

13. Soil mechanics, bases and foundations / pod red. S.B. Ukhova. M.: Vyssh. shkola, 2004.

14. Smorodinov M.I., Fedorov B.S. Foundation of structures and structures using the "Wall in the ground" method. M., 1976.

15. Sotnikov S. N., Simagin V.G., Vershinin V.P. Design and construction of foundations near existing structures. The experience of construction in the North-West of the USSR. M.: Stroizdat, 1986.

16. VSN 5-71 Temporary instructions on the arrangement of short bored concrete and rubble concrete piles for low-rise rural buildings. M.: Minsel'stroi SSSR, 1971.

17. SP 52-101-2003 Concrete and concrete structures without reinforcement voltage. M.: GUP NIIZhB Gosstroya Rossii, 2004.

18. SNiP 2.03.01-84\* Concrete and reinforced concrete structures. M.: Gosstroi SSSR, 1989.

УДК 624.131.29

DOI: 10.18324/2077-5415-2017-2-142-145

## Закономерности изменения физических и фильтрационных свойств загипсованных песков при длительном обводнении

О.М. Преснов

Сибирский федеральный университет, пр. Свободный 79, Красноярск, Россия  
presn955@mail.ru

Статья поступила 28.02.2017, принята 24.03.2017

*В работе анализируются результаты исследования суффозионных деформаций загипсованных песков в лабораторных условиях. Испытания образцов осуществляли с замачиванием под нагрузкой по схеме восходящего потока, при градиенте напора  $J = 1-25$ , в зависимости от схемы испытания, физических свойств грунта и количества гипса в образце. С целью исключения влияния сложных химических процессов на рассоление грунта, что может привести к искажению общих закономерностей развития суффозионной сжимаемости грунтов во времени, в качестве фильтрующей жидкости использовали водопроводную воду при температуре  $t = 15-20$  °C с плотным остатком 0,1-0,2 г/л, который учитывали при расчете степени рассоления  $\beta$ . В процессе проведения опытов отбирали фильтраты (в первые сутки 2 раза, затем по 1 разу в течение 20 суток, далее 1 раз в 5 суток) для определения количества выщелачиваемых солей, которые вычисляли по величине плотного остатка фильтратов. Кроме того, фиксировали общее количество жидкости, профильтровавшейся через образцы, с целью подсчета количества выщелоченных солей и коэффициента фильтрации  $K$ . В процессе компрессионно-фильтрационных испытаний пылеватых песков исследованы различные факторы, влияющие на суффозионное сжатие. К ним относятся время фильтрации  $t$ , объем профильтровавшейся воды  $V_w$ , степень загипсованности  $d_0$ , степень рассоления  $\beta$ , давление  $P$ , гидравлический градиент  $J$ .*

**Ключевые слова:** химическая суффозия; загипсованные пески; градиент напора; коэффициент фильтрации.

## Laws in the variation of physical and filtration properties of plastered sands with prolonged watering

O.M. Presnov

Siberian Federal University; 79, Svobodny Ave., Krasnoyarsk, Russia  
presn955@mail.ru

Received 28.02.2017, accepted 24.03.2017

*The paper analyzes the results of the investigation of suffosion deformations of plastered sand under laboratory conditions. Tests of the samples were carried out with soaking under load according to the scheme of upflow, with a pressure gradient  $J = 1-25$ , depending on the test scheme, physical properties of the soil and the amount of gypsum in the sample. In order to exclude the influence of complex chemical processes on soil desalination, which may lead to a search for general regularities in the development of the suffosion of soil compressibility over time, tap water was used as a filtering fluid at a temperature  $t = 15-20$  °C with a dense residue of 0,1-0.2 g / l, which was taken into account in calculating the degree of desalination. During the experiments, filtrates were selected (on the first day 2 times, then 1 time for 20 days, then 1 time per 5 days) to determine the amount of leached salts, which were calculated from the density of filtrate residue. In addition, the total amount of liquid filtered through the samples was fixed in order to calculate the amount of leached salts and the filtration coefficient  $K$ . In the process of compression-filtration tests of silty sands, various factors influencing the suffosion compression are investigated. These include the filtration time  $t$ , the volume of filtered water  $V_w$ , the degree of gypsum  $d_0$ , the degree of desalination, the pressure  $P$ , the hydraulic gradient  $J$ .*

**Keywords:** chemical suffosion; plastered sands; pressure gradient; filtration rate.

## Введение

В последние годы идет интенсивное освоение аридных и полуаридных регионов, где открыты крупные месторождения нефти, газа, металлов. В качестве оснований фундаментов все чаще используются различные виды засоленных и загипсованных грунтов, строительные свойства которых мало изучены, что приводит к многочисленным случаям деформации зданий и сооружений [1–6].

*Постановка задачи.* Выполним комплекс лабораторных работ на компрессионно-фильтрационных приборах с длительным замачиванием и фильтрацией загипсованных песков с содержанием гипса от 5 до 25 %, используя рекомендации [7]. Замачивание и фильтрацию через образцы ведем способом восходящего потока с отбором фильтратов.

В процессе компрессионно-фильтрационных испытаний исследуем различные факторы, влияющие на суффозионное сжатие.

При длительной фильтрации воды через образцы происходит постепенное растворение и вынос солей. Это ведет к повышению пористости и последующему суффозионному сжатию грунта под давлением. Рассоление образцов при компрессионно-фильтрационном испытании имеет большую длительность, которая зависит, при прочих равных условиях, от фильтрационной способности грунтов. Исследования показали, что длительность рассоления песков в 4–5 раз меньше, чем суглинков, и в 1,5–2 раза меньше, чем супесей. При этом время полного рассоления и, следовательно, длительность развития суффозионных деформаций увеличиваются с возрастанием значений  $P$  и  $d_o$  [8]. Изменение напорного градиента  $J$  вызывает, соответственно, изменение сроков рассоления и развития суффозионных деформаций, однако сама величина не зависит от величины  $J$ .

Компрессионно-фильтрационные испытания загипсованных песков при различных  $J$  показали следующее. Независимо от величины  $J$ , значения для грунтов с одинаковыми  $d_o$  и  $P$  практически равны. Отличие состоит лишь во времени достижения условной стабилизации суффозионного сжатия. Поэтому с целью сокращения сроков испытания песков целесообразно проводить опыты при повышенных градиентах напора порядка 20–25 (при исключении механической суффозии).

Однако даже при таких значениях градиента напора длительность суффозионных деформаций песков при проведении компрессионно-фильтрационных испытаний составляет от 5 до 150 суток (табл. 1).

При анализе изменения коэффициента фильтрации  $K$  в процессе рассоления отмечено, что тесная связь между коэффициентом  $K$  и временем испытания  $t$  не устанавливается. На эту связь, как показали исследования, влияют несколько параметров: содержание гипса в образце, давление  $P$ , напорный градиент  $J$ , однородность распределения гипса в грунте.

После начала фильтрации в первые двое суток происходит резкое уменьшение величины  $K$ . Это объясняется тем, что при высоких значениях градиента  $J$  через

образец профильтровывается большое количество воды, что способствует быстрому растворению и выносу легкорастворимых солей и гипса. Создается повышенная пористость, в результате чего происходит уплотнение и уменьшение активной пористости грунта. Уменьшение величины  $K$  загипсованных песков в первые 2–7 суток соответствует нарастанию скорости суффозионного сжатия  $V_{sf}$ .

Таблица 1

*Длительность полного рассоления загипсованных песков с различным содержанием гипса при давлении  $P$  и напорном градиенте  $J = 18$  (числитель) и  $J = 25$  (знаменатель)*

Давление $P$ , МПа	Длительность полного рассоления $t$ , суток, при содержании гипса, %				
	5	10	15	20	25
0,10	9	17	27	38	48
	5	10	20	30	40
0,25	23	42	66	92	120
	12	25	46	70	96
0,40	45	60	90	120	150
	20	33	60	85	110

При дальнейшей фильтрации воды через загипсованные пески происходит некоторое увеличение  $K$  в интервале от 1 до 7 суток. Причем, максимальные величины  $K$  на этой стадии фильтрационного рассоления оказываются, как правило, меньше величин  $K$  в первые сутки фильтрации из-за более низкой активной пористости, чем в начале испытаний. Этот период времени характеризуется уменьшением суффозионного сжатия.

Дальнейшая фильтрация воды приводит к постепенному рассолению образцов и деформациям, в результате которых происходит уменьшение величины коэффициента фильтрации  $K$ . При достижении условной стабилизации суффозионного сжатия наступает одновременная стабилизация фильтрационной способности. Причем, стабилизация  $K$  наступает раньше у менее загипсованных грунтов, у которых процесс рассоления происходит быстрее по сравнению с более загипсованными образцами.

Можно также отметить, что рассоление образцов песчаных грунтов при более низких напорных градиентах ( $J = 10–15$ ) приводит к более плавному очертанию кривых зависимости  $K = f(t)$ . Вначале происходит медленное уменьшение (меньшая скорость рассоления) величины  $K$ , затем — небольшое нарастание и последующая стабилизация  $K$ .

Наиболее тесная зависимость коэффициента фильтрации  $K$  установлена от степени рассоления  $\beta$ .

Зависимость  $K = f(\beta)$  аппроксимируется функцией вида:  $K = a \cdot \beta^2 + b \cdot \beta + c$ , где  $a$ ,  $b$  и  $c$  — коэффициенты, которые зависят от  $d_o$  и  $P$  (принимаются по табл. 2).

Таблица 2

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $c$  и  $r$  в зависимости от содержания гипса и давления  $P$ 

Давление $P$ , МПа	Содержание гипса $d_o$ , %								
	3			10			25		
	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$
0,1	9,506	-10,697	3,798	10,955	-11,916	5,011	8,005	-9,112	5,674
0,4	3,090	-3,567	1,432	3,876	-4,489	2,176	8,650	-9,871	4,514

В процессе фильтрации песков с  $d_o = 10-25$  % под нагрузкой значение  $K$  в начальной стадии рассоления достигает  $(0,5-1,2) \cdot 10^{-4}$  см/с, а для песков с  $d_o < 10$  % —  $(2-5) \cdot 10^{-5}$  см/с. Затем коэффициент фильтрации уменьшается и стремится к некоторому постоянному значению. Установившееся значение коэффициента фильтрации имеет наибольшую величину у песков с  $d_o > 25$  % и наименьшую — у песков с  $d_o < 3$  %. Значение  $K$ , при прочих равных условиях, обратно пропорционально значению действующего давления  $P$ . Величина установившегося коэффициента фильтрации для песков с  $d_o = 10-25$  % составляет  $(1-3) \cdot 10^{-5}$  см/с, а с  $d_o < 10$  % —  $n \cdot 10^{-6}$  см/с.

На рис. 1 представлены кривые зависимости концентрации фильтрата  $C$  от продолжительности фильтрации  $t$  для песков с содержанием гипса  $d_o = 5-25$  %.

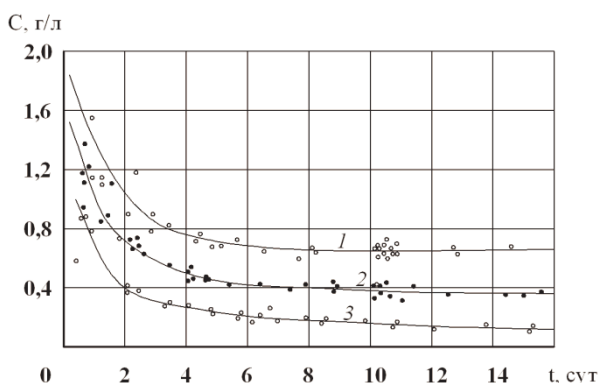


Рис. 1. Зависимость концентрации фильтрата  $C$  от продолжительности промывки  $t$  для песков с содержанием гипса  $d_o$ : 1 —  $d_o = 25$  %; 2 —  $d_o = 15$  %; 3 —  $d_o = 5$  %

Эти кривые характеризуют процесс массообмена, возникающего при промывании загипсованных песков непрерывно фильтрующей водой [9–15]. Начальная стадия фильтрации характеризуется высоким содержанием гипса в фильтрате, что соответствует вымыву

гипса, находящегося в макропорах грунта. На 3–4-е сутки компрессионно-фильтрационных испытаний концентрация гипса в фильтрате резко падает и стабилизируется.

Эта стадия рассоления характеризуется низкими концентрациями и соответствует вымыву гипса из тупиковых пор и микропор образцов. Характер кривых объясняется небольшой высотой образца (25 мм) и относительно высокой скоростью фильтрации.

Полученные в опытах выходные кривые  $C = f(t)$  зависимости изменения концентрации фильтрата от времени аппроксимируются уравнением:  $C = a \cdot t^2 - b \cdot t + m$ , где  $a$ ,  $b$  и  $m$  — коэффициенты, которые зависят от  $d_o$  (принимаются по табл. 3).

По результатам исследований установлено, что при рассолении загипсованных пылеватых песков изменяются его физические свойства.

В процессе выщелачивания солей происходит небольшое изменение гранулометрического состава, сопровождающееся увеличением дисперсности частиц.

Это свидетельствует о том, что при засолении грунта количество мелких частиц уменьшается благодаря их скоагулированности в мелкие агрегаты. Однако агрегаты, созданные солями, являются непрочными и при удалении солей распадаются на мелкие, увеличивая дисперсность грунта.

Рассматривая плотность образцов с момента начала фильтрации до полного рассоления грунта, можно отметить незначительное уменьшение  $\rho_d$  при  $\beta = 100$  % по сравнению с  $\rho_d$  в начале фильтрации. Эта разница при нагрузке  $P = 0,1-0,4$  МПа для образцов с  $d_o = 10-25$  % составляет менее 3 %, т. е. при сжатии происходит практически полное замещение объема удаленных солей частицами песка. Эта закономерность позволяет значительно упростить расчет суффозионных деформаций песков.

Таблица 3

Значения коэффициентов  $a$ ,  $b$ ,  $m$  и  $r$  в зависимости от содержания гипса  $d_o$ 

Содержание гипса $d_o$ , %								
5			15			25		
$a$	$b$	$m$	$a$	$b$	$m$	$a$	$b$	$m$
0,007	-0,116	0,658	0,016	-0,225	1,145	0,022	-0,298	1,593

На основе статистической обработки результатов компрессионно-фильтрационных испытаний песков установлена количественная связь между  $\epsilon_{sf}$  и содержанием гипса  $d_0$ , степенью рассоления  $\beta$ , давлением  $P$ , аналогичная по структуре [7; 9]:

$$\epsilon_{sf} = m \cdot d_0 \cdot \beta^n,$$

где  $d_0$  — содержание гипса, доли единицы;  $\beta$  — степень рассоления, доли единицы;  $m, n$  — эмпирические коэффициенты, принимаемые соответственно по табл. 4 и 5.

Таблица 4

Значения коэффициента  $m$  для песков в зависимости от содержания гипса  $d_0$  и давления  $P$

Давление $P, \text{МПа}$	Содержание гипса $d, \%$				
	5	10	15	20	25
0,10	0,10	0,30	0,50	0,68	0,80
0,25	0,13	0,50	0,60	0,73	0,85
0,4	0,25	0,60	0,68	0,78	0,90

Таблица 5

Значения коэффициента  $n$  для песков в зависимости от содержания гипса  $d_0$  и степени рассоления

Степень рассоления, доли единицы	Содержание гипса $d, \%$				
	5	10	15	20	25
0,2	1,0	1,2	1,3	1,5	1,6
0,4	1,0	1,2	1,3	1,5	1,6
0,6	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4
0,8	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

### Выводы

1. Продолжительность процесса суффозионных деформаций зависит от гидравлического градиента напора и составляет от 5 до 150 суток.

2. Скорость фильтрации не влияет на величину конечных деформаций загипсованных песков.

3. Установлена количественная связь между относительным суффозионным сжатием  $\epsilon_{sf}$  и содержанием гипса  $d_0$ , степенью рассоления  $\beta$ , давлением  $P$ .

### Литература

1. Абелев М.Ю., Джумашев У.Р. Строительство на засоленных грунтах. М.: МИСИ, 1978. 46 с.
2. Аракелян Э.А. Особенности определения физических свойств загипсованных грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1986. № 1. С. 20-21.
3. Арутюнян Р.Н. Особенности грунтов гипсового засоления и их поведение в просадочной толще оснований зданий и сооружений // Фундаментостроение в сложных грунтовых условиях: тез. докл. всесоюз. совещ. Алма-Ата, 1977. С. 239-241.
4. Бакенов Б.Б., Бойко Н.В., Джумашев У.Р. Основания и фундаменты на засоленных грунтах. М.: Стройиздат, 1988. 135 с.
5. Мустафаев А.А. Деформации засоленных грунтов в основаниях сооружений. М.: Стройиздат, 1985. 280 с.

6. Павилонский В.М., Курбанов А. Исследование изменения фильтрационных свойств загипсованных грунтов в процессе длительной фильтрации воды // Труды ин-та ВНИИ ВОДГЕО. М., 1979. Вып.74. С. 142-153.

7. Петрухин В.П. Строительство сооружений на засоленных грунтах. М.: Стройиздат, 1989. 262 с.

8. Петрухин В.П., Альперович С.В. О механизме деформирования загипсованных глинистых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1980. № 2. С. 7-10.

9. Арунушкина А.К. Руководство по химическому анализу почв. М.: Изд-во МГУ, 1970. 487 с.

10. Веригин Н.Н., Васильев С.В., Куранов Н.П. Методы прогноза солевого режима грунтов и грунтовых вод. М.: Колос, 1979. 336 с.

11. Волобуев В.Р. Расчет промывки засоленных почв. М.: Колос, 1975. 71 с.

12. Зиангиров Р.С., Аслибекян О.В., Рахманов Б. Методика прогноза изменения деформационных свойств засоленных грунтов в процессе их выщелачивания Проблемы строительства на засоленных грунтах: тез. докл. Всесоюз. семинара-совещ. Караганда, 1991. С. 15-16.

13. Сильченко О.А. Инженерно-строительные изыскания. М.: Стройиздат, 1978. С. 31-43.

14. Ухов С.В. Влияние искусственного засоления и рассоления связных грунтов на их физико-механические свойства // Основания, фундаменты и механика грунтов. 1961. № 3. С. 16-18.

15. Шульгин Д.Ф., Машарипов Р.М. Определение параметров переноса солей в почвогрунтах по данным полевых опытов // Мелиорация и водное хозяйство: сб. ст. Киев, 1973. Вып. 26. С. 14-23.

### References

1. Abelev M.Yu., Dzhumashev U.R. Construction on saline soils. M.: MISI, 1978. 46 p.
2. Arakelyan E.A. Determination of the physical properties of plastered soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1986. № 1. P. 20-21.
3. Arutyunyan R.N. Features of gypsum soil salinity and behavior in the subsiding thickness of the bases of buildings and constructions // Fundamentostroenie v slozhnykh gruntovykh usloviyakh: tez. dokl. vsesoyuzn. soveshch. Alma-Ata, 1977. P. 239-241.
4. Bakenov B.B., Boiko N.V., Dzhumashev U.R. Substructures and foundations on saline soils. M.: Stroizdat, 1988. 135 p.
5. Mustafaev A.A. Deformations of saline soils in the building footings. M.: Stroizdat, 1985. 280 p.
6. Paviloniskii V.M., Kurbanov A. A study of changes the filtration properties of soils with abundant gypsum in the long process of water filtration // Trudy in-ta VNIИ VODGEO. M., 1979. Vyp.74. P. 142-153.
7. Petrukhin V.P. Construction of buildings on saline soils. M.: Stroizdat, 1989. 262 p.
8. Petrukhin V.P., Al'perovich S.V. About mechanism of deformation plastered clay soils // Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1980. № 2. P. 7-10.
9. Arinushkina A.K. Manual on chemical analysis of soils. M.: Izd-vo MGU, 1970. 487p.
10. Verigin N.N., Vasil'ev S.V., Kuranov N.P. Methods of prediction salt regime of soils and groundwater. M.: Kolos, 1979. 336 p.
11. Volobuev V.R. Calculation of flushing saline soils. M.: Kolos, 1975. 71 p.
12. Zianguirov R.S., Aslibekyan O.V., Rakhmanov B. A method for forecasting the changes of deformation properties of saline soils in the process of their desalination: tez. dokl. Vsesoyuzn. seminar-soveshch. Karaganda, 1991. P. 15-16.
13. Sil'chenko O.A. Engineering and construction surveys. M.: Stroizdat, 1978. P. 31-43.