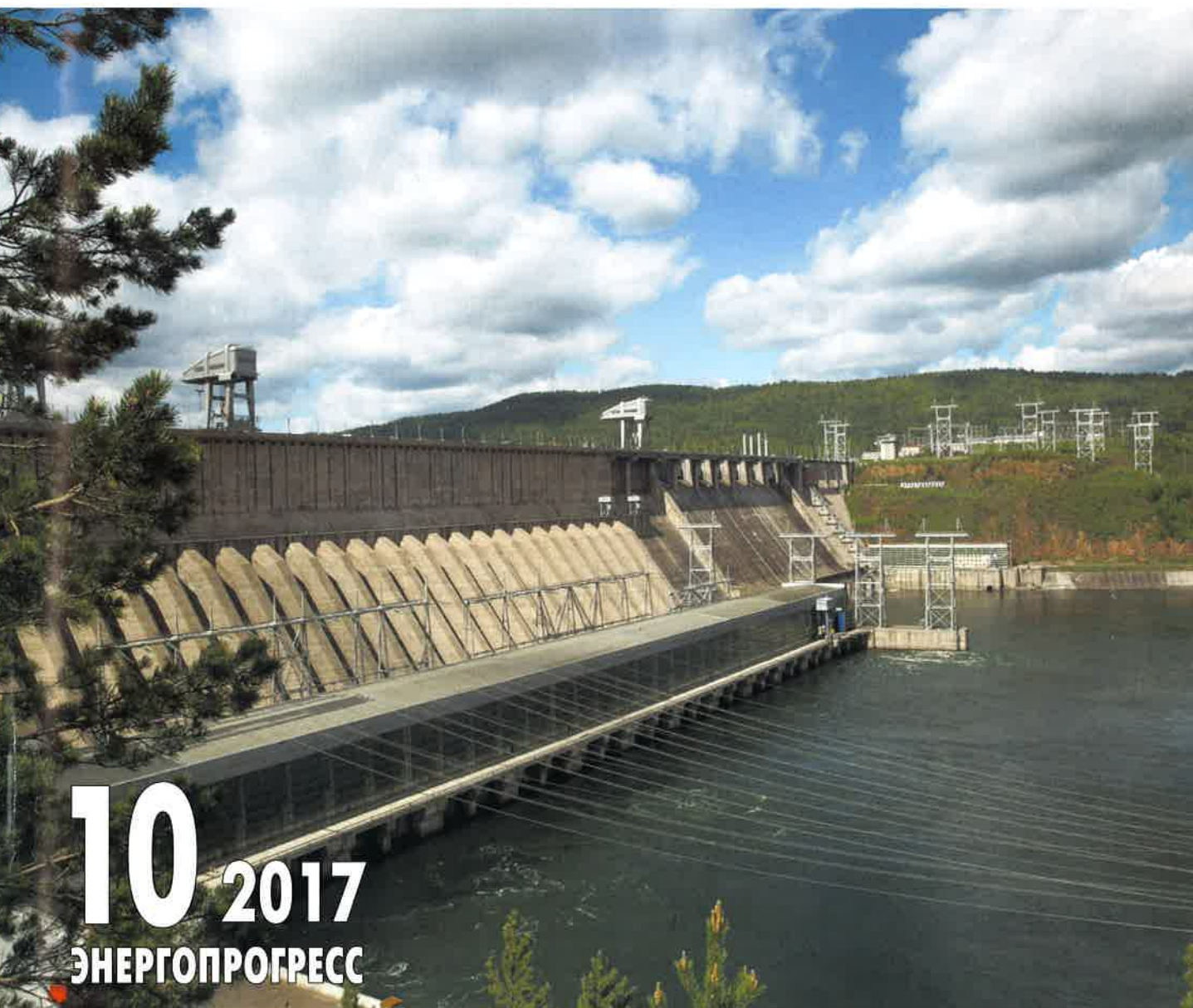




ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО –
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

ISSN 0016-9714

ГИДРО- ТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО



10 2017
ЭНЕРГОПРОГРЕСС

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

Борткевич С. В.¹, кандидат техн. наук, заместитель генерального директора по научно-исследовательской работе (АО "Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро "ГИТЕСТ")

Излагаются результаты совместного проведения геотехнических и геофизических исследований уплотнённого щебенисто-глинистого грунта, выполненных на опытной насыпи с целью разработки сейсмоакустического способа контроля качества укладки этого грунта в тело плотины. Даны рекомендации по определению контролируемых параметров грунта.

Ключевые слова: щебенисто-глинистый грунт, контроль качества, геотехнические исследования, сейсмоакустические исследования, контролируемые параметры, плотность сухого мелкозёма, содержание мелкозёма, коэффициент уплотнения.

Development of seismic-acoustic method of quality control of laying rubble-clayey soils into the dam body

Bortkevich S. V., Candidate of Technical Sciences, Deputy Director General for Scientific-Research Work of Joint Stock Company "Project Survey and Scientific Research Bureau "GITEST"

The results of joint geotechnical and geophysical studies of compacted rubble-clayey soil, made on the experimental embankment with the aim of developing of seismic-acoustic method of quality control of laying of that soil into the dam body are presented. Recommendations on the determination of the controlled parameters of the soil are given.

Key words: rubble-clayey soil, quality control, geotechnical studies, seismic-acoustic surveys, controlled parameters, density of dry fine-grained deposit, content of fine-grained deposit, compaction coefficient.

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 устраива-

ют шурфы глубиной, равной толщине слоя, и размером в плане 1,00 × 1,00 м.

Отбором монолитов из стенок шурфов определяют плотность сухого мелкозёма ρ 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 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 пара-

¹ info@gitest.ru

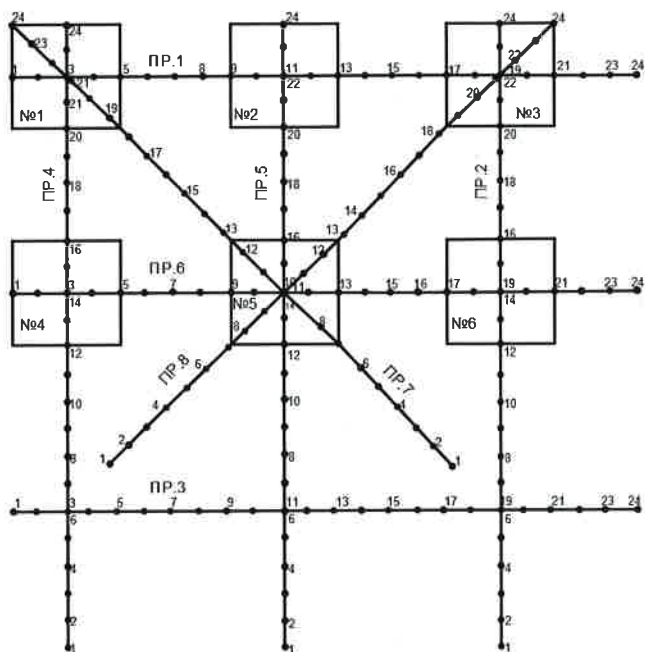


Рис. 1. Схема расположения шурфов № 1–6 и геофизических профилей ПР.1–8 на опытной насыпи щебенисто-глинистого грунта:

1–24 — номера сейсмоприёмников (СП) и пунктов удара (ПУ)

метров 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 гружёным автосамосвалом БелАЗ-540 за 8–10 ходок по следу. Площадка для проведения исследований располагалась в плане по середине опытной насыпи.

На площадке было размечено 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.

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.

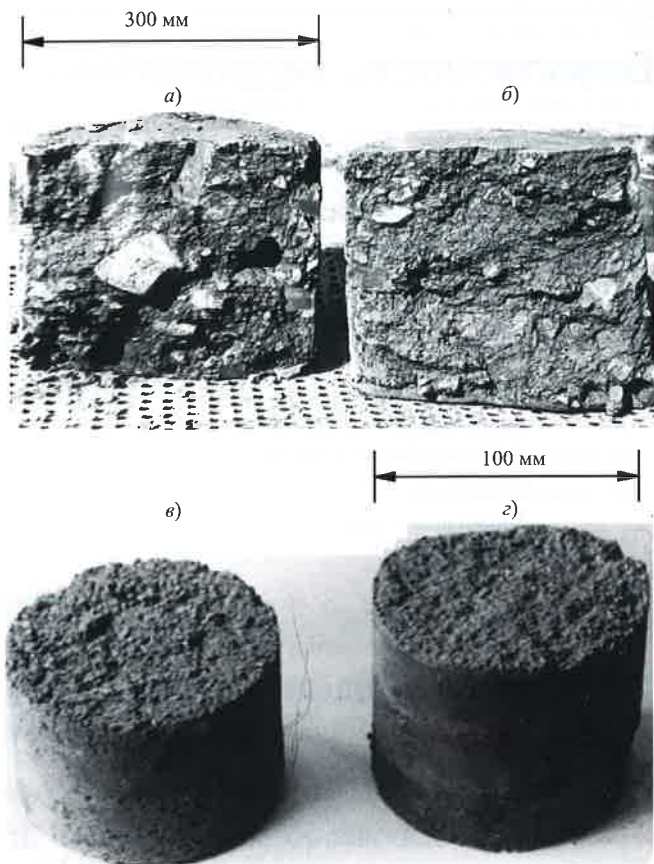


Рис. 2. Образцы щебенисто-глинистого грунта, сформированные отсевом частиц крупностью более 60 мм с последующим лабораторным уплотнением при содержании мелкозёма 60 % (а) и 80 % (б) в сравнении с образцами мелкозёма, уплотнёнными по ГОСТ 22733-2016 (в) и по модернизированному методу AASHO (г)

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 JBMPC 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 ис-

	ш. №1	ш. №2	ш. №3	ш. №4	ш. №5	ш. №6
2.14	2.11	2.05	2.06	2.17	2.07	
1.94	1.91	1.99	2.00	2.11	2.01	
Среднее значение ρ_d , г/см ³	2.04	2.01	2.02	2.03	2.14	2.04

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

следованиями установлено, что наиболее значимыми при построении тарировочных корреляционных связей являются скорости продольных волн на разных базах. Это позволяет обходиться в будущем более простой и оперативной процедурой измерений.

Шифр скоростей соответствует определённой схеме 3-элементной установки, например ПУ 0,75 СП 0,25 СП, где 0,75 — расстояние между ПУ и первым СП (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, отобраным 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 (с меньшим содержанием мелкозёма), что является следствием сегрегации при отсыпке щебенисто-глинистого грунта слоем толщиной 0,50 м.

Физические характеристики мелкозёма, определённые согласно ГОСТ 5180–84 [9], таковы: плотность частиц грунта $\rho_s = 2,73$ г/см³, 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 сравне-

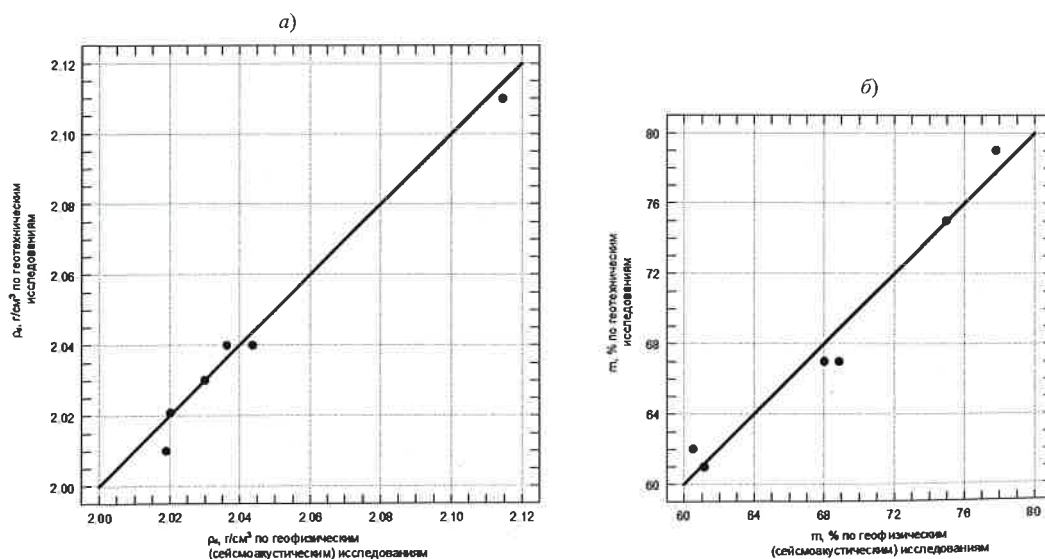


Рис. 4. Соотношение значений контролируемых параметров качества укладки щебенисто-глинистого грунта, определённых геотехническими исследованиями и рассчитанных по результатам геофизических (сейсмоакустических) исследований: а — плотность сухого мелкозёма ρ_d ; б — содержание в грунте мелкозёма m

нии с образцами мелкозёма, уплотнёнными по ГОСТ 22733-2016 [11] и по модифицированному методу AASHTO (Американская ассоциация государственных служащих автомобильных дорог).

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 контролируемыми параметрами грунта (содержанием мелкозёма и его плотностью) в опытной насыпи целесообразно устанавливать для средних значений этих параметров по толщине уложенного слоя грунта.

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 содержания мелкозёма 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, измеренная на базе между двумя сейсмоприёмниками, равной 0,25 м, при удалении первого сейсмоприёмника от пункта удара на 0,75 м. Коэффициент корреляции связи, выражаемой 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

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

где $V_{0,50}^{0,50}$ — скорость продольных упругих волн, измеренная 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

Т а б л и ц а 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	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	-

Технические характеристики лабораторной установки для ударного уплотнения щебенисто-глинистого грунта

Техническая характеристика	Значение
Контейнер для грунта:	
объём, см ³	18 652
высота, см	26,4
диаметр, см	30,0
Удары по грунту:	
масса молота, кг	57
диаметр, см	18
площадь удара, см ²	254
Высота свободного падения, см	46
Количество ударов по слою	65
Слои уплотнения:	
количество	3
поверхность, см ²	706,5
толщина слоя, см	8,8

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 формуле

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

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.

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., Павич М. П., Рельтов Б. Ф. Экспериментальные исследования уплотняемости грунтовых смесей // Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденсева: 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.

- гического университета имени П. А. Костычева. 2015. № 4 (28). С. 38 – 43.
4. Пат. № 162761 РФ, МПК E02B 13 / 00. Поворотное сооружение для каналов с бурным течением” / О. В. Атаманова, Г. С. Аджыгулова // Бюллетень. № 18. 2016.
 5. Леви И. И. Моделирование гидравлических явлений. — Л.: Энергия — Ленинградское отделение, 1967. — 235 с.
 6. Штеренлихт Д. В. Гидравлика. — М.: Энергоатомиздат, 2008. — 351 с.
 7. Справочник по гидравлическим расчетам / Под ред. П. Г. Киселева. Изд 5-е. — М.: Энергия, 1974. — 312 с.
 8. Михалев М. А. Физическое моделирование гидравлических явлений: Учеб. пособие. — СПб: Изд-во политехнического университета, 2010. — 443 с.
 9. Высоцкий Л. И., Высоцкий И. С. Продольно-однородные осредненные турбулентные потоки: Монография. — Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 2011. — 560 с.
 10. Филиппов Е. Г. Гидравлика гидрометрических сооружений для открытых потоков. — Л.: Гидрометеиздат, 1990. — 286 с.
 11. МИ 2406-97. ГСИ. Расход жидкости в открытых каналах систем водоснабжения и канализации. Методика выполнения измерений при помощи стандартных водосливов и лотков. — М.: Издательство стандартов, 1997. — 44 с.

Сдано в набор 25.08.2017. Подписано в печать 17.10.2017. Формат 60×84 1/8.

Печать офсетная. Печ. л. 7,5. Цена свободная

Оригинал-макет выполнен в издательстве “Фолиум”
127411, Москва, Дмитровское ш. 157, тел/факс 8(499) 258-08-28
Internet: <http://www.folium.ru>, **E-mail:** info@folium.ru
Отпечатано в типографии издательства “Фолиум”