



Акционерное общество
«Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро
«ГИТЕСТ»

**Актуальные научные разработки по качеству возведения
высоких плотин из грунтовых материалов**

**Сборник статей сотрудников
АО «ПИНИБ «ГИТЕСТ»**

Аннотация

В сборнике приведены статьи сотрудников АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ», опубликованные в журналах «Природообустройство», «Гидротехническое строительство» и др., совместно с авторами смежных организаций, участвующих в научных разработках по качеству возведения высоких плотин из грунтовых материалов с 2007 по 2018 гг.

Излагается опыт создания из местных грунтов строительного грунтового материала, обладающего оптимальным сочетанием физико-механических и фильтрационно-суффозионных характеристик для ядра высокой плотины, описываются методы уплотнения грунтов и снижения в них порового давления консолидации, методы контроля качества укладки гравийно-галечниковых и щебенисто-глинистых грунтов в тело плотин, технологические возможности повышения сейсмостойкости этих сооружений. В заключительной части сборника приводится конструкция сейсмостойкой каменно-земляной плотины по патенту Российской Федерации № 2642643.

Сборник отражает важное направление развития научного обоснования требований к грунтам, укладываемым в тело гидротехнических сооружений.

Аннотация

В сборнике приведены статьи сотрудников АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ», опубликованные в журналах «Природообустройство», «Гидротехническое строительство» и др., совместно с авторами смежных организаций, участвующих в научных разработках по качеству возведения высоких плотин из грунтовых материалов с 2007 по 2018 гг.

Излагается опыт создания из местных грунтов строительного грунтового материала, обладающего оптимальным сочетанием физико-механических и фильтрационно-суффозионных характеристик для ядра высокой плотины, описываются методы уплотнения грунтов и снижения в них порового давления консолидации, методы контроля качества укладки гравийно-галечниковых и щебенисто-глинистых грунтов в тело плотин, технологические возможности повышения сейсмостойкости этих сооружений. В заключительной части сборника приводится конструкция сейсмостойкой каменно-земляной плотины по патенту Российской Федерации № 2642643.

Сборник отражает важное направление развития научного обоснования требований к грунтам, укладываемым в тело гидротехнических сооружений.

Содержание

	стр.
Введение.....	5
<i>Борткевич С.В., Скибин А.Н.</i>	6
Исследование смеси суглинков с гравийно-галечниковым грунтом для ядра плотины Тери. (Безопасность энергетических сооружений // Научно-технический и производственный сборник. Выпуск 16. ОАО «НИИЭС». М.: 2007, с. 31–44)	
<i>Аверьянов В.Н.</i>	25
О коэффициенте уплотнения крупно-обломочных грунтов при строительстве дорог, земляных и гидротехнических сооружений (Информационный вестник государственного автономного учреждения Московской области «Мособлэкспертиза. Выпуск № 4 (31). М.: 2010, с. 48–50)	
<i>Борткевич В.С., Жерихин А.С.</i>	33
Технологические возможности повышения сейсмостойкости строящихся высоких каменно-земляных плотин (Природообустройство // Научно-практический журнал ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», № 1. М.: 2015, с. 31–37)	
<i>Сметанин В.И., Аверьянов В.Н.</i>	48
Совершенствование технологии уплотнения глинистых грунтов при возведении гидротехнических сооружений (Природообустройство // Научно-практический журнал ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», № 2. М.: 2016, с. 28–36)	
<i>Аверьянов В.Н., Борткевич В.С.</i>	67
О способах снижения порового давления в глинистых ядрах	

каменно-земляных плотин (Природообустройство // Научно-практический журнал ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», № 3. М.: 2016, с. 8–14)

Борткевич С.В. 82

Оптимизация контроля качества укладки гравийно-галечниковых грунтов при возведении плотин (Гидротехническое строительство // Ежемесячный научно-технический журнал, № 2. М.: 2017, с. 11–17)

Борткевич С.В. 101

Разработка сейсмоакустического способа контроля качества укладки в тело плотины щебенисто-глинистых грунтов (Гидротехническое строительство // Ежемесячный научно-технический журнал, № 10. М.: 2017, с. 29–33)

Борткевич С.В. 115

О применении пролювиальных отложений для строительства плотин из грунтовых материалов (Гидротехническое строительство // Ежемесячный научно-технический журнал, № 9. М.: 2018, с. 2–6)

Аверьянов В.Н., Борткевич В.С., Жерихин А.С. 130

Каменно-земляная плотина. Патент РФ на изобретение № 2642643. Патентообладатель: Акционерное общество «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ» (RU). Дата регистрации в государственном реестре изобретений Российской Федерации: 25.01.2018 г.

Введение

Высокие плотины из грунтовых материалов строятся для создания водохранилищ энергетического и водохозяйственного назначения на горных реках в сложных инженерно-геологических условиях. При успешном решении проблем накопления и пропуска речного стока надёжность таких плотин зависит от качества их возведения.

В статьях настоящего сборника излагаются актуальные научные разработки по качеству возведения высоких плотин из гравийно-галечниковых и щебенисто-глинистых грунтов, широко распространённых в горных областях Российской Федерации. Статьи расположены в хронологическом порядке, т.е. по мере опубликования их сотрудниками АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ» в ведущих научно-технических или научно-производственных журналах и сборниках Российской Федерации, затрагивающих вопросы гидротехнического строительства.

Авторы сборника надеются на то, что приведённые в сборнике научные разработки заинтересуют также строителей плотины Рогунской ГЭС в Таджикистане, плотины Пскемской ГЭС в Узбекистане и будут способствовать успешному введению этих уникальных объектов в строй на проектную мощность.

Исследование смеси суглинков с гравийно-галечниковым грунтом для ядра плотины Тери

Борткевич С.В., кандидат технических наук (ОАО «НИИЭС»),
Скибин А.Н., инженер (Филиал ОАО «Инженерный Центр
ЕЭС» – «Институт Гидропроект»)

Опубликовано: Безопасность энергетических сооружений // Научно-технический и производственный сборник. Выпуск 16. ОАО «НИИЭС». М.: 2007, с. 31–44

В сейсмически активном районе Индии (Нижние Гималаи) на р. Бхагирати завершается строительство гидроузла Тери – одного из наиболее крупных гидроузлов в мире. Водохранилище создается каменно-земляной плотиной высотой $H = 260$ м с боковыми призмами из гравийно-галечного грунта и камня (пригрузка откосов) и с противофильтрационным наклонным ядром из глинистого материала. Среднее заложение верхового откоса плотины составляет $1 : 2,5$, а низового $1 : 2$. Толщина ядра равна $0,3 H$ в средней зоне и $0,5 H$ по контакту с основанием.

Для обеспечения безопасности сооружения проектом было принято, по аналогии с высотной плотиной Нурекской ГЭС (Республика Таджикистан), возводить ядро из скелетно-глинистого грунта, гранулометрический состав которого приведен в таблице 1.

Таблица 1.

Гранулометрический состав грунта ядра плотины

Зона ядра плотины	Наименование границы	Процентное содержание фракций диаметром, мм					
		<0,002	<0,075	<0,425	<4,75	<20	$< \frac{200}{75}$
Основное тело	верхняя	10	50	60	70	85	100
	нижняя	5	20	30	40	60	100
Контакт с бортами ущелья	верхняя	20	70	80	90	100	–
	нижняя	10	40	50	60	80	100

Примечание: В таблице дробью указана максимальная крупность фракций грунта, допускаемого к укладке в основное тело ядра (числитель) и в зону его контакта с бортами ущелья (знаменатель).

В связи с тем, что месторождений грунта требуемого гранулометрического состава в районе строительства не оказалось, было принято решение о смешивании суглинков с гравийно-галечниковым грунтом, естественные залежи которых находились в непосредственной близости от створа плотины в месторождении Коти. Граничные кривые гранулометрического состава суглинков и гравийно-галечникового грунта после отделения из него фракций крупнее 200 мм показаны на рис.1.

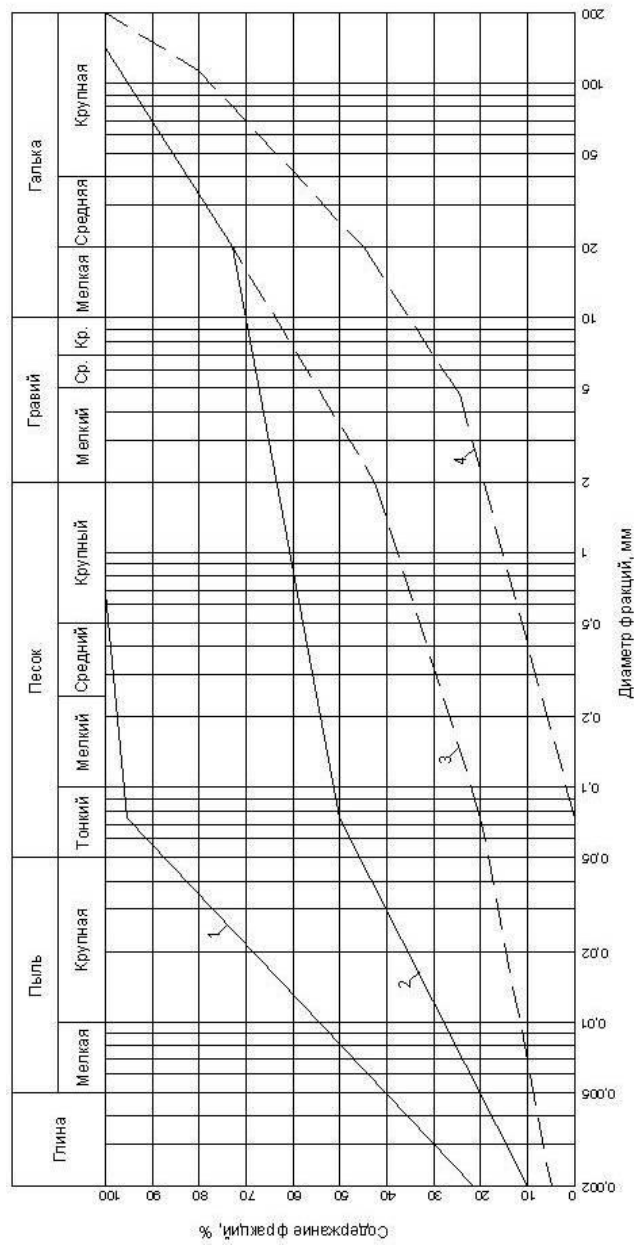


Рис. 1. Граничные кривые гранулометрического состава суглинка и гравийно-галечникова грунта после отделения крупнее 200 мм:

1, 2 – суглинок, 3, 4 – гравийно-галечный грунт

Предварительными расчетами было установлено, что грунт для основного тела ядра плотины можно получить путём смешивания суглинков с гравийно-галечниковым грунтом в весовом соотношении $0,5 : 1 \div 1 : 1$, а для зоны контакта с бортами ущелья – в соотношении $2 : 1$.

Перед началом строительства плотины был выполнен комплекс исследований, включающий изучение возможности приготовления грунтовых смесей для ядра плотины в производственных условиях (полевые исследования), а также изучение фильтрационно-суффозионных, деформационных и прочностных свойств этих смесей (лабораторные исследования).

Полевые исследования выполнялись на месте строительства плотины индийской стороной под научно-методическим руководством российских специалистов, а лабораторные исследования – российской стороной в Научно-исследовательском институте энергетических сооружений (ОАО «НИИЭС»).

При полевых исследованиях [1] были устроены промежуточные склады 1 и 2, в которых создавались смеси суглинков с гравийно-галечниковым грунтом для основного тела ядра и для его контактной зоны, а также возведены опытные насыпи 1 и 2 для указанных зон, в которых отрабатывался способ укладки и уплотнения грунтовых смесей. Толщина слоев отсыпки суглинков в складе 1 составляла 0,45 м, в складе 2 – 0,90 м, соответственно толщина слоев гравийно-галечникового грунта $0,50 \text{ м} \div 0,60 \text{ м}$ и $0,30 \text{ м} \div 0,50 \text{ м}$. Слои суглинков и гравийно-галечникового грунта в складах чередовались, высота каждого склада составляла 4 м, размеры в плане $50 \text{ м} \times 50 \text{ м}$.

В процессе отсыпки промежуточных складов, как для основной зоны ядра, так и для контактной, производилась корректировка толщины и влажности отсыпаемых слоев в

зависимости от состава и влажности поступающих из месторождения грунтов, для чего на всех звеньях технологической цепи полевых исследований был организован геотехнический контроль.

Опыт строительства плотины Нурекской ГЭС показал, что наилучшее сочетание фильтрационных, деформационных и прочностных характеристик скелетно-глинистого грунта требуемого проектом гранулометрического состава достигается при твёрдой консистенции мелкозёма для основной зоны ядра и при полутвёрдой-тугопластичной консистенции для контактной зоны. Поэтому влажность мелкозема (фракций менее 4,75 мм) в складе 1 поддерживалась на уровне от 0,10 до 0,15, а в складе 2 – от 0,16 до 0,19, предполагая, что уплотнением грунтовой смеси в насыпи 1 до плотности сухого мелкозёма = 1,85 т/м³ и в насыпи 2 до плотности сухого мелкозёма = 1,80 т/м³ будет обеспечено условие сохранения указанной консистенции мелкозема при полном водонасыщении [2].

Грунтовая смесь основной зоны ядра (максимальная крупность фракций < 200 мм) укладывалась в опытную насыпь 1, а контактной зоны (максимальная крупность фракций < 75 мм) – в насыпь 2. Принципиальных различий в проведении работ на обеих насыпях не было, поэтому их описание даётся совместно.

Разработка склада производилась единым забоем на всю высоту экскаватором с ковшом 3,5 м³ и погрузчиком с ковшом 7 м³. Грунт в забое перемешивался этими механизмами и загружался в автосамосвалы с кузовом ёмкостью 25 м³. Полученная таким образом грунтовая смесь выгружалась из автосамосвалов на картах отсыпки и разравнивалась бульдозером. После разравнивания, не допуская изменения влажности грунта, производилось его уплотнение с помощью самоходного виброкатка с передним гладким вальцом W1802Д

фирмы «VIBROMAX» общей массой 16200 кг (масса передней катковой части 10800 кг, удельное линейное давление 50,2 кН/м, частота колебаний 1600 мин⁻¹, амплитуда 2 мм, возмущающая сила 280 кН).

Размеры насыпей в плане 60×22 м. На насыпи 1 было уложено (в порядке возведения) 4 слоя по 0,40 м, пятый слой – 0,50 м, шестой – 0,60 м, седьмой – 0,50 м и последний восьмой слой имел толщину 0,60 м. Такой порядок возведения был обусловлен поиском оптимальных параметров уплотнения в конкретных условиях (толщина слоёв, количество ходок катка, влажность грунта). На насыпи 2 первые 3 слоя имели мощность 0,40 м, четвёртый слой – 0,50 м, и последний пятый слой 0,55 м.

Перед отсыпкой очередного слоя поверхность предыдущего разрыхлялась траками бульдозера при его движении по карте. После этого производилось увлажнение взрыхлённой поверхности с помощью поливочной машины. При вышеуказанных размерах карт обычно требовалась примерно одна ёмкость машины (7,5 т). При выпадении дождя обе эти операции по подготовке поверхности отменялись.

В процессе послойного уплотнения грунтовых смесей был отработан оптимальный режим работы катка. Первый проход катка по свежееотсыпанному слою проводился при выключенном вибраторе со скоростью не более 3 км/час. Все последующие проходы выполнялись с включённым вибратором в положении «Stage – 1» (т.е. высокая возмущающая сила, низкая частота, большая амплитуда), с той же скоростью. Последний проход проводился со скоростью не более 2 км/час. Все проходы катка с включённым вибратором выполнялись только вперёд. В противном случае, возникало несоответствие между направлением кругового движения вальца и направлением движения самого катка, что приводило к развитию

растягивающих напряжений на уплотняемой поверхности, и, как следствие, появлению на ней многочисленных трещин с раскрытием до 10–15 мм. Проходы катка с выключенным вибратором можно было делать в любом направлении. Движение катка по карте выполнялось как по спирали, так и «змейкой», при этом каток не приближался к свободному краю ближе, чем на 0,5 м (во избежание его опрокидывания). Перед отсыпкой смежной карты края уплотнённого слоя срезались. Время, необходимое для уплотнения одного слоя размером в плане 60 м × 20 м одним проходом катка при скорости 3 км/час, составляло 20–25 мин. Таким образом, общая производительность катка составляла примерно 3500 м²/час уплотняемой поверхности за один проход или (при слое толщиной 0,40 м и необходимом числе проходов 8) в объёмном выражении – примерно 200 кубометров грунта в час.

Время, потребное на отсыпку слоя размером в плане 60 м × 20 м при толщине 0,4 м с помощью вышеуказанных механизмов, при расстоянии от забоя на складе до карты 50 ÷ 100 м, составляло примерно 4 часа. Время, необходимое для разравнивания грунта на карте одним бульдозером, 1,5–2 часа. Подготовка поверхности предыдущего слоя перед отсыпкой последующего (рыхление, увлажнение) занимала, примерно, 1,0 ÷ 1,5 часа.

Эти величины положены в основу для расчёта необходимого количества механизмов на плотине, количества карт и интенсивности ведения работ.

Результаты геотехнического контроля на опытных насыпях 1 и 2 представлены в таблице 2. Гранулометрические составы грунтовых смесей, полученных на опытных насыпях, в таблице не приводятся, поскольку все они точно укладывались в соответствующие границы, установленные проектом.

Таблица 2

Результаты геотехнического контроля за укладкой смесей суглинков с гравийно-галечниковым грунтом на опытных насыпях 1 и 2 (средние значения по слоям)

Номер слоя в порядке возвешения насыпи	Толщина слоя, м	Количество проходв катка по следу	Влажность мелкозема перед укаткой, д. ед.	Содержание мелкозема (<4,75мм) в грунте, %	Оптимальная влажность, мелкозема, д. ед.	Максимальная плотность сухого мелкозема, т/м ³	Лунки				Монолиты				Пределы пластичности			Обеспеченность стенни уплотнения мелкозема D = 0,97, %	Плотность сухого мелкозема при вероятности $\alpha = 0,95$	Плотность сухого мелкозема при вероятности $\alpha = 0,99$
							Плотность сухого грунта, т/м ³	Влажность мелкозема, д. ед.	Плотность сухого мелкозема, т/м ³	Степень уплотнения мелкозема, D	Влажность мелкозема, д. ед.	Плотность сухого мелкозема, т/м ³	Степень уплотнения мелкозема, D	W _L , д. ед.	W _p , д. ед.	I _p , д. ед.				
Опытная насыпь 1																				
1	0,40	8	0,09	58	0,14	1,91	—	—	—	—	0,08	1,83	0,96	0,25	0,16	0,09	—	—	—	
2	0,40	8	0,10	61	0,14	1,87	2,19	0,12	1,86	0,99	0,08	1,91	1,02	0,28	0,19	0,09	87,1	1,90	1,89	
3	0,40	8	0,11	57	0,14	1,89	2,18	0,11	1,85	0,98	0,11	1,89	1,00	0,28	0,18	0,10	82,8	1,89	1,87	
4	0,40	8	0,12	54	0,14	1,88	2,27	0,11	1,97	1,05	0,10	1,94	1,03	0,28	0,18	0,10	100,0	1,93	1,92	
5	0,50	8	0,10	65	0,14	1,88	2,28	0,10	2,02	1,07	0,11	1,91	1,02	0,27	0,18	0,09	95,8	1,90	1,90	
6	0,60	8	0,11	52	0,14	1,88	2,23	0,09	1,93	1,03	0,10	1,94	1,03	0,28	0,19	0,09	97,9	1,93	—	
7	0,50	6	0,10	66	0,14	1,90	2,21	0,10	1,93	1,01	0,10	1,94	1,02	0,28	0,18	0,10	97,6	1,93	1,93	
8	0,60	6	0,14	63	0,13	1,90	2,17	0,12	1,85	0,97	0,12	1,92	1,01	0,27	0,18	0,09	—	—	—	
Среднее значение по насыпи			0,11	59,5	0,14	1,89	2,22	0,11	1,92	1,01	0,10	1,91	1,01	0,27	0,18	0,09	—	1,91	1,90	

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Опытная насыпь 2																			
1	0,40	8	0,14	63	0,13	1,87	2,24	0,12	1,93	1,03	0,13	1,87	1,00	0,28	0,17	0,11	100	1,86	1,85
2	0,40	8	0,11	70	0,14	1,88	2,25	0,11	1,98	1,05	0,10	1,98	1,05	0,28	0,18	0,10	87,2	1,96	1,85
3	0,40	8	0,13	68	0,14	1,86	2,22	0,12	1,92	1,03	0,12	1,92	1,03	0,29	0,18	0,11	93,7	1,85	1,85
4	0,50	6	0,11	80	0,14	1,86	2,20	0,11	1,95	1,05	0,12	1,95	1,05	0,29	0,19	0,10	93,7	1,86	1,86
5	0,55	6	0,16	77	0,15	1,84	2,16	0,12	1,88	1,02	0,12	1,88	1,02	0,29	0,19	0,10	–	–	–
Среднее значение по насыпи			0,13	72	0,14	1,86	2,21	0,12	1,93	1,04	0,12	1,92	1,03	0,28	0,18	0,10	–	1,88	1,85

По результатам контроля качества укладки грунтов сформулированы основные требования к влажности, плотности и технологии уплотнения смеси суглинка с гравийно-галечниковым грунтом:

- в основное тело ядра плотины смесь необходимо укладывать при твёрдой консистенции мелкозёма с влажностью $0,10 \div 0,15$. Требуемая плотность сухого мелкозёма, после уплотнения, должна быть $\rho_d \geq 1,90 \text{ т/м}^3$ при минимально допустимых значениях в отдельных пробах $\rho_d^{\min} \geq 1,85 \text{ т/м}^3$, что соответствует плотности сухой грунтовой смеси в целом $2,00 - 2,30 \text{ т/м}^3$ в зависимости от содержания и вида крупного заполнителя.

- в контактную зону ядра смесь следует укладывать при полутвёрдой и тугопластичной консистенции мелкозёма с влажностью $0,16 \div 0,19$. Требуемая плотность сухого мелкозёма после укатки грунта должна быть $\rho_d \geq 1,85 \text{ т/м}^3$ при минимально допустимых значениях в отдельных пробах $\rho_d^{\min} \geq 1,80 \text{ т/м}^3$, что соответствует плотности грунтовой смеси в целом $1,90 - 2,10 \text{ т/м}^3$.

- для получения требуемых параметров плотности укатку грунтовой смеси следует производить слоями $0,40 \text{ м}$ в рыхлом теле за 8 проходов по следу тяжёлого вибрационного катка с удельным линейным давлением более 50 кН/м при вышеописанном режиме работы. Как известно из практики строительства для исследуемых грунтов полезно применение таких катков с кулачками «пэдфут».

Для проведения фильтрационных исследований в теле насыпей 1 и 2 было устроено по два шурфа глубиной $1,3 \text{ м} \div 1,5 \text{ м}$. Каждый шурф располагался над полиэтиленовой плёнкой размером в плане $8 \times 8 \text{ м}$, заложенной при возведении насыпей. Необходимо отметить, что проходка шурфов

выполнялась медленными темпами, спустя семь месяцев после возведения насыпей, что привело к потере влажности грунтового массива, высыханию его с поверхности и образованию трещин усадки. В качестве примера, на рис. 2 приведено геологическое описание одного из шурфов.

ШУРФ № 1/2.
Опытная насыпь № 2.
Глубина – 1,35 м; Сечение 1,5×1,5 м²
Способ проходки вручную (ломом, лопатой)

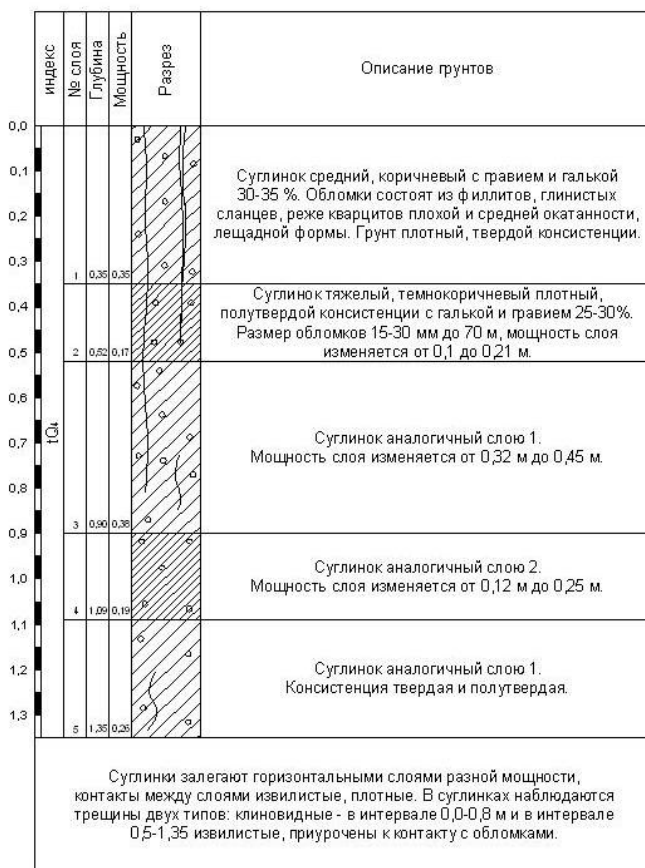


Рис. 2. Геологическое описание шурфа № 1/2

Несмотря на выявленные дефекты, было принято решение проводить фильтрационные опыты и рассматривать их результаты как экстремальные. Для этого стенки шурфов были закреплены деревянной опалубкой и фильтровой обсыпкой. По периметру шурфов, на расстоянии 0,5 м от стенок и далее, с шагом 1 м, установлены трубчатые пьезометры, всего по 3 штуки с каждой стороны.

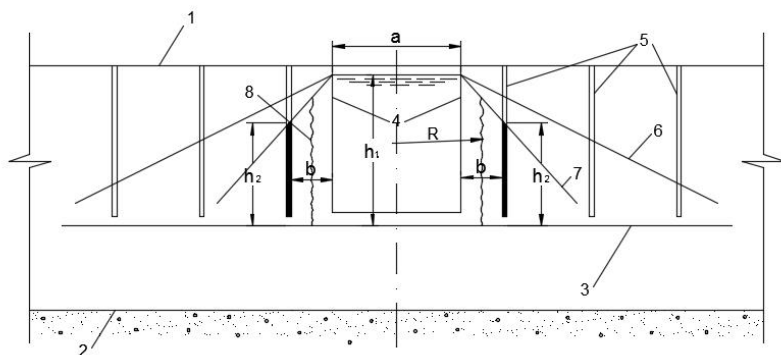
В шурфы была залита вода и уровень её поддерживался до момента условной стабилизации расходов и депрессионной поверхности в пьезометрах.

Согласно программе исследований, для стабилизации фильтрационного режима предполагалось выдержать шурфы, заполненные водой 2–3 месяца и только после этого начинать измерения расходов и уровней воды для расчётов коэффициента фильтрации тела насыпи. Однако, в связи со значительным отставанием от намеченного графика проведения полевых исследований, замеры расходов и уровней воды для расчёта коэффициента фильтрации пришлось выполнять через месяц после заливки шурфов.

Расходы воды на испарение не замерялись и в расчётах не учитывались. Как известно, все принятые условности и допущения идут в запас при критической оценке водопроницаемости грунта.

Следует отметить, что на момент контрольных замеров во всех шурфах уровни воды установились только в пьезометрах первого ряда, расположенных на расстоянии 0,5 м от стенок шурфов. Поэтому, определение коэффициента фильтрации тела насыпей для каждого шурфа выполняли только по одному расчётному сечению, представляющему из себя цилиндрическую поверхность, расположенную между стенками

шурфа и первым рядом пьезометров. Расчётная схема и формулы приведены на рис. 3.



$$K_{\phi} = \frac{Q}{\omega \cdot J}; \quad J = \frac{h_1 - h_2}{b}; \quad \omega = \pi \cdot R \cdot (h_1 + h_2); \quad R = 0,5(a + b).$$

Рис. 3. Расчётная схема и формулы для определения коэффициента фильтрации K_{ϕ} тела насыпей вдоль слоев укатки:

- 1 – поверхность насыпи; 2 – гравийно-галечниковое основание;
- 3 – полиэтиленовая пленка; 4 – стенки наливного шурфа;
- 5 – пьезометры; 6 – ожидаемая поверхность депрессии при стабилизированном режиме фильтрации; 7 – фактическая поверхность депрессии условно стабилизированного фильтрационного потока в момент определения K_{ϕ} ;
- 8 – расчетная площадь фильтрации ω

В зависимости от размеров шурфов и уровней воды в пьезометрах, площадь фильтрации в расчётных сечениях составляла от 6,78 м² до 10,52 м², расход воды от 44 до 85 л/сут, градиенты напора от 1,2 до 1,35. Расчёт коэффициентов фильтрации тела насыпей по экспериментальным данным приведён в таблице 3.

Таблица 3.

**Расчёт коэффициентов фильтрации тела насыпей 1 и 2
по экспериментальным данным**

№ насыпи	№ шурфа	Расход воды, Q л/сут.	Средний градиент напора, I	Расчётная площадь фильтрации, ω, м ²	Коэффициент фильтрации $K_f = \frac{Q}{\omega \times I}$, см/с
1	1/1	85	1.35	9,32	$7,8 \times 10^{-6}$
	2/1	71	1.30	10,52	$6,0 \times 10^{-6}$
2	1/2	44	1.28	6,78	$5,9 \times 10^{-6}$
	2/2	56	1.20	6,91	$7,8 \times 10^{-6}$

Как видно из таблицы, коэффициент фильтрации насыпей в расчётных сечениях равен $A \times 10^{-6}$ см/с, где А – любое число от 1 до 10.

В пьезометрах второго и третьего ряда, находящихся, соответственно, на расстоянии 1,5 и 2,5 м от стенок шурфов, вода на момент окончания работ не появилась, что говорит о значительно меньшей водопроницаемости той части изучаемого грунтового массива, которая находится глубже 0,5 м от его дневной поверхности и, следовательно, не затронута трещинами усадки.

Учитывая всё это, был сделан вывод о том, что исследуемые грунтовые смеси в теле насыпей имеют достаточно

низкую водопроницаемость и, вполне, могут быть использованы для создания противофильтрационного ядра плотины.

Углублённое изучение фильтрационно-суффозионной прочности смеси суглинков с гравийно-галечниковым грунтом было выполнено [3] в лабораторных условиях на больших образцах диаметром 0,3 м

При этом, для создания модельных смесей фракции крупностью более 40 мм заменялись на фракции 20–40 мм, фильтр по торцам образца выполнялся фракциями 0,1–20 мм.

Смеси испытывались на высоконапорной установке, позволяющей создавать сжимающие напряжения в образце до 6,0 МПа и градиенты напора до 100.

Начальная плотность сухого грунта для смеси, содержащей 40 % мелкозёма, составляла $2,20 \text{ т/м}^3$, а для смеси, содержащей 70 % мелкозёма – $2,02 \text{ т/м}^3$.

Испытаниями установлено, что водопроницаемость материала ядра плотины зависит от процентного содержания мелкозёма, начальной плотности грунтовой смеси и величины сжимающих напряжений в ней.

С увеличением сжимающих напряжений в грунтовых смесях, имеющих различное содержание мелкозёма, их коэффициент фильтрации уменьшается, как показано на рис. 4, что можно объяснить повышением плотности смесей. Во всех опытах при достижении максимальных величин сжимающих напряжений произошло уплотнение испытываемых образцов смеси, плотность сухого грунта достигла значений $2,38\text{--}2,43 \text{ т/м}^3$.

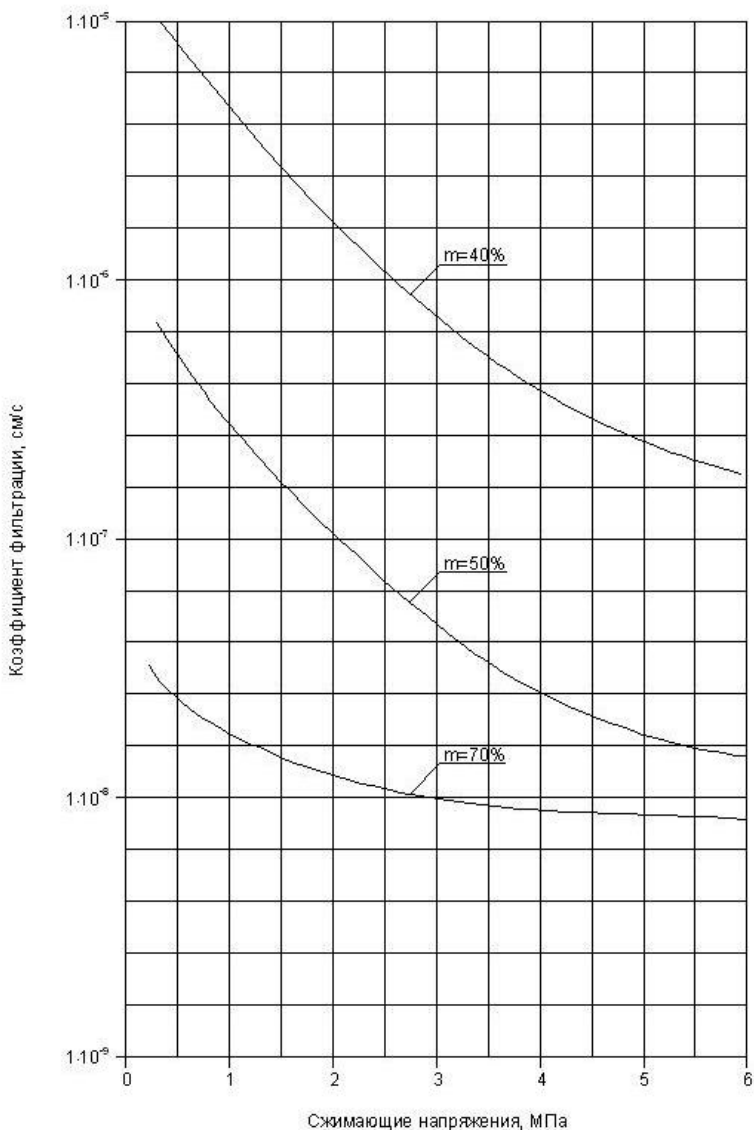


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента фильтрации смеси суглинка с гравийно-галечниковым грунтом от сжимающих напряжений в испытываемом образце:

m – содержание мелкозема (фракций мельче 4,75 мм) в смеси.

Смеси суглинка с гравийно-галечниковым грунтом, характеризующиеся гранулометрическим составом, соответствующим проекту, во всех режимах испытаний фильтрационно-устойчивы и отвечают нормативным требованиям, предъявляемым к материалу противофильтрационных устройств.

Деформативно-прочностные характеристики смеси определялись [4] на приборах трёхосного сжатия, предназначенных для испытания образцов диаметром 60 мм и высотой 120 мм. В связи с этим максимальный размер частиц в образцах составлял 10 мм. Учитывая то, что средние гранулометрические составы смесей, рекомендованных проектом к укладке в основное тело ядра и его контактную зону содержат соответственно около 60 % и около 80 % мелкозёма, были испытаны две грунтовые смеси. Эти смеси содержали 60 и 80 % мелкозёма с добавлением до 100 % фракции крупностью $4,75 \div 10$ мм. Такая замена была обоснована экспериментальной работой [5] и приводила к незначительному (до 1°) уменьшению угла внутреннего трения, что идёт в запас прочности. Деформативные характеристики грунта натурального гранулометрического состава и модельных смесей различаются не более, чем на $5 \div 7\%$.

Программа исследования грунтовых смесей включала проведение опытов по консолидированно-дренированной схеме трёхосного сжатия при следующих значениях всестороннего обжатия: 0,05; 0,1; 0,3; 0,5; 0,8 и 1,2 МПа. Модельная смесь основного тела ядра, содержащая 60 % мелкозёма, испытывалась при начальных значениях влажности 0,08 и плотности сухого грунта $2,07 \text{ т/м}^3$, а модельная смесь контактной зоны – при начальных значениях влажности 0,15 и плотности сухого грунта $1,89 \text{ т/м}^3$.

В результате трёхосных испытаний установлено, что огибающие предельных напряжений, отражающие связь между интенсивностью касательных напряжений σ_i^* и средним эффективным напряжением σ , аппроксимируются линейными функциями:

– для основного тела ядра $\sigma_i^* = 0,15 + 0,754 \sigma$, МПа,

– для контактной зоны $\sigma_i^* = 0,075 + 0,662 \sigma$, МПа.

При построении огибающих функций $\sigma_i^*(\sigma)$ в качестве предельных значений напряжений принимались напряжения последних ступеней нагружения, при которых деформации ещё стабилизировались. Определённые по этим напряжениям параметры прочности также имеют некоторый запас.

Нормативные значения прочностных характеристик, пересчитанные в параметры прочности Мора-Кулона составили:

– для основного тела ядра $\text{tg } \varphi = 0,63$; $\varphi = 32,2^\circ$;
 $C = 0,126$ МПа;

– для контактной зоны $\text{tg } \varphi = 0,545$; $\varphi = 28,6^\circ$;
 $C = 0,066$ МПа.

Зависимости модуля сдвига G и модуля объёмной деформации K от среднего эффективного напряжения σ и интенсивности деформаций сдвига e_i аппроксимируются выражениями:

- для основного тела ядра $G = \frac{0,15 + 0,754\sigma}{0,0056 + 0,98e_i}$, МПа

$$K = 24 + 12\sigma, \text{ МПа};$$

- для контактной зоны $G = \frac{0,075 + 0,662\sigma}{0,0122 + 0,916e_i}$, МПа

$$K = 6,8 + 8,5\sigma, \text{ МПа}.$$

В результате выполненного комплекса полевых и лабораторных исследований установлены:

- возможность и целесообразность приготовления смесей суглинков с гравийно-галечниковым грунтом для ядра плотины;
- технология укладки грунтовых смесей в тело плотины;
- контрольные параметры плотности и влажности смесей, применяемых для возведения сооружения;
- фильтрационно-суффозионные и деформативно-прочностные характеристики смесей, использованные для расчётов фильтрационного режима и напряжённо-деформированного состояния плотины, а также устойчивости её откосов.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Отчёт** «Научно-методическое руководство полевыми исследованиями технологии укладки грунтов в плотину г/у Тери (Индия). НИС Гидропроекта, 1990.

2. **Борткевич С.В.** Основные требования к качеству скелетно-глинистых ядер каменно-земляных плотин. // Гидротехническое строительство. № 8. 1973.

3. **Отчёт** «Исследование фильтрационно-суффозионных свойств материалов грунтовой плотины ГЭС Тери (Индия)». НИС Гидропроекта, 1990.

4. **Отчёт** «Экспериментальное определение расчётных деформативно-прочностных характеристик крупнообломочных и глинистых материалов плотины г/у Тери при статических и динамических воздействиях». НИС Гидропроекта, 1990.

5. **Воронцов Э.И., Чумичёв Б.Д.** Моделирование зернового состава крупнообломочных грунтов при исследованиях прочностных и деформативных свойств. Экспресс-информация «Энергетика и электрификация», серия: Сооружение ГЭС, вып. 7, 11, 1985.

О коэффициенте уплотнения крупнообломочных грунтов при строительстве дорог, земляных и гидротехнических сооружений

Аверьянов В.Н., главный инженер проекта, ЗАО "Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро "ГИТЕСТ"

Опубликовано: Информационный вестник государственного автономного учреждения Московской области «Мособлэкспертиза. Выпуск № 4 (31). М.: 2010, с. 48–50

Качество возведения земляных и гидротехнических сооружений или подготовки оснований, а также эксплуатационная безопасность обеспечиваются соблюдением требований СНиП 3.02.01-87 «Земляные сооружения, основания и фундаменты» и СНиП 2.05.02-85 «Автомобильные дороги» в части коэффициента уплотнения грунтов $k_{упл}$.

Под коэффициентом уплотнения понимается отношение фактической плотности сухого грунта ρ_d в сооружении (основании) к максимальной ρ_d^{max} , т.е.:

$$k_{упл} = \frac{\rho_d}{\rho_d^{max}}$$

Максимальная плотность грунтов крупностью до 20 мм определяется послойным уплотнением по ГОСТ 22733-2002 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности».

Для грунтов большей крупности пока не существует Российского стандарта по определению их максимальной плотности.

В то же время известно, что крупнообломочные грунты применяются для наиболее ответственных частей земляных сооружений: боковых призм плотин, балластных подсыпок и дренажей дорог, крепления берегов рек и др. С увеличением плотности крупнообломочных грунтов существенно увеличивается их прочность (см. рис. 1) поэтому актуальным является определение максимальной плотности крупнообломочных грунтов.

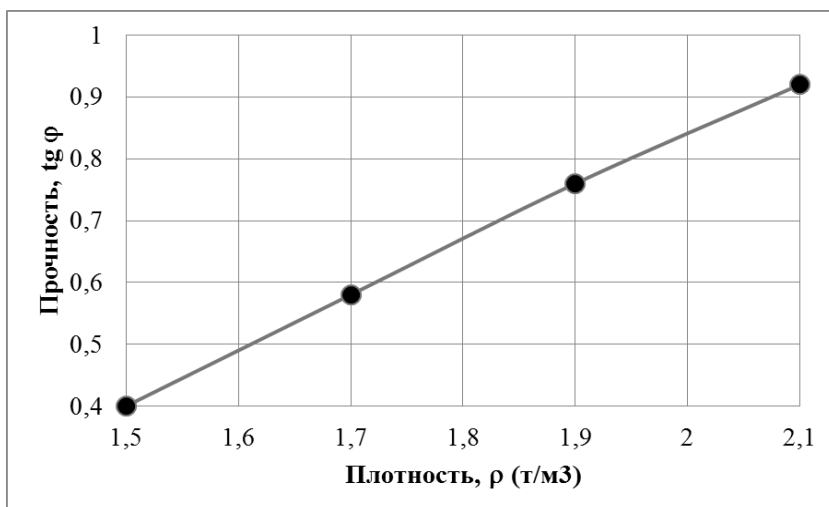


Рис. 1. Зависимость прочности горной массы от плотности.

За рубежом для определения максимальной плотности крупнообломочных грунтов и их модельных смесей применяют вибрирование. Вибрационный метод испытания оправдал себя на практике и используется во всех странах, например в США по государственному стандарту ASTM D2049 грунт вибрируют под пригрузом в цилиндрической форме диаметром 152 мм или

279 мм на вибрационном столе с вертикально направленными колебаниями. В этом методе из-за недостаточной свободы передвижения частиц в условиях вертикально направленных колебаний переупаковка грунта полностью не реализуется.

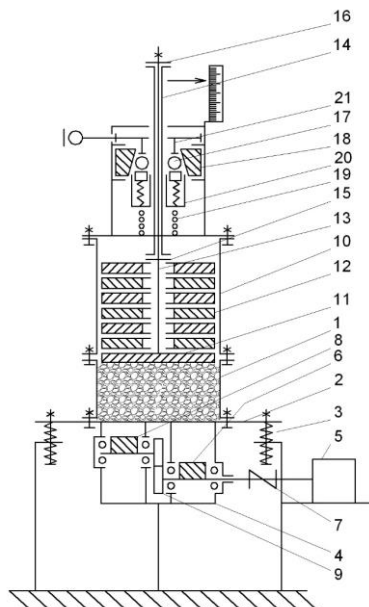
Фирмой «Динапак» разработан свой собственный лабораторный метод, по которому вибрационная трамбовка, устанавливаемая сверху, уплотняет грунт в форме диаметром 150 мм. Метод апробирован и принят в качестве шведского стандарта. Аналогичный метод с использованием вибрационной трамбовки был разработан в Англии и утвержден в качестве британского стандарта – 1377 (испытание 14).

Недостатком этих методов определения максимальной плотности крупнообломочных грунтов является дополнительное дробление грунтовых образцов при испытаниях, что обычно приводит к завышению значений плотности и осложняет задачу достижения нормативного коэффициента уплотнения в натуре.

Все эти недостатки устранены в устройстве для определения максимальной плотности и коэффициента уплотнения крупнообломочных грунтов, выполненном по патенту РФ № 2002891, которое отличается применением объемной вибрации, складывающейся из одновременно направленных вертикальных и крутильных горизонтальных колебаний, применением шариковой муфты одностороннего хода и использованием пригруза, состоящего из несвязанных между собой дисков.

Схема и общий вид устройства приведены на рис. 2, а технические характеристики – в таблице 1.

а)



б)



Рис. 2. Прибор для лабораторного определения максимальной плотности и коэффициента уплотнения крупнообломочных грунтов:
а) – схема; б) – общий вид:

1 – контейнер с грунтом; 2 – вибростол; 3 – пружины; 4 – вибратор;
5 – электродвигатель; 6 – ведущий дебаланс; 7 – эластичная муфта;
8 – ведомый дебаланс; 9 – шестерни; 10 – корпус для размещения пригрузочных дисков; 11 – пригрузочный поршень; 12 – пригрузочные диски; 13 – шток пригрузочного поршня; 14 – полый шток муфты одностороннего хода; 15 – закрепляющий запечник; 16 – прижимная шайба; 17 – шарики муфты одностороннего хода; 18 – конусное кольцо; 19 – прижимная пружина; 20 – сепаратор; 21 направляющая втулка

Таблица 1.

Частота колебаний вибростола, Гц	50
Возмущающая сила вибровозбудителя, кгс	1860
Тип колебаний	Направленные по вертикали и крутильные по горизонтали
Амплитуда колебаний, мм	1,0
Мощность электропривода, кВт	2,2
Внутренний диаметр контейнера для грунта, мм	310
Высота контейнера для грунта, мм	300
Суммарная масса пригрузочного устройства, кг	100
Суммарное удельное давление постоянного пригруза, МПа, (кг/см ²)	0,013(0,13)
Количество (шт) и масса пригрузочных дисков (кг)	6×15
Наибольший осевой ход штока, мм	60
Стандартное время уплотнения, мин	2
Габариты (Д×Ш×В), мм	950×650×1500

Объемная вибрация позволяет полностью реализовать переупаковку частиц грунта и сократить время вибрирования образца до 2 мин., что в свою очередь снижает разрушение частиц грунта и, таким образом, увеличивает точность измерения максимальной плотности сложения грунта.

Этому же способствует применение пригруза, состоящего из шести несвязанных между собой дисков, поскольку такой пригруз исключает виброударный режим работы при большой амплитуде перемещений и, следовательно, уменьшает разрушение частиц грунта.

Применение шариковой муфты одностороннего хода позволяет избежать разуплотнения грунта в контейнере на переходных режимах работы вибростола и способствует большей точности измерений.

Контейнер (1) с образцом исследуемого грунта установлен на вибростоле (2) подрессоренным пружинами (3), которому передаются колебания с помощью вибратора (4). Вращающий момент от электродвигателя (5) передается ведущему дебалансу (6) с помощью эластичной муфты (7), а также ведомому дебалансу (8) с помощью пары шестерен (9) с равным числом зубьев.

Сверху на контейнере с образцом грунта устанавливается пригруз, собранный в корпусе (10), состоящий из пригрузочного поршня (11) и свободно лежащих на нем пригрузочных дисков (12). Шток пригрузочного поршня (13) входит в полый шток (14) муфты одностороннего хода и закреплен в нем с помощью заплечика (15) и прижимной шайбы (16).

Муфта одностороннего хода, позволяющая штоку с подвешенным на нем пригрузом перемещаться только вниз, состоит из шариков (17), поджатых к конусному кольцу (18) пружиной (19) через сепаратор (20). Муфта выключается с помощью направляющей втулки (21), отжимающей шарики от конусного кольца.

В процессе вибрационных испытаний грунта на описанном устройстве устанавливается зависимость плотности сухого грунта от его влажности при уплотнении с постоянными параметрами, а также максимальная плотность сухого грунта. Влажность, при которой достигается максимальная плотность сухого грунта, является оптимальной влажностью.

Это же устройство позволяет определять плотность грунта в предельно рыхлом сложении.

Учитывая, что гранулометрический состав крупнообломочных грунтов может изменяться в значительных диапазонах как по крупности, так и по содержанию мелкозема, разработана специальная методика исследования влияния этих параметров на величину максимальной плотности и

коэффициента уплотнения, которая успешно опробована и осуществлена на плотинах Богучанской ГЭС (Россия), Нурекской ГЭС (Таджикистан), Тери (Индия), Тишрин (Сирия) и др.

Помимо крупнообломочных грунтов устройство позволяет испытывать низкопрочные (разрушаемые при уплотнении) грунты, шлаки и грунтовые смеси, обрабатываемые вяжущим. Сравнение результатов определения максимальной плотности горной массы низкопрочных карбонатных пород на вышеописанном устройстве с результатами определения на виброустановке ASTM D2049 (США) и на установке для испытания грунта по ГОСТ 22733-2002 (РФ) приведены на рис. 3. Из рисунка видно, что испытания известными методами ASTM и ГОСТ приводят к недоуплотнению низкопрочного грунта, а значит, к получению недостаточно качественного сооружения, возводимого из такого грунта.

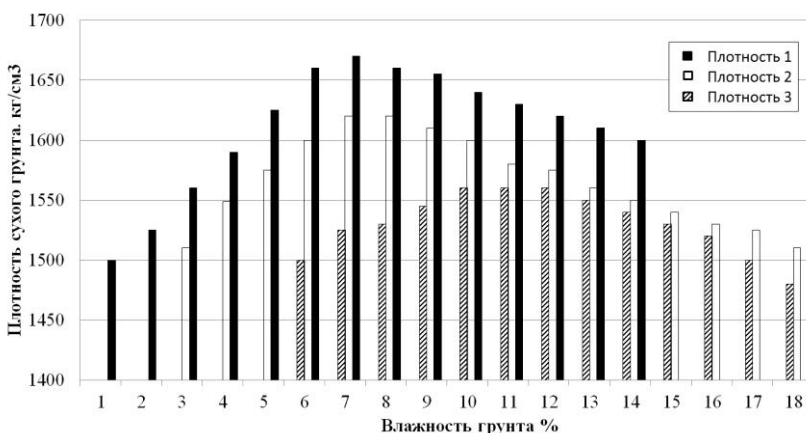


Рис. 3. Сравнение результатов определения максимальной плотности горной массы низкопрочных карбонатных пород на приборе, выполненном по патенту РФ № 2002891 (1), с результатами определения на виброустановке ASTM D2049 (2) и на установке для испытания грунта методом стандартного уплотнения по ГОСТ 22733-2002 (3).

Применение предлагаемого метода и прибора для определения максимальной плотности и коэффициента уплотнения крупнообломочных грунтов при изысканиях, проектировании и строительстве грунтовых сооружений позволяет повысить качество этих работ и точность объемов, что особенно актуально в условиях действия динамических эксплуатационных нагрузок, в том числе от движущегося транспорта.

Технологические возможности повышения сейсмостойкости строящихся высоких каменно-земляных плотин

Борткевич В.С., ОАО «Институт МосводоканалНИИпроект»,
Жерихин А.С., ЗАО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ»

Опубликовано: Природообустройство // Научно-практический журнал ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», № 1. М.: 2015, с. 31–37

Высокие каменно-земляные плотины, включающие ядро из скелетно-глинистых грунтов и боковые призмы из крупнозернистых (крупнообломочных) грунтов, обычно возводят на скальном основании в сейсмически активных районах со сложными инженерно-геологическими условиями строительства. Это объясняется относительно малой деформируемостью материалов тела плотин и возможностью выполнения надёжного сопряжения их ядер, являющихся противофильтрационными устройствами, с бортами вмещающих скальных массивов. К таким сооружениям относятся построенные с участием российских специалистов Нурекская плотина высотой 304 м в Таджикистане, Тери высотой 261 м в Индии, а также строящиеся в Таджикистане Рогунской ГЭС высотой 335 м и ГЭС Shuangjiangkou на реке Даду высотой 312 м в Китае.

Расчёты устойчивости откосов описаны в СНиП 2.06.05-84* «Плотины из грунтовых материалов» и СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах». Кроме этого сейсмостойкость высоких плотин обосновывается в

России большим объёмом расчётных исследований напряженно-деформированного состояния при различных способах задания сейсмического воздействия на сооружения и разных математических моделях поведения грунтов [1, 2, 3].

Обычно выполняемый комплекс расчётных исследований позволяет установить, что при интенсивном сейсмическом воздействии в теле высокой плотины могут возникать зоны с прогрессирующим накоплением пластических деформаций, по которым формируются нарушения монолитности тела плотины и поверхности обрушения её откосов. Расчётными исследованиями определены места появления таких опасных зон при действии разрушительных землетрясений. Они располагаются у пригребневой зоны откосов плотины и в средней части верховой боковой призмы. Степень приближения к критическому состоянию тела плотины в этих зонах при сейсмическом воздействии пока однозначно не определяется.

Следует отметить, что в настоящее время строительство высоких каменно-земляных плотин осуществляется в условиях общего повышения сейсмической активности в мире и в более сложных инженерно-геологических условиях по сравнению с ранее возведёнными сооружениями [4]. В неоднородных скальных основаниях этих сооружений имеются разломы и трещины различного порядка, а в некоторых из них наблюдаются тектонические подвижки. Измерения напряжений в массиве скальных пород зачастую показывают их значительную величину, причём горизонтальные напряжения могут превышать вертикальные.

Необходимо учитывать, что сложность строения такого природного массива горных пород не позволяет выявить все без исключения «дефекты» основания, на котором строится и будет эксплуатироваться плотина, даже при самых детальнейших

современных инженерно-геологических исследованиях. Поэтому в оценке инженерно-геологических условий объекта и в прогнозах их изменения под влиянием техногенных факторов всегда присутствует некоторый элемент неопределённости [5].

Вышеуказанные особенности инженерно-геологического строения оснований высоких каменно-земляных плотин и вероятность проявления тектонических подвижек в бортах вмещающих скальных массивов при землетрясениях пока не нашли отражение ни в одной методике расчётных исследований напряжённо-деформированного состояния и сейсмостойкости плотин.

Технологическими исследованиями по укладке гравийно-галечниковых грунтов в боковые призмы строящейся плотины Рогунской ГЭС установлено, что структура сложения насыпей из натуральных грунтов существенно отличается от структуры сложения модельных смесей, для которых в лабораторных условиях определены и использованы в расчётах связи между напряжениями и деформациями [6]. Модельные смеси приготавливались из условия ограничения крупности и равномерного смешивания фракций грунта. В реальных условиях при возведении боковых призм из гравийно-галечниковых грунтов равномерного смешивания фракций не происходит. Вследствие большой разнородности этих грунтов (степень неоднородности гранулометрического состава $C_u = 200 \dots 400$) образуется матричная структура массива. Элементами структуры являются: матрица из фракций размером до 40...80 мм, называемая «основой», со значительно бóльшим содержанием мелкозёма (частиц мельче 5 мм), чем в отсыпаемом грунте; включения гнёзд валунов размером до 600...800 мм, называемые «скоплениями», неравномерно распределённые по объёму насыпей и практически не

содержащие мелкозём. Объём единичных «скоплений» валунов достигает $1,5 \text{ м}^3$, а общий – 15...50 % в зависимости от гранулометрического состава отсыпаемого грунта. На рис. 1 показан фрагмент поверхности опытной насыпи в теле плотины Рогунской ГЭС и стенка шурфа со «скоплением» валунов.

а)



б)



Рис.1. Опытная насыпь из гравийно-галечникового грунта в теле плотины Рогунской ГЭС:

- а – фрагмент поверхности насыпи;
- б – стенка шурфа для определения плотности;

На рис. 2 приведены карты распространения скоростей продольных упругих волн в опытных насыпях по результатам сейсмоакустической томографии. Наблюдаемая неравномерность распределения скоростей упругих волн соответствует неравномерности распределения физико-механических характеристик грунта в теле насыпей. Плотность сухого грунта в боковых призмах плотины составляет $2,0 \dots 2,4 \text{ т/м}^3$.

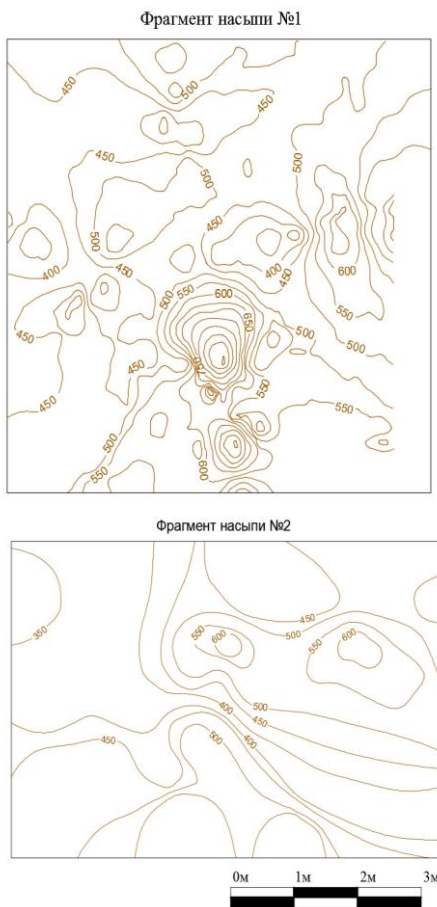


Рис.2. Карты распределения скоростей продольных упругих волн в опытных насыпях из гравийно-галечниковых грунтов:
350...500 – изолинии скоростей, м/с;

Основными способами повышения сейсмостойкости массива из крупнозернистых грунтов являются регулирование гранулометрического состава и качественное уплотнение грунтов, которые позволяют устранить возможность возникновения опасных деформаций и порового давления воды, а также максимально использовать свойство дилатансии разнозернистых грунтов для повышения прочности массива при сейсмическом воздействии. Исследованиями процессов динамического уплотнения гравийно-галечниковых грунтов было установлено, что коэффициент уплотнения $K_{com} \geq 0,97$ [7].

Такое уплотнение обеспечивает получение устойчивой структуры грунта и гарантирует сохранение этой структуры в условиях динамических воздействий на сооружение. Однако в СНиП 2.06.05-84* «Плотины из грунтовых материалов» и в СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» не нормируется величина коэффициента уплотнения грунтов в теле плотин. Не приводится каких-либо сведений по коэффициенту уплотнения грунтов в сооружениях и при составлении для них деклараций безопасности. До настоящего времени в России не разработан государственный стандарт на определение максимальной плотности крупнозернистых грунтов, знание которой необходимо при определении коэффициента уплотнения по формуле:

$$K_{com} = \rho_d / \rho_d^{\max}, \quad (1)$$

где: ρ_d – плотность сухого грунта в теле сооружения;

ρ_d^{\max} – максимальная плотность грунта по результатам испытаний;

В этих условиях следует учитывать возможность нарушения монолитности тела высокой плотины и снижения

устойчивости откосов при сейсмических воздействиях вследствие адаптации сооружения к вмещающей среде и действующим нагрузкам, а также возможность накопления остаточных деформаций и повреждений, в том числе и тех, которые происходят при относительно слабых землетрясениях в процессе заполнения водохранилища и эксплуатации сооружения.

Известны способы повышения сейсмостойкости плотин из грунтовых материалов при конструктивном разбиении их тела на блоки из грунтов с разным отношением модуля Юнга к плотности, препятствующие возникновению резонансного режима колебаний сооружения [8, 9]. Однако эти способы трудновыполнимы в практике строительства.

Исключить местные нарушения и накопление пластических деформаций в теле плотины от сейсмических воздействий возможно введением в крупнозернистый грунт боковых призм искусственных материалов, способных воспринимать растягивающие усилия, т.е. созданием геокомпозитов. К таким технологическим приёмам относится укрепление каменно-земляной плотины по авторскому свидетельству № 1717710 [10]. Этот приём включает закладку в плотину перфорированных на отдельных участках труб и омоноличивание через них крупнозернистого грунта инъекцией связующего раствора. Сварные плети труб закладываются горизонтально в боковые призмы по направлению от откосов к ядру при послойном возведении плотины. Концы труб, выходящие на откосы плотины, подключают к системе нагнетания связующего раствора, приготовленного на основе цемента, жидкого стекла и т.п. По окончании возведения плотины или её части производят нагнетание связующего раствора в трубы, через перфорацию которых омоноличивается

крупнозернистый грунт боковых призм. Омоноличенные зоны крупнозернистого грунта могут располагаться в теле плотины в шахматном порядке с шагом, от величины которого зависит общее сцепление грунта по массиву. Повышение сцепления трубчатой арматуры с грунтом и общего сцепления грунта по массиву при сохранении его водопроницаемости позволяет увеличить крутизну откосов плотины и повысить сейсмостойкость сооружения. Длина труб, укладываемых в направлении от поверхности откосов плотины к её ядру, обусловлена положением границ между оползающим и неподвижным грунтом в неукреплённом массиве при критической величине сейсмического воздействия. Для определения количества труб, их расположения и поперечного сечения могут быть использованы ранее указанные методы расчёта напряжённо-деформированного состояния плотин или программа расчёта откосов плотин из упрочнённого гравийно-галечникового грунта [11].

К технологическим приёмам, повышающим сейсмостойкость плотин относится и способ возведения земляного сооружения по авторскому свидетельству № 2055118, который заключается в том, что при отсыпке каждого слоя грунта производят укладку в него отдельными зонами равномерно по слою твердеющего консистентного материала и арматуры. Твердеющий консистентный материал укладывают на отдельных участках арматуры (многоточечная анкеровка) [12]. Арматуру располагают в теле боковых призм плотины также, как в ранее описанном способе. Твердеющий консистентный материал (раствор) подают к месту укладки автотранспортом, разравнивают и уплотняют в процессе проведения аналогичных работ на слое отсыпки грунта. Эти способы позволяют создать в теле плотины геокомпозит,

состоящий из крупнозернистого грунта, включений консистентного твердеющего материала (связующего раствора) и заделанных в них арматурных ветвей. В таком геокомпозите усилия на арматуру передаются посредством заделки её в твердеющий материал, а не посредством контакта с грунтом, как это должно иметь место в армированном грунте и может быть осуществлено только в грунтах ограниченной крупности со специально подобранным гранулометрическим составом. Укрепленная зона плотины может воспринимать значительные напряжения без образования трещин.

Результаты расчёта устойчивости откосов плотины высотой 335 м с учётом возведения её по способу, предложенному авторским свидетельством № 2055118, в условиях расчётного сейсмического воздействия 9 баллов и при наихудшем распределении пиковых горизонтальных ускорений по высоте плотины (с максимальным значением на гребне) показали возможность замены рваного камня пригрузки боковых призм плотины на упрочнённый гравийно-галечниковый грунт без уменьшения крутизны откосов [13]. Величины усилий в арматуре, количество арматуры на 1 м высоты и длины плотины для стали марок Ст3 и А11, обеспечивающее значения коэффициентов запаса устойчивости обоих откосов равными 1,185, приведены в таблице

Откос	Усилие в арматуре на 1 м высоты слоя, кН	Площадь сечения арматуры	
		Сталь Ст3 (R=2100 кг/см ²), см ²	Сталь А-11 (R=5170 кг/см ²), см ²
Верховой	176	8,4	3,4
Низовой	60	2,9	1,2

Для восприятия таких усилий в создаваемом геокомпозите могут применяться вместо арматуры и более современные искусственные материалы, например, такие, как полотнища (решётки) тканого геотекстиля Stabilenka®. В случае применения тканого геотекстиля не требуется укладывать в гравийно-галечниковый грунт твердеющий консистентный материал.

В качестве примера использования армирующих элементов из тканого геотекстиля для упрочнения откосов высокой каменно-земляной плотины можно привести плотину ГЭС Shuangjiangkou в Китае, поперечный профиль которой показан на рис. 3 [14].

Тканый геотекстиль Stabilenka® представляет собой ткань из полиэстера в продольном направлении (основа) и полиамида или полиэстера в поперечном направлении. Материал обладает долговечностью, высокой прочностью при растяжении, выдерживает большие растягивающие усилия при незначительном удлинении и эффективен при необходимости армирования грунта с небольшими допустимыми деформациями. Существует несколько стандартных типов материала с различными значениями прочности 150...1000 кН/м при растяжении [15].

Тканый геотекстиль Stabilenka®, выпускаемый германской фирмой HUESKER Synthetic GmbH&Co, широко опробован в мировой практике при строительстве и эксплуатации крупных морских гидротехнических сооружений, а также при строительстве дорожных насыпей на слабых грунтах в России.

В перспективе возможно появление аналогичного материала отечественного производства при реализации отраслевой программы внедрения композиционных материалов, конструкций и изделий из них в строительном комплексе Российской Федерации, утверждённой приказом Министерства регионального развития РФ от 24 июля 2013 г. № 306.

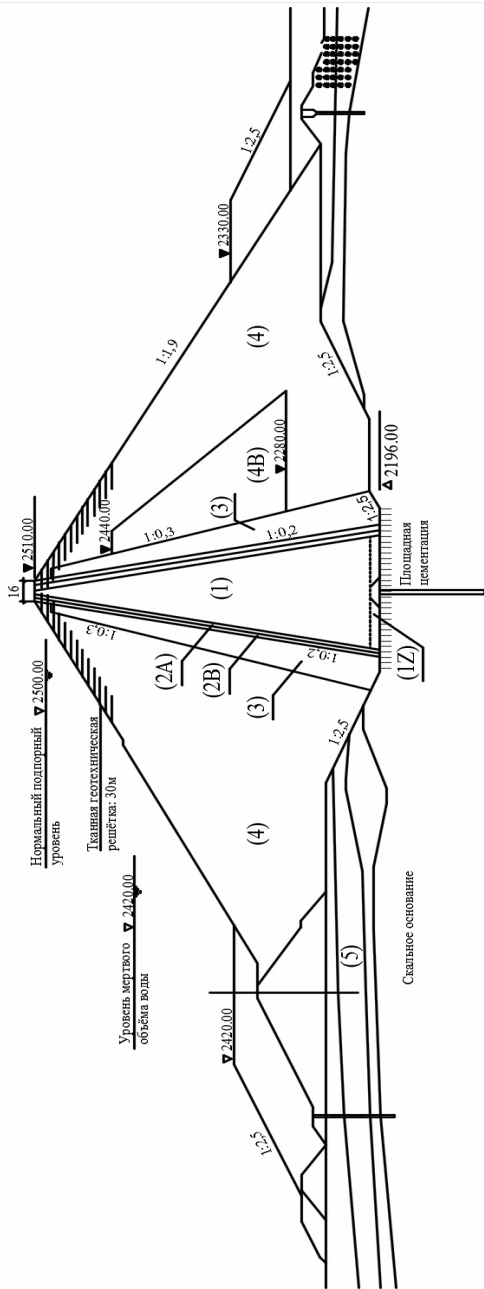


Рис.3. Поперечный профиль плотины ГЭС Shuangjiangkou:

1 – ядро из водонепроницаемого гравелистого грунта; **1Z** – контактный слой из глины; **2A** – фильтр А; **2B** – фильтр В; **3** – переходная зона; **4** – боковые призмы из уплотнённой каменной наброски; **4B** – внутренняя зона уплотнённого мелкого камня; **5** – пригруженное основание, состоящее из трёх слоёв грунта различной консистенции

Укладка арматуры с многоточечной анкеровкой в грунте или укладка полотнищ (решёток) тканого геотекстиля могут быть применены для создания геокомпозита в потенциально опасных зонах, формирующихся при критических сейсмических воздействиях в теле высокой плотины (рис. 4).

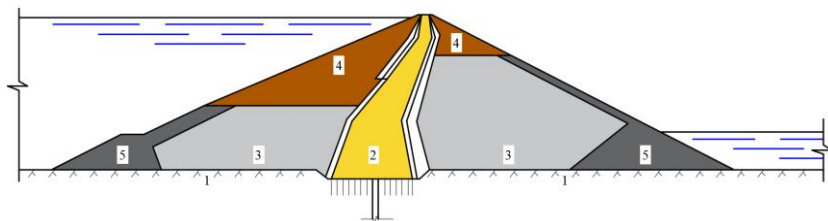


Рис.4. Вариант повышения сейсмостойкости высокой каменно-земляной плотины:

- 1 – скальное основание; 2 – скелетно-глинистый грунт;
- 3 – гравийно-галечниковый грунт; 4 – геокомпозит (гравийно-галечниковый грунт, укрепленный арматурой с многоточечной анкеровкой или полотнищами тканого геотекстиля);
- 5 – каменная наброска

Создание геокомпозитов в зонах ожидаемого развития пластических деформаций, которые могут появиться в теле высоких плотин при действии особенно интенсивных землетрясений, позволит компенсировать влияние отрицательных природных факторов, не выявленных в процессе изысканий и неучтённых расчётными исследованиями сейсмостойкости плотин, что существенно повысит надёжность этих ответственных сооружений.

Выводы

1. Высокие каменно-земляные плотины строятся в сложных инженерно-геологических условиях, не позволяющих полностью выявить все факторы отрицательного воздействия вмещающей природной среды на сооружение и особенности поведения слагающих его грунтов при землетрясениях, поэтому в качестве предупреждающей меры следует считать полезным профилактическое повышение их сейсмостойкости известными в настоящее время и относительно простыми в исполнении технологическими приёмами строительства.

2. Регулирование гранулометрического состава и качественное уплотнение грунтов являются основными способами повышения сейсмостойкости массива из крупнозернистых грунтов в теле плотины.

3. Повышение сейсмостойкости плотины может быть достигнуто применением геокомпозитов в зонах вероятного развития пластических деформаций от сейсмических воздействий. Расположение этих зон определяется расчётом напряжённо-деформированного состояния плотины при критических расчётных сейсмических нагрузках.

4. В крупнозернистых грунтах, характеризующихся большой неоднородностью, геокомпозиты рекомендуется создавать послойной или поярусной укладкой арматуры и её многоточечной анкерровкой в грунте или укладкой полотнищ высокопрочного тканого геотекстиля.

Пристатейный библиографический список

1. Зарецкий Ю.К., Ломбардо В.Н. Статика и динамика грунтовых плотин. М.: Энергоатомиздат. 1983. – 256 с.
2. Лятхер В.М., Иващенко И.Н. Сейсмостойкость грунтовых плотин. М.: Наука. 1986. – 278 с.
3. Гольдин А.Л., Рассказов Л.А. Проектирование грунтовых плотин. М.: Энергоатомиздат. 1987. – 303 с.
4. Савич А.И., Бронштейн В.И. Современное состояние и пути обеспечения сейсмостойкости и гидродинамической безопасности крупных энергообъектов // Гидротехническое строительство. 2000. № 8/9. – С. 60–70.
5. Парабучев И.А. Об актуальных проблемах инженерных изысканий для гидротехнического строительства // Гидротехническое строительство. 2003. № 3. – С. 6–10.
6. Борткевич С.В. Роль технологических исследований в научном обосновании плотин из грунтовых материалов // Гидротехническое строительство. 2009. № 8. – С. 31–35.
7. Борткевич С.В. О плотности укладки песчано-гравийных и галечниковых грунтов в тело плотины // Гидротехническое строительство. 1982. № 6. – С. 28–30.
8. А.С. СССР № 808581. Плотина из грунтовых материалов / Натариус Я.И. // Бюллетень изобретений. 1981. № 8. – 3 с.
9. А.С. СССР № 1301912. Земляная плотина / Гиленко М.Л. // Бюллетень изобретений. 1987. № 13. – 2 с.
10. А.С. СССР № 1717710. Устройство для укрепления каменно-земляной плотины / Борткевич С.В., Финк А.К., Щербина В.И., Каганов Г.М., Борткевич В.С. // Бюллетень изобретений. 1992. № 9. – 2 с.

11. Архиппова Е.К., Борткевич В.С. Программа расчёта откосов плотин из упрочнённого гравийно-галечникового грунта. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №980297. Российское агентство по правовой охране программ для ЭВМ, баз данных и технологий интегральных микросхем. 1998.

12. А.С. РФ № 2055118. Способ возведения земляного сооружения / Борткевич В.С., Савченков Н.Г., Финк А.К., Борткевич С.В. // Бюллетень изобретений. 1996. № 6. – 3 с.

13. Архиппова Е.К., Борткевич В.С., Скибин А.Н., Финк А.К. Разработка способа упрочнения гравийно-галечниковых грунтов в каменно-земляных плотинах // Гидротехническое строительство. 1995. № 1. – С. 18–22.

14. Публикация на официальном сайте ОАО «РусГидро» в разделе «Блог» от 20.07.2011 пользователем Пресс-служба. – www.rushydro.ru

15. Родькин А.П. Геосинтетические материалы для дорожного строительства // Строительные материалы. 2000, № 12. – С. 24–28.

Совершенствование технологии уплотнения глинистых грунтов при возведении гидротехнических сооружений

Сметанин В.И., Аверьянов В.Н., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»

Опубликовано: Природообустройство // Научно-практический журнал ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», № 2. М.: 2016, с. 28–36

Введение. Строительство и реконструкция грунтовых гидротехнических сооружений сопряжены с послойной укладкой и уплотнением несвязных и связных глинистых грунтов. Для достижения максимальной плотности перед уплотнением рекомендуется грунт доводить до оптимальной влажности. Значения оптимальной влажности устанавливаются на основании лабораторных испытаний, в результате которых определяют влажность W_{opt} – ту влажность, при которой достигается максимальная стандартная плотность сухого грунта $\rho_{d \max}$.

Укладка большинства несвязных грунтов обычно не вызывает особых проблем ни в период возведения, ни в процессе эксплуатации грунтовых сооружений. При укладке глинистых грунтов часто возникают обстоятельства, осложняющие процесс их укладки при строительстве, или вызывающие изменение их физико-механических свойств в период эксплуатации возведенного сооружения.

Например, изменение состояния глинистых грунтов в процессе замачивания и последующего водонасыщения приводило к разрушению гидротехнических сооружений (плотина на р.Мармарик высотой 64 м в Армении) или к необходимости ремонта их противофильтрационных устройств (плотина Болдерхед высотой 48 м, плотина Хиттеуевой высотой 93 м в Англии) и др.

С целью совершенствования технологии возведения грунтовых гидротехнических сооружений была изучена возможность уплотнения глинистых грунтов влажностью отличной от W_{opt} , изменяющейся в диапазоне влажностей от максимальной молекулярной влагоёмкости до влажности, соответствующей мягкопластичному состоянию.

Материалы и методы исследований. Исследования показали, что при уплотнении глинистых грунтов в указанном диапазоне влажностей вполне реально достижение значения плотности, при которой грунт характеризуется коэффициентом водонасыщения $S_r \geq 0,9$. При достижении грунтом $S_r \geq 0,9$ обеспечивается наименьшая водопроницаемость и наибольшая стабильность физико-механических свойств, как в процессе строительства, так и в период эксплуатации гидротехнического сооружения. Исключается переход грунта из состояния, достигнутого в процессе уплотнения глинистого грунта при возведении сооружения, в другое, возможно текучепластичное или текучее состояние, после его замачивания и водонасыщения в период эксплуатации сооружения.

Для определения оптимальной влажности и максимальной плотности применяют ударное воздействие на грунт, но удельная энергия уплотнения при этом существенно различается и варьирует от $5,9 \cdot 10^{-1}$ Дж/см³ (в методе

Американской ассоциации государственных служащих автомобильных дорог ААШО) до $27,0 \cdot 10^{-1}$ Дж/см³ (в модифицированном методе ААШО). Также производят лабораторное уплотнение грунта циклическими статическими нагрузками, моделирующими воздействие уплотняющих механизмов на грунт (методы, разработанные во ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева). Применяют динамическое ударно-вибрационное уплотнение, а также уплотнение вибрацией, перемятием и другими методами, которые воспроизводят процессы укатки грунта различными грунтоуплотняющими средствами (ВНИИ «ВОДГЕО», ВСЕГИНГЕО, Воронежский инженерно-строительный институт и др.).

По результатам лабораторных исследований построены графики зависимости плотности сухого грунта ρ_d от его влажности W , на которых выделены значения максимальной плотности сухого грунта $\rho_{d\max}$ и оптимальной влажности W_{opt} .

Изучена связь между максимальной плотностью сухого грунта и оптимальной влажностью для различных глинистых грунтов [1, 2]. В Российской Федерации в настоящее время действует ГОСТ 22733-2002 «Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности», в котором используется ударное воздействие на грунт. Этот метод разработан Государственным дорожным научно-исследовательским институтом (ФГУП «СоюздорНИИ»).

Сравнение результатов лабораторного уплотнения песчанистого суглинка различными методами, использующими ударное воздействие на грунт, приведено на рисунке 1. Как видно из рисунка, с увеличением удельной энергии уплотнения значение максимальной плотности сухого грунта возрастает сначала интенсивно, а затем затухает. При этом сохраняется линейная зависимость между значениями максимальной

плотности и оптимальной влажности (максимальная плотность возрастает по мере уменьшения оптимальной влажности). Такой же эффект уплотнения был отмечен при исследовании грунтовых смесей «ОСВ-песок» [3].

Кривые зависимости ρ_d от W , полученные на основании лабораторных испытаний грунта, в большинстве случаев, не соответствуют полученным при обработке результатов производственного уплотнения.

Поэтому, при строительстве гидротехнических сооружений, например плотин, перед началом возведения противифльтрационных устройств из глинистых грунтов, производят уплотнение грунта на опытных насыпях.

По результатам этих испытаний уточняют требования к плотности и влажности грунта, толщину уплотняемого слоя и режим уплотнения.

Но, и после отработки технологии уплотнения грунтов на опытных площадках, в процессе строительства приходится корректировать условия отсыпки и уплотнения грунтов, а также требования к качеству уплотнения по результатам производственного геотехнического контроля.

Исследованиями И.Е. Евгеньева, изложенными в трудах ФГУП «СоюздорНИИ» показано, что по стандартному методу понятие «требуемая плотность» не связано с расчётными показателями деформативности, прочности, пучинистости, поэтому невозможно представить, на сколько снижается надёжность конструкции вследствие некоторого недоуплотнения грунта; даже при достижении требуемой плотности глинистый грунт может иметь консистенцию от твёрдой до текучепластичной, соответственно в широком интервале изменяется и его прочность [4].

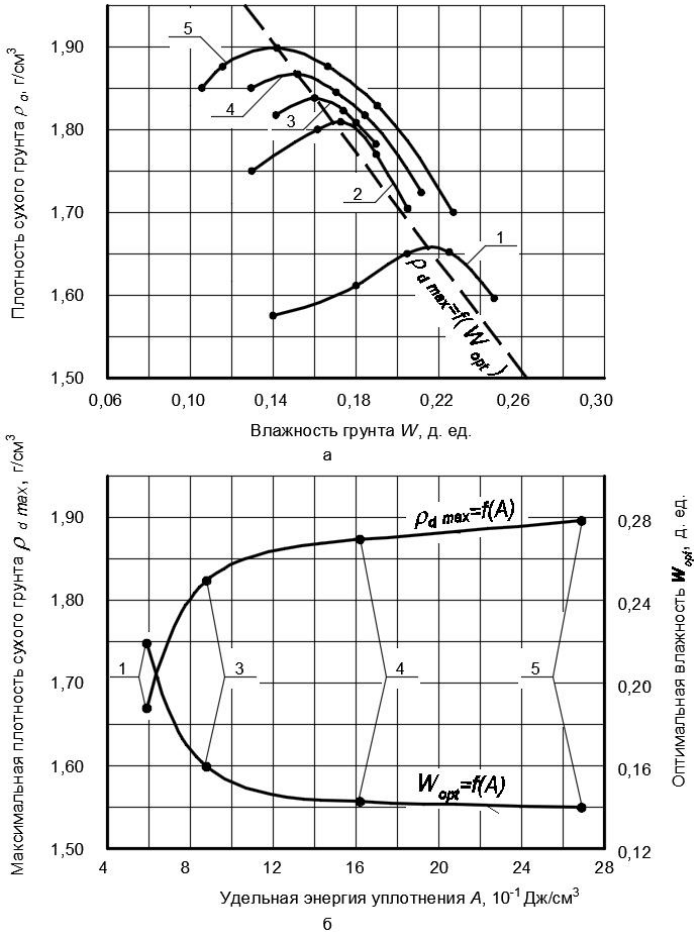


Рис. 1. Сравнение результатов лабораторного уплотнения песчанистого суглинка методами, использующими ударное воздействие на грунт: а – зависимости плотности сухого грунта ρ_d от влажности W , б – зависимость максимальной плотности сухого грунта $\rho_d \max$ и оптимальной влажности W_{opt} от удельной энергии уплотнения A :

1 – стандартный метод AASHO ($A=5,9 \cdot 10^{-1}$ Дж/см³); 2 – метод Проктора (ручное трамбование грунта, A – не определяется); 3 – ГОСТ 22733-2002 ($A=8,8 \cdot 10^{-1}$ Дж/см³); 4 – калифорнийский метод ($A=16,2 \cdot 10^{-1}$ Дж/см³); 5 – модифицированный метод AASHO ($A=27,0 \cdot 10^{-1}$ Дж/см³)

Практика проектирования и строительства плотин из грунтовых материалов в США показывает, что требуемое значение плотности колеблется от 90 % по стандартному методу AASHTO до 97 % по модифицированному методу AASHTO. Ещё более широко расходятся мнения относительно влажности грунта при укладке. Одни фирмы требуют укатки грунта с влажностью ниже оптимальной, другие – выше, третьи – только при оптимальной влажности. Степень колебаний достигает от 0,06 (выше оптимальной) до 0,02 (ниже оптимальной). Отмечается, что в общем случае ядро плотины при влажной укатке менее водопроницаемо и способно выдерживать деформации без трещинообразования [5].

Согласно СП 39.13330.2012 (Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84*) плотность грунта назначается в зависимости от конструктивных особенностей возводимого сооружения, требований к отсыпке грунта для последующего его уплотнения, интенсивности земляных работ.

Такой подход к возведению грунтовых насыпных гидротехнических сооружений из глинистых грунтов позволяет достичь нормативных требований к качеству земляных работ на стадии возведения, но не позволяет учитывать особенности формирования структуры и свойств глинистых грунтов, меняющихся при водонасыщении в период эксплуатации сооружения.

Структуру глинистых грунтов исследовали многие отечественные и зарубежные учёные: Е.М. Сергеев, В.И. Осипов, В.Н. Соколов, Т.Б. Лэмб, Г.Б. Сид, С.К. Чан и др. Исследованиями установлены два вида естественного структурообразования глинистых грунтов.

Первый – солевой, когда в коллоидном растворе в электрическом поле осаждаются диспергированные частицы, имеющие одноименные заряды, способствующие частицам скользить друг по другу, обеспечивая наилучшую их упаковку с образованием параллельной структуры расположения частиц.

Второй – несолевой, когда в коллоидном растворе, в электрическом поле отдельные частицы с разноименными зарядами склеиваются между собой в отдельные агрегаты, которые образуют структуры с хаотичным расположением частиц.

Ориентация частиц при этом получается хаотичной с расположением смежных частиц относительно друг друга близкой к перпендикулярному, то есть отрицательные полюса частиц притягиваются положительными. В первом случае структуру называют диспергационной и ориентацию частиц – параллельной, во втором случае – флокуляционной и ориентацию частиц – хаотичной.

При флокуляционной структуре сложения фильтрационные и механические свойства грунта определяются характером и прочностью связей между агрегатами, а не ориентацией частиц в агрегате. При диспергационном сложении большое значение приобретает степень ориентации частиц грунта. В природном состоянии подавляющее большинство континентальных глинистых грунтов осадочного происхождения характеризуется флокуляционной структурой.

В процессе уплотнения глинистого грунта, доставленного из карьера к месту укладки и распределённого по карте отсыпки равномерным слоем, в нём формируется структура, отличная от природной. Разрушаются агрегаты, уменьшается межагрегатная пористость и создаётся более однородное сложение грунтовой массы, которое в зависимости от влажности грунта, метода уплотнения и величины затраченной на уплотнение работы

может характеризоваться флокуляционной, либо диспергационной структурой. При одном и том же методе уплотнения грунта с различной влажностью преобразование структуры грунта с флокуляционной на диспергационную достигается уплотнением до достижения плотности глинистого грунта, при которой в грунте остаётся лишь 10 % незаполненных водой пор, то есть коэффициент водонасыщения грунта приобретает значение 0,9.

Преобразование флокуляционной структуры в диспергационную приводит к уменьшению коэффициента фильтрации глинистого грунта в десятки и сотни раз [6].

Диспергационная структура слабо реагирует на дополнительное увлажнение при дальнейшем водонасыщении грунта, что обеспечивает практически неизменность физико-механических и фильтрационных свойств глинистого грунта. Высокий уровень водонасыщения глинистого грунта способствует более равномерному распределению плотности по толщине уплотняемых слоёв, что доказано большим объёмом полевых исследований Е. Лефлайва и М. Шаефмера [7].

Требуемая плотность сухого грунта ρ_d , обеспечивающая переход из флокуляционной в диспергационную структуру, определяется по формуле:

$$\rho_d \geq \frac{S_r \cdot \rho_s \cdot \rho_w}{S_r \cdot \rho_w + W \cdot \rho_s} \quad (1)$$

где: $S_r = 0,9$ (значение коэффициента водонасыщения, при котором в процессе уплотнения формируется устойчивая диспергационная структура грунта); ρ_s – плотность частиц грунта, зависящая от минералогического состава, может изменяться в пределах 2,70...2,75 г/см³ и для большинства

глинистых грунтов составляет $2,72 \text{ г/см}^3$; ρ_w – плотность воды, 1 г/см^3 ; W – природная влажность глинистого грунта, д. ед.

Следует учитывать, что при уплотнении некоторых глинистых грунтов может проявляться тенденция к сохранению флокуляционной структуры или, наоборот, к переходу в диспергационную структуру. Поэтому, значение коэффициента водонасыщения S_r , при котором достигается устойчивая диспергационная структура грунта, может отклоняться в сторону его увеличения или уменьшения, как показывает практика исследований, в пределах от 0,85 до 0,95.

В зависимости от инженерно-геологических условий природная влажность глинистых грунтов может существенно различаться, соответственно различается их состояние, или консистенция, определяемая по показателю текучести I_L согласно ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация». В работах А.М. Васильева, Н.Н. Маслова, М.Н. Гольдштейна, Н.А. Цитовича, А.А. Кагана, Э.К. Кузахметовой и др. показано, что консистенция глинистого грунта является обобщённым показателем его физико-механических свойств. Учитывая этот факт, подбор уплотняющей техники для преобразования природной флокуляционной структуры грунта в диспергационную следует выполнять в зависимости от консистенции грунта.

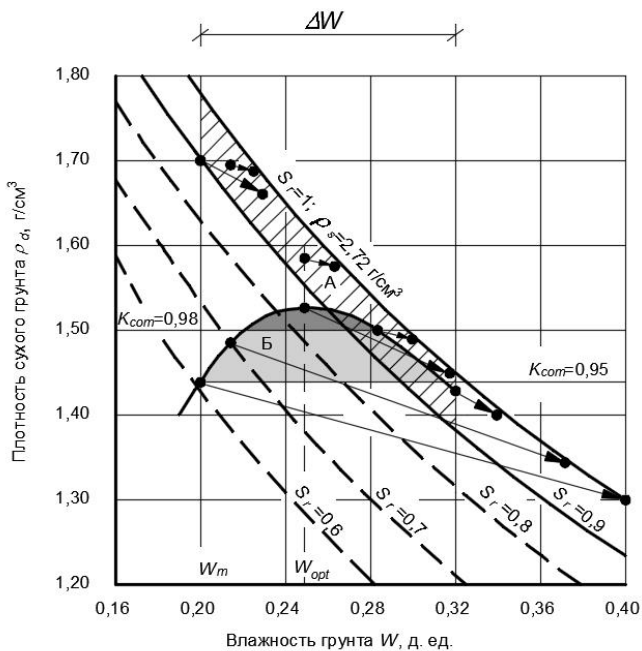
Если грунт в естественной залежи имеет твёрдую ($I_L < 0$) или полутвёрдую ($0 \leq I_L \leq 0,25$) консистенцию, то для его уплотнения в сооружении требуются механизмы с наибольшей энергией воздействия на уплотняемый грунт, такие как самоходные виброкатки с кулачковым вальцом типа "педфут", трамбуемые плиты или тяжёлые пневмокотки с высоким удельным давлением на грунт. Для грунта, имеющего тугопластичную консистенцию ($0,25 \leq I_L \leq 0,50$), понадобятся кулачковые катки статического

действия или пневмокатки со средним удельным давлением, а для грунта мягкопластичной консистенции ($0,50 \leq L \leq 0,75$) – лёгкие катки или бульдозеры, оказывающие наименьшее энергетическое воздействие на уплотняемый грунт. Грунты текучей ($L > 1,00$) и текучепластичной ($0,75 < L \leq 1,00$) консистенции, а также пересохшие грунты с влажностью, меньшей максимальной молекулярной влагоёмкости, не применяют для возведения земляных сооружений без предварительного их кондиционирования.

Таким образом, коэффициент водонасыщения $S_r \geq 0,9$ и консистенция глинистого грунта природной влажности являются новыми технологическими параметрами, при обеспечении которых уплотнением формируется устойчивая диспергационная структура грунта с наименьшей водопроницаемостью.

Инженерно-геологическими изысканиями устанавливается диапазон изменения природной влажности и консистенция глинистого грунта в месторождении, выбранном с целью возведения сооружения. Для этой консистенции подбирается грунтоуплотняющий механизм и по формуле (1) определяют требуемые значения плотности грунта, которые должны быть достигнуты его послойным уплотнением при природной влажности. Такой подход к определению технологических параметров уплотнения не связан с выполнением многократных стандартных испытаний уплотняемости грунта в лаборатории и подгоном их к производственным условиям.

На рис. 2 показана область требуемых значений плотности и влажности для глины твёрдой и полутвёрдой консистенции (А) в сравнении с требованиями СП 45.13330.2012 (Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87) при коэффициентах уплотнения $K_{com} = 0,95$ и $K_{com} = 0,98$ (Б).



Консистенция B	Твёрдая	Полутвёрдая	Тугопластичная	
Показатель текучести I_L , д. е. д.		0	0,25	0,50
Угол внутреннего трения φ , град	25+23	23+21	21+17	
Сцепление C , МПа	0,06+0,04	0,04+0,02	0,02+0,01	
Модуль деформации E , МПа	30+20	20+10	10+5	

Рис. 2. Область требуемых значений плотности и влажности, обеспечивающих формирование устойчивой дисперсионной структуры в уплотняемой глине твёрдой и полутвёрдой консистенции (А), в сравнении с требованиями к уплотнению грунтов по СП 45.13330.2012 (Б):

ΔW – диапазон изменения природной влажности глины;
 W_{opt} – оптимальная влажность по ГОСТ 22733-2002; W_m – максимальная молекулярная влагоёмкость; S_r – коэффициент водонасыщения;
 K_{com} – коэффициент уплотнения; ρ_s – плотность частиц грунта;
 \rightarrow – стрелки показывают изменение плотности и влажности уплотнённой глины при замачивании и водонасыщении

Из рисунка видно, что грунт, уплотнённый в соответствии с новыми технологическими требованиями (А) при полном водонасыщении не изменяет свою консистенцию и, соответственно, механические характеристики. Грунт, уплотнённый в соответствии с требованиями ныне действующих нормативных документов (Б), в аналогичных условиях может в значительной мере изменять свою консистенцию с твёрдой до мягкопластичной, вследствие чего в несколько раз снижаются его механические характеристики.

Такой процесс в суглинках и супесях, характеризующихся меньшей пластичностью, чем глина, может способствовать к их переходу в текучепластичное или текучее состояние и привести сооружение в аварийное состояние.

Выбор режима работы грунтоуплотняющих механизмов и толщины уплотняемых слоёв грунта, обеспечивающих соблюдение вышеуказанных технологических параметров уплотнения, должен производиться на основе опытной укатки грунта.

Наиболее высокие требования к качеству исполнения предъявляются к противофильтрационным устройствам, выполняемым в виде экрана. С целью достижения наименьшей водопроницаемости была опробована технология возведения экранов из глинистых грунтов природной влажности с использованием вышеизложенных теоретических положений уплотнения глинистых грунтов на строительстве верхнего аккумулирующего водоёма Днестровской ГАЭС, золоотвала Рязанской ГРЭС, бассейна суточного регулирования Зеленчукских ГЭС и иловых площадок Курьяновских очистных сооружений.

На строительстве Днестровской ГАЭС были устроены три опытных насыпи: из тяжёлых неогеновых глин, из лёгких

эолово-делювиальных глин и из неогеновых суглинков, а на строительстве золоотвала Рязанской ГРЭС – опытная насыпь из аллювиальных суглинков.

Глинистые грунты в полезных выемках разрабатывали экскаватором ЭО-4121А, вместимость ковша 1 м³, с погрузкой в автосамосвалы МАЗ-5549, МАЗ-551 и транспортировали в опытные насыпи, где укладывали при природной влажности, соответствующей твёрдой и полутвёрдой консистенции, слоями 0,25÷0,30 м в рыхлом теле с разравниванием бульдозером на базе трактора Т-130. Уплотнение каждого слоя грунта производили за 8 проходов по следу при скорости движения 5 км/час: в насыпях глин – гружёным автосамосвалом БелАЗ-540, а в насыпях суглинков – скрепером Д-357. Перед укладкой каждого последующего слоя поверхность предыдущего увлажняли по норме 5÷7 л/м² для получения качественного контакта слоёв. Опытные насыпи глин состояли из двух слоёв грунта, а насыпи суглинков – из четырёх.

После окончания возведения насыпей на их поверхности проходили шурфы, из которых в нижней половине каждого слоя отбирали контрольные пробы на плотность, влажность и пластичность. Отбор проб из шурфов производили методом режущего кольца в соответствии с ГОСТ 12071-2000 «Грунты. Отбор, упаковка, транспортирование и хранение образцов».

Результаты исследований. Анализ результатов опытного уплотнения показал, что на всех испытанных разновидностях глинистых грунтов новые технологические параметры уплотнения (консистенция и коэффициент водонасыщения), ограничивающие область требуемых значений плотности и влажности грунтов в насыпи, реализованы без каких-либо затруднений. Следовательно, при уплотнении этих грунтов была

получена диспергационная структура, обеспечивающая их наименьшую водопроницаемость. В качестве иллюстрации на рисунке 3 приведены результаты уплотнения глины в опытной насыпи, совмещённые с кривыми стандартного уплотнения в лабораторных условиях по ГОСТ 22733-2002 и по модифицированному методу AASHTO. Как видно из графика на рисунке 3, опытные точки, полученные при уплотнении глинистых грунтов природной влажности твёрдой и полутвёрдой консистенции, легли в зоне изменения коэффициентов водонасыщения $S_r = 0,9 \dots 1,0$, соответствующей правым ветвям кривых стандартного уплотнения грунта в лаборатории как по ГОСТ 22733-2002, так и по модифицированному методу AASHTO. Подобную картину подтверждают результаты полевых исследований уплотнения лёгких и тяжёлых глин твёрдой и полутвёрдой консистенции, выполненные под нашим методическим руководством лабораторией крупномасштабных гидравлических и геотехнических исследований Министерства Топлива и Энергетики Украины на строительстве Днестровской ГАЭС. Полученные значения плотности ρ_d , при соответствующих им влажностях W грунта, также попали в область, ограниченную технологическими параметрами от $S_r = 0,9 \dots 1,0$.

При этом выбор грунтоуплотняющих механизмов и режима уплотнения, ориентировался на использование новых технологических параметров в виде консистенции грунта соответствующей природной влажности и коэффициента водонасыщения $S_r \geq 0,9$.

Уплотнение глинистого грунта выполнялось кулачковым виброкатком ATLAS массой 16 т слоёв грунта толщиной по $0,25 \div 0,30$ м, а также кулачковым виброкатком НАММ массой 24 т слоёв грунта толщиной по $0,30 \div 0,35$ м.

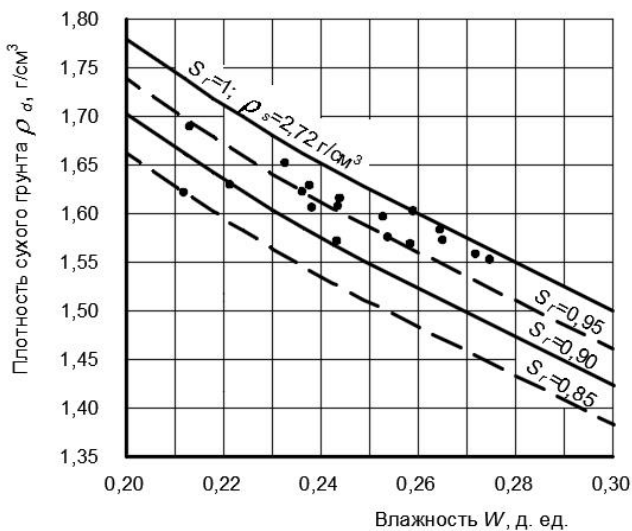
Уплотнение грунтов на картах отсыпки производили за 8 попутных проходов по одному следу кулачковым виброкатком ATLAS при скорости его перемещения 1,5 км/ч, и за 10 проходов в режиме, когда первый и три последних прохода осуществлялись на скорости до 2 км/ч, а промежуточные проходы на скорости 3 км/ч.

Результаты уплотнения глин природной влажности твёрдой и полутвёрдой консистенции кулачковым виброкатком ATLAS массой 16 т приведены на рисунке 4.

Из 18 проб, отобранных в насыпи, только 1 проба имела коэффициент водонасыщения ниже 0,9, т.е. обеспеченность значений $S_r \geq 0,9$ составила 95 %. Плотность сухого грунта ρ_d при той же обеспеченности составила 1,56 г/см³. При 50 % обеспеченности $S_r = 0,97$, а плотность $\rho_d = 1,61$. Максимальное значение плотности сухого грунта $\rho_d = 1,69$ при $S_r = 1$.

Исследования водопроницаемости уплотнённых в опытных насыпях глинистых грунтов при высоких градиентах фильтрации показали, что их коэффициент фильтрации значительно ниже 10^{-8} см/с ($\sim 10^{-5}$ м/сут).

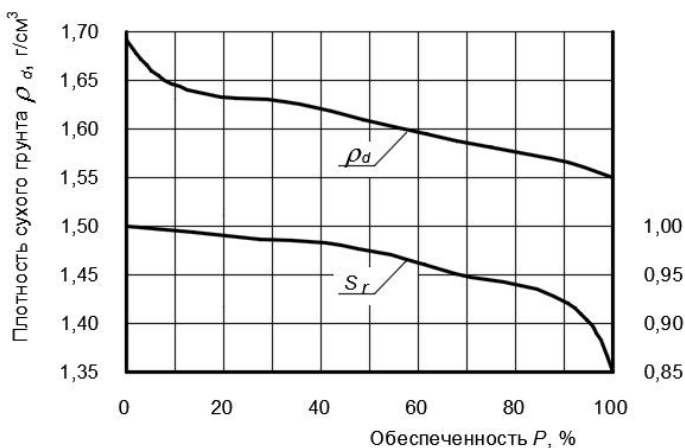
Уплотнение глинистых грунтов с введением новых требований к технологическим параметрам процесса уплотнения в виде коэффициента водонасыщения $S_r \geq 0,9$ и консистенции, соответствующей природной влажности, было применено при возведении экрана из лессовидных и делювиальных суглинков полезных выемок взамен плёночного экрана на строительстве бассейна суточного регулирования Зеленчукских ГЭС и при реконструкции иловых площадок Курьяновских очистных сооружений при возведении дамб и защитных экранов из глинистых грунтов моренных и флювиогляциальных отложений.



Консистенция

Твёрдая ($I_L < 0$)	Полутвёрдая ($0 < I_L < 0,25$)
-----------------------	----------------------------------

а



б

Рис. 4. Результаты уплотнения глины кулачковым виброркатком ATLAS массой 16 т за 10 проходов по следу на слое толщиной 0,3 м:

- а – зависимость плотности сухого грунта ρ_d от влажности W ;
- б – графики обеспеченности плотности сухого грунта ρ_d и коэффициента водонасыщения S_r .

Выводы

Наличие современного парка грунтоуплотняющей техники с различной степенью воздействия на грунт позволяет при уплотнении глинистого грунта природной влажности добиться плотности, обеспечивающей достижение грунтом коэффициента водонасыщения $S_r \geq 0,9$, характеризующего переход флокуляционной структуры глинистых грунтов в дисперсионную.

Изучение процесса изменения структуры глинистых грунтов при уплотнении позволило сформулировать новые технологические параметры: консистенция и коэффициент водонасыщения. По консистенции грунта выбирается грунтоуплотняющая машина, а по значению коэффициента водонасыщения $S_r = 0,9$, используя приведённую выше зависимость с учетом природной влажности уплотняемого грунта, определяют минимально допустимую плотность ρ_d , при достижении которой достигается переход флокуляционной структуры глинистых грунтов в дисперсионную.

Уплотнение глинистых грунтов природной влажности при возведении грунтовых сооружений позволяет избежать необходимости выполнения трудоёмких операций по доведению грунтов до оптимальной влажности, что сокращает сроки строительства и стоимость строительных работ.

Предлагаемая технология организации уплотнения глинистых грунтов, усовершенствованная новыми технологическими параметрами, может быть использована при возведении земляных сооружений в дорожном строительстве и в других отраслях народного хозяйства.

Библиографический список

1. Жарницкий В.Я. Оперативное определение параметров Проктора глинистых грунтов, используемых для устройства противofильтрационных элементов плотин // Гидротехническое строительство. – 2005. – №3. – с. 15–18.

2. Striegler W. Bodenmechanische Grenzwerte zur Verdichtung natürlicher Erddichtungsstaffe im Wasserbau // WWT•18. Jahrgang 1968. Heft2,p. 52–55.

3. Сметанин В.И., Земсков В.Н. Рекультивация земель с использованием осадков сточных вод // Природообустройство. – 2013. – №2. – С. 15–20.

4. Евгеньев И.Е. О дифференцировании требований к плотности грунтов земляного полотна // Труды СОЮЗДОРНИИ. Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоёв дорожных одежд. – М.: СОЮЗДОРНИИ, 1980. – С. 9–15.

5. Практика проектирования и строительства арочных, земляных, каменно-набросных и бетонных гравитационных плотин в США. Плотины из местных материалов // Перевод 626.3/П-69. Институт «Гидропроект» – М.: Гидропроект, 1985. – С. 46–48.

6. Лэмб Т.В. Структура уплотнённой глины // Перевод №2076. НИС Гидропроекта. – М.: Гидропроект, 1962. – 35 с.

7. Лефлайв Е. Шаефнер М. Значение толщины слоёв для уплотнения насыпи. Перевод с французского // Информационное издание ВИНТИ «Геология». – Выпуск 7. Реферат Е455. – М.: ВИНТИ, 1981. – 8 с.

О способах снижения порового давления в глинистых ядрах каменно-земляных плотин

Аверьянов В.Н., Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ»

Борткевич В.С., АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ»

Опубликовано: Природообустройство // Научно-практический журнал ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», № 3. М.: 2016, с. 8–14

Введение

Создание водохранилищ на горных реках в сложных инженерно-геологических условиях осуществляется чаще всего путем строительства высоких каменно-земляных плотин с ядром из глинистых грунтов. Задачи проектирования и строительства таких плотин требуют внимания к длительным процессам, происходящим в их теле и влияющим на качество строительства. Одним из таких процессов является возникновение при строительстве порового давления в ядрах из глинистых грунтов, характеризующихся коэффициентом фильтрации, меньшим чем $1 \cdot 10^{-7}$ см/с. Существуют различные инженерные решения по снижению порового давления, однако практическая реализация их остается под вопросом. В связи с этим возникает необходимость исследований существующих способов снижения порового давления и выбора наиболее надёжного способа с точки зрения эксплуатации плотины.

Материалы и методы исследований

Проведен научный анализ существующих инженерных решений по снижению порового давления в ядрах каменно-земляных плотин. На основе выполненного анализа и обобщения, ранее выполненных исследований свойств глинистых грунтов, даются рекомендации по снижению порового давления путем регулирования физико-механических и фильтрационных свойств грунта, укладываемого в ядро плотины.

Практика строительства показала, что высокое поровое давление в ядре, возникающее в процессе возведения плотины препятствует своевременной консолидации грунтов тела плотины [1]. Независимо от темпов возведения плотины в ядре формируется поровое давление в пределах 65...100 % от $\rho \cdot h$ (где ρ – плотность грунта, h – мощность толщи грунта над точкой измерения). В таблице 1 в качестве примера приведены несколько построенных плотин, где измерялось поровое давление и даны максимальные его значения.

Таблица 1

Поровое давление в глинистых ядрах каменно-земляных плотин

Наименование плотины	Страна	Высота плотины H , м	Коэффициент фильтрации грунта ядра K_f , см/с	Максимум порового давления в % от $\rho \cdot h$
Гепач	Австрия	153	$1 \cdot 10^{-7}$	70...100
Серр-Понсон	Франция	120	$5 \cdot 10^{-7}$	65...90
Кастилетто	Швейцария	74	$1 \cdot 10^{-8}$	100
им. 15 Хардада	Иран	70	$5 \cdot 10^{-8}$	70...100
Расхауптен	Германия	41	$1 \cdot 10^{-8}$	100

Высокое поровое давление в ядре при строительстве и в начальный период эксплуатации наблюдалось также на Чарвакской плотине в Узбекистане ($H = 168$ м), на плотине Хаобинь во Вьетнаме ($H = 105$ м) и на других плотинах.

На Чарвакской плотине, хорошо оснащенной контрольно-измерительной аппаратурой, максимальное значение порового давления было зафиксировано в центральной части ядра и к концу строительства составило 85...90 % от $\rho \cdot h$. Следует отметить, что такое высокое поровое давление сформировалось, несмотря на относительно низкие темпы укладки грунта в ядро плотины. Рост порового давления с нуля до 85...90 % от $\rho \cdot h$ приборы зафиксировали при укладке толщи грунта над ними до 30...40 м, далее при увеличении высоты плотины поровое давление увеличивалось пропорционально росту нагрузки от выше уложенного грунта.

Следует отметить, что измеренные в теле Чарвакской плотины вертикальные напряжения в грунте оказались несколько меньше $\rho \cdot h$, а в боковых призмах в примыкании к ядру они настолько же больше $\rho \cdot h$. Таким образом, имело место зависания ядра на боковых призмах и, следовательно, измеренное поровое давление относительно фактических напряжений в ядре составляло порядка 100 %. Подобная картина наблюдалась только в средней по высоте части ядра. Вблизи основания поровое давление уменьшалось за счет дренирующего эффекта скального основания. В верхней части ядра поровое давление было также меньше и составляло к концу строительства 30 % от $\rho \cdot h$.

В общем, в глинистых ядрах каменно-земляных плотин рассеивание порового давления происходит очень медленно, что способствует формированию в теле плотины неблагоприятного напряженно-деформированного состояния, изменяющегося во

времени. При высоком поровом давлении вероятная поверхность обрушения откосов плотины от сейсмических воздействий проходит через ядро, которое оказывает распорное давление на боковые призмы. По мере рассеивания порового давления могут ухудшаться условия фильтрации воды в отдельных зонах ядра и на контакте ядра с основанием плотины. В нормативном документе СП 39.13330.2012 Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84* «Плотины из грунтовых материалов» предусмотрены правила учёта порового давления при расчётном обосновании проектов плотин.

Неравномерность осадок тела плотины вследствие консолидации ядра и изменения напряженно-деформированного состояния может вызывать образование трещин в ядре и необходимость его ремонта с досыпкой гребня плотины так, как это было, например, на плотинах Гепач в Австрии ($H = 153$ м), Эль-Инферпильо в Мексике ($H = 148$ м) и др.

Чтобы ускорить рассеивание порового давления, а значит процесс консолидации глинистого ядра и получить к моменту окончания строительства стабильные напряжения в плотине, существуют предложения по уменьшению ширины ядра и его наклону с созданием понура в нижней части или бетонной пробки для лучшего прижатия ядра к основанию [2]. Известны инженерные решения, в которых, с целью ускорения консолидации тела плотины, внутри ядра размещается дренаж, который выполняется в виде горизонтальных прослоек, не доведенных до его верхней грани, или в виде порядно расположенных замкнутых полостей (дрен), заполненных несвязным материалом, как это показано на рисунке 1 [3, 4]. Горизонтальные дренажные прослойки, соединенные с переходной зоной между ядром и низовой боковой призмой плотины, снимают напоры воды, возникающие в глинистом

грунте ядра по мере роста плотины. А замкнутые полости, заполненные несвязным материалом, снижают поровое давление за счет того, что вода из пор глинистого грунта отдавливается в поры несвязного материала, сжимая находящийся в них воздух.

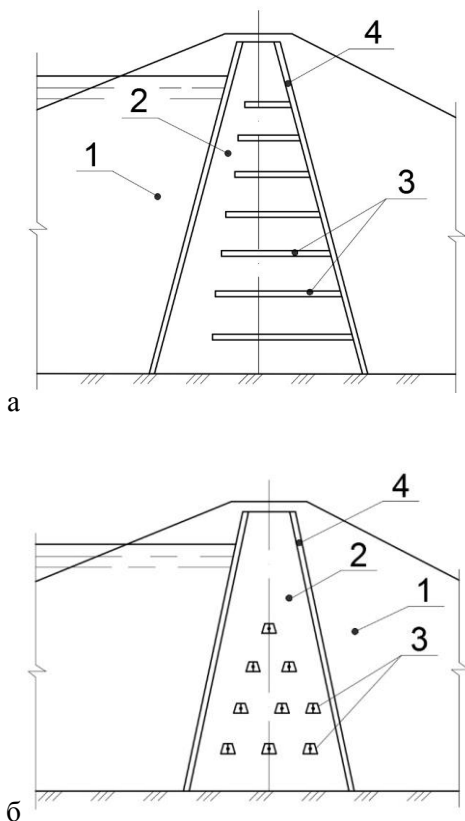


Рис. 1. Дренаж глинистого ядра каменно-земляной плотины, выполненный в виде горизонтальных прослоек (а) и в виде порядно расположенных замкнутых полостей (б), заполненных несвязным материалом:

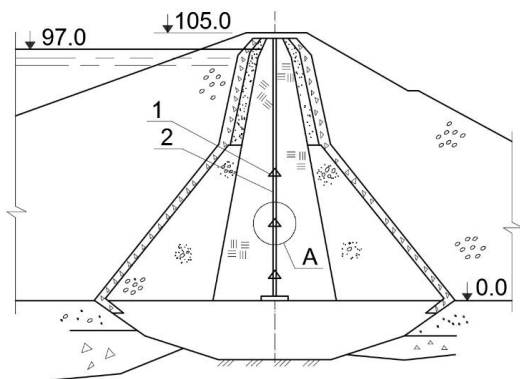
- 1 – боковые призмы плотины; 2 – глинистое ядро; 3 – дренаж;
- 4 – переходная зона

При возведении каменно-земляной плотины с ядром из глинистых грунтов повышенной относительно оптимальной влажности НИСом Гидропроекта (ныне АО «НИИЭС» РусГидро) был рассмотрен вариант устройства в ядре дренажной системы с отводом воды, отжимаемой из пор грунта. По этому варианту, основанному на изобретении по авторскому свидетельству 897923 «Плотина из местных материалов», замкнутые дренажные призмы, расположенные поярусно по высоте ядра в продольном направлении, устраивались в зонах предполагаемого развития наибольших пьезометрических напоров поровой воды [5]. Через некоторые интервалы по длине дренажные призмы сопрягались с вертикальными трубами, которые в местах пересечения с призмами имели отверстия для сбора в трубах отжатой в процессе консолидации поровой воды. Роль таких труб-водосборников выполняли трубы глубинных марок, устанавливаемых по высоте ядра. Внутренний диаметр этих труб составлял 200 мм.

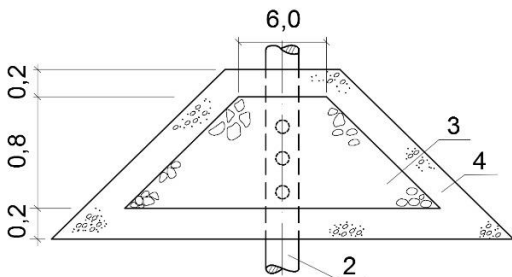
Воду из труб предполагалось удалять с помощью водоотборников, представляющих собой отрезок трубы меньшего диаметра с заглушкой в нижнем конце. Подобным способом обычно удаляется вода из открытых пьезометров для проверки их исправности. Объем отжимаемой из пор грунта воды очень мал, поэтому порционный отбор мог бы вполне обеспечить полное удаление воды из вертикальных труб при периодическом опускании водоотборников в период строительства.

Учитывая, что дрены располагались в зоне наибольших значений порового давления, как это показано на рисунке 2, система представлялась весьма эффективной и должна была обеспечивать быстрое снижение пьезометрических напоров в ядре при строительстве плотины. Однако, при сейсмическом воздействии фильтрационная прочность ядра с такой дренажной системой могла быть уязвима.

а



Узел А



б

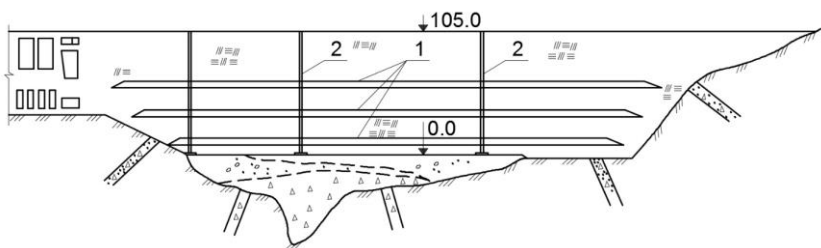


Рис. 2. Дренажная система глинистого ядра каменно-земляной плотины с отводом воды, отжимаемой из грунта:

- а – поперечное сечение, б – продольное сечение; 1 – дренажная призма; 2 – труба глубинной марки; 3 – горная масса; 4 – обратный фильтр

Менее уязвимой, с точки зрения сохранения фильтрационной прочности ядра при сейсмическом воздействии является конструкция плотины с глинистым ядром, в нижней части которого (по всей его длине) выполняется несколько рядов вертикальных скважин, заполненных пористым материалом, прочность которого превышает прочность глинистого грунта ядра плотины [6]. Ряды скважин располагаются параллельно продольной оси плотины, чтобы не нарушать водонепроницаемость ядра (рисунок 3). Скважины в грунте могут быть заполнены крупнопористым материалом, например, пористым бетоном, песчано-гравийным или гравийно-галечниковым грунтом и др., чтобы вода из глинистого грунта отжималась в поры этого материала, снимая избыточные напоры воды в ядре и повышая его прочность.

Заполняющий скважины материал, диаметр, шаг, глубина и расстояние между рядами скважин назначаются конструктивно или расчетом в зависимости от механических и фильтрационных свойств глинистого грунта и высоты плотины. Под действием нагрузки от верхней части ядра или сейсмических сил нижняя часть ядра такой плотины работает как грунтовый массив, укрепленный сваями. Роль свай выполняют скважины, заполненные материалом более прочным, чем глинистый грунт. Воспринимая на себя основную часть нагрузки, которая распределяется по сооружению пропорционально прочности слагающих его материалов, они укрепляют грунтовый массив и тем самым снижают осадки ядра и повышают сейсмостойкость плотины.

Снижение порового давления и осадок в ядре плотины, повышение его прочности и сейсмостойкости позволяют уменьшить объем строительной досыпки грунтов и вероятность образования трещин в ядре.

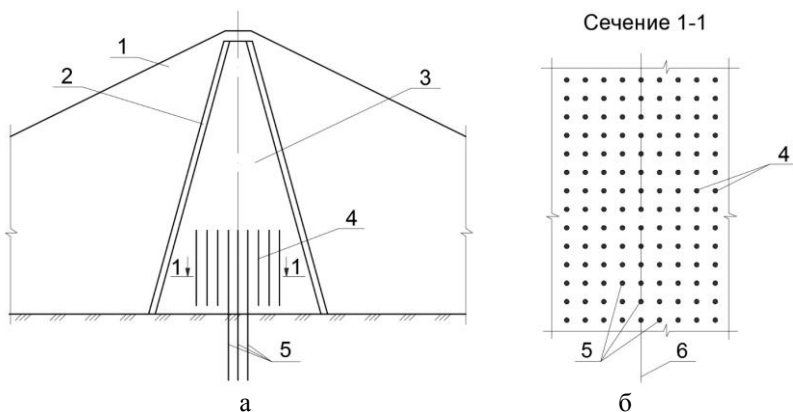


Рис. 3. Ядро каменно-земляной плотины с дренирующими скважинами:

а – поперечное сечение, б – план расположения скважин (по сечению 1-1); 1 – боковые призма; 2 – переходная зона; 3 – глинистое ядро; 4 – дренирующие скважины; 5 – скважины цементации основания; 6 – продольная ось плотины

Конструктивные способы снижения порового давления в глинистых ядрах плотин так или иначе осложняют фильтрационный режим сооружения, поэтому не находят широкого применения в гидротехническом строительстве.

Известны приемы снижения порового давления путем укладки в ядро плотины глинистого грунта с влажностью значительно меньше оптимальной. Однако грунт, уложенный таким образом, имеет возможность, при эксплуатации сооружения, дополнительного водонасыщения. Водонасыщение грунта в отдельных случаях сопровождается неуправляемым изменением его физико-механических характеристик, увеличением деформаций разуплотнением некоторых зон ядра и может привести к непредвиденным последствиям. Такие явления вызвали необходимость ремонта каменно-земляных плотин Хиттеювей в Норвегии ($H = 94$ м) и Боулдерхед в Великобритании ($H = 48$ м).

Результаты исследований

Все рассмотренные способы снижения порового давления нарушают фильтрационную однородность ядра и создают некоторую неопределенность для режима эксплуатации плотины, особенно при возможном интенсивном сейсмическом воздействии.

Более надёжным способом снижения порового давления, с точки зрения эксплуатации сооружения, является регулирование физико-механических и фильтрационных свойств глинистого грунта при возведении плотины.

Снижение порового давления без нарушения фильтрационной однородности ядра можно достигнуть путем укладки в ядро плотины грунта с высокой плотностью. Высокую плотность глинистого грунта получают уплотнением механизмами с большим удельным давлением на грунт при консистенции грунта, характеризуемой показателем текучести $I_L < 0,5$ (от твердой до тугопластичной).

В хорошо уплотненном грунте вышеуказанной консистенции образуются относительно прочные структурные связи, которые воспринимают на себя часть внешнего давления при передаче его на поровую воду.

В качестве показателя, характеризующего влияние структурных связей на процесс консолидации и на распределение давления в поровой жидкости и скелете грунта, обычно принимается коэффициент порового давления, равный отношению максимального порового давления к общему давлению, действующему в грунте. Определение коэффициента порового давления возможно на основе компрессионных испытаний грунтов.

Анализируя результаты компрессионных испытаний водонасыщенных глинистых грунтов, Ю.К. Зарецкий показал,

что изменение уплотняющей нагрузки от 0 до 0,7 МПа приводит к уменьшению коэффициента порового давления от 1 до 0,05 [7]. При этом отмечено, чем менее глинистый грунт, тем сильнее проявляется эффект снижения порового давления.

Снижению порового давления и ускорению процесса консолидации в глинистом ядре плотины способствует также наличие в грунте скелета из каменных включений различной крупности. Содержание в скелетно-глинистом грунте включений крупностью более 5 мм обычно составляет 30...60 %. Максимальная крупность – не более 2/3 толщины уплотняемого слоя. Такой гранулометрический состав грунта способствует и самозалечиванию трещин в случае их образования. Схема выбора начального состояния скелетно-глинистого грунта в теле плотины заключается в следующем. На основании сведений о местных ресурсах производится выбор строительного материала, устанавливается общая характеристика его состава и свойств, а затем выбирается консистенция глинистого мелкозема (фракции мельче 5 мм) при укладке и степень уплотнения грунта с запроектированными зерновыми и минералогическими составами, определяемая задаваемой работой. Эта задача выполняется с учетом требований к механическим и фильтрационным свойствам грунтов возводимого сооружения заданной конструкции, увязанной с природными условиями, в которых возводится сооружение.

Изучение механических свойств скелетно-глинистого грунта в широком классе траекторий нагружения, выполненное Г.М. Ломизе и В.Г. Федоровым в МИСИ (ныне Московский государственный строительный университет) объективно показало преимущества достижения высокой плотности мелкозема в таком грунте при его твердой консистенции [8].

Для предотвращения трещин в верхнюю часть ядра высокой каменно-земляной плотины и в зону, контактирующую с бортами скального основания укладывается более пластичный грунт, с меньшим содержанием и меньшей крупностью каменных включений.

Фильтрационные исследования смеси суглинка с гравийно-галечниковым грунтом, выполненные в АО «НИИЭС» РусГидро, показали возможность варьирования величиной коэффициента фильтрации и сжимаемостью скелетно-глинистого грунта, от которых зависит степень проявления порового давления. На рисунке 4 показано изменение коэффициента фильтрации смеси суглинка с гравийно-галечниковым грунтом в зависимости от сжимающих напряжений в испытываемом образце и содержания мелкозема при одинаковой степени его начального уплотнения, установленной в соответствии с вышеизложенными требованиями к качеству скелетно-глинистых грунтов [9]. Как видно из рисунка, изменение содержания мелкозема в исследованной грунтовой смеси от 40 до 70 % сопровождается изменением коэффициента фильтрации в сотни раз. С увеличением сжимающих напряжений коэффициент фильтрации изменяется в тех же пределах, что можно объяснить повышением плотности испытываемой грунтовой смеси.

Результаты проведённых исследований скелетно-глинистых грунтов говорят о том, что, ориентируясь на ожидаемый уровень напряжений в ядре плотины, можно регулировать величину и скорость рассеивания порового давления путём подбора гранулометрического состава грунта, консистенции и плотности его мелкозёма. Технология производства работ должна обеспечивать получение этих параметров начального состояния грунта при возведении сооружения.

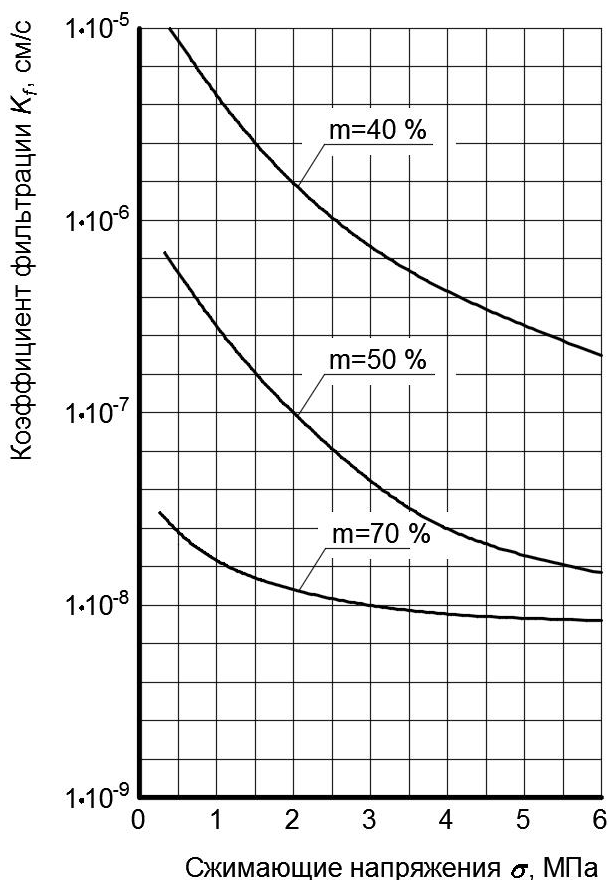


Рис. 4. Графики зависимости коэффициента фильтрации смеси суглинка с гравийно-галечниковым грунтом от сжимающих напряжений в испытываемом образце:

m – содержание мелкозёма (фракции мельче 5 мм) в смеси

Скелетно-глинистые грунты были применены для возведения ядра плотины Нурекской ГЭС в Таджикистане ($H = 300$ м) и для ядра плотины ГЭС Тери в Индии ($H = 260$ м). Использование аналогичных грунтов предполагается и при

возведении высотной плотины Рогунской ГЭС в Таджикистане ($H = 385$ м). Скелетно-глинистый грунт ядра этой плотины предполагается разрабатывать в конусах выноса пролювиальных отложений, что потребует всестороннего изучения его гранулометрического состава и изменчивости свойств мелкозема для обоснования начального состояния грунта и технологии укладки в тело сооружения.

Выводы

Способы снижения порового давления путем устройства дренажей и других конструкций в глинистых ядрах каменно-земляных плотин осложняют фильтрационный режим сооружения, поэтому не находят широкого применения в гидротехническом строительстве.

Более эффективным способом снижения порового давления является регулирование физико-механических и фильтрационных свойств глинистого грунта при возведении сооружения.

Учитывая возможность варьирования гранулометрическим составом, сжимаемостью и коэффициентом фильтрации скелетно-глинистых грунтов, а также их способность к самозалечиванию трещин, следует считать применение этих грунтов, при научном обосновании плотности и влажности мелкозема, наиболее надежным способом снижения порового давления в ядрах строящихся каменно-земляных плотин.

В процессе изыскательских работ для обоснования проектов каменно-земляных плотин необходимо уделять внимание поиску месторождений скелетно-глинистых грунтов и возможности получения таких грунтов путем создания искусственных смесей.

Библиографический список

1. Ляпичев Ю.П. Поровое давление консолидации в каменно-земляных плотинах//Труды института «ВОДГЕО», Гидротехника. Вып. 34 – М.: «ВОДГЕО», 1972. – С. 9–18.

2. Борткевич С.В., Одинцов А.К., Чучик Т.Н. Влияние конструкции каменно-земляной плотины на ее напряженное состояние // Энергетическое строительство. – 1973. – № 12. – С. 48–50.

3. Плотина из местных материалов: А.с. 644901 / Б.И. Балыков, Л.В. Горелик и М.П. Павчич. – Оpubл. 1979. – Бюл. № 4. – 2 с.

4. Плотина из местных материалов: А.с. 358463 / В.Ф. Теплов. – Оpubл. 1972. – Бюл. № 34. – 2 с.

5. Плотина из местных материалов: А.с. 897923 / В.И. Вуцель, В.И. Шербина – Оpubл. 1982. – Бюл. № 2 – 2 с.

6. Плотина из грунтовых материалов: А.с. 1138451 / С.В. Борткевич, А.Б. Васильев, В.И. Вуцель, С.И. Скиба – Оpubл. 1985. – Бюл. № 5. – 2 с.

7. Зарецкий Ю.К. Вопросы консолидации и ползучести с учетом распределения пор грунта по величине // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 1973. – №4. В книге «Моя жизнь в журнале ОФМГ». М.: Издательство «ЭСТ», 2005. – С. 84–93.

8. Ломизе Г.М. и Федоров В.Г. Влияние начального состояния скелетно-глинистого грунта на его деформируемость и прочность // Гидротехническое строительство. – 1975. – № 12. – С. 19–27.

9. Борткевич С.В., Скибин А.Н. Исследование смеси суглинков с гравийно-галечниковым грунтом для ядра плотины Тери // Безопасность энергетических сооружений. Научно-технический и производственный сборник. Вып. 16. – М.: ОАО «НИИЭС», 2007. – С. 31–44.

Оптимизация контроля качества укладки гравийно-галечниковых грунтов при возведении плотин

*Борткевич С.В., кандидат техн. наук, главный инженер,
АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро
«ГИТЕСТ»*

Опубликовано: Гидротехническое строительство // Ежемесячный научно-технический журнал, № 2. М.: 2017, с. 11–17

Для возведения плотин на горных реках широко применяют гравийно-галечниковые грунты. При качественной укладке эти грунты обладают малой деформативностью и высокой прочностью как в сухом, так и в обводнённом состоянии. Качество укладки гравийно-галечниковых грунтов в тело сооружения характеризуют по гранулометрическому составу и коэффициенту уплотнения, которые должны соответствовать проектным значениям. При этом проектные значения гранулометрического состава грунта задают в виде граничных кумулятивных кривых с минимальным и максимальным допустимым содержанием частиц определённого размера, а коэффициент уплотнения грунта – величиной, определённой согласно [1] по формуле:

$$K_{com} = \frac{\rho_d}{\rho_{d\max}}, \quad (1)$$

где ρ_d – плотность сухого грунта, уложенного в тело плотины, т/м³;
 $\rho_{d\max}$ – максимальная плотность сухого грунта, т/м³.

Определение ρ_d и $\rho_{d\max}$ гравийно-галечниковых грунтов связано с преодолением ряда трудностей, обусловленных высокой

степенью неоднородности их гранулометрического состава и большой крупностью. Для укладки в тело плотин обычно допускаются грунты, включающие валуны размером до 800 мм.

Определение плотности сухого грунта ρ_d в насыпи выполняют методом лунки (шурфа). Главным фактором, влияющим на точность определения ρ_d , является объём отбираемой из лунки пробы, который рекомендуется принимать в зависимости от максимального размера частиц грунта согласно [2]. Рекомендуемый ориентировочный объём пробы для определения плотности грунта с крупными включениями размером 200 мм и более составляет 1000 литров при глубине лунки 800–1000 мм и размерах в плане 800×800 – 1000×1000 мм.

Эти рекомендации справедливы для рассматриваемых грунтов в том случае, если распределение частиц различных размеров в грунте относительно равномерно. Однако производственные исследования на строительстве плотин Нурекской, Тери и Рогунской ГЭС показали, что при укладке в тело плотин гравийно-галечниковых грунтов равномерного распределения их частиц не происходит. Вследствие высокой неоднородности этих грунтов в процессе послойной отсыпки образуется квазиоднородный насыпной массив, характеризующийся своей особой структурой. Геотехническая модель структуры сложения насыпного массива из гравийно-галечниковых грунтов приведена в [3].

Элементами структуры являются «скопления» валунов, включая гальку крупностью более 100 мм, и «основа» грунтового массива. По объёму насыпи «скопления» валунов распределены в «основе», представленной частицами размером до 40–80 мм.

Изменение гранулометрического состава грунта по крупности и содержанию мелкозёма (частиц мельче 5 мм) создаёт первый масштабный уровень неоднородности

насыпного массива, а изменение структуры его сложения – второй масштабный уровень неоднородности. Объём единичных «скоплений» валунов достигает $1,5 \text{ м}^3$ при линейных размерах в плане $0,5\text{--}2,1 \text{ м}$. Содержание «скоплений» в насыпи может изменяться от 15 до 50 % в зависимости от гранулометрического состава отсыпаемого грунта. «Скопления» валунов и «основа» массива, сформированного послойной отсыпкой гравийно-галечникового грунта, существенно различаются по содержанию мелкозёма и степени неоднородности. Например, при отсыпке гравийно-галечникового грунта с содержанием мелкозёма 20–25 % в «основе» образуется 35–40 % мелкозёма, а в «скоплениях» – от 0 до 5 %. Степень неоднородности гранулометрического состава «основы» насыпного массива составляет 100–200, а «скоплений» валунов – не более 5–20.

Линейные размеры элементов структуры насыпного массива из гравийно-галечникового грунта соизмеримы с размерами проб грунта, отбираемых методом лунки, поэтому возникает вопрос о представительности проб.

С целью уточнения размеров и объёма проб, которыми исключается влияние структуры сложения насыпного массива и неравномерности раскладки частиц грунта на результаты определений его гранулометрического состава и плотности, были проведены работы, включающие совместные геотехнические и сейсмоакустические исследования опытных насыпей. Кроме того, в процессе проведения этих работ на строительстве Рогунской ГЭС опробован сейсмоакустический способ контроля качества укладки крупнообломочных грунтов в насыпь [4]. Научное руководство сейсмоакустическими исследованиями выполняли доктор физико-математических наук, член-корреспондент Российской академии естественных

наук А.И. Савич и кандидат технических наук В.И. Коптев, общее руководство работами осуществлял автор. Ответственными исполнителями работ являлись инженеры Ю.М. Горешков, А.С. Типикин и В.В. Мишин.

Две опытные насыпи гравийно-галечниковых грунтов были устроены по технологической схеме, применявшейся на строительстве плотин Нурекской, Тери и Рогунской ГЭС: разработка грунта экскаватором, транспортировка автосамосвалами, отсыпка грунта слоями 0,8–1,0 м в насыпь, планировка бульдозером с поливом водой по норме 300 л/м³ и уплотнение виброкатком. Каждая насыпь объёмом по 600 м³ состояла из двух слоёв грунта.

Степень неоднородности грунта, уложенного в насыпи, от 100 до 300. Содержание мелкозёма от 16 до 36 %, размер валунов от 200 мм до 800 мм. Содержание пылеватых частиц 1–2 %. Граничные кумулятивные кривые гранулометрического состава грунтов опытных насыпей № 1 и № 2 показаны на рис. 1.

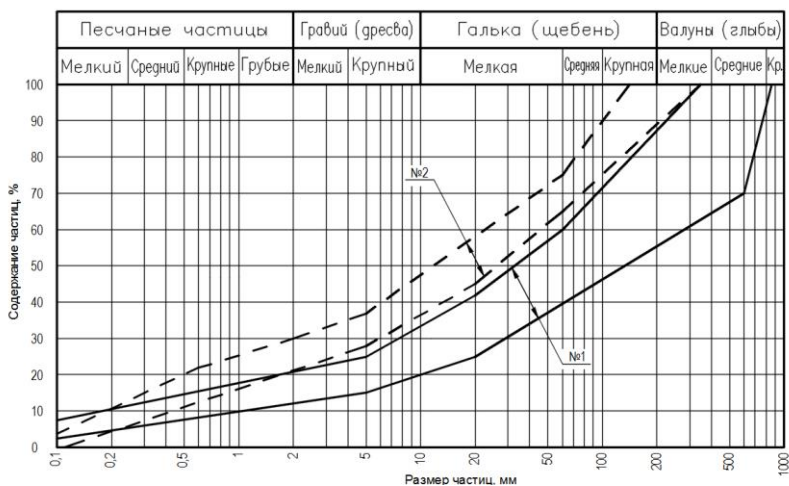


Рис. 1. Граничные кумулятивные кривые гранулометрического состава грунтов опытных насыпей № 1 и № 2

На поверхности опытных насыпей было размечено расположение шурфов для геотехнических исследований. После этого по участкам расположения шурфов выполнено сейсмоакустическое профилирование с измерением скоростей распространения продольных упругих волн. В каждой насыпи сделано шесть сейсмоакустических профилей, проходящих через центры будущих шурфов. Упругие продольные волны в грунте возбуждали ударами молотка по деревянной бобышке диаметром 10 см и толщиной 15 см, а принимали вертикальными сейсмоприёмниками СВ-30, установленными с шагом 0,25 м. Длина одной стоянки составляла 5,75 м. Сейсмоприёмники плотно устанавливали в предварительно пробитые штырём отверстия в грунте или на специальные подставки, если точки измерения попадали на валуны. Измерения скорости распространения упругих волн производили с помощью сейсмостанции ИСН-24 и двухканальной цифровой сейсмостанции, позволяющих регистрировать время пробега упругих волн в грунте с точностью не ниже $1 \cdot 10^{-4}$ с и имеющими устройства для сохранения зарегистрированных колебаний на экране дисплея.

Скорости продольных волн V_p определяли для различных комбинаций расстояний l между сейсмоприёмниками и пунктами удара, т.е. на различных базах измерений. Всего для определения скоростей упругих волн использовано 35 вариантов трехэлементных измерительных установок, в которых расстояние между сейсмоприёмниками Δl , а также расстояние между пунктами удара и ближайшим сейсмоприёмником изменялось от 0,25 м до 1,75 м. Полученные значения скоростей, характеризующие различные части объёма исследуемых насыпей и разную степень осреднения оценок скоростей, были объединены по площадкам размещения

шурфов, из которых должен был производиться отбор грунта для геотехнических исследований.

Количество единичных определений скоростей, по которым проводилось осреднение, менялось от 2 до 60. По полученным значениям скоростей продольных волн V_p построены графики изменений V_p вдоль исследованных профилей. Эти графики были использованы для построения карт V_p на площадках расположения шурфов в опытных насыпях № 1 и № 2. Карты, построенные на персональном компьютере по программе «ТОРО», приведены на рис. 2. Все осреднённые значения скоростей использованы для построения масштабных кривых и для последующего установления зависимостей между геофизическими и геотехническими показателями грунтов в опытных насыпях.

Ограниченная мощность опытных насыпей затрудняла построение масштабных кривых для скоростей продольных волн при базе измерений $l > 1,75$ м, поэтому для изучения неоднородности насыпей был использован дополнительно метод неформального анализа [5]. На рис. 3 изображены масштабные кривые, характеризующие неоднородность исследованных опытных насыпей. Вид этих кривых позволяет сделать вывод о том, что исследованные насыпи представляют собой квазиоднородный (в масштабе каждой насыпи) массив. Линейные размеры неоднородностей около 2,1 м. Элементы неоднородности, представленные скоплениями валунов, относительно равномерно (регулярно) распределены в массиве. На это указывает ступенька масштабных кривых при базе осреднения 2,1 м. При случайном распределении неоднородностей масштабные кривые имеют плавный характер. Неоднородность насыпи № 1 выше, чем неоднородность насыпи № 2. На это указывает более резкое изменение масштабной кривой и наличие второй ступени при базе измерения – 1,2 м.

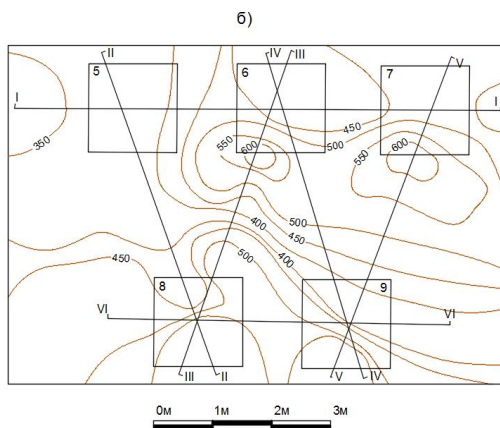
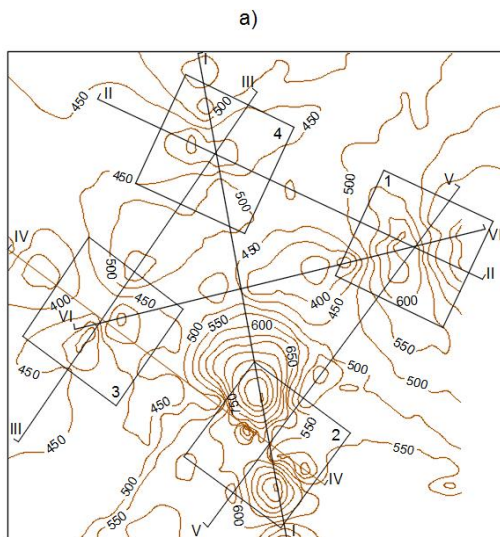



Рис. 2. Карты распределения скоростей продольных волн V_p , полученные по результатам сейсмоакустического прозвучивания площадок на опытных насыпях № 1 (а) и № 2 (б):

1, 2, ..., 9 – номера геотехнических шурфов, выполненных после проведения геофизических исследований;

I-I, ..., VI-VI – сейсмоакустические профили;

 500 — изолинии скоростей V_p , м/с

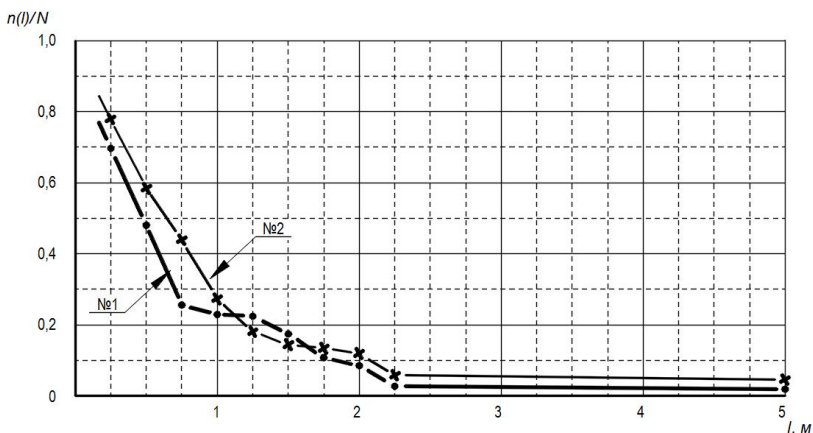


Рис 3. Масштабные кривые, построенные по результатам многократных измерений скоростей продольных волн V_p на разных базах l при сейсмоакустическом прозвучивании опытных насыпей № 1 и № 2:

$n(l)$ – количество интервалов измерений, требующих исключения повышенных и пониженных значений измеряемого геофизического параметра;

N – количество интервалов значимых различий измеряемого геофизического параметра

Элементами структуры насыпи № 1 являются отдельные средние и крупные валуны (600–800 мм), наличием которых объясняется ступень в масштабной кривой на базе измерения 1,2 м, и скопления мелких валунов (200–400 мм), относительно регулярно, со средним расстоянием 2,1 м распределённых в «основе» массива. В насыпи № 2, в отличие от насыпи № 1, содержание валунов и их максимальные размеры значительно ниже. Согласно полученным результатам сейсмоакустических исследований элементарным квазиоднородным элементом насыпного массива является блок с линейными размерами 5–10 м. Без учета структуры сложения насыпи, представительным для измерения гранулометрического состава и плотности гравийно-галечникового грунта в контрольной

точке, является блок с линейными размерами в плане не менее 2,1 м. При толщине уплотнённого слоя грунта 0,8–1,0 м объём такого блока составляет не менее 3,5–4,5 м³.

После завершения сейсмоакустических исследований были выполнены прямые определения плотности и гранулометрического состава грунта во всех шурфах, размеченных на насыпях, с инженерно-геологической документацией и фотографированием стенок шурфов (четыре шурфа в насыпи № 1 и пять – в насыпи № 2). На рис. 4 приведена развёртка стенок одного из шурфов.

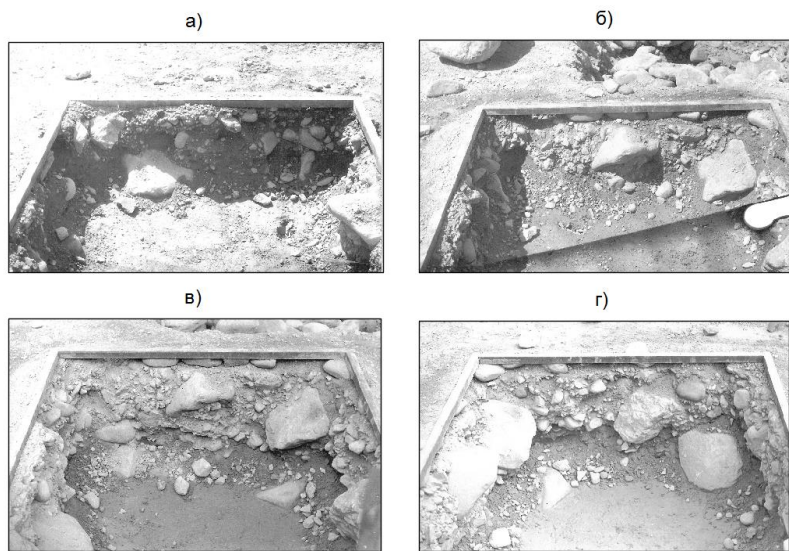


Рис. 4. Фотографическая развёртка стенок шурфа № 3, устроенного на опытной насыпи № 1 внутри стальной ограничительной рамки 1,60×1,60 м:

а, б, в, г – условные обозначения стенок шурфа

При устройстве шурфов размером в плане 1,5×1,5 м вровень с поверхностью грунта устанавливали по уровню ограничительную стальную рамку 1,6×1,6 м и фиксировали поверхность грунта мерной иглой. Выемку грунта из шурфа производили на глубину, равную толщине уплотнённого слоя. Объём шурфа измеряли посредством заливки воды до касания острия мерной иглы. При этом перед заливкой воды всю поверхность шурфа выстилали полиэтиленовой плёнкой толщиной 0,2 мм. Весь грунт, вынутый из шурфа, взвешивали и разделяли по размеру частиц.

Гранулометрический состав грунта определяли его просеиванием через набор стандартных сит (ячейки размером 20, 40, 60, 80 мм). Гальку крупностью более 80 мм и валуны отсортировывали вручную посредством обмера по наименьшему диаметру.

Содержание в грунте частиц размером менее 20 мм определяли следующим образом:

- брали 20-ти килограммовую навеску из грунта, прошедшего через сито с ячейками 20 мм;
- рассеивали эту навеску на ситах с ячейками 5 и 10 мм, промывали и взвешивали высушенный остаток;
- пересчитывали содержание частиц 5–10 мм и 10–20 мм на всю массу грунта, вынутого из шурфа;
- из отсева частиц грунта диаметром менее 5 мм брали пробу массой 1 кг для определения влажности мелкозёма и пересчета её на грунт в целом;
- гранулометрический состав частиц грунта мельче 5 мм определяли согласно ГОСТ 12536-2014 [6].

Плотность сухого гравийно-галечникового грунта определяли как отношение массы сухого грунта, вынутого из шурфа, к замеренному объёму шурфа с учетом поправочного

коэффициента, учитывающего влияние полиэтиленовой плёнки. Величина поправочного коэффициента 0,98 была установлена ранее исследованиями, проведёнными в процессе геотехнического контроля за укладкой гравийно-галечниковых грунтов в тело плотины Нурекской ГЭС.

Поставленные таким образом геотехнические и сейсмоакустические исследования на опытных насыпях позволили провести совместную обработку данных полевых измерений и выявить многомерные корреляционные зависимости между геотехническими параметрами грунта в теле насыпей и среднестатистическими значениями скоростей, измеренных на разных базах. В качестве способа установления этих корреляционных зависимостей использован метод многомерного регрессионного анализа, реализованный с помощью персонального компьютера и пакетов программ «STATGRAF» и «SURFER».

Оценка гранулометрического состава грунта по скорости прохождения упругих продольных волн основывалась на так называемом масштабном эффекте, который проявляется в том, что среднестатистические величины скоростей в неоднородных средах зависят от базы измерений [7]. По мере увеличения базы измерений скорости закономерно уменьшаются. На малых базах, соизмеримых с размером крупных частиц грунта, они выше, а по мере увеличения базы они уменьшаются, приближаясь к асимптотическому значению, которое соответствует квазиоднородной среде, когда база измерений много больше размеров крупных частиц.

В качестве показателей гранулометрического состава исследуемого грунта принято содержание основных групп частиц: мелкозёма (мельче 5 мм), крупного гравия с мелкой галькой (от 5 мм до 20 мм), средней гальки (от 20 мм до

100 мм), крупной гальки и валунов (более 100 мм). Содержание этих групп частиц достаточно чётко определяет вид кумулятивных кривых гранулометрического состава грунта.

Гранулометрический состав и плотность гравийно-галечникового грунта определены по каждому шурфу в отдельности («точечные» пробы) и в целом по площадкам, на которых они располагались. В таблице 1 приведены результаты этих определений.

Таблица 1.

Результаты определения плотности и гранулометрического состава гравийно-галечникового грунта в опытных насыпях

№№ опытной насыпи	№№ шурфов	Плотность сухого грунта, т/м ³		Содержание в грунте частиц, %					
				< 5 мм		5 – 20 мм		> 100 мм	
		а	б	а	б	а	б	а	б
1	1	2,24	2,24	18,5	16,2	9,7	8,7	46,8	49,0
	2	2,28	2,30	23,0	24,0	18,0	17,8	30,0	28,0
	3	2,20	2,20	18,0	21,2	18,0	19,3	37,0	27,0
	4	2,22	2,21	16,0	16,6	10,0	11,2	36,0	36,0
	В целом по площадке	2,23	2,24	18,9	19,5	13,9	14,2	37,4	35,0
2	5	2,24	2,24	34,0	32,4	16,0	18,0	13,0	12,0
	6	2,28	2,27	31,0	28,8	20,0	17,2	10,0	18,0
	7	2,31	2,29	30,0	28,2	15,0	15,8	24,0	27,0
	8	2,24	2,25	35,0	36,4	14,0	14,6	11,0	12,0
	9	2,23	2,22	32,0	33,0	20,0	19,1	13,0	11,0
	В целом по площадке	2,26	2,25	32,4	31,8	17,0	16,9	14,2	16,0
Среднее		2,25	2,25	26,4	26,3	15,6	15,7	24,5	24,4
Примечание:		а – геотехнические определения б – сейсмоакустические определения							

В целом для площадки расположения шурфов на насыпи № 1 плотность сухого грунта составляла $\rho_d = 2,23 \text{ т/м}^3$ по результатам геотехнических определений и $\rho_d = 2,24 \text{ т/м}^3$ по результатам сейсмоакустических определений, содержание мелкозёма (частиц мельче 5 мм) соответственно 18,9 и 19,5 %.

Для площадки расположения шурфов на насыпи № 2 плотность сухого грунта составляла $\rho_d = 2,26 \text{ т/м}^3$ по результатам геотехнических определений и $\rho_d = 2,25 \text{ т/м}^3$ по результатам сейсмоакустических определений, содержание мелкозёма соответственно 32,4 и 31,8 %.

«Точечные» пробы характеризуют лишь те или иные элементы структуры уплотнённого слоя грунта. Фактическая плотность и фактический гранулометрический состав гравийно-галечникового грунта в насыпи могут быть установлены только после накопления и статистической обработки результатов определений по «точечным» пробам.

Несмотря на существенное различие по содержанию мелкозёма в грунте, значения плотности сухого грунта, характеризующие каждую опытную площадку, оказались очень близки между собой. Следует отметить, что ранее, при определении максимальной плотности гравийно-галечникового грунта на вибростенде управления строительства «Нурекгидрострой» путём уплотнения слоёв грунта толщиной 0,8–1,0 м в мерной ёмкости $2,0 \times 2,0 \times 2,0 \text{ м}$, был получен аналогичный эффект: при содержании мелкозёма как 19 %, так и при 32 % максимальная плотность сухого грунта составила одну и ту же величину $\rho_{d\max} = 2,34 \text{ т/м}^3$ [8].

Коэффициент уплотнения гравийно-галечникового грунта составил для насыпи № 1: $K_{com} = 2,23/2,34 = 0,95$ и для насыпи № 2: $K_{com} = 2,26/2,34 = 0,97$.

Возможно лабораторное определение максимальной плотности гравийно-галечникового грунта по устаревшему отраслевому стандарту Минэнерго СССР ОСТ 34-72-646-83 «Грунты. Метод определения максимальной плотности сложения несвязных грунтов» на смесях, моделирующих гранулометрический состав натурального грунта. Международной и отечественной практикой исследований наибольшая крупность частиц в модельных смесях гравийно-галечникового грунта установлена равной 60 мм, а вид и содержание мелкозёма принимается таким же, как в натурном грунте.

При лабораторном определении максимальной плотности гравийно-галечникового грунта имеет значение способ, а также режим вибрационного воздействия на модельную смесь грунта и величина её пригрузки. В АО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» были проведены исследования в этом направлении [9], по результатам которых в АО «Институт Гидропроект» разработан с использованием [10] прибор для лабораторного определения максимальной плотности и коэффициента уплотнения крупнообломочных (крупнозёрных) грунтов (рис. 5). В АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ» разработана методика определения на этом приборе максимальной плотности крупнообломочных грунтов, включая гравийно-галечниковые [11]. ПАО «РусГидро» запланировало разработать новый отраслевой стандарт на лабораторное определение максимальной плотности крупнообломочных грунтов [12], который должен послужить для более точного определения коэффициента уплотнения гравийно-галечниковых грунтов в теле гидротехнических сооружений.

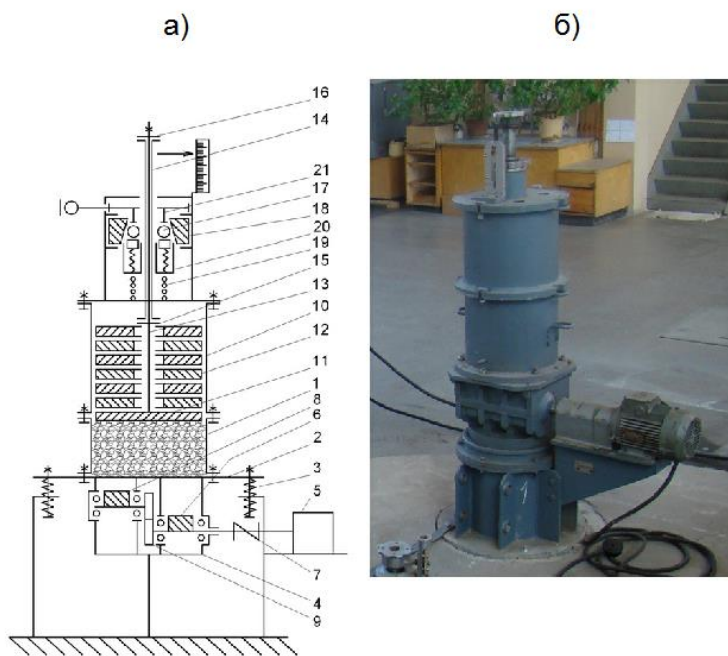


Рис. 5. Прибор для лабораторного определения максимальной плотности и коэффициента уплотнения крупнообломочных грунтов: а) – схема; б) – фото в сборе:

1 – контейнер с грунтом; 2 – вибростол; 3 – пружины; 4 – вибратор; 5 – электродвигатель; 6 – ведущий дебаланс; 7 – эластичная муфта; 8 – ведомый дебаланс; 9 – шестерни; 10 – корпус для размещения пригрузочных дисков; 11 – пригрузочный поршень; 12 – пригрузочные диски; 13 – шток пригрузочного поршня; 14 – полый шток муфты одностороннего хода; 15 – закрепляющий запечник; 16 – прижимная шайба; 17 – шарики муфты одностороннего хода; 18 – конусное кольцо; 19 – прижимная пружина; 20 – сепаратор; 21 – направляющая втулка

Определение плотности и гранулометрического состава грунта плотины в контрольных точках методом лунки (шурфа) связано с выполнением трудоёмких технологических операций, сдерживающих темпы возведения сооружения и не позволяет проводить своевременную оценку качества работ. Стремление к

ограничению количества трудоёмких операций приводит к тому, что зачастую допускается отбирать по одной контрольной пробе на 5 тыс. м³ укладываемого гравийно-галечникового грунта, т.е. при толщине отсыпаемого слоя 1 м по одной пробе на карту размером 50×100 м. Одна проба на карту не может характеризовать качество укладки грунта.

Повышение оперативности и снижение трудоёмкости контроля качества укладки гравийно-галечниковых грунтов «точечными» пробами могут быть достигнуты за счет применения сейсмоакустического способа [4], детально отработанного в процессе проведения комплекса совместных геотехнических и сейсмоакустических исследований на опытных насыпях. Сходимость контрольных параметров грунта, рассчитанных по многомерным корреляционным связям в зависимости от скоростей прохождения продольных упругих волн на разных базах измерений и полученных методом прямых геотехнических определений, очень высокая. Коэффициент корреляции по показателям гранулометрического состава и плотности сухого грунта изменяется от 0,93 до 0,98. При этом контрольными определениями плотности и гранулометрического состава грунта возможно охватить всю карту отсыпки без задержки технологического процесса отсыпки и уплотнения грунта. Для практического пользования составлена «Инструкция по контролю качества укладки гравийно-галечниковых грунтов сейсмоакустическим способом».

Сейсмоакустический способ контроля качества послойной укладки гравийно-галечниковых грунтов большими объёмами на площадках с линейными размерами 5–10 м (объём пробы 20–100 м³) гарантирует учёт влияния структуры сложения грунта в насыпи на его плотность и усредняет

гранулометрический состав грунта в контролируемой зоне, что уменьшает разброс значений контролируемых параметров, а также даёт более правильное и своевременное представление о качестве возведения насыпи. Кроме того, контроль качества насыпей большими объёмами открывает возможности для увеличения толщины слоёв отсыпки и уплотнения тяжёлыми самоходными виброкатками гравийно-галечниковых грунтов с более крупными валунами, чем допускается в настоящее время.

Выводы

1. Оптимизация контроля качества укладки гравийно-галечниковых грунтов при возведении плотин должна проводиться в направлении повышения представительности контрольных проб, оперативности их выполнения и точности определения контролируемых параметров.

2. При послойной отсыпке гравийно-галечниковых грунтов, содержащих валуны крупностью до 800 мм, представительные контрольные пробы на плотность и гранулометрический состав грунта характеризуются размерами в плане не менее 2,1×2,1 м (объём пробы 4–5 м³), а с учётом структуры сложения грунта в отсыпаемом слое – не менее 5,0–10,0 м (объём пробы 20–100 м³).

3. Плотность и гранулометрический состав гравийно-галечникового грунта, уложенного в тело плотины, целесообразно определять с использованием сейсмоакустической аппаратуры путём прозвучивания слоя грунта по нескольким поперечникам с измерением скоростей прохождения упругих продольных волн на разных базах, что существенно облегчает и ускоряет процесс геотехнического контроля.

4. При расчёте коэффициента уплотнения гравийно-галечникового грунта в сооружении рекомендуется использовать значения максимальной плотности, полученные виброуплотнением натурального грунта.

5. Для лабораторного определения максимальной плотности гравийно-галечниковых грунтов на модельных смесях необходима разработка соответствующего стандарта.

Список литературы

1. *СП45.13330.2012* Свод правил. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87.-М.: Минрегион России.-2012.

2. *РД 34.15.073*. Руководство по геотехническому контролю за подготовкой оснований и возведением грунтовых сооружений в энергетическом строительстве. – Л.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева -1991.

3. *Борткевич С.В.* Роль технологических исследований в научном обосновании плотин из грунтовых материалов // Гидротехническое строительство. 2009. № 8.

4. *А.с. 1833816*. Сейсмоакустический способ контроля качества укладки крупнообломочных грунтов в насыпь / С.В. Борткевич, Ю.М. Горшков, В.И. Коптев, А.И. Савич, Н.Г. Савченков // Бюллетень изобретений. 1993. № 30.

5. *Губерман Ш.А.* Неформальный анализ данных в геологии и геофизике. М.: Недра, 1987.

6. *ГОСТ 12536–2014*. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава.

7. *Савич А.И., Куянджич Б.Д., Коптев В.И.* и др. Комплексные инженерно-геофизические исследования при строительстве гидротехнических сооружений. М.: Недра, 1990.

8. *Борткевич С.В., Вуцель В.И., Чернилов А.Г., Ройко Н.Ф.* Контроль качества уплотнения грунтовых материалов при строительстве высоких плотин // Гидротехническое строительство. 1981. № 5.

9. *Чернилов А.Г., Урунич В.М.* Определение плотности укладки грунтов в плотины из местных материалов // Гидротехническое строительство. 1979. № 6.

10. А.с. 2002891 Устройство для уплотнения образцов из несвязанных грунтов: / В.М. Урунич, С.В. Борткевич. – Бюллетень изобретений. 1993. № 41–42.

11. *Борткевич С.В., Аверьянов В.Н.* Метод определения максимальной плотности и коэффициента уплотнения крупнообломочных грунтов // Второй Всероссийский Дорожный Конгресс: Сб. научных трудов. – М.: МАДИ, МОО «Дорожный Конгресс», 2010.

12. *Стандарты*, планируемые к разработке // Вестник РусГидро. 2009. № 1.

Разработка сейсмоакустического способа контроля качества укладки в тело плотины щебенисто-глинистых грунтов

Борткевич С.В., кандидат техн. наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ»

Опубликовано: Гидротехническое строительство // Ежемесячный научно-технический журнал, № 10. М.: 2017, с. 29–33

Противофильтрационные устройства высоких каменно-земляных плотин обычно выполняют из щебенисто-глинистых грунтов, которые кроме высокой фильтрационно-суффозионной прочности обладают малой сжимаемостью и способностью к самозалечиванию возникающих в сооружении по какой-либо причине водопроводящих трещин. Содержание дресвы и щебня крупностью до 200 мм в таких грунтах составляет 20–60 %, соответственно содержание глинистого мелкозёма (частиц мельче 5 мм) – 80–40 %. Дресвяно-щебенистые частицы распределены в матрице из мелкозёма.

Качество послойной укладки щебенисто-глинистых грунтов в тело плотины чаще всего контролируют по содержанию мелкозёма и по его плотности в сухом состоянии. Эти контролируемые параметры дают чёткое представление не только об общей плотности грунта, но и об его монолитности в качестве противофильтрационного барьера.

В процессе геотехнического контроля на уплотнённом слое грунта малым экскаватором устраивают шурфы глубиной, равной толщине слоя, и размером в плане ~1,00×1,00 м.

Отбором монолитов из стенок шурфов определяют плотность сухого мелкозёма ρ_d и изменение её по высоте слоя, а взвешиванием и промывкой на сите с ячейками 5 мм грунта, выбранного из шурфа, – содержание мелкозёма m в среднем по шурфу. Такой контроль качества укладки щебенисто-глинистых грунтов в тело плотины был отработан Научно-исследовательским институтом энергетических сооружений (НИИЭС), на строительстве Нурекской ГЭС и позволил обеспечить необходимую эксплуатационную надёжность построенного сооружения [1, 2]. В последующем способ контроля качества щебенисто-глинистых грунтов по мелкозёму хорошо зарекомендовал себя при строительстве других плотин [3, 4].

Учитывая значительную трудоёмкость реализации описанного способа, были проведены исследования по повышению его оперативности за счёт применения сейсмоакустического профилирования насыпи грунта. В результате исследований разработана методика определения контролируемых параметров и составлена инструкция по оперативному контролю качества укладки щебенисто-глинистого грунта в тело плотины сейсмоакустическим способом.

Исследования проводили на строительстве Рогунской ГЭС в Таджикистане. Грунт для исследований разрабатывали в месторождении Пассимурахо и укладывали в опытную насыпь на специально подготовленном основании одним слоем толщиной 0,50 м, разравнивали бульдозером и укатывали гружённым автосамосвалом БелАЗ-540 за 8–10 ходок по следу. Площадка для проведения исследований располагалась в плане по середине опытной насыпи.

На площадке были размечены шесть шурфов, через их центры, а также рядом с местом расположения шурфов, пройдены геофизические (сейсмоакустические) профили. После прозвучивания насыпи качество укладки грунта изучали при помощи устройства шурфов. Схема расположения шурфов и геофизических профилей приведена на рис. 1.

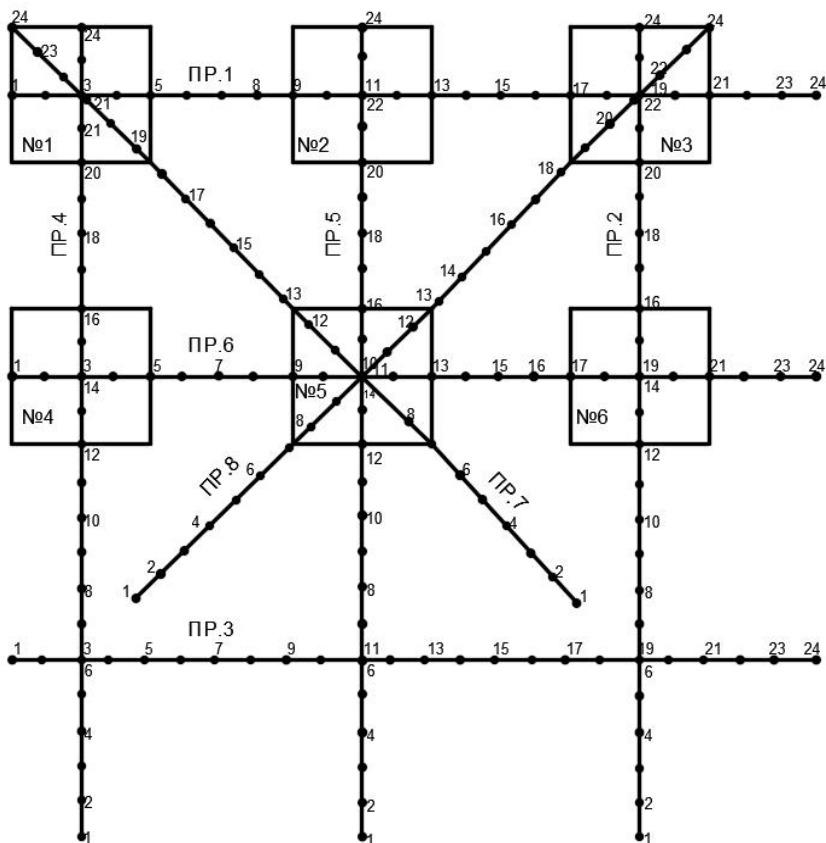


Рис.1 Схема расположения шурфов №1 – 6 и геофизических профилей ПР.1–8 на опытной насыпи щебенисто-глинистого грунта:
1–24 – номера сейсмоприёмников (СП) и пунктов удара (ПУ)

Методика проведения исследований и состав исследователей были такими же, как при исследованиях гравийно-галечниковых грунтов [5, 6, 7, 8]. Дополнением к этой методике являлось то, что из верхней и нижней частей шурфов отбирали монолиты для определения плотности сухого мелкозёма и изменения её по толщине слоя грунта, а также для выявления связи между скоростью прохождения упругих волн через грунт и плотностью сухого мелкозёма.

Всего было отработано восемь сейсмоакустических профилей. Длина каждого профиля 5,75 м. Шаг между сейсмоприёмниками 0,25 м. Возбуждение упругих колебаний осуществляли ударами кувалды по деревянной подставке, их приём – вертикальными сейсмоприёмниками СВ-30. Пункты ударов располагали через 0,50 м по всей длине профиля. Регистрацию упругих продольных волн проводили с помощью многоканальной цифровой сеймостанции ИСН-24, использовавшейся при исследованиях гравийно-галечникового грунта [5]. Это позволило добиться идентичности условий проведения работ, исключить случайные ошибки за счёт использования различной измерительной аппаратуры, унифицировать технику и методику сейсмоакустических методов контроля различных видов грунтов. Результаты полевых измерений фиксировали в виде сейсмограмм на электрографической бумаге.

С полученных сейсмограмм с помощью дигитайзера JBMPС снимали время первых вступлений упругих волн, по которым вычисляли скорости продольных волн при различных положениях пунктов удара (ПУ) и сейсмоприёмников (СП). Амплитудные характеристики и параметры поперечных волн не определяли, поскольку предыдущими исследованиями установлено, что наиболее значимыми при построении

тарировочных корреляционных связей являются скорости продольных волн V_p на разных базах. Это позволяет обходиться в будущем более простой и оперативной процедурой измерений.

Шифр скоростей соответствует определённой схеме 3-х элементной установки, например ПУ 0,75 СП 0,25 СП, где 0,75 – расстояние между ПУ и первым СП в метрах (вынос), 0,25 – расстояние между первым и вторым СП (база измерений, м).

Эти схемы установок могут быть реализованы с любой сейсмоакустической аппаратурой, как многоканальной, так и двухканальной. Для получения надёжных результатов необходимо, чтобы объём грунта, изучаемый сейсмоакустическим методом, соответствовал объёму отбираемой пробы. Поэтому в анализе полученных сейсмоакустикой результатов учитывали скорости, измеренные на тех участках, которые располагались внутри контура шурфов.

Для поиска связей между скоростями продольных упругих волн V_p на разных базах измерений и контрольным параметром грунта m использованы результаты определения гранулометрического состава грунта, отобранного из шурфов, а для поиска связей между скоростями V_p и контрольным параметром ρ_d – результаты определения плотности сухого мелкозёма по монолитам, отобранным из тех же шурфов.

Геотехническими определениями выявлено следующее.

Содержание мелкозёма в грунте колеблется от 61 до 79 % (см. табл. 1), максимальная крупность частиц грунта в шурфах № 1, 4, 6 составляет 100 мм, а в шурфах № 2, 3, 5 – 300–400 мм.

В нижней части слоя находится грунт с более высоким содержанием крупных частиц (т.е. с меньшим содержанием мелкозёма), что является следствием сегрегации при отсыпке щебенисто-глинистого грунта слоем толщиной 0,50 м.

Таблица 1

**Результаты определения гранулометрического состава
грунта, отобранного из шурфов**

Номер шурфа	Масса влажного грунта, кг	Масса сухого грунта, кг	Влажность грунта, %	Влажность мелкозёма (частиц мельче 5 мм), %	Содержание мелкозёма (частиц мельче 5 мм), %	Содержание в грунте, %, частиц крупностью, мм			
						5–20	20–60	60–200	>200
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	903	841	7	10	75	17	4	4	–
2	1033	971	6	9	67	13	8	7	5
3	874	819	7	10	67	16	11	4	2
4	762	717	6	8	79	16	3	2	–
5	737	703	5	8	61	17	8	7	7
6	727	685	6	10	62	17	11	10	–

Физические характеристики мелкозёма, определённые согласно ГОСТ 5180-84 [9], таковы: плотность частиц грунта $\rho_s = 2,73 \text{ г/см}^3$, влажность на границе текучести $W_L = 21 \%$, влажность на границе раскатывания $W_p = 15 \%$, число пластичности $J_p = 6 \%$, содержание песчаных частиц (2–0,05 мм) составляет 60 %, поэтому он классифицируется по ГОСТ 25100-2011 [10] как супесь песчанистая.

На рис. 2 показаны образцы изучаемого щебенисто-глинистого грунта, сформированные отсевом частиц крупностью более 60 мм с последующим лабораторным уплотнением при содержании мелкозёма 60 и 80 % на установке, технические характеристики которой приведены в табл. 2, в сравнении с образцами мелкозёма, уплотнёнными по ГОСТ 22733-2016 [11] и по модифицированному методу AASHTO (Американской ассоциации государственных служащих автомобильных дорог).

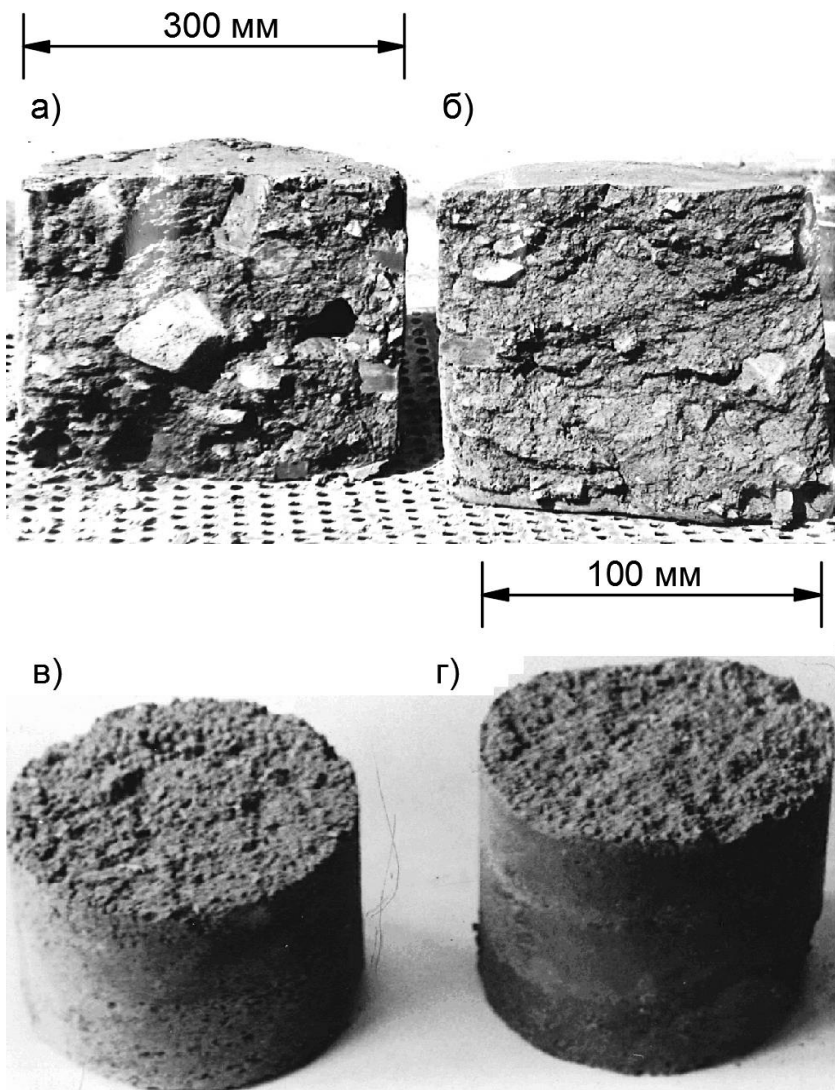


Рис.2 Образцы щебенисто-глинистого грунта, сформированные отсевом частиц крупностью более 60 мм с последующим лабораторным уплотнением при содержании мелкозёма 60 % (а) и 80 % (б) в сравнении с образцами мелкозёма, уплотнёнными по ГОСТ 22733-2016 (в) и по модернизированному методу AASHTO (г)

Таблица 2

Технические характеристики лабораторной установки для ударного уплотнения щебенисто-глинистого грунта

Техническая характеристика	Значение
Контейнер для грунта: объём, см ³ высота, см диаметр, см	18652 26,4 30,0
Удары по грунту: масса молота, кг диаметр, см площадь удара, см ² Высота свободного падения, см Количество ударов по слою	57 18 254 46 65
Слои уплотнения: количество поверхность, см ² толщина слоя, см	3 706,5 8,8

Максимальная плотность сухого мелкозёма $\rho_{dmax} = 2,07...2,11$ г/см³ в зависимости от содержания его в грунте и способа лабораторного уплотнения. Оптимальная влажность соответственно имеет значение $W_{opt} = 10...9$ %.

В опытной насыпи плотность сухого мелкозёма, определённая отбором монолитов массой 2000–4000 г, в среднем по шести шурфам составила $\rho_d = 2,04$ г/см³ при коэффициенте уплотнения $K_{com} = 0,97...0,98$ и в отдельных пробах изменялась от 1,91 до 2,17 г/см³. Изменение плотности сухого мелкозёма по толщине укатанного слоя грунта в шурфах показано на рис. 3, из которого видно, что эта плотность в нижней части слоя на 0,04–0,20 г/см³ меньше, чем в его верхней части.

Выполненные геотехнические определения в сумме показали, что корреляционные связи между скоростями

прохождения упругих продольных волн на разных базах сейсмоакустических измерений и контролируемые параметрами грунта (содержанием мелкозёма и его плотностью) в опытной насыпи целесообразно устанавливать для средних значений этих параметров по толщине уложенного слоя грунта.

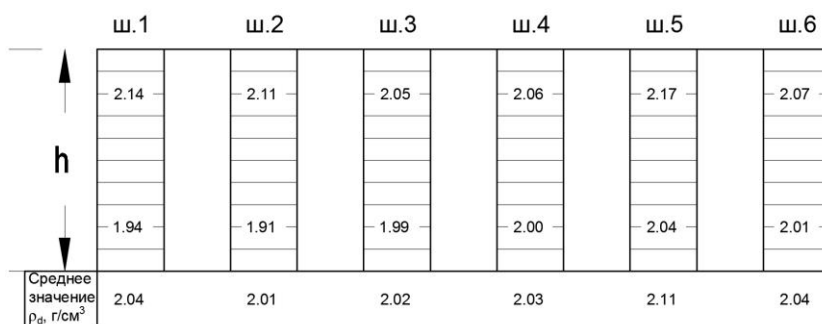


Рис.3 Изменение плотности сухого мелкозёма ρ_d , г/см³ по толщине укатанного слоя грунта $h = 0,50$ м в шурфах № 1–6

Для поиска связей между вышеуказанными геофизическими и геотехническими показателями использовали аппарат многомерного регрессионно-корреляционного анализа, состоящего из комплекса программ «STATGRAF». При этом перебирали все возможные сочетания значений m , ρ_d и V_p , полученные на различных установках ПУ – первый СП – второй СП. В результате выполненного анализа для оценки плотности сухого мелкозёма ρ_d в грунте наиболее чувствительной оказалась установка ПУ 0,75 СП 0,25 СП. Связь значений

скоростей V_p , измеренных на этой установке, со значениями ρ_d описывается уравнением:

$$\rho_d = 1,95 + 0,155 \cdot 10^{-3} \cdot V_{0,75}^{0,25}, \quad (1)$$

где $V_{0,75}^{0,25}$ – скорость продольных упругих волн, замеренная на базе между двумя сейсмоприёмниками, равной 0,25 м, при удалении первого сейсмоприёмника от пункта удара на 0,75 м. Коэффициент корреляции связи, выражаемый уравнением (1), составляет 0,99, а стандартная ошибка определения ρ_d – 0,005 г/см³.

По содержанию мелкозёма в грунте m наиболее информативно сочетание установок ПУ 0,75 СП 0,25 СП и ПУ 0,50 СП 0,50 СП. Связь между значениями скоростей V_p , измеренными на вышеуказанных установках, и содержанием мелкозёма в грунте m выражается уравнением:

$$m = 258,67 - 0,133 \cdot V_{0,75}^{0,25} - 5,67 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{1}{V_{0,75}^{0,25}} \right) + 0,0314 \cdot V_{0,50}^{0,50}, \quad (2)$$

где $V_{0,50}^{0,50}$ – скорость продольных упругих волн, замеренная на базе между двумя сейсмоприёмниками, равной 0,50 м, при удалении от пункта удара на 0,50 м.

Коэффициент корреляции связи, выражаемой уравнением (2), составляет 0,96, а стандартная ошибка определения $m = 2,04$ %. В этом уравнении кроме скорости $V_{0,50}^{0,50}$ присутствует величина, обратная значению скорости $V_{0,75}^{0,25}$, что говорит не только о необходимости использования скоростей, измеренных на двух разных базах, для определения содержания

мелкозёма в грунте, но и о том, что описанная этим уравнением зависимость криволинейна.

Соотношение значений контролируемых параметров качества укладки щебенисто-глинистого грунта ρ_d и m , определённых геотехническими исследованиями в шурфах и рассчитанных по результатам геофизических исследований с использованием уравнений (1) и (2), показано на рис. 4.

Плотность сухого щебенисто-глинистого грунта в целом ρ_d^* определяется по известной формуле:

$$\rho_d^* = \rho_d \cdot m + \rho_s \cdot (1 - m) \quad (3)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта крупностью более 5 мм, которая в среднем для исследуемого массива составляет 2,60 г/см³.

Проведённые на опытной насыпи совместные геотехнические и геофизические исследования показали, что качество укладки в тело плотины щебенисто-глинистого грунта можно контролировать неразрушающим сейсмоакустическим способом, который обладает гораздо большей оперативностью, чем непосредственный отбор проб из шурфов с последующим их изучением в лабораторных условиях. При этом сокращается трудоёмкость геотехнического контроля и появляется возможность опробовать карты укладки грунта с гораздо большей детальностью.

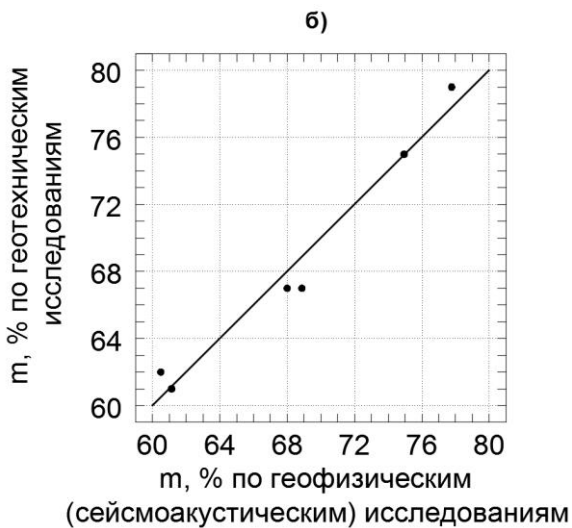
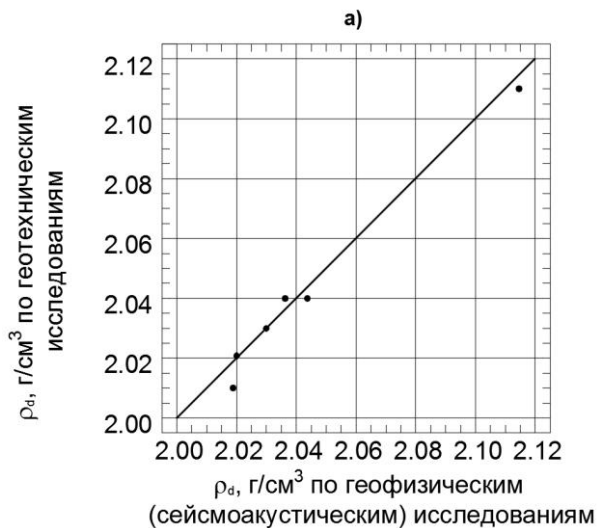


Рис.4 Соотношение значений контролируемых параметров качества укладки щебенисто-глинистого грунта, определённых геотехническими исследованиями и рассчитанных по результатам геофизических (сейсмоакустических) исследований: а – плотность сухого мелкозёма ρ_d ; б – содержание в грунте мелкозёма m

Выводы

1. Для оперативного контроля качества укладки щебенисто-глинистого грунта при послойном возведении плотины рекомендуется сейсмоакустический способ определения контролируемых геотехнических параметров: содержания мелкозёма в грунте и его плотности в сухом состоянии.

2. Сейсмоакустическим способом, по скорости прохождения в грунте упругих продольных волн на разных базах измерений, определяют средние по толщине слоя контролируемые геотехнические параметры, поэтому технология уплотнения грунта должна обеспечивать равномерность указанных параметров в уплотнённом слое.

3. Применение сейсмоакустического способа контроля качества укладки в тело плотины щебенисто-глинистого грунта позволяет уменьшить трудоёмкость геотехнического контроля и повысить интенсивность проведения земляных работ.

Список литературы

1. *А.с. 486248*. Способ контроля качества уплотнения грунта / С.В. Борткевич, П.П. Листровой, Л.П. Могильников, Н.Г. Савченков // Бюллетень изобретений. 1975. № 36.

2. *Борткевич С.В., Вуцель В.И., Чернилов А.Г., Ройко Н.Ф.* Контроль качества уплотнения грунтовых материалов при строительстве высоких плотин // Гидротехническое строительство. 1981. № 5. С. 9–12.

3. *Буренкова В.В.* Назначение характеристик глинисто-щебенистых грунтов в противофильтрационных элементах грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1987. № 7. С. 17–21.

4. *Ермолаева А.Н., Павчич М.П., Рельтов Б.Ф.* Экспериментальные исследования уплотняемости грунтовых смесей // Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева: Научное обоснование и опыт строительства и эксплуатации грунтовых плотин. 1989. Т. 216. С. 69–75.

5. *Борткевич С.В.* Оптимизация контроля качества укладки гравийно-галечниковых грунтов при возведении плотин // Гидротехническое строительство. 2017. № 2. С. 11–17.

6. *А.с. 1833816.* Сейсмоакустический способ контроля качества укладки крупнообломочных грунтов в насыпь / С.В. Борткевич, Ю.М. Горшков, В.И. Коптев, А.И. Савич, Н.Г. Савченков // Бюллетень изобретений. 1991. № 30.

7. *Руководство по контролю качества возведения плотин из грунтовых материалов сейсмоакустическими методами* – М.: Институт «Гидропроект». 1993.

8. *Пат. РФ № 2038595.* Сейсмоакустический способ контроля качества укладки неоднородных грунтов в насыпь / Ю.М. Горшков, В.И. Коптев, А.И. Савич, С.В. Кривенцов // Бюллетень изобретений. 1995.

9. *ГОСТ 5180-2015.* Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. М.: ОАО "ПНИИИС". 2015.

10. *ГОСТ 25100-2011.* Грунты. Классификация. МНТКС. 2013.

11. *ГОСТ 22733-2016.* Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности. М.: Стандартинформ. 2016.

О применении пролювиальных отложений для строительства плотин из грунтовых материалов

Борткевич С.В., кандидат техн. наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе, АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ»

Опубликовано: Гидротехническое строительство // Ежемесячный научно-технический журнал, № 9. М.: 2018, с. 2–6

При строительстве плотин из грунтовых материалов на реках, расположенных в горных и предгорных районах зачастую приходится иметь дело с пролювиальными отложениями, представленными как связными так и несвязными грунтами или их смесями.

Пролювиальные отложения образованы в результате деятельности временных бурных дождевых потоков, характерных для горных областей с ливневым выпадением атмосферных осадков. Они залегают на дневной поверхности земли, их разработка не требует выполнения значительных вскрышных работ.

Разные природные условия накопления пролювиального материала обуславливают очень большие колебания в его составе. Согласно [1], выделяются два типа с резко отличными инженерно-геологическими свойствами:

- неотсортированный или плохо отсортированный валунный, галечниковый и щебенистый материал, с разной, чаще плохой, окатанностью, нередко с песчаным или суглинистым заполнителем, обычно с невысокой пористостью;

- отсортированный пылевато-глинистый материал лёссовидного облика нередко с характерными свойствами, в частности просадочными, с высокой пористостью.

Из смеси таких материалов в Таджикистане возведено ядро Нурекской плотины высотой 300 м при научном обосновании состава грунтовой смеси и технологии производства работ НИСом Гидропроекта (ныне АО «Научно-исследовательский институт энергетических сооружений» ПАО «РУСГИДРО»). Приобретённый на строительстве Нурекской плотины опыт был использован в Индии при проектировании (АО «Институт Гидропроект») и возведении ядра плотины Тери высотой 260 м из смеси суглинков с гравийно-галечниковым грунтом.

Перед строителями стоит задача возведения тела плотин или их противофильтрационных устройств из пролювиального материала первого типа, в формировании которого В.А. Приклонский [1] выделил следующие отличия:

- небольшая длительность переноса рыхлых продуктов выветривания, что обуславливает слабую сортировку материала и слабую окатанность обломков;

- быстрое отложение сносимого со склонов материала при резком уменьшении скорости течения воды у их подножия или в других местах перегиба рельефа, что приводит к образованию беспорядочной или грубой косослоистой текстуры с неправильным чередованием линз и прослоев разного состава и разных свойств;

- неблагоприятные условия для накопления и сохранения органических, в частности растительных, остатков, с чем связано отсутствие разностей, обогащённых гумусом или заторфованных;

- периодическое длительное и глубокое просыхание откладываемого материала, что вызывает свёртывание коллоидов глинистой части, выделение растворимых солей с образованием дополнительных связей между частицами породы и общее уплотнение материала.

Учитывая отличительные особенности формирования вышеуказанного материала пролювиальных отложений приходится уделять повышенное внимание приготовлению грунтовых смесей из него: регулировать гранулометрический состав смесей как по крупности каменных включений, так и по содержанию мелкозёма (глинистых, пылеватых и песчаных частиц), а также влажность, иногда содержание водорастворимых солей.

Диапазон изменения вышеуказанных характеристик в грунтовых смесях устанавливается в зависимости от вида конструктивного элемента плотины, для создания которого они используются. Такие грунтовые смеси, согласно классификации Е. М. Сергеева, относятся к искусственным грунтам без кристаллизационных связей, улучшенных путём доведения до оптимального гранулометрического состава и последующего уплотнения [2].

При благоприятном сочетании дресвяных (гравийных), щебенистых (галечниковых), песчаных и глинистых частиц из пролювиальных отложений можно получить такие смеси, которые будут иметь максимум положительных и минимум отрицательных с инженерно-строительной точки зрения свойств грунта.

Если грунтовая смесь, приготовленная из пролювиальных отложений, представляет собой щебенисто-глинистый грунт и предназначена для создания противофильтрационного устройства плотины, то в первую очередь изучается её

фильтрационно-суффозионная прочность. На основе такого изучения Д. Л. Шерардом [3] дана примерная классификация грунтовых материалов для ядер плотин по сопротивляемости суффозии.

Согласно этой классификации хорошим и удовлетворительным материалом считались грунтовые смеси, состоящие из дресвы (гравия), песка и глинистого заполнителя – мелкозёма (частицы мельче 5 мм) с числом пластичности более 12 %, т.е. суглинка.

Для ядра Сарсангской каменно-земляной плотины высотой 125 м, построенной в Азербайджане, ВНИИГом им. Веденеева также был рекомендован состав смеси суглинка с дресвяно-щебенистым материалом, характеризующейся содержанием суглинка от 30 до 60 % [4].

Исследованиями ВНИИ ВОДГЕО, выполненными применительно к Нурекской, Колымской, Изобельненской, Рогунской, Богучанской и другим плотинам, обобщёнными В.В. Буренковой [5], уточнено содержание глинистого мелкозёма различной пластичности в щебенисто-глинистом грунте для обеспечения его фильтрационно-суффозионной прочности:

мелкозём с числом пластичности от 1 до 7 %, т.е. супесь 28–36,5 % (среднее значение 32 %);

то же с числом пластичности от 7 до 17 %, т.е. суглинок 26–36 % (среднее значение 31 %);

то же с числом пластичности более 17 %, т.е. глина 19–33,5 % (среднее значение 26 %).

При этом под мелкозёмом подразумевались частицы грунта мельче 1 мм.

Ядро Колымской плотины высотой 30 м возведено из неоднородных щебенисто-глинистых грунтов, содержащих не менее 45 % супесчаного мелкозёма (фракции мельче 2 мм).

Опыт строительства Орто-Токойской плотины в 1950-х гг. показал, что при содержании мелкозёма менее 30–33 % следует опасаться расслоения грунта при его отсыпке. В связи с этим не рекомендуется к укладке в тело плотин грунт с содержанием мелкозёма менее 33–35 %.

Разница в максимальной крупности частиц мелкозёма, указанной исследователями обусловлена способами его отсева из щебенисто-глинистого грунта на разных ситах в производственных и лабораторных условиях.

Подробный анализ гранулометрического состава щебенисто-глинистых грунтов, который был выполнен в НИСе Гидропроекта, показал, что при содержании частиц мельче 5 мм в количестве не менее 40 %, а пылевато-глинистых частиц не менее 15 % при непрерывной гранулометрии и 35 % при прерывистой гранулометрии грунты являются несуффозионными [6].

В общем все вышеуказанные рекомендации по гранулометрическому составу щебенисто-глинистых грунтов, обладающих фильтрационно-суффозионной прочностью при различных градиентах напора воды, совпадают с ранее разработанными рекомендациями Х. Брета [7] по гранулометрическому составу глинобетона, приведённому на рис. 1. Изучая этот состав К. Кейль [8] показал, что глинистые частицы, имеющие размер менее 0,0015 мм и содержащиеся в глинобетоне в количестве 2 %, обладают удельной поверхностью в 40 раз большей, чем все остальные частицы, содержание которых составляет 98 % по массе, поэтому глинобетон является хорошим материалом для противofильтрационных устройств.

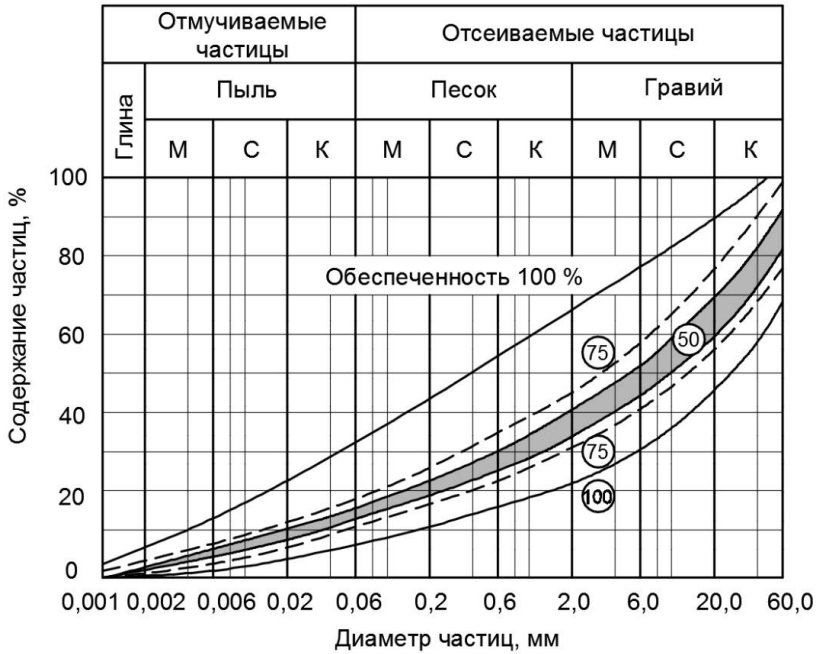


Рис. 1. Кумулятивные кривые гранулометрического состава глинистого бетона (по Х. Брету) с указанием их обеспеченности: 50 %, 75 % и 100 %

Щебенисто-глинистые грунты для противофильтрационных устройств плотин обычно готовят из карьерных грунтов на механических установках, колосниковых решётках, в промежуточных складах или в конусах сегрегации с отбором крупных фракций. Технологические схемы улучшения гранулометрического состава и регулирования влажности карьерных грунтов для возведения плотин приведены в [9].

В процессе реализации той или иной технологической схемы важное значение имеет проведение операций, способствующих в последствии, при укладке в тело плотины и

уплотнении грунтов, преобразованию природной флокуляционной структуры их глинистого мелкозёма в дисперсионную. Грунт до отправки к месту укладки должен быть разрыхлён, а агрегаты в мелкозёме разрушены. Достижению этих целей при заготовке грунтов из пролювиальных отложений с твёрдой консистенцией мелкозёма способствует их дополнительное увлажнение и выдерживание в местах заготовки. Метод доувлажнения и длительность выдерживания доувлажнённого грунта на месте его заготовки определяются опытно-производственными работами или технологическими исследованиями, которые обязательно выполняются перед возведением плотин I и II классов.

Следует отметить возможность получения из пролювиальных отложений сразу нескольких видов грунта для формирования полного профиля плотины. Так, например, известен способ возведения плотины из неоднородных грунтовых материалов [10], включающий создание складов сегрегации грунта сталкиванием (сбрасыванием) его с высоты под откос, последующую ярусную разработку грунта в складах и зональную укладку сегрегированного грунта в тело плотины (рис. 2), отличающийся тем, что с целью снижения стоимости строительства путём регулирования гранулометрического состава грунта определяют гранулометрические составы грунта в каждом ярусе склада сегрегации, сравнивают их с нормативными требованиями по условию свободного оттока воды и по условию отсутствия суффозии грунта, при рассогласовании составов изменяют высоту ярусов до ликвидации рассогласования. При этом высоту яруса разработки склада сегрегации увеличивают для выполнения условия свободного оттока воды из грунта, а для выполнения условия отсутствия суффозии грунта её уменьшают.

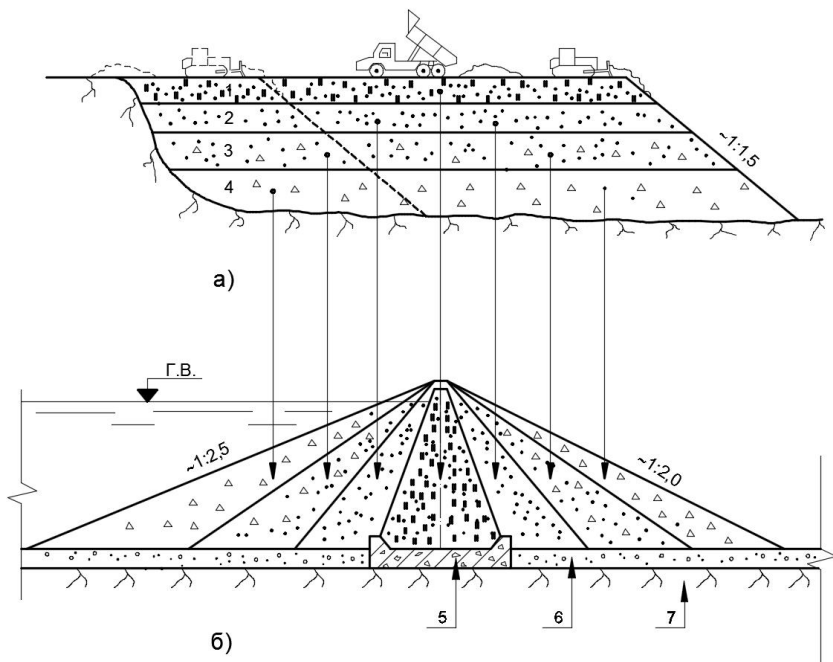


Рис.2. Схема возведения плотины из неоднородных грунтовых материалов:

а – отсыпка грунта пионерным способом в склад сегрегации с последующей поярусной разработкой; *б* – зональная послойная укладка сегрегированного грунта в тело плотины; 1, 2, 3, 4 – номера ярусов склада сегрегации по порядку вступления в разработку; ГВ – проектный горизонт воды в верхнем бьефе плотины; 5 – бетонная пробка; 6 – речной аллювий; 7 – скальное основание

Условия свободного оттока воды и отсутствия суффозии грунта в смежных зонах, которые рассматривают как переходные, выражаются критерием К. Терцаги:

$$\frac{D_{15}}{d_{15}} \geq 4 \geq \frac{D_{15}}{d_{85}},$$

где D_{15} – условный диаметр частиц, мельче которых содержится 15 % по массе в зоне с крупным грунтом; d_{15} и d_{85} –

условные диаметры частиц, мельче которых содержится соответственно 15 % и 85 % по массе в зоне с мелким грунтом.

Грунт верхнего яруса разработки склада сегрегации послойно укладывают в центральную зону плотины, выполняющую роль противофильтрационного устройства; грунт нижележащих ярусов – в смежные последовательно расположенные зоны; грунт нижнего яруса – в периферийную зону у откосов плотины.

Применение описанного способа наиболее эффективно для возведения плотин из грунтовых материалов, месторождения которых трудно расчлениить по структуре залежи, гранулометрическому составу грунтов, их влажности, крупности каменистых включений и пр., а также для возведения плотин из грунтов полезных выемок.

При строительстве плотин из щебенисто-глинистых грунтов, полученных путём разработки пролювиальных отложений, приходится уделять внимание не только крупности каменистых включений и содержанию мелкозёма в грунте, а также его влажности и плотности.

Регулируя соотношение этих двух параметров, можно формировать структуру и водонасыщение глинистого мелкозёма в грунте, от которых зависят его фильтрационные и механические свойства, а также степень их возможного изменения в процессе строительства и эксплуатации сооружения.

Наилучшее сочетание суффозионно-фильтрационных и механических характеристик мелкозёма щебенисто-глинистого грунта в теле плотины достигается путём его укладки при твёрдой, полутвёрдой или тугопластичной консистенции мелкозёма (показатель текучести $I_L < 0,5$) с уплотнением до

состояния характеризуемого коэффициентом водонасыщения $S_r \geq 0,8-0,9$.

Как показано в [11], твёрдая или полутвёрдая консистенция мелкозёма в уплотнённом грунте уменьшает вероятность развития высокого порового давления консолидации, а значения коэффициента водонасыщения более 0,8 – 0,9 исключают появление нежелательных деформаций тела плотины и образование в её теле трещин за счёт изменения физико-механических свойств грунта при его обводнении.

Для возведения низконапорных плотин на деформируемом основании целесообразно применение грунтов, имеющих глинистый мелкозём тугопластичной или мягкопластичной консистенции при тех же значениях коэффициента водонасыщения.

Подбор средств для уплотнения грунта следует производить исходя из консистенции глинистого мелкозёма согласно [9, 12]. В таблице приведены рекомендуемые средства уплотнения щебенисто-глинистых грунтов при возведении плотин.

Рекомендуемые средства уплотнения щебенисто-глинистых грунтов при возведении плотин

Разновидность глинистого мелкозёма в щебенисто-глинистом грунте по консистенции (по показателю текучести I_L)	Рекомендуемые средства уплотнения
1	2
Супеси твёрдые ($I_L < 0$); суглинки и глины твёрдые и полутвёрдые ($I_L < 0, 0 \leq I_L \leq 0,25$)	Мощные самоходные вибрационные катки с вальцом, оборудованным кулачками типа «ПЭДФУТ»; трамбующие плиты; тяжёлые пневмоколёсные катки с удельным давлением на грунт 0,6–1,2 МПа

1	2
Суглинки и глины тугопластичные ($0,25 < I_L \leq 0,50$)	Самоходные кулачковые катки статического действия типа «ПЭДФУТ»; пневмоколёсные катки с удельным давлением на грунт 0,2–0,5 МПа
Суглинки и глины мягкопластичные ($0,50 < I_L \leq 0,75$)	Бульдозеры и пневмоколёсные катки с удельным давлением на грунт 0,05–0,2 МПа

Выбирая по таблице средства уплотнения щебенисто-глинистого грунта с мелкозёмом твёрдой или полутвёрдой консистенции, необходимо учитывать, что благодаря большой интенсивности динамических напряжений, создаваемых в уплотняемом слое при воздействии вибровальца и многократной повторяемости нагрузки на грунт, виброкатки являются наиболее эффективным средством достижения высокого значения коэффициента уплотнения этого грунта и значительной производительности, которая для наиболее мощных машин может достигать 600–800 м³/ч.

Качество уплотнения щебенисто-глинистого грунта в сооружении зависит от достигаемой степени уплотнения его мелкозёма, поэтому контроль качества уплотнения в процессе возведения плотины целесообразно вести по мелкозёму.

Следует учитывать, что в грунтах, приготовленных из пролювиальных отложений одного и того же месторождения, вид глинистого мелкозёма может изменяться от тяжёлых суглинков до песчанистых супесей. В этом случае, для исключения возможности перехода супесчанистой части глинистого мелкозёма в текучее состояние при обводнении тела плотины, контрольные значения плотности мелкозёма назначают переменными и зависящими от вида мелкозёма, характеризуемого числом пластичности или содержанием

песчано-глинистых частиц. В качестве примера на рис. 3 приведены контрольные значения плотности-влажности мелкозёма и щебенисто-глинистого грунта в целом, приготовленного путём смешивания и сегрегации материалов из различных зон разработки месторождения пролювиальных отложений для возведения ядра плотины Нурекской ГЭС, а на рис. 4 дана форма обобщения результатов контроля качества укладки этого грунта на строительстве.

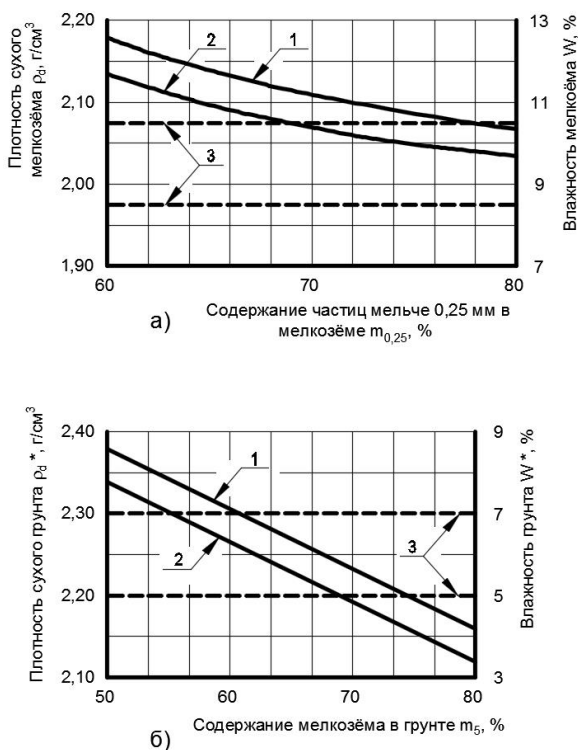


Рис. 3. Контрольные значения плотности и влажности щебенисто-глинистого грунта при возведении ядра плотины Нурекской ГЭС: *а* – для мелкозёма, *б* – для грунта в целом; *1* и *2* – максимальная и минимально допустимая плотность; *3* – требуемая влажность (границные значения)

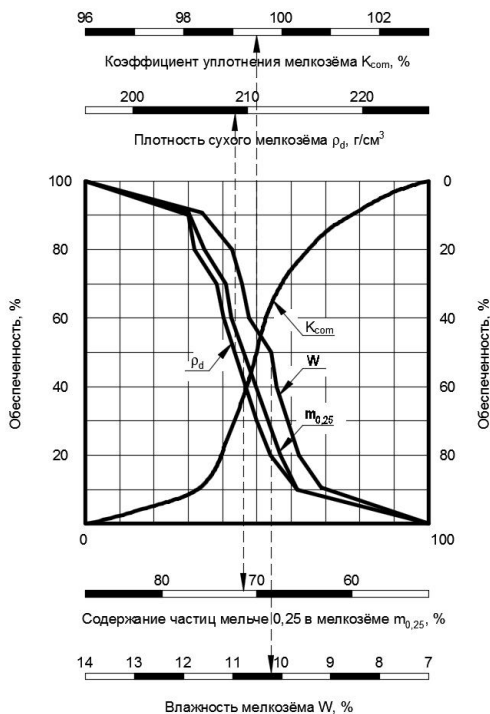


Рис.4. Форма обобщения результатов контроля качества укладки щебенисто-глинистого грунта по мелкозёму (частицы мельче 5 мм) при строительстве плотины Нурекской ГЭС

Практика строительства и эксплуатации ряда высоких плотин из грунтовых материалов показала, что для возведения противофильтрационных устройств подобных сооружений могут быть использованы пролювиальные отложения, характеризующиеся неоднородной структурой залегания и значительной изменчивостью глинистого заполнителя. Научное обоснование технологии улучшения гранулометрического состава и регулирования влажности, а также технологии укладки в тело плотины щебенисто-глинистых грунтов, полученных разработкой этих отложений, с соответствующим

геотехническим контролем позволяет создавать надёжные сооружения, в теле которых грунт обладает наилучшим сочетанием физико-механических и фильтрационно-суффозионных характеристик.

Выводы

1. При строительстве плотин из грунтовых материалов в горных и предгорных районах целесообразно рассматривать возможность наиболее полного использования пролювиальных отложений, залегающих непосредственно на поверхности земли и не требующих значительных вскрышных работ.

2. Простейшие способы улучшения гранулометрического состава и регулирования влажности пролювиальных отложений позволяют получать из них грунтовые материалы, обладающие оптимальным для той или иной зоны плотины сочетанием физико-механических и фильтрационных свойств.

3. В процессе укладки в тело плотины щебенисто-глинистых грунтов, полученных путём разработки пролювиальных отложений, требуется уделять особое внимание качеству уплотнения их глинистого мелкозёма и подбору уплотняющих средств.

Список литературы

1. *Приклонский В.А.* Грунтоведение. Часть вторая. – М.: Государственное издательство геологической литературы, 1952. – 371 с.

2. *Сергеев Е.М.* Инженерная геология. – М.: Издательство Московского университета, 1978, С. 131–136.

3. *Sherard J.L.* Embankment-Dam Engineering. John Willey and Sons inc., New-York, London, Sydney, Toronto, 1973. P. 272–353.

4. *Ермолаева А.Н., Рельтов Б.Ф., Радченко В.Г., Мамедов Б.А.* Искусственная смесь суглинка с дресвяно-песчаным

грунтом как материал для возведения ядра плотины // Известия Всесоюзного научно-исследовательского института гидротехники. 1976. Т. 111. С. 11–16.

5. *Буренкова В.В.* Назначение характеристик глинисто-щебенистых грунтов в противофильтрационных элементах грунтовых плотин // Гидротехническое строительство. 1987. № 7. С. 17–21.

6. *Ронжин И.С.* Некоторые критерии оценки фильтрационной прочности оснований гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 1974. № 7. С. 24–27.

7. *Breth H.* Die erdbaumechanischen und erdbautechnischen Unetrsuchungen fur das Pumpspeicherwerk Happung // Bautechnik. 1958. Heft 6.

8. *Keil K.* Aufgabe und Funktion des Tons in den anorganischen Dichtungen des Erd – und Wasserbaues. Der Bauingenieur. 38 (1963). Heft 10.

9. *Пособие* по технологии возведения плотин из грунтовых материалов (к СНиП 2.06.05-84 и СНиП 3.07.01-85). П-885-91. М.: Гидропроект. 1991 (актуализации текста 01.12.2013). 161 с.

10. *Пат. СССР № 1692181.* Способ возведения плотины из неоднородных грунтовых материалов / С.В. Борткевич, А.Н. Скибин // База патентов СССР. 15.07.1994.

11. *Аверьянов В.И., Борткевич В.С.* О способах снижения порового давления в глинистых ядрах каменно-земляных плотин // Природообустройство. 2016. № 3. С. 8–16.

12. *Сметанин В.И., Аверьянов В.И.* Совершенствование технологии уплотнения глинистых грунтов при возведении гидротехнических сооружений // Природообустройство. 2016. № 2. С. 28–37.

Каменно-земляная плотина

Аверьянов В.Н., Борткевич В.С., Жерихин А.С.,

*АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро
«ГИТЕСТ»*

*Опубликовано: Патент РФ на изобретение № 2642643. Патентообладатель:
Акционерное общество «Проектно-изыскательское научно-исследовательское
бюро «ГИТЕСТ» (RU). Дата регистрации в государственном реестре
изобретений Российской Федерации: 25.01.2018 г.*

Изобретение относится к гидротехническим сооружениям, в частности к плотинам из грунтовых материалов, и может быть использовано при создании глубоких водохранилищ на горных реках в сейсмически активных районах.

Известны плотины из грунтовых материалов, включающие боковые упорные призмы, переходные зоны и ядро из глинистого грунта, в котором для ускорения консолидации, снижения величины осадок и повышения устойчивости плотины выполнены полости, заполненные дренирующим материалом [1, 2, 3]. Однако эти плотины характеризуются фильтрационной неоднородностью ядра, что осложняет фильтрационный режим сооружения при интенсивном сейсмическом воздействии и появлении неравномерных эксплуатационных деформаций [4]. На такой случай требуется повышение надёжности сооружения.

Наиболее близкой по технической сущности и достигаемому результату является каменно-земляная плотина с ядром, включающим центральную часть из смеси несвязного минерального грунта с глинистым заполнителем и охватывающую её замкнутую оболочку из глинистого грунта

[5]. Наименование грунтов принято в соответствии с действующим ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация».

Размеры центральной части ядра и охватывающей её оболочки подбираются исходя из соотношения деформационных и фильтрационных свойств грунтов, применяемых для сооружения ядра, переходных зон и боковых упорных призм плотины. Эта плотина обладает большей фильтрационной однородностью ядра и повышенной водонепроницаемостью его в контактных зонах, но также имеет недостаток, который заключается в том, что глинистый грунт оболочки, охватывающей центральную часть ядра, не способен кольматировать водопроводящие трещины, которые могут образовываться в ядре и в скальном основании плотины при землетрясении и при проявлении неравномерных эксплуатационных деформаций.

Вследствие образования трещин и размыва их водой происходит потеря местной фильтрационно-суффозионной прочности ядра, т.е. снижается надёжность плотины.

Цель изобретения – повышение надёжности плотины на случай интенсивного сейсмического воздействия и проявления неравномерных эксплуатационных деформаций.

Поставленная цель достигается тем, что в известной каменно-земляной плотине с ядром, включающим центральную часть из смеси несвязного минерального грунта с глинистым заполнителем и охватывающую её замкнутую оболочку, оболочка выполнена из той же смеси с пониженным содержанием несвязного минерального грунта меньшей крупности и с повышенной влажностью глинистого заполнителя.

Таким образом, одновременно с повышением водонепроницаемости ядра в контактных зонах достигается

эффект залечивания возникающих трещин за счёт их кольматации частицами несвязного минерального грунта при движении воды по трещинам.

Степень снижения содержания несвязного минерального грунта и уменьшения его крупности в смеси, а также степень увеличения влажности глинистого заполнителя зависят от вида применяемых грунтов.

Крупность несвязного минерального грунта в смеси для центральной части ядра подбирается исходя из способа его возведения, а для охватывающей замкнутой оболочки – исходя из прогнозируемой максимальной величины раскрытия трещин.

Предложенная каменно-земляная плотина обладает повышенной надёжностью на случай интенсивного сейсмического воздействия и проявления неравномерных эксплуатационных деформаций с образованием водопроводящих трещин в её ядре и в скальном основании, так как при размыве водой охватывающей замкнутой оболочки по трещинам они кольматируются разновеликими частицами несвязного минерального грунта, входящего в состав смеси вместе с глинистым заполнителем. Возможно упрочнение полотнищами геотекстиля охватывающей центральную часть ядра замкнутой оболочки, что позволяет снизить процессы образования трещин в ядре при воздействии сейсма и при неравномерных эксплуатационных деформациях, что также приводит к повышению надёжности сооружения.

В качестве примера на рис. 1 и 2 схематично изображена плотина с вертикальным и наклонным ядром, поперечное сечение, а на рис. 3 – то же, продольное сечение. Плотина имеет ядро, с центральной частью 1 и охватывающей её оболочкой 2, возводится ядро слоями толщиной 0,3 м. Ядро примыкает посредством бетонной пробки 3 к скальному основанию 4, а

сбоку к переходным зонам 5. Ядро и переходные зоны пригружены боковыми призмами 6. Прогнозируемая максимальная величина раскрытия трещин в ядре и в скальном основании плотины 50 мм.

Учитывая послойный способ возведения ядра, его центральная часть 1 выполняется из смеси несвязного минерального грунта, представленного песком, дрсевой и щебнем крупностью до 200 мм, с глинистым заполнителем в виде суглинка влажностью 0,08–0,11 при их весовом соотношении в среднем 60 % и 40 %, а охватывающая оболочка – из той же смеси при среднем соотношении вышеуказанных составляющих 40 % и 60 % и влажности суглинка 0,12–0,14.

Максимальная крупность частиц грунта в оболочке, охватывающей центральную часть ядра, назначается несколько большей, чем прогнозируемая максимальная величина раскрытия трещин, и составляет 60–80 мм, т.е. уменьшена относительно крупности грунта в центральной части ядра.

В верхней зоне примыкания ядра плотины к бортам скального основания 4, где наиболее вероятно появление трещин разрыва, охватывающая центральную часть ядра замкнутая оболочка 2 может быть упрочнена полотнищами геотекстиля 7, увеличивающими сопротивление грунтовой смеси разрыву. Расположение и разрывная прочность полотнищ геотекстиля определяются расчётом напряжённо-деформированного состояния плотины.

Сопоставительный анализ заявленного технического решения с прототипом показывает, что предложенная каменно-земляная плотина отличается от прототипа наличием новых признаков в ядре, а именно: охватывающая замкнутая оболочка, внутри которой размещена смесь несвязного минерального грунта, выполнена из той же самой смеси с пониженным

содержанием несвязного минерального грунта меньшей крупности и с повышенной влажностью глинистого заполнителя, следовательно, соответствует критерию изобретения «новизна». Кроме того, в верхней зоне примыкания ядра плотины к бортам скального основания охватывающая оболочка может быть упрочнена полотнищами геотекстиля.

Сравнением заявленной каменно-земляной плотины не только с прототипом, но и с другими известными решениями не обнаружено решение, обладающее сходными признаками. Это позволяет сделать вывод о соответствии предложенной каменно-земляной плотины критерию «существенные отличия».

Заявленная каменно-земляная может быть использована при создании глубоких водохранилищ в горных районах Российской Федерации, а также при строительстве Рогунской ГЭС в Таджикистане и Камбаратинской ГЭС в Киргизии.

Источники информации, принятые во внимание:

1. Авторское свидетельство СССР №644901 «Плотина из местных материалов». Авторы: Б.И. Балыков, Л.В. Горелик, М.П. Павчич. Бюл. №4, 1979.

2. Авторское свидетельство СССР №358463 «Плотина из местных материалов». Автор: В.Ф. Теплов. Бюл. №34, 1972.

3. Авторское свидетельство СССР №897923 «Плотина из местных материалов». Авторы: В.И. Вуцель, В.И. Щербина. Бюл. №2, 1982.

4. Аверьянов В.Н., Борткевич В.С. О способах снижения порового давления в глинистых ядрах каменно-земляных плотин // Природообустройство. Научно-практический журнал, №3, 2016, с. 8–16.

5. Авторское свидетельство СССР №407993 «Каменно-земляная плотина». Автор: С.В. Борткевич. Бюл. №47, 1973.

Каменно-земляная плотина

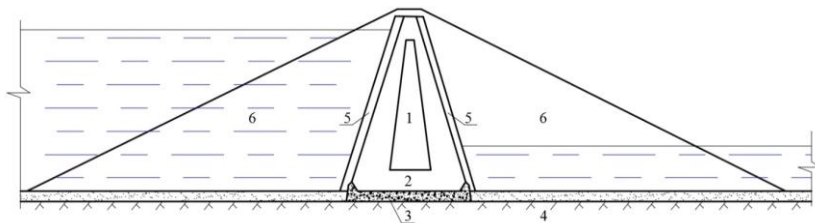


Рис. 1

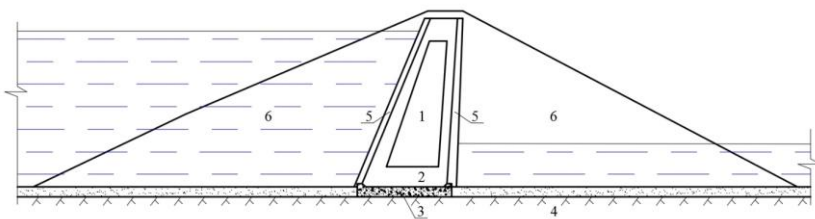


Рис. 2

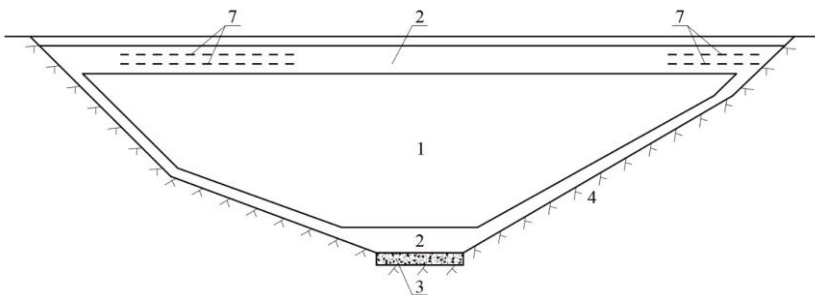


Рис. 3

Заказ № 2801. Бумага офсетная.
Формат 1/16
Отпечатано в типографии ООО «Аналитик»
г. Москва, ул. Клары Цеткин, д.18, стр. 3 . Тел. 617-09-24