »	—
» . . . . .	0,5	0,6	—	—	10	24,7	15 мин.	—
» . . . . .	0,25	0,3	3	—	—	0,73	10 сут.	—
» . . . . .	0,25	0,3	10	—	—	0,76	10 »	2,79
» . . . . .	0,25	0,3	10	10	—	0,57	10 »	—
» . . . . .	0,25	0,3	—	—	10	28,3	14 мин.	—

Таблица 6

Таблица 5

Наименование грунтов			Время выдерживание образцов (в сутках)		Временное сопротивление сжатию		Влажность в образцах при испытании
	% добавки жидкого стекла	% добавки железного купороса	Во влажной камере	В воде	На воздухе	kg/cm²	
Иловатая тяжелая супесь . .	2	2,4	3			1,75	25,32%
			10		10	2,37	25,11%
			—		10	4,37	1,50%
			10	10	10	5,12	1,74%
			10	10	10	1,0	28,06%
Иловатая тяжелая супесь . .	1	1,2	3			6,25	1,89%
			10		10	2,0	22,44%
			—		10	2,25	23,01%
			10	10	10	6,4	1,11%
			10	10	10	6,0	1,22%
Иловатая тяжелая супесь . .	0,5	0,6	3			1,25	24,83%
			10		10	7,5	1,35%
			—		10	2,12	22,95%
			10		10	2,37	21,25%
			10	10	10	6,25	1,08%
			10	11	10	8,25	1,33%
			10	10	10	2,85	22,42%
			10	10	10	6,9	1,06%

При стабилизации жидким стеклом и железным купоросом мелко-пылеватой легкой супеси оказалось, что добавки жидкого стекла в 0,5% не дают никакого эффекта, и добавки в 1,0% не создают достаточной водоустойчивости. Наилучшие результаты получились при введении жидкого стекла в количестве равном 1,5%. Образцы грунтов, после выдерживания их во влажной камере, не размокают в воде много дней и обладают времененным сопротивлением сжатию в сырьем состоянии от 1 до 4 kg/cm² (табл. 6).

Мелко-пылеватый грунт для его стабилизации требует введения жидкого стекла в количестве 2% (табл. 6).

Кроме железного купороса в качестве второго реагента нами испробован был также гидрат закиси железа, который получился путем осаждения аммонием из раствора железного купороса. Выпавший осадок гидрата закиси железа вначале декантацией, а затем на фильтре освобождался от сернокислого аммония.

Наименование грунта	% добавки жидкого стекла		% добавки железной купороса		Время преб. во влажн. камере	Время преб. в воде	Время сушки на воздухе	Сопротивл. сжат. в кг на 1 см²	Только что вынут. из горды	Время размокания
	Сухие куб.	Влажн. куб.	Сухие куб.	Влажн. куб.						
Мелко-пылеватая легкая супесь .	1	1,2	1,2	1,2	1	1	1	10,5	—	3 мин.
То же . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	2	12,5	—	3 "
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	2	0	—	—	4 "
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	—	—	—	1—5 ч.
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	—	—	—	не разм. в 5 сут.
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	2	21,88	—	5 мин.
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	6	20,85	—	5 "
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	7	13,54	—	6 сут.
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	1	14,5	—	9 сут.
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	2	12,5	—	—
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	1	11,5	—	—
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	14	—	4,0	14 сут.
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	17	—	2,0	17 сут.
" . . . . .	1	1,2	1,2	1,2	—	—	22	—	1,5	22 сут.
Мелко-пылеватый грунт . .	2	2,4	2,4	2,4	2	—	—	—	—	1 час.
То же . . . . .	2	2,4	2,4	2,4	—	1	23	—	—	5 мин.
" . . . . .	2	2,4	2,4	2,4	5	8	—	—	1,6	8 сут.
" . . . . .	2	2,4	2,4	2,4	15	5	—	—	1,15	5 сут.

Для выяснения вопроса, происходит ли реакция между жидким стеклом и гидратом закиси железа, поставлены были лабораторные опыты. В эрленмейеровские колбы вносились определенное количество жидкого стекла и затем гидрат железа в количестве, эквивалентном натрию, содержащемуся в жидком стекле. Содержимое колб при частом взбалтывании оставалось во взаимодействии на разные сроки, после чего жидкость отфильтровывалась, в ней определялось содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  и вычислялся модуль  $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}}$  стекла. Результаты опытов приведены в таблице 7.

Таблица 7

Время взаимодействия жидкого стекла и гидрата закиси железа в сутках	0	1	3	14
Модуль стекла после реакции . . . .	2,65	2,62	2,54	2,41

Как видно из полученных результатов, модуль стекла с увеличением времени взаимодействия его с гидратом закиси железа уменьшается, что указывает на наличие реакции, происходящей между этими веществами. Надо отметить, что реакция идет медленно, несравненно медленнее, чем между жидким стеклом и железным купоросом. В последнем случае, как показал отчет, в течение суток в тех же условиях количество прореагировавшего жидкого стекла составляло 98,22 %.

Чтобы установить, с какой скоростью реакция между жидким стеклом и гидратом закиси железа пойдет при стабилизации грунтов, был взят грунт, по гранулометрическому составу пылеватая тяжелая супесь (фр.  $> 0,25 \text{ мм}$  — 0,81%, фр. 0,025—0,05 мм — 56,86%, фр. 0,05—0,01 мм — 21,77%, фр. 0,01—0,005 мм — 12,53%, фр. 0,005—0,001 мм — 2,6% и фр.  $< 0,001 \text{ мм}$  — 5,61%) и в него было введено 2% от веса грунта жидкого стекла и эквивалентное количество натрия в стекле гидрата закиси железа. Влажность грунта после введения в него реагентов равнялась 25,8%. Вся масса тщательно была перемешана и часть ее оставлена во влажной камере на 7 суток и другая часть на 10 суток. По истечении этих сроков из грунта была сделана водная натяжка (отношение грунта к воде 1 : 5), в ней определено содержание  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  и вычислен модуль стекла. Этот модуль для грунта, находившегося во влажной камере 7 суток, оказался равным 1,7 и для стекла в грунте, находившегося в камере 10 суток, равным 1,54 (модуль стекла, взятого для опыта был — 2,65). Как видно из этих опытов, реакция между стеклом и гидратом закиси железа происходит в грунте значительно быстрее, чем без него; грунт является катализатором. Однако и в этом случае реакция идет сравнительно медленно, что дает возможность успешно использовать гидрат закиси железа в качестве второго реагента при стабилизации грунтов в производственных условиях методом смешения.

При изучении влияния на физико-механические свойства грунтов введение жидкого стекла и гидрата закиси железа, материалом при опытах служила тяжелая иловатая супесь, которая испытывалась и при употреблении вторым реагентом железного купороса.

Результаты испытаний приведены в табл. 8. Как видно из таблицы, временное сопротивление сжатию сырых образцов получилось больше по сравнению с тем, что давали добавки железного купороса, большее получилось и сопротивление давливанию. Меньшая связность грунта при употреблении железного купороса в качестве второго реагента, очевидно, объясняется тем, что в результате реакции железного купороса и жидкого стекла получается сернокислый натрий, который при кристаллизации нарушает сцепление между частицами грунта. Это явление хорошо известно и в природе. Горизонты пухлых солончаков, содержащие значительное количество сернокислого натрия, обладают малой связностью, они рыхлы и пухлы. Неудобство применения гидрата железа в качестве второго

реактива состоит в том, что трудно получить равномерное распределение его в грунте.

Таблица 8

Наименование грунта	% добавки жидкого железа		% доб. гидрат. закиси железа		Врем. пребыв. образцов (в сутках)	Врем. сопротивл. сжатию	Сопротивл. давл. при погружен. штам. на 2,5 мм		Влажность при испытании	Время размокания
	В воде	На воздухе	Во влаж. камере	Влажн.			кг/см <sup>2</sup>	Влажн. при испытании	кг/см <sup>2</sup>	
Тяжелая иловатая супесь	2	2,4	3	—	3	3,75	22,99	—	—	—
		—	10	—	10	3,75	23,75	—	—	—
		—	10	—	11	6,0	0,93	—	—	—
		—	3	3	—	6,0	1,34	—	—	—
		—	10	11	—	2,0	25,51	—	—	—
	1	1,2	3	—	10	2,37	26,0	—	—	—
		—	10	—	10	6,25	1,19	—	—	—
		—	3	3	—	3,25	22,07	2	24,5%	1 мин.
		—	10	—	—	4,0	21,01	7,0	24,03	—
		—	3	3	11	7,06	1,14	—	—	—
	—	—	10	10	—	1,0	25,79	—	—	—
		—	10	—	10	2,5	24,58	6,6	25,5	—
	—	—	10	—	8,0	0,96	—	—	—	—
		—	—	—	—	—	—	—	—	—

На основании лабораторных испытаний можно сделать следующие выводы:

- Стабилизация пылеватых грунтов возможна введением в них последовательно двух растворов — жидкого стекла и железного купороса. Железный купорос может быть заменен гидратом железа. Применение гидрата железа вместо железного купороса при одинаковых количествах дает большую прочность грунтов, однако равномерность распределения его в грунте значительно труднее.
- При стабилизации пылеватых и иловатых суглинков и тяжелых супесей количество жидкого стекла должно равняться 0,5% пылеватых и иловатых супесей — 1,5% и иловатых грунтов — 2%.
- Учитывая то явление, что грунты с добавками жидкого стекла и соли железа после их высушивания теряют водоустойчивость, стабилизация грунтов этим способом возможна только грунтов влажных, т. е. грунтов, находящихся в дорожном основании.
- Стабилизаторы вносятся в грунт разведенными водой с таким расчетом, чтобы процент влаги был равен в пылеватых суглинках и супесях 16—18% и в пылеватых супесях 18—20%.
- При обработке грунта вперед вносятся раствор жидкого стекла, тщательно с ним перемешивается, а затем вводится раствор железной соли. После введения второго реагента грунт должен

быть немедленно уплотнен и плотом в течение нескольких суток (3—5) должен поддерживаться во влажном состоянии, причем избытка воды в грунте не должно быть. После конца реакции, вода на, грунт, обработанный жидким стеклом и солью железа, вредного действия не оказывает. Образцы после выдерживания в воде 30 сут. не уменьшали устойчивости.

6. Прочность пылеватых суглинков после введения в них жидкого стекла и соли железа сохраняется равной  $1 \text{ кг}/\text{см}^2$  и для супесей  $1-4 \text{ кг}/\text{см}^2$ .

7. Для того, чтобы можно было рекомендовать производству стабилизацию грунтов дорожных оснований химическим способом, необходимо проверить полученные результаты в полулабораторной обстановке, выбрать наилучшие способы введения стабилизаторов в грунт (смешение, инъекция), изучить влияние стабилизаторов на величину передаваемых напряжений и несущую способность грунтов и наконец заложить опытные участки на дороге с учетом всех полученных результатов. Совокупность всех этих работ намечается программой Ленфилиала ДОРНИИ на 1937 год.

200

CHILOTO CT  
TER BAGOTOB  
WAKI THY