

*Выскребенцев В.С., аспирант
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова*

О ВЛИЯНИИ ХИМИЧЕСКОЙ СУФФОЗИИ НА ФИЗИЧЕСКИЕ И ДЕФОРМАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ЛЁССОВЫХ ГРУНТОВ

vovagjan@mail.ru

Установлено, что в ходе фильтрационного выщелачивания солей из супесчаных и суглинистых лёссовых грунтов меняются их фильтрационные свойства, количество и качество содержания в грунте солей, гранулометрический состав, пористость, удельный вес, механические свойства. В результате этого плотность грунта снизится, что вызовет дополнительные осадки и образование зон сдвига. При определении общей величины деформации лёссовых грунтов необходимо учитывать как степень и тип засоленности, так и солевой состав увлажняющей жидкости.

Ключевые слова: лёссовый грунт, химическая суффозия, карбонатные соли, хлористые соли, плотность, прочность грунта, суффозионная осадка, выщелачивания солей.

В области транспортного строительства на лёссовых грунтах центральное место занимают вопросы повышения качества и эффективности возводимых инженерных сооружений.

Основной показатель качества уплотненного грунта в основании сооружений – плотность грунта, определяемая физическими и механическими свойствами. Поэтому при возведении земляных сооружений необходимо производить систематическую проверку указанных выше свойств грунта, так как качество лёссовых грунтов находится в

зависимости от такого важного фактора, как химическая суффозия.

Влияние водорастворимых солей на механические свойства лёссовых пород представляет существенный интерес, так как эти соли входят в состав твердой фазы пород, создают минерализацию порового раствора и определяют состав обменных катионов.

Экспериментальные исследования показали, что присутствие карбонатных солей влияет на прочность грунта (табл. 1).

Таблица 1

Влияние карбонатных солей на предел прочности лёссовых грунтов

Вид грунта	Карбонатность, %	Предел прочности на сжатие, МПа
С первоначальной карбонатностью	9,0	4,5
После удаления карбонатов	-	3,25
С первоначальной карбонатностью	17,5	8,1
После удаления карбонатов	-	5,2

Как видно из таблицы 1, предел прочности на сжатие при содержании в грунте карбонатов больше, чем в грунте, где они отсутствуют.

Для выяснения роли карбонатов кальция в лёссовых грунтах, используя методику М.П.

Лысенко [7] провели опыты, по определению прочности лёссового грунта в зависимости от содержания в них карбонатов (табл. 2).

Таблица 2

Прочность лёссового грунта в зависимости от содержания карбонатов

Время высушивания	Предел прочности, МПа			
	0%	5%	10%	15%
11 дней	29,9	19,2	22,2	14,1
30 дней	30,8	32,9	33,6	29,1
2 месяца	37,4	29,6	29,8	30,2
3 месяца	39,9	35,4	36,8	30,6
1 год	40,7	32,6	34,1	31,2

С течением времени отмечается некоторое возрастание прочности лёссового грунта. Увеличение прочности объясняется не утолщением водноколлоидных пленок, а частичной перекристаллизацией карбонатных солей. Четкая закономерность в изменении

прочности с возрастанием содержания карбоната кальция отсутствует [7]. Карбонатные соли в тонкодисперсном состоянии и в виде пленок повышают сцепление, от чего возрастает сопротивление сдвигу. Выщелачивание солей понижает показатели сдвига.

Анализ полной вытяжки грунта Cl-SO₄-Na засоления позволил предположить эмпирическую формулу связи между отношениями SO₄/Cl=1,04 и Na/Cl=0,962.

Сопоставление отношений SO₄/Cl и Na/Cl показало наличие между ними прямолинейной зависимости (рис. 1).

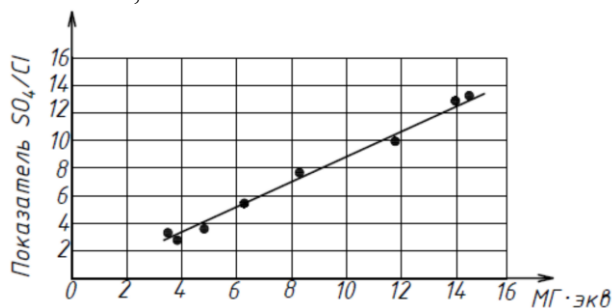


Рис. 1 Прямолинейная зависимость показателей SO₄/Cl и Na/Cl в водной вытяжке

Присутствие сульфатов магния в водной вытяжке существенно не повлияло на характер засоления, т.к. содержание их меньше 24,5% по

отношению к Na/Cl. Показатели содового засоления грунта не отклоняются от пределов нормы (рис.2).

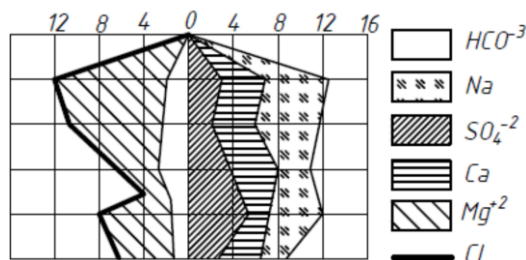


Рис. 2 Состав водной вытяжки из лёссового грунта

Отсюда следует, что ни MgSO₄ ни HCO₃ не влияют на механические свойства грунтов, а хлористые соли будут способствовать уплотнению грунта, так как их содержание в грунте не более 0,48 %. Количество хлористых солей не превышает пределов нормы, поэтому они входят в состав скелетной части и при увеличении влажности не будут вымываться. В результате этого плотность грунта в земляном полотне не понизится, что не вызовет дополнительных осадков и образования зон сдвига.

Необходимо учитывать, что ирригационная сеть, широко развитая на юге черноземной полосы России, играет существенную роль в процессах засоления грунтовых вод и отложений.

Количество взвешенных частиц в оросительных каналах Запорожской, Николаевской и Херсонской областях и

Ставропольском крае содержится в пределах 0,1–4,1 г/л. Возможный состав химических наносов в пределах 30–35 % вредных солей, карбонатов кальция 31–36 %, сульфоната кальция – 37–39,5 %. В сумме это дает огромную величину химического стока.

Исключительно высокая сухость климата, ничтожное количество атмосферных осадков и большое потенциальное испарение, наличие глинистых пород, отличающихся низкой солеотдачей – всё это способствует задержке рассоления и сохранению на длительное время высокой остаточной засоленности грунтов [1, 4].

Результаты экспериментальных исследований показали, что водорастворимые соли, находящиеся в лёссовых породах, снижают показатели свойств грунтов. С увеличением количества легкорастворимых солей, в частности хлористого натрия, верхний предел пластичности понижается (табл. 3).

Таблица 3

Влияние раствора хлористого натрия на показатели пластичности

Содержание хлористого натрия в грунте, %	Верхний предел пластичности	Нижний предел пластичности
0,05	0,292	0,184
0,135	0,268	0,187
0,255	0,257	0,185
0,370	0,229	0,185
0,405	0,206	0,182

Как видно из таблицы 3, снижение пластичности вызвано уменьшением её верхнего предела, изменение нижнего предела не превышает ошибки опыта, таким образом, воздействие электролита сказывается лишь на содержание очень рыхлосвязанной воды.

Карбонатные соли, облегающие пленками грунтовые частицы и образующие известково-глинистые агрегаты влияют на пластичность и другие свойства лёссовых грунтов, как выяснилось из опытов, в изложении показателей пластичности нет закономерностей, колебания их находятся в пределах ошибки опыта. Судя по значениям максимальной гигроскопичности и максимальной влагоёмкости, значения которых снизились от 6,2 до 3,2 от 15,4 до 12,5, карбонат

кальция действовал лишь как гранулометрическая добавка, укрепляющая состав исходного лёсса. Легко- и среднерастворимые соли (хлорид натрия, сульфит натрия, сульфат кальция) уменьшает усадку лёссовых пород, замедляет её процесс и снижает трещиностойкость.

В присутствии солей замедляется скорость испарения влаги и увеличивается размер свободных пор, по которым происходит передвижение влаги в грунте. Трещиностойкость особенно снижается в присутствии хлорида натрия [3]. Благодаря повышенной пористости и малой влажности снижается плотность сухого грунта (табл. 4).

Таблица 4

Изменение плотности сухого грунта под действием легко растворимых солей

Количество солей, %	Влажность	Пористость	Плотность сухого (скелета) грунта ρ_d , г/см ³
3,0	1,59	49,9	1,31
2,0	1,80	48,8	1,39
1,73	3,09	44,9	1,48
1,13	4,99	38,8	1,505
0,7	4,51	38,1	1,51

Карбонатность и насыщенность лёссового грунта обменным кальцием снижали липкость грунта. Сульфаты Na_2SO_4 , MgSO_4 оказывали отрицательное действие, т.к. кристаллизуясь с водой, заметно увеличивались в объеме. Хлористые соли, наоборот, способствовали уменьшению объема. Поэтому показатели физических свойств грунтов необходимо использовать для взаимосвязи с показателями водной, солянокислой вытяжки грунта, т.к. это позволит правильно оценить осадку грунта.

При изучении степени просадочности лёссовых грунтов в лабораторных условиях чаще используется вода с дополнительным хлорированием, а поэтому, практически искусственным образом повышается степень просадочности, т.к. происходит интенсивный вынос легкорастворимых солей (а иногда и среднерастворимых). Поэтому были проведены испытания по определению степени просадочности лёссовых грунтов в полевых условиях, непосредственно у водных источников.

Моделировались условия инфильтрации через лёссовую толщу. В начале образцы лёссового грунта с глубины 1 метра замачивались канальной водой, а образцы с глубины 2-х метров замачивались водой, профильтрованной через образец с 1-го метра. Образцы с глубины 3-х метров замачивались водой, профильтрованной через образец с глубины 2-х метров и т.д. На некоторых

участках просадочность лёссовых грунтов изучалась до глубины 18-25 метров с различным литологическим напластованием и различной исходной (первоначальной) влажностью. Для проведения такого рода опытов было сконструировано дополнительное устройство для сбора профильтрованной воды, которое монтировалось на компрессионных приборах Гидропроекта. Полученные данные характеризуют влияние химического состава раствора, увлажняющего грунт, на степень его просадочности (табл. 5).

Параллельно изучалась степень просадочности при замачивании образцов лёссового грунта дистиллированной водой. Производилось сравнение полученных результатов по каждому метру и каждому участку. Общее число испытаний составило более 300. Одновременно проводились определения состава обменных катионов и емкости поглощения на 100 г породы. Отмечены существенные различия в содержании Na, K, Ca, и Mg по глубине, в образцах: а- до замачивания, б- после замачивания, в- профильтрованной через грунт водой. Емкость поглощения на глубине 2,0 м составила:

а – 12,52 мг·экв. (Na+ K - 6,26 мг·экв., Ca – 1,06 мг·экв., Mg – 5,2 мг·экв.);

б – 9,23 мг·экв. (Na+ K-3,8 мг·экв., Ca – 0,98 мг·экв., Mg – 4,45 мг·экв.);

в – 10,86 мг·экв. (Na+ K-4,2 мг·экв., Ca – 1,06 мг·экв., Mg – 5,6 мг·экв.)

На глубине 10 м соответственно:
а – 1,6 мГ·экв. (Na+ К-6,5 мГ·экв., Са – 1,3 мГ·экв., Mg – 4,1 мГ·экв);

б – 8,2 мГ·экв. (Na+ К-3,5 мГ·экв., Са – 1,1 мГ·экв., Mg – 3,6 мГ·экв);
в – 12,7 мГ·экв. (Na+ К-4,0 мГ·экв., Са – 3,8 мГ·экв., Mg – 4,9 мГ·экв).

Таблица 5

Влияние химического состава увлажняющих растворов на степень просадочности

Глубина взятия образца, м	№ испытания	Значение в % ϵ_{sl} при увлажнении		$\epsilon_{sl}/\epsilon_{sl}$	Уменьшение на ϵ_{sl} %
		Дистиллированной водой ϵ_{sl}	Профильтрованной водой ϵ_{sl}		
2,0	2	0,05	0,0485	0,969	3,1
3,0	4	0,202	0,186	0,921	7,9
4,0	6	0,95	0,86	0,964	9,6
5,0	8	1,8	1,61	0,892	10,8
6,0	10	3,4	3,1	0,91	9,0
7,0	12	3,05	2,65	0,868	13,2
8,0	14	3,42	2,92	0,855	14,5
9,0	16	2,51	2,19	0,871	12,9
10,0	18	2,72	2,27	0,832	16,8
11,0	20	2,48	2,03	0,819	18,1
12,0	22	2,51	1,91	0,76	24,0
13,0	24	2,12	1,62	0,762	23,8
14,0	26	1,88	1,43	0,760	24,0
15,0	28	1,72	1,26	0,732	26,8
16,0	30	1,48	1,08	0,736	26,4
17,0	32	1,38	1,01	0,735	26,5
18,0	34	1,33	0,99	0,745	25,5
19,0	36	0,83	0,61	0,735	26,5
20,0	38	1,38	1,13	0,816	18,4
21,0	40	1,29	0,02	0,709	29,1
22,0	42	1,22	0,87	0,712	28,8
23,0	44	0,91	0,69	0,755	29,5

Исследованиями установлено, что при замачивании образцов грунта водой из каналов оросительной сети, содержание солей по глубине возрастает в среднем на 1 м – 0,9÷0,35 % по сравнению с естественным состоянием. В большей степени увеличивается содержание Са, а Na и К даже несколько уменьшается. В связи с этим и степень просадочности у образцов, увлажняемых

профильтрованной водой, меньше, чем при увлажнении дистиллированной. На основании статической обработки полученных результатов были составлены таблицы по определению коэффициентов, учитывающих степень засоленности увлажняющей жидкости K_3 (табл.6).

Таблица 6

Степень засоленности увлажняющей жидкости K_3

Глубина расположения, м	K_3
0–5	0,96–0,98
6–10	0,89–0,91
11–15	0,79–0,81
16–20	0,76–0,80
21–25	0,73–0,75

При сравнении общей величины просадки, вычисленной с использованием коэффициентов K_3 , в результате просадки, определяемой в натуральных условиях с помощью натуральных моделей в открытых котлованах при интенсивном замачивании, а также с учетом степени влажности грунта в лёссовой толще после окончания испытаний, были получены

очень хорошие результаты, а именно: для толщи в 16–18 м просадка в натуральных условиях от природных нагрузок составила 25,8 см, по результатам лабораторных испытаний 25,4 см (использовалась канальная вода). А при использовании только дистиллированной воды, просадка составила 34,2 см. Все это говорит о

необходимости использования предложенной методики испытаний в лабораторных условиях.

Можно заключить, что засоленные супесчаные и суглинистые грунты, как просадочные, так и непросадочные, претерпевают суффозионную осадку, которая достигает 6–8 %, в лёссовых просадочных грунтах 18–20 % и более в обычных сильнозагипсованных суглинках и супесях, на что указывает и ряд авторов [2, 5, 6].

Существующие классификации засоленных грунтов по количественному содержанию солей [8–10], предложенные дорожниками, гидротехниками или почвоведом, применяемые главным образом к глинистым грунтам, нижний предел содержания солей, принят в существующих классификациях от 0,3 до 0,5 %. Тогда как исследования показывают, что суффозионная осадка наблюдается в лёссовых грунтах уже при содержании легкорастворимых солей выше 0,2 %, или свыше 1 % (при условии, что $e > 0,7$, и количество глинистых частиц < 40 %). Для непросадочных грунтов это предел может быть повышен до 5 %, при использовании просадочных суглинков и супесей в качестве оснований, обычно применяются различные мероприятия (предварительное замачивание, и т.д.), практически ликвидирующие возможность развития во времени суффозионной осадки. В связи с этим, основное внимание должно быть уделено изучению непросадочных засоленных грунтов с коэффициентом пористости $e > 0,7$.

Засоленные грунты в природном залегании нередко сцементированы до прочности полускальных пород. Компрессионные испытания этих грунтов с замачиванием в течение 1–2 суток дают результаты, практически не отличающиеся от испытаний в воздушно сухом состоянии при проведении опытов с длительной фильтрацией. При содержании $S_a < 7-9$ % в них развивается суффозионная осадка, а величина прочностных характеристик уменьшается.

Для установления величины суффозионной осадки засоленных супесчаных и суглинистых грунтов рекомендуется проведение штамповых или компрессионно-фильтрационных испытаний с длительной фильтрацией растворов. После окончания длительных испытаний следует определить гранулометрический состав, пластичность и удельный вес испытанного образца грунта. Для общей характеристики засоленности грунтов в лабораторных условиях следует выполнять определение солей с помощью водных и соляно-кислых вытяжек с дополнительным определением карбонатности. Это даст достаточную характеристику

содержания в грунте легко, средне и труднорастворимых солей. Специфика засоленных грунтов должна учитываться при инженерно-геологических изысканиях, проектировании, строительстве и эксплуатации инженерных сооружений, при чем, они должны быть охарактеризованы не только количественным содержанием и качественным составом солей, но и характером распределения в массиве. На основании полученных результатов комплексных исследований можно сделать следующие выводы:

- предел прочности на сжатие при содержании в лёссовых грунтах карбонатов больше, чем в грунте, где они отсутствуют;
- карбонатные соли в тонкодисперсном состоянии повышают сцепление, от чего возрастает сопротивление сдвигу;
- при определении общей величины деформации лёссовых грунтов необходимо учитывать вид и состав увлажняющей жидкости при проведении лабораторных испытаний, используя при этом коэффициент, уточняющий величину просадки от природных нагрузок;
- при определении общей величины деформации среднепросадочных лёссовых грунтов ($n \geq 44$ %) следует учитывать послепросадочные деформации;
- степень просадочности следует определять при той интенсивности давления и степени увлажнения, которые будут иметь место в массиве грунта под сооружением в эксплуатационный период;
- в практике проектирования инженерных сооружений на лёссовых просадочных грунтах, необходимо учитывать как степень и тип засоленности, так и солевой состав увлажняющей жидкости, что позволит разработать наиболее эффективные методы подготовки оснований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Балаев Л.Г. Просадочные деформации лёссовых грунтов ирригационными каналами Вахской оросительной системы. Зависимость величины просадочных деформаций лёссовых грунтов от степени увлажнения. Научные записки МВИВХ, Т. 23, 1960.
2. Безрук В.М. Классификация засоленных грунтов в Средней Азии при использовании их в дорожном строительстве // Труды совещания по инженерно-геологическим свойствам горных пород и методам их изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1957. Т. II.
3. Денисов Н.Я. Природа прочности и деформаций грунтов. М.: Стройиздат, 1972. 279 с.

4. Калачук Т.Г. Зависимость между просадочными деформациями и действующими напряжениями в лёссовых основания / Новые технологии и проблемы технических наук: сб. научных трудов по итогам международной научно-практической конференции // Красноярск, 10 ноября 2015 г. Изд-во: Инновационный центр развития образования и науки, 2015. С. 67–73.

5. Кириллов А.А., Фролов Н.Н. Гидротехнические сооружения на оросительных системах, в лёссовых просадочных грунтах. М.: Сельхозиздат, 1963. 271 с.

6. Ломизе Л.Н. Обобщающие данные исследований скрытой просадочности лёссовых сильнозагипсованных грунтов, как материал для формирования изысканий под гидротехническое строительство // Вопросы строительства на

лёссовых грунтах: Доклады межвузовской научной конференции. Воронеж, 1961. С. 55–59.

7. Лысенко М.П. Состав и физико-механические свойства грунтов. М.: Недра, 1972. 320 с.

8. Рубинштейн А.Л. Основные положения проектирования ирригационных сооружений на лёссовых грунтах // Сб. трудов совещания по строительству на лёссовых грунтах. Киев: Изд. Академии строительства, 1961. С. 59–88.

9. Ступаков Л.Ф. О классификации засоленных грунтов для дорожного строительства // Строительство и архитектура Узбекистана. 1966. №6.

10. Черныш А.С., Долженков Д.Ю. Оценка длительной прочности водонасыщенных лёссовых грунтов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2016. №2. С. 37–40.

Vyskrebentsev V.S.

THE EFFECT OF CHEMICAL SUFFUSION ON PHYSICAL AND DEFORMATION BEHAVIOR OF LOESS SOILS

It was ascertained, that at seepage leaching of salt from sandy loam and clay loamy loess soils their seepage behavior, quantity and quality content of salt in soil, grain size composition, pinhole rating, absolute weight, mechanical behavior are changed. As a result the density of soils abates, which induces supplementary outflanking and the generation of displacement zone. At the definition of the general value of deformation of loess soils it is necessary to consider the degree and character of salinity, as well as the dampening salt of composition fluid.

Key words: loess soils, chemical suffusion, carbonate salts, chlorine salts, density, soil strength, suffusion outflanking, leaching of salts.

Выскребенцев Владимир Сергеевич, аспирант кафедры городского кадастра и инженерных изысканий.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail: vovagjan@mail.ru