



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ  
НАУЧНО –  
ТЕХНИЧЕСКИЙ  
ЖУРНАЛ

ISSN 0016-9714

# ГИДРО- ТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО



**8** 2013  
ЭНЕРГОПРОГРЕСС

# Оценка водоупорной способности экрана из аллювиальных суглинков на основе изучения микроструктуры грунта и фильтрационных исследований

Аверьянов В. Н., инженер (ЗАО "ПИНИБ "ГИТЕСТ")

Изложены результаты комплексных исследований микроструктуры и фильтрационной прочности аллювиальных суглинков, выполненных для опытной насыпи экрана золоотвала Рязанской ГРЭС. Показано, что суглинки с числом пластичности более 0,10 д. ед. могут укладываться в экран при естественной влажности и при этом должны обязательно уплотняться до состояния, характеризуемого средним коэффициентом водонасыщения 0,9. Водопроницаемость суглинков, уплотненных таким образом, снижается в десятки тысяч раз по отношению к природному сложению. Уложенные в экран суглинки характеризуются практически однородной и слабоориентированной матричной микроструктурой, обладают высокой водоупорной способностью и могут воспринимать без внутреннего перемещения грунтовых частиц градиенты напора до 400.

**Ключевые слова:** противofильтрационный экран, суглинки, водопроницаемость, уплотнение, коэффициент водонасыщения, микроструктура, плотность, влажность.

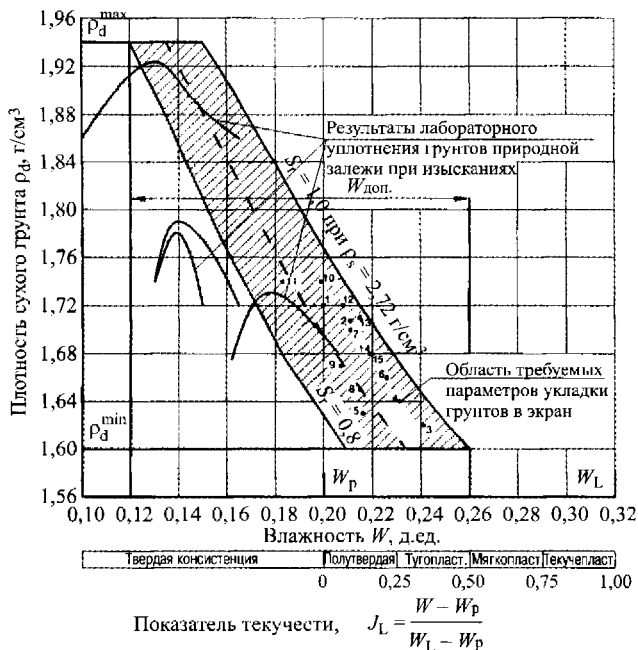
К настоящему времени накоплен значительный опыт строительства противofильтрационных экранов из глинистых грунтов четвертичных отложений с укладкой этих грунтов при естественной влажности, при этом вместо оптимальной влажности и максимальной плотности контрольными параметрами качественной укладки глинистых грунтов в сооружении являются консистенция и коэффициент водонасыщения [1]. К таким сооружениям относятся, например, экран бассейна суточного регулирования Зеленчукской ГЭС, экраны с дамбами реконструированных иловых площадок Курьяновских очистных сооружений МГУП "Мосводоканал" в России и экран верхнего аккумулирующего водоема Днестровской ГАЭС на Украине.

Главной особенностью эксплуатационного режима работы экранов является воздействие больших градиентов напора при фильтрации воды через экран, поэтому даже в тех случаях, когда фильтрационная устойчивость глинистых грунтов в местах выхода фильтрационного потока из экрана обеспечена подбором соответствующих дренажей, возникает вопрос о водоупорных свойствах самого экрана, т.е. о величине допустимых градиентов напора, не вызывающих внутреннего перемещения частиц глинистого грунта, приводящих к потере водоупорной способности экрана. Такие исследования были выполнены ЗАО "ПИНИБ "ГИТЕСТ" для аллювиальных суглинков золоотвала Рязанской ГРЭС.

В естественной залежи эти суглинки имеют твердую, полутвердую, тугопластичную и мягкопластичную консистенцию, включая прослой и линзы песка толщиной 0,5 – 1,0 м. Содержание глинистых частиц в грунте изменяется от 9,4 до 13,6 %. Глинистая составляющая (частицы менес 0,005 мм) характеризуется каолинит-гидролюидным составом. Легкорастворимых солей в грунте почти не имеется, среднерастворимых содержится до 0,5 % и труднорастворимых — до 3,0 % по массе. Число пластичности грунтов составляет 0,10 – 0,14 д. ед., в среднем 0,12 д. ед. По

данным инженерных изысканий коэффициент фильтрации грунтов толщ  $K_f = A \cdot 10^{-4}$  см/с, где  $A$  — любое число от 1 до 10. Требуемые параметры укладки грунтов в экран приведены на рис. 1 в сравнении с результатами лабораторного уплотнения проб грунтов, отобранных из естественной залежи при изысканиях. Учитывая, что укатка отсыпаемого грунта производилась автосамосвалами, контрольный параметр консистенции — показатель текучести был принят  $J_L \leq 0,5$ , т.е. к укладке в тело экрана допускали грунты твердой, полутвердой и тугопластичной консистенции, которые после уплотнения должны были иметь коэффициент водонасыщения  $S_r \geq 0,8$  при среднем значении 0,9. Влажность грунта могла изменяться от 0,12 до 0,26, а плотность сухого грунта — от 1,60 до 1,94 г/см<sup>3</sup>.

На опытной насыпи были отобраны пробы грунта для изучения микроструктуры уплотненного суглинка и для фильтрационных исследований. Изучение микроструктуры глинистого грунта, уплотненного по новым требованиям, производили с целью определения формы и истинных размеров пор, по которым происходит фильтрация воды, вместо условных поровых каналов, чей диаметр в [2, 3] определяется расчетом по аналогии с песчаными грунтами исходя из экспериментально установленных величин коэффициента фильтрации. Отбор проб осуществляли режущими кольцами из шурфов в нижней части отсыпанных слоев. Кольца с пробами грунта зачищали и укладывали в контейнер (рис. 2), в котором их транспортировали в лабораторию для проведения испытаний. Контейнер для хранения и транспортировки грунта состоял из металлического цилиндра 1, пластмассовых перфорированных дисков 2, на которые опирались кольца 3 с отбираемыми пробами. Для предотвращения потери влажности каждое кольцо с пробой герметизировалось прокладкой из полиэтиленовой пленки 4. Кольца в контейнере неподвижно фиксировались через штамп 5, сухарь 6 путем передачи усилия зажимным винтом 7.

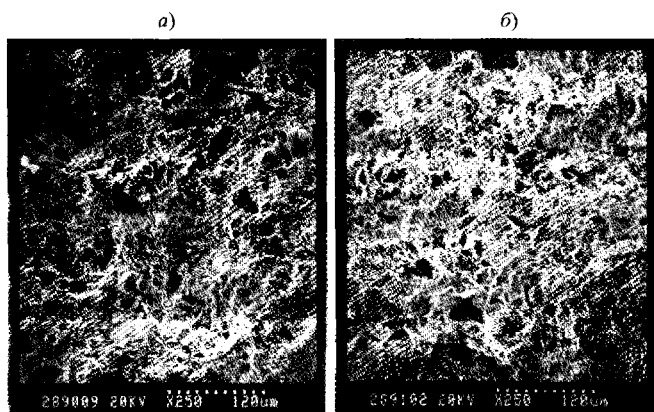


**Рис. 1.** Требуемые параметры укладки глинистых грунтов в экран золоотвала Рязанской ГРЭС в сравнении с результатами лабораторного уплотнения при изысканиях:

$\rho_s$  — плотность частиц грунта;  $\rho_d^{\max}$  — максимальная плотность;  $\rho_d^{\min}$  — минимальная плотность;  $S_r$  — коэффициент водонасыщения;  $W_{\text{доп}}$  — допустимая влажность грунта при укладке в экран;  $W_L$  и  $W_P$  — соответственно граница текучести и граница раскатывания грунта;

• — точка, показывающая плотность и влажность пробы грунта, отобранной из опытной насыпи с указанием номера

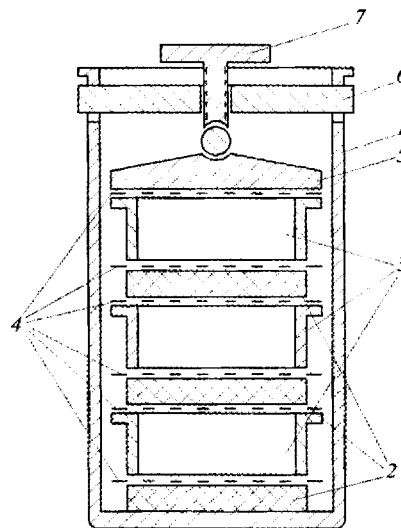
По прибытии контейнера в лабораторию кольца извлекали и для каждой отобранной пробы определяли плотность и влажность. Всего было отобрано 15 проб. Все пробы отвечали требованиям к параметрам укладки грунтов в экран (рис. 1). Для 6 из 15 проб определяли коэффициент фильтрации. Микроструктурные исследования выполняли для двух проб, каждая



**Рис. 3.** РЭМ-изображения микроструктуры грунта образца № 1 в двух взаимно перпендикулярных сечениях:

а — перпендикулярно действию сил при укатке грунта и фильтрационному потоку (образец 1 - 1);

б — параллельно действию сил при укатке грунта и фильтрационному потоку (образец 1 - 2)



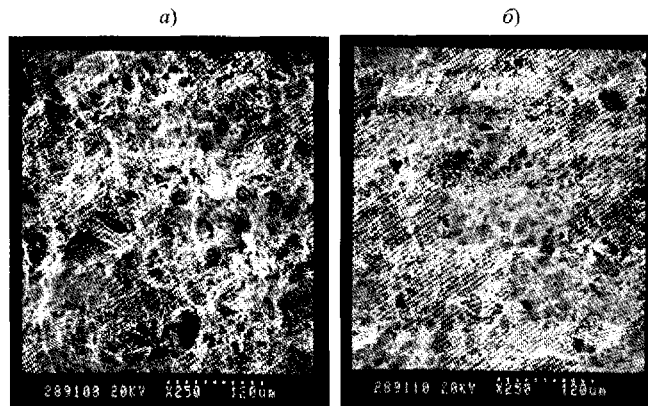
**Рис. 2.** Схема контейнера для хранения и транспортировки проб грунта:

1 — корпус контейнера; 2 — пластмассовые диски; 3 — кольца с грунтом; 4 — полиэтиленовая пленка; 5 — шпатель; 6 — сухарь; 7 — зажимной винт

из которых являлась представительной по физическим характеристикам для всего отсыпанного слоя, при этом одну из них исследовали после фильтрационных испытаний. Кроме того, для грунта опытной насыпи была проведена серия определений максимальной плотности и оптимальной влажности по ГОСТ 22733-2002 “Грунт. Метод лабораторного определения максимальной плотности”.

Для образцов грунта с максимальной плотностью и оптимальной влажностью также определяли коэффициент фильтрации.

Микроструктурные исследования проб грунта на растровом электронном микроскопе “Hitachi” были выполнены в Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова. Методика подготовки образцов и проведения анализов [4] позволила оце-



**Рис. 4.** РЭМ-изображения микроструктуры грунта образца № 2 в двух взаимно перпендикулярных сечениях:

а — перпендикулярно действию сил при укатке грунта (образец 2 - 1);

б — параллельно действию сил при укатке грунта (образец 2 - 2)

нить микроструктуру образцов в двух взаимно перпендикулярных сечениях. Образец № 1 с влажностью 0,20 д. ед. и плотностью сухого грунта 1,72 г/см<sup>3</sup> был подвергнут фильтрационным испытаниям при градиентах напора 100, 200 и 400 в течение 120 ч, после чего этот же образец прошел микроструктурные исследования. Из этого образца было приготовлено два (1 – 1 и 1 – 2). Поверхность образца 1 – 1 была ориентирована перпендикулярно действию сил на карте отсыпки и направлению фильтрационного потока в фильтрационном приборе. Поверхность образца 1 – 2 была ориентирована параллельно действующим силам и направлению фильтрационного потока.

Образец № 2 с влажностью 0,21 д. ед. и плотностью сухого грунта 1,71 г/см<sup>3</sup> фильтрационных испытаний не проходил. Его структура испытывала только действие сил при укатке груженым автотранспортом. Ориентировка поверхности образца 2 – 1 была перпендикулярна действию сил, а образца 2 – 2 — параллельна действию сил.

Количественный анализ микроструктуры проводили с помощью прикладных программ. В ходе анализа рассчитывали такие количественные показатели микроструктуры, как величина общей пористости, эк-

вивалентные диаметры и суммарные площади пор, их вклад в общую пористость, средние значения коэффициента формы для каждой категории пор, степень ориентации и фильтрационный коэффициент, выраженный в миллидарси. Фильтрационный коэффициент определяли как сумму произведений содержания пор каждого гидравлического радиуса на его величину во второй степени. По гистограммам распределения эквивалентных диаметров пор выделяли отдельные категории пор, такие, как межчастичные, межультрамикроагрегатные, мелкие и крупные межмикроагрегатные. По гистограммам распределения пор по суммарным площадям оценивали вклад каждой выбранной категории пор в общую пористость образца.

На рис. 3 показаны РЭМ-изображения характерных участков двух сечений образца № 1, прошедшего фильтрационные испытания: перпендикулярно (а) и параллельно (б) фильтрационному потоку. Результаты расчетов параметров микроструктуры приведены в табл. 1. Из анализа таблицы следует, что поровое пространство образца № 1 имеет однородную структуру в двух перпендикулярных направлениях сечений. В сечении образца 1 – 1 встречаются межчастичные ультрамикропоры с эквивалентным диаметром

Таблица 1

Результаты расчетов параметров микроструктуры образцов грунта по РЭМ-изображениям

Номер образца и его ориентация	Количественные характеристики микроструктуры															
	Эквивалентные диаметры пор, мкм				Вклад пор разных категорий в общую пористость, %				Среднее значение коэффициента формы для каждой категории пор				Степень ориентации, %, $k_a$	Пористость, %		Фильтрационный коэффициент, мд
	$D_4$	$D_3$	$D_2$	$D_1$	$N_4$	$N_3$	$N_2$	$N_1$	$k_{f4}$	$k_{f3}$	$k_{f2}$	$k_{f1}$		по РЭМ-изображениям	средняя по образцу	
1–1 перпендикулярно действию сил при укатке и направлению фильтрационного потока	0,067 0,176	0,176 1,21	1,21 10,13	10,13 26,56	14,4	25,6	52,7	7,3	0,413	0,418	0,468	0,515	3,1	34,02	36,75	0,0176
1–2 параллельно фильтрационному потоку	0,065 0,259	0,259 2,77	2,77 11,02	11,02 29,56	13,3	28,8	48,2	9,7	0,422	0,445	0,506	0,563	5,5	38,67		0,0223
2–1 перпендикулярно действию сил при укатке	0,074 0,232	0,232 1,27	1,27 10,22	10,22 26,33	6,3	30,1	55,3	8,3	0,419	0,425	0,522	0,573	13,4	33,01	37,15	0,0154
2–2 параллельно действию сил при укатке	0,067 0,175	0,175 1,44	1,44 11,81	11,81 25,39	7,7	32,2	49,2	10,9	0,420	0,450	0,489	0,530	2,1	30,79		0,0123

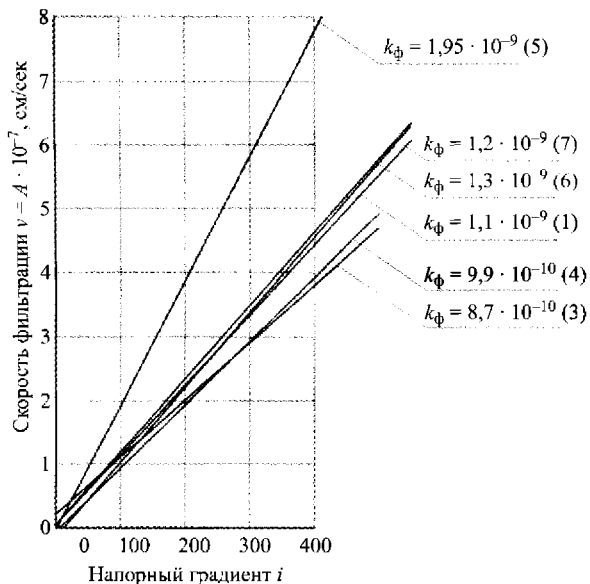


Рис. 5. Обобщенные результаты определения коэффициента фильтрации грунтов  $k_f$ , см/с, с карты опытной укатки золоотвала Рязанской ГРЭС:

(1), (3), (4), (5), (6), (7) — номера проб, отобранных из опытной насыпи

$D_4 = 0,067 \dots 0,176$  мкм, анизометричной формы ( $k_{f4} = 0,413$ ). Вклад этих пор в общую пористость не превышает 14,4 %, при общей пористости по РЭМ-изображению 34,02 %. Присутствующие межультрамикроагрегатные поры с  $D_3 = 0,176 \dots 1,21$  мкм составляют до 25,6 % от общей пористости. Эти поры также имеют анизометричную форму ( $k_{f3} = 0,418$ ). Большая часть порового пространства (52,7 % от общей пористости) представлена межмикроагрегатными мелкими порами с  $D_2 = 1,21 \dots 10,13$  мкм. Форма пор более изометричная ( $k_{f2} = 0,468$ ). Реже встречаются крупные межмикроагрегатные поры с  $D_1 = 10,13 \dots 26,56$  мкм изометричной формы ( $k_{f1} = 0,515$ ). Их вклад в поровое пространство небольшой и составляет всего 7,3 %. Микроструктура образца 1 – 1 имеет степень ориентации  $k_a = 3,1$  % и по классификации [4] является матричной, слабоориентированной.

Для микроструктуры образца 1 – 2 также характерна слабая ориентация частиц  $k_a = 5,5$  %. Изучение двух взаимно перпендикулярных сечений грунта показало однородность и слабую ориентированность матричной микроструктуры грунта противодиффузионного экрана.

На рис. 4 показаны РЭМ-изображения характерных участков двух сечений образца № 2, не подвергнувшегося фильтрационным испытаниям. Один из них (2 – 1) своей плоскостью ориентирован перпендикулярно действию сил при укатке грунта, а другой (2 – 2) — параллельно. Результаты расчетов параметров микроструктуры также сведены в табл. 1.

В сечении образца 2 – 1 встречаются межчастичные ультрамикropоры с эквивалентным диаметром  $D_4 = 0,074 \dots 0,232$  мкм анизометричной формы

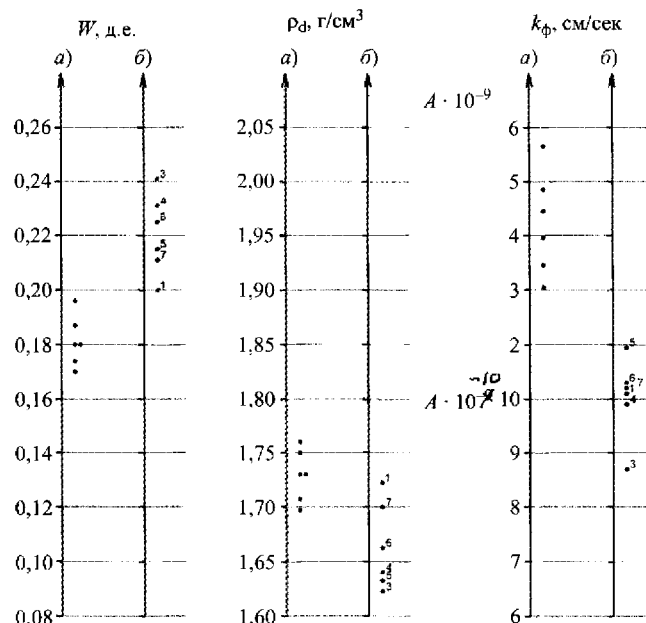


Рис. 6. Графики рассеяния влажности  $W$ , плотности сухого грунта  $\rho_d$  и коэффициента фильтрации  $k_f$  грунтов по лабораторным испытаниям образцов:

а — сформированных при оптимальной влажности и максимальной плотности по ГОСТ 22733-2002;

б — отобранных с карты опытной укатки

( $k_{f4} = 0,419$ ). Эти поры составляют 6,3 % от общей пористости, равной 33,01 %. Несколько более крупные межультрамикроагрегатные поры с  $D_3 = 0,232 \dots 1,27$  мкм также анизометричны по форме ( $k_{f3} = 0,425$ ) и составляют 30,1 % от общей пористости. Межмикроагрегатные мелкие поры с  $D_2 = 1,27 \dots 10,22$  мкм составляют большую часть порового пространства, а именно 55,3 %, и имеют более правильную изометричную форму ( $k_{f2} = 0,522$ ). Крупные межмикроагрегатные поры  $D_1 = 10,22 \dots 26,33$  мкм достаточно редки, изометричны ( $k_{f1} = 0,573$ ) и составляют 8,3 % порового пространства. Ориентированность структуры слабая с  $k_a = 13,4$  %, но выше, чем в двух сечениях образца № 1. Несколько повышенная ориентированность частиц в сечении образца 2 – 1 не способствует проявлению какой-либо анизотропии. Следует отметить, что при аналогичных параметрах микроструктуры образца 2 – 2 степень ориентированности микроструктуры слабая с  $k_a = 2,1$  %. Для обоих сечений изученного образца, как и для образца № 1, характерна однородная матричная слабоориентированная микроструктура. Кроме того, оба образца сходны по микроструктурному строению и фильтрационным параметрам во взаимно перпендикулярных направлениях. Так, рассчитанная по РЭМ-изображениям величина фильтрационного коэффициента лежит в пределах 0,0123 – 0,0223 миллиарды.

Матричная микроструктура характеризуется наличием сплошной неориентированной глинистой массы (матрицы), в которой содержатся беспорядочно расположенные пылеватые и песчаные зерна, не контактирующие между собой. Глинистое вещество агре-

Таблица 2

Результаты определения прочности глинистых грунтов на растяжение по данным НИП "Бауграунд" [6]

Число пластичности $I_p$ , д. ед.	Прочность на растяжение $C_0$ , г/см <sup>2</sup>
0,10	5
0,15	10
0,20	15
0,25	20
0,30	25

гировано и находится в виде ультрамикрoагрегатов и микрoагрегатов. Форма пор меняется от анизометрических (межультрамикрoагрегатных), эквивалентный диаметр которых не превышает 1,27 мкм, до изометрических (межмикрoагрегатных), эквивалентный диаметр которых достигает нескольких микрометров или даже нескольких десятков микрометров, а именно 29,56 мкм.

В тонких слоях толщиной менее 0,15 мкм вода обладает упругими свойствами и характеризуется модулем сдвига порядка 2 кг/мм<sup>2</sup>, т.е. 20 МПа [2, 5], поэтому фильтрация воды через межчастичные ультрамикрoпоры невозможна. Межультрамикрoагрегатные поры и мелкие межмикрoагрегатные поры, частично занятые связанной водой, являются основными путями фильтрации. В крупных межмикрoагрегатных порах практически исключено влияние связанной воды на фильтрацию и устойчивость глинистых частиц, поэтому по ним наиболее вероятны отрыв и перемещение частиц грунта фильтрационным потоком с последующим прорывом воды.

Водоупорная способность суглинков экрана оценена по величине допустимого градиента напора, не вызывающего внутреннего перемещения частиц грунта, который определяется согласно [6] по формуле

$$i = \frac{1}{d_p} \cdot \frac{C_0}{1 \cdot 1,1 \cdot \gamma_w} - \frac{\gamma \cos \beta_1}{1,1 \gamma_w}, \quad (1)$$

где  $d_p$  — диаметр пор, см;  $C_0$  — прочность грунта на растяжение, г/см<sup>2</sup>;  $\gamma_w = 1$  г/см<sup>3</sup> — плотность воды;  $\gamma$  — плотность влажного грунта, г/см<sup>3</sup>;  $\beta_1$  — угол наклона экрана, град.

Это выражение применимо к связным грунтам, отвечающим следующим требованиям:

$0,1 \leq I_p \leq 0,5$ , где  $I_p$  — число пластичности, д. ед.;

$d_{10} \leq 0,002 \leq d_{50}$ ,  $d_{100} \leq 80$ , где  $d_{10}$ ,  $d_{50}$ ,  $d_{100}$  — диаметр частиц, процентное содержание которых в грунте составляет соответственно 10, 50 и 100 %;

непрерывность кривой гранулометрического состава грунта противофильтрационного элемента и примыкающей к нему части сооружения;

влажность грунта  $W \geq W_{opt}$ , где  $W_{opt}$  — оптимальная влажность грунта;

коэффициент водонасыщения  $S_r \geq 0,95$ ;

равномерность уплотнения, определяемая как отношение действительной плотности к требуемой, 0,95;

хорошее сцепление между слоями насыпи;

диаметр пор в грунте  $d_p \leq 10$  мм.

Так как наиболее опасными с точки зрения отрыва и перемещения глинистых частиц фильтрационным потоком являются самые крупные поры, максимальный диаметр которых, согласно табл. 1, составляет 10,22 – 29,56 мкм, принимаем для расчета  $d_p = 30$  мкм = 0,003 см.

К определению прочности глинистых грунтов на растяжение  $C_0$ , используемой в фильтрационно-суффозионных расчетах, существует два принципиально различных подхода. В одном из них эту прочность определяют для заданного состояния грунта, например [7, 8], в другом — для состояния грунта на границе текучести, например [2, 6]. В рассматриваемом случае фильтрации воды по крупным межмикрoагрегатным порам глинистый грунт на контакте с водой может набирать влажность до перехода в текучее состояние, поэтому его прочность на растяжение следует определять при влажности на границе текучести.

Результаты экспериментальных определений этой прочности, выполненных в НИП "Бауграунд" для различных глинистых грунтов, приведены в табл. 2. Как видно из таблицы, для рассматриваемых суглинков расчетная прочность на растяжение может быть принята  $C_0 = 5$  г/см<sup>2</sup>.

Следует отметить, что такая же величина расчетной прочности суглинков на растяжение рекомендована в [9] при оценке их сопротивляемости размыву с учетом действия длительных пульсационных нагрузок от водного потока.

Для плотности влажного грунта 2,07 г/см<sup>3</sup> (при  $\rho_d = 1,71$  г/см<sup>3</sup>,  $W = 0,21$ ) и реально возможных углов наклона экрана от 0 до 60° формула (1) примет вид

$$i = \frac{1}{0,003} \cdot \frac{5}{4 \cdot 1,1 \cdot 1} - \frac{2,07(0,5 \dots 1,0)}{1,1 \cdot 1} = 379 - (0,9 \dots 1,9) = 378,1 \dots 377,1$$

Таким образом, на основе изучения микроструктуры образцов грунта установлено, что суглинок экрана имеет матричную микроструктуру, может выдерживать напорные градиенты фильтрации порядка 400 без нарушения его структуры и без перемещения мельчайших частиц внутри грунта. Глинистые грунты малой пластичности, например супеси, не обладают прочностью на растяжение, т.е.  $C_0 = 0$ . В случае недо-

уплотнения они легко переходят в текучее состояние и теряют способность удерживать напоры воды.

Для проверки полученных результатов по оценке водоупорной способности суглинков экрана была выполнена серия фильтрационных испытаний образцов грунта экрана на приборе ПФГ-1 при напорных градиентах фильтрации до 400. Конструкция прибора и методика проведения испытаний подробно описана в [10].

Фильтрационные испытания проводили для проб с плотностью сухого грунта  $\rho_d$  от 1,62 до 1,72 г/см<sup>3</sup>. При испытаниях в качестве рабочей жидкости использовали дистиллированную воду, а испытания проводили по нисходящей ветви градиентов напора. Результаты фильтрационных испытаний приведены на рис. 5 в виде графиков зависимости скорости фильтрации  $V$  от напорного градиента  $i$ . Коэффициент фильтрации  $k_f$  определяли как частное от деления скорости фильтрации на напорный градиент. Значения коэффициентов фильтрации изменялись от  $8,7 \cdot 10^{-10}$  до  $1,95 \cdot 10^{-9}$  см/с. Полученные в ходе испытаний положительные и отрицательные начальные градиенты фильтрации связаны с направлением осмотического потока и в практических целях принимались равными нулю. Линейная зависимость скорости фильтрации от напорных градиентов для всех проб грунта свидетельствует о том, что их водоупорная способность не изменялась при росте градиентов до 400.

Для сравнения результатов лабораторных испытаний образцов грунта, сформированных уплотнением при оптимальной влажности до максимальной плотности, и образцов, отобранных из опытной насыпи экрана, построены графики рассеяния их влажности, плотности и коэффициента фильтрации (рис. 6). Как видно на рис. 6, коэффициенты фильтрации образцов из опытной насыпи несколько ниже коэффициентов фильтрации образцов, сформированных в лаборатории при оптимальной влажности и максимальной плотности. Это говорит о том, что грунт, уплотненный при естественной влажности в опытной насыпи, более диспергирован, чем грунт, уплотненный при оптимальной влажности по ГОСТ 22733-2002.

В целом фильтрационные испытания показали низкие значения коэффициентов фильтрации суглинков при их уплотнении с естественной влажностью.

## Выводы

1. Выполненными исследованиями установлено, что уплотнение аллювиальных суглинков в теле экрана при естественной влажности до состояния, характеризующегося коэффициентом водонасыщения

0,8 – 1,0, позволяет снизить их водопроницаемость более чем в десятки тысяч раз относительно водопроницаемости в природной залежи.

2. Грунт экрана характеризуется практически однородной и слабоориентированной матричной микроструктурой, в которой можно выделить по водопроницаемости три группы пор: непроницаемые (~ 10 % от общего количества), слабопроницаемые (~ 80 %) и проницаемые (~ 10 %). Этот грунт может воспринимать без внутреннего перемещения грунтовых частиц, а следовательно, без нарушения структуры градиенты напора до 400.

3. Низкая общая водопроницаемость грунта экрана обусловлена микроструктурой, искусственно сформированной уплотнением, поэтому необходимым условием надежной работы экрана из глинистого грунта является сохранение параметров плотности-влажности, полученных в процессе его возведения.

## Список литературы

1. *Аверьянов В. Н., Воронин С. Г.* О применении глинистых грунтов четвертичных отложений в противofильтрационных экранах гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2009. № 8.
2. *Истомина В. С., Буренкова В. В., Мишурова Г. В.* Фильтрационная прочность глинистых грунтов. — М.: Стройиздат, 1975.
3. *Жиленков В. Н.* Водопроницаемость экранов из глинистых грунтов (опыт исследований) // Материалы конференции и совещаний по гидротехнике: Фильтрационные исследования и расчеты при проектировании гидротехнических сооружений / ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. — Л.: Энергоатомиздат, 1983.
4. *Осинов В. И., Соколов В. Н., Румянцева Н. А.* Микроструктура глинистых пород. — М.: Недра, 1989.
5. *Дерягин Б. В.* Исследования по внешнему трению и прилипанию. Теория прилипания // Журнал физической химии. 1935. Т. VI. Вып. 10.
6. *Rehfeld E.* Neue Erkenntnisse hinsichtlich der Verformungsbeständigkeit der Lockergesteine gegenüber Wirkungen des Sickerwassers. WWT, 18. Jahrgang (1968). H. 7.
7. *Рекомендации по проектированию и строительству противofильтрационных экранов золоотвалов и накопителей производственных сточных вод электростанций.* П82 – 79 / ВНИИГ. Л., 1980.
8. *Рекомендации по методике лабораторных испытаний грунтов на водопроницаемость и суффозионную устойчивость:* П12 – 83 / ВНИИГ. Л., 1984.
9. *Мирихулава Ц. Е.* Размыв русел и методика оценки их устойчивости. — М.: Колос, 1967.
10. *Борткевич С. В., Воронин С. Г.* Фильтрационные исследования глинистых грунтов экрана верхнего водоема Днестровской ГАЭС при высоких градиентах напора // Безопасность энергетических сооружений / ОАО “НИИЭС”, 2005. Вып. 15.