

## ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ ПРОЧНОСТИ ТОНКИХ ПРОСЛОЕВ НЕСВЯЗНЫХ ГРУНТОВ

С.В.Сольский<sup>1</sup>, М.Г.Лопатина<sup>2</sup>, А.Домбска<sup>3</sup>

На территории Северо-Запада европейской части РФ, стран Балтии, республики Беларусь, Польши широко распространены озерно-ледниковые отложения, характеризующиеся слоистым сложением – чередованием слабодопроницаемых глинистых и суглинистых слоев с водопроницаемыми песчанистыми прослоями (иногда линзами). Их строение обусловлено генезисом осадения взвешенных частиц в водоемах.

Из-за незначительной мощности тонкие прослойки и линзы песков очень сложно выделить при геологических изысканиях и учесть их влияние при оценке устойчивости откосов.

В таких отложениях, вскрытых откосами глубоких котлованов, при обводненности грунтов возникают неблагоприятные проявления фильтрационных деформаций. Выход подземных вод на откос по прослойкам приводит к выносу песчаных частиц (процесс механической суффозии), к размыву откоса ниже прослойки, обрушению и оплыванию части откоса, расположенного выше зоны обводнения. Этот вид фильтрационных деформаций наблюдался на ряде объектов, например, в строительных котлованах реакторных отделений Ленинградской АЭС-2 и Балтийской АЭС [1].

На сегодняшний день отсутствуют критерии, а также не разработаны модели процесса фильтрационных деформаций, вызванных процессом механической суффозии в тонких прослойках несвязных грунтов. В специализированной литературе отсутствует информация о фильтрационно-суффозионных характеристиках обводненных тонких прослоев несвязных грунтов. В существующих нормативных и методических документах [2] содержатся указания по методике лабораторных испытаний и по расчету грунтов на суффозионную устойчивость, но отсутствуют рекомендации по суффозионной устойчивости тонких прослоев несвязных грунтов, выходящих на откосы открытых выработок.

В связи с изложенным, актуальными являются разработка методики лабораторных испытаний и расчета на суффозионную устойчивость тонких

---

<sup>1</sup> Доктор техн. наук

Тел.: (812) 493-93-47, E-mail: solskiysv@vniig.ru

<sup>2</sup> Канд. техн. наук

Тел.: (812) 493-93-49, E-mail: lopatinamg@vniig.ru

ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».195252, С.-Петербург, Гжатская ул., 21

<sup>3</sup> Канд. техн. наук

Тел.: (04822) 234-74-53, E-mail: agnieszka.dabska@mail.ru

Варшавский политехнический университет,

Институт Гидротехнического Строительства и Гидравлики

00-653 Варшава, ул. Нововейская, 20

прослоек несвязных грунтов, что, в свою очередь, позволит обосновывать инженерные мероприятия по обеспечению устойчивости откосов глубоких котлованов, имеющих слоистое геологическое строение.

В ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» в 2014 г. были выполнены исследования, целью которых являлось уточнение модели процесса суффозии несвязных грунтов в тонких прослойках. Также в процессе исследований ставилась задача определения значения критического градиента суффозионной устойчивости несвязных грунтов в тонких прослойках и времени, за которое наблюдается разрушение песчаной прослойки (полный вынос частиц).

Для достижения поставленной цели была разработана методика проведения эксперимента по испытанию фильтрационной прочности тонких прослоек несвязных грунтов, изготовлена специальная лабораторная установка, составлен план проведения эксперимента, выполнена обработка и анализ полученных результатов экспериментов.

На основе анализа гидро-геодинамических условий разработки глубоких котлованов в слоистых грунтах была разработана методика проведения лабораторного эксперимента, приближенного к натурным условиям. Для определения критического градиента напора предполагалось проведение экспериментов на моделях прослоек толщиной от 2 до 10 мм, сформированных из 3-х видов песка разного зернового состава: крупного, среднего и мелкого, одинаковой пористости грунта в прослойке  $n = 0,40$ , которая соответствует коэффициенту пористости  $e = 0,67$  и плотности скелета грунта  $\rho_d = 1,59 \text{ г/см}^3$ . Характеристики этих песков определены в соответствии с ГОСТ [3–6] и представлены в табл. 1. Изготовленная модель позволяет достичь градиентов, характерных для проанализированных условий, то есть  $i = 2 - 3$ , при возможности повышения градиента напора со скоростью, соответствующей скорости разработки котлована.

Схема лабораторной установки для испытаний фильтрационных деформаций тонких прослоек несвязных грунтов представлена на рис. 1.

Таблица 1

Характеристики грунтов

Грунт	Плотность частиц грунта, $\text{г/см}^3$	Мин. плотность сухого грунта, $\text{г/см}^3$	Макс. плотность сухого грунта, $\text{г/см}^3$	Макс. коэффициент пористости	Мин. коэффициент пористости	Коэффициент фильтрации, $\text{см/с}$	Диаметр $d_{10}$ , мм	Диаметр $d_{17}$ , мм	Диаметр $d_{50}$ , мм	Диаметр $d_{60}$ , мм	Коэффициент неоднородности
Мелкий песок	2,65	1,49	1,77	0,78	0,50	0,010	0,102	0,110	0,190	0,210	2,06
Средний песок	2,65	1,59	1,82	0,66	0,45	0,008	0,120	0,140	0,300	0,340	2,83
Крупный песок	2,65	1,52	1,76	0,75	0,51	0,067	0,300	0,370	0,700	0,860	2,87

Установка состоит из выполненного из оргстекла лотка длиной 45 см и шириной 20 см. В лоток укладывается прослойка грунта, которая закрывается съемной крышкой, герметизация рабочей камеры обеспечивается силиконовым уплотнителем.

Гидравлический напор задается при помощи камеры верхнего бьефа. В стенке лотка со стороны верхнего бьефа имеются отверстия, проложенные геотекстилем, для равномерного распределения расхода воды, втекающей в лоток.

Со стороны нижнего бьефа осуществляется свободный сток воды. К камере верхнего бьефа и по длине лотка на расстоянии от верхнего бьефа 5, 15, 25 и 35 см подключены пьезометры, в которых измерялся напор.

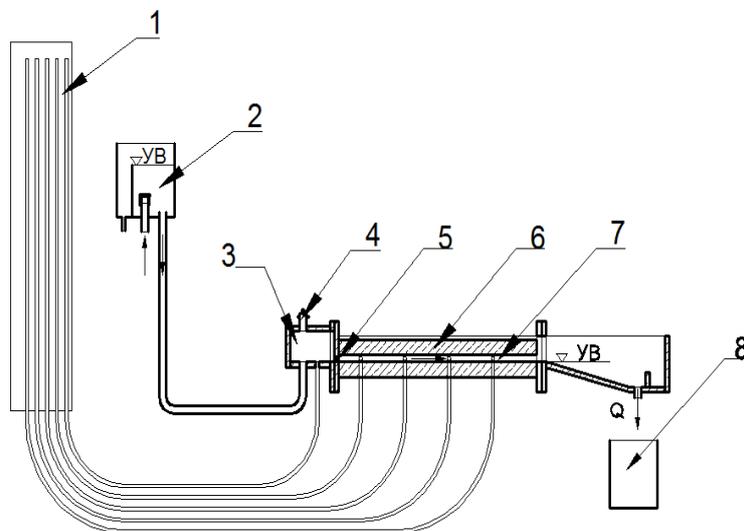


Рис. 1. Схема установки для испытаний фильтрационных деформаций тонких прослоек несвязных грунтов:

- 1 – пьезометры; 2 – напорный бачок для создания напора воды в камере верхнего бьефа; 3 – камера верхнего бьефа; 4 – вентиль для выпуска воздуха из камеры верхнего бьефа; 5 – решетка с геотекстилем для равномерной подачи воды; 6 – верхняя крышка лотка, выполнена из оргстекла, съемная, на струбцинах; 7 – лоток 45 × 20 см, выполнен из оргстекла; 8 – песколовка

Водонасыщение сформированного в лотке образца происходило при общем градиенте  $i = 0,16$ . В последующем повышение градиента происходило со скоростью 0,04 долей ед. в 2 мин. Для фильтрации использовалась водопроводная вода, отстоявшаяся в резервуаре, при температуре  $t = 20^{\circ}\text{C}$ .

В ходе проведения эксперимента фиксировались напоры во всех пьезометрах и напорном бачке с точностью 0,1 см и время от начала повышения градиента до момента разрушения образца, велась фотофиксация характера фильтрационной деформации.

Под действием фильтрационных сил начинал разрушаться каркас грунта, при одновременном изменении проницаемости грунта и его деформируемости, что в итоге приводило к полной деструкции грунта. Эксперимент продолжался до момента разрушения прослойки и массового истечения грунта в “нижний бьеф”.

Разрушение прослойки имело характер гидроразрыва толщи вследствие расклинивающего действия воды, быстро проникающей вглубь толщи по разрыхленной зоне грунта и образуемому фильтрационному каналу. Образование канала и последующий размыв прослойки по длине образца сопровождалось характерным изменением уровня воды в пьезометрах. Напор по мере перемещения зоны разжиженного грунта через контрольные точки (места подключения пьезометров по длине образца) поднимался почти до уровня напора в верхнем бьефе, а затем резко падал. Процесс образования канала и полный размыв происходил довольно быстро, в течение 1 – 2 мин.

В результате проведения экспериментов установлены следующие этапы разрушения прослойки:

1. Образование зоны разрыхленного (разжиженного) грунта по фронту со стороны “верхнего бьефа”.

2. Расширение зоны разрыхленного грунта по фронту со стороны “верхнего бьефа”.

3. Образование и продвижение “языка” фильтрационного канала в сторону “нижнего бьефа”.

4. Формирование сосредоточенного фильтрационного канала в результате выноса мелких частиц в “нижний бьеф”.

5. Дальнейший размыв прослойки по образованному сквозному сосредоточенному каналу в результате истечения разжиженного грунта прослойки в “нижний бьеф”.

Для визуализации алгоритма проводимых исследований приводим блок-схему (рис. 2).

Вся работа разделялась на два крупных этапа:

непосредственно экспериментальная часть, включающая планирование и проведение исследований;

обработка результатов, анализ и планирование дальнейшего вектора исследований.

На первом этапе с целью установления зависимости между значением критического (разрушающего) градиента суффозионной устойчивости тонких прослоек несвязных, песчаных грунтов и факторами, определяющими фильтрационную прочность, была рассмотрена задача многофакторного планирования эксперимента [7]. В качестве варьируемых факторов были приняты следующие:

$x_1 = t$  – толщина прослойки грунта, мм,

$x_2$  – крупность песка (приняты обозначения: песок крупный (+1), песок средний (0), песок мелкий (-1)).

С целью решения задачи был разработан план полного факторного эксперимента, то есть многоуровневый несимметричный план с варьированием двух факторов на разных уровнях:  $x_1$  на пяти и  $x_2$  на трех. Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 2.

В ходе работ выяснилось, что по техническим причинам не было возможности провести опыты для прослойки толщиной 2 мм, а в случае средних и крупных песков не наблюдалось повторяемости результата эксперимента (фильтрационные деформации иногда наблюдались при общих градиентах выше предполагаемых  $i > 2 - 3$  или разрушение прослойки не наблюдалось вообще).



Рис. 2. Блок-схема проведения лабораторных экспериментов по исследованию тонких прослоев несвязных грунтов

В итоге выполнены опыты только для мелкого песка для прослоек толщиной 4, 6 и 8 мм, то есть для фактора  $\bar{x}_1 = +0,5; 0; -0,5$  и фактора  $\bar{x}_2 = -1$ . Каждый из опытов был повторен пять раз ( $n = 5$ ). Таким образом, на основе рассмотренной задачи многофакторного планирования эксперимента была выполнена задача только для мелкого песка с одним входным параметром-фактором  $\bar{x}_1$  (толщиной прослойки). Выполненную часть плана представляет многоуровневый симметричный план с одним фактором  $\bar{x}_1 = \bar{x}$ , варьирующим на трех уровнях, с числом опытов  $N = 3^1$ , матрица планирования которого представлена в табл. 3. Переход от натуральных значений фактора к кодированным значениям задается формулой  $\bar{x} = \frac{x - 6}{2}$ .

Результаты проведенных экспериментов (рассчитанные критические градиенты на длине образца  $y_1$  и время от начала повышения градиента до момента разрушения образца  $y_2$ ) представлены в табл. 4.

По результатам эксперимента получено, что в диапазоне прослоек от 2 до 8 мм и длиной 45 см значения критического градиента и время разру-

шения прослойки не зависят от толщины и равны соответственно  $i_{kr} = 1,03$  и  $t = 43$  мин 23 с.

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

Номер опыта в матрице	Уровни факторов		Результаты экспериментов
	$\tilde{x}_1$	$\tilde{x}_2$	
1	-1,0	-1,0	0
2	-1,0	0	0
3	-1,0	+1,0	0
4	-0,5	-1,0	+
5	-0,5	0	-
6	-0,5	+1,0	-
7	0	-1,0	+
8	0	0	-
9	0	+1,0	-
10	+0,5	-1,0	+
11	+0,5	0	-
12	+0,5	+1,0	-
13	+1,0	-1,0	-
14	+1,0	0	-
15	+1,0	+1,0	-

**Примечание:** „+” – фильтрационные деформации в пределах предполагаемого общего градиента ( $i = 2 - 3$ ), положительный результат;  
 „0” – отсутствие возможности проведения эксперимента;  
 „-” – фильтрационные деформации для общих градиентов выше предполагаемых значений ( $i > 3$ ), результат отрицательный.

Таблица 3

Матрица планирования выполненного эксперимента

Номер опыта в матрице	Уровень фактора	Натуральное значение фактора
	$\tilde{x}$	$x$ , мм
1	-1	4
2	0	6
3	+1	8

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что для разработки линейной модели со значимым коэффициентом для критического градиента  $i_{kr}$  и времени  $t$  нужно увеличить точность эксперимента (улучшить методику проведения опытов или поставить параллельные опыты) или/и расширить интервал варьирования, то есть приспособить установку для возможности достижения градиентов  $i$  выше 3, при которых наблюдается разрушение прослоек толщиной более 8 мм, а также предусмотреть возможность варьировать длину лотка (прослойки).

Таблица 4

Матрица планирования, результаты эксперимента и оценка ошибочности результатов измерений для опытов, проведенных для мелкого песка

№ опыта	№ измерения	Фактор		Результаты		Оценка ошибочности результатов измерений			Замечания
		код	толщина прослойки, мм	общий критический градиент	время, мин	для общего критического градиента	для времени		
1	1			0,96	40	$r_{\max} = 0,916$	$r_{\max} = 0,916$	$r_{\max} = 0,916$	Брак, исключен из дальнейших расчетов
	2			0,60	22	$r_{\min} = 1,928$	$r_{\min} = 1,928$	$r_{\min} = 1,928$	
	3	-1,0	4	0,87	36	-	-	-	
	4			0,92	38	-	-	-	
	5			0,87	36	-	-	-	
2	6			0,65	25	$r_{\min} = 1,332$	$r_{\min} = 1,332$	$r_{\min} = 1,332$	Недостовверное разрушение образца по стене лотка
	7			0,74	29	-	-	-	
	8	0	6	1,14	49	-	-	-	
	9			1,36	60	$r_{\max} = 1,081$	$r_{\max} = 1,081$	$r_{\max} = 1,081$	
	10			1,32	58	-	-	-	
3	11			0,92	38	$r_{\min} = 1,085$	$r_{\min} = 1,085$	$r_{\min} = 1,085$	Недостовверное измерение из-за инструментальной ошибки
	12			1,49	67	-	-	-	
	13	+1,0	8	1,23	54	-	-	-	
	14			2,25	105	$r_{\max} = 1,835$	$r_{\max} = 1,835$	$r_{\max} = 1,835$	
	15			1,18	51	-	-	-	

И все-таки результаты исследований нельзя признать неудовлетворительными. В процессе эксперимента впервые был фотофиксирован и описан поэтапно процесс суффозии в тонких прослойках несвязного грунта, где фильтрационная деформация возникает со стороны верхнего бьефа в виде зоны разрыхленного грунта, затем переходит в сосредоточенный фильтрационный канал, формирующийся за счет выноса материала с последующим размывом прослойки. Разрушение прослойки имеет характер гидроразрыва толщи вследствие расклинивающего действия воды.

Также получены некоторые численные значения, которыми можно охарактеризовать процесс суффозии в тонких прослойках несвязных грунтов:

для тонких прослоек однородного песка средней и крупной зернистости разрушение при возрастающим градиенте происходит при значениях выше 3;

для тонких прослоек однородного мелкого песка толщиной от 4 до 8 мм установлено, что критический градиент, разрушающий прослойку, не зависит от ее толщины и составляет  $i_{kr} = 1,03$ ;

общий критический градиент для тонких прослоек однородного мелкого песка выше, чем критический градиент для массива мелкого песка в основании гидротехнических сооружений, рекомендованный СП [8] для оснований с дренажем 0,32;

для тонких прослоек однородного мелкого песка толщиной от 4 до 8 мм установлено, что время от начала повышения напора до разрушения прослойки не зависит от толщины и составляет  $t = 0,723$  ч.

Полученные результаты позволили наметить дальнейшие направления в работе по изучению процесса фильтрационных деформаций тонких прослоек несвязных грунтов. Это следующие направления:

1. Проведение серии экспериментов для других несвязных грунтов и разработка общих закономерностей суффозионной устойчивости и зависимости значений критических градиентов от характеристик несвязных грунтов.

2. Разработка критериев потери фильтрационной прочности тонких прослоек несвязных грунтов, вызванной процессом механической суффозии.

3. Работа над усовершенствованием конструкции экспериментальной установки.

4. Разработка практических рекомендаций для проектирования и эксплуатации откосов открытых котлованов с учетом суффозионной устойчивости тонких прослоек несвязных грунтов.

5. Разработка мероприятий по защите откосов котлованов от размыва подземными водами, выходящими на откос по прослойкам несвязных грунтов.

## Выводы

1. В лаборатории Фильтрационных исследований им. акад. Н.Н. Павловского ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» была разработана и изготовлена лабораторная установка, позволяющая проводить испытания фильтрационных деформаций тонких прослоек несвязных грунтов.

2. Проведенная серия экспериментов позволила описать модель разрушения тонкой прослойки несвязного грунта под воздействием фильтрационного потока.

3. Для рассмотренного диапазона толщин прослоек и фиксированной длины получены значения критического градиента суффозионной устойчивости несвязных грунтов в тонких прослойках (в 3 раза выше, чем для массива) и времени, за которое наблюдается разрушение песчаной прослойки (полный вынос частиц).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

**1. Проблемы** проектирования и эксплуатации откосов глубоких котлованов / С.В.Сольский, Д.П.Самофалов, А.Н.Арефьева, Е.В.Булганин // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 2013. Т.271. С. 44-54.

**2. Рекомендации** по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость. П 49-90 / ВНИИГ. 1991.

**3. ГОСТ 12 536-79.** Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического и микроагрегатного состава. 1980.

**4. ГОСТ 25 584-90.** Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации. 1991.

**5. ГОСТ 5180-84.** Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. 1985.

**6. ГОСТ 25 100-95.** Грунты. Классификация. 1996.

**7. Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Издание второе переработанное и дополненное. М.: Наука. 1976.

**8. СП 23.13330.2011.** Основания гидротехнических сооружений.