

– № 3.– С. 16–21.

5. Новикова И. С., Родионов В. Б., Семенов В. М. Гидравлические исследования и выбор конструкции эксплуатационного водосброса № 2 Богучанской ГЭС // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 9. – С. 54–60.

Материал поступил в редакцию 16.06.2014.

Гурьев Алим Петрович, доктор

технических наук, профессор

Тел. +7 (499) 976-21-56

Ханов Нартмир Владимирович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Гидротехнические сооружения»

E-mail: nvkhanov@yahoo.com

Волгин Николай Александрович, аспирант

E-mail: nvolgin@yandex.ru

Тел. 8-916-707-01-22

УДК 502/504:627.82.034.93

В. Я. ЖАРНИЦКИЙ, А. М. СИЛКИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

«Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

ЭТАП СТРОИТЕЛЬСТВА ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН – ЗАЛОГ ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ

В решении задачи по обеспечению эксплуатационной безопасности грунтовых плотин важнейшую роль играет этап строительства таких сооружений, где обеспечение качества работ является залогом их надежности и долговечности. В статье проводится анализ причин повреждений, аварий и разрушений грунтовых плотин, являющихся наиболее массовым видом напорных гидротехнических сооружений. Отмечается, что при решении задачи по обеспечению эксплуатационной надежности напорных грунтовых сооружений немалую роль играет этап реализации проектного решения, то есть этап строительства плотин, при ответственном отношении к которому в процессе возведения сооружений нередко выявляются и своевременно корректируются неточности проектных решений, разработок, требований и др. Обоснована методика установления закономерностей оперативного освидетельствования строительных показателей грунтов на основе корреляционно-регрессивного анализа экспериментальных данных. Эта методика позволяет учитывать межфакторные связи в грунтах. Рекомендованы квалификационные показатели для глинистых грунтов, являющиеся многофакторными критериями их состояния при уплотнении. Представлена система оперативного освидетельствования качества укладки глинистых грунтов в тело напорных сооружений, которая может быть использована как для «чистых» (без включений) грунтов, так и для содержащих обломочный материал. Эта система существенно повышает надежность послойной их укладки путем исключения влияния природной изменчивости свойств грунтов на объективность оценки качества уплотнения.

Оперативный геотехнический контроль, квалификационный показатель грунта, коэффициент (степень) уплотнения, метод монолитов, метод лунки (шурфа).

In solving the problem on ensuring the operational safety of earth dams the most important role is played by the construction stage of these structures where ensuring of works quality is the security of their reliability and durability. In the article there is given an analysis of causes of damages, failures and destructions of earth dams which are the most prevailing among head hydro-technical structures. It is stated that when solving the problem on ensuring the operational safety of earth head structures a considerable role is played by the stage of the design decision implementation that is the stage of dams building, under the proper relation to it in the process of erection of structures some inaccuracies of design decisions, developments, requirements etc. are revealed and corrected in due time. The method is substantiated for the establishment of regularities of operative examination of soils building factors on the basis of the correlated-regressive analysis of the experimental data. This method allows taking into consideration inter-factor connections in soils. There are recommended qualification indicators for clay soils which are multi-factor criteria of their condition under compaction. There is given a system of the operative examination of the quality of clay soils laying into the body of head structures which can be used both for «clean» (without inclusions) soils and for those containing detritus. This system significantly improves the reliability of their layering by excluding the influence of the natural changeability of soils properties on the objective assessment of the compaction quality.

Operative geotechnical control, qualification indicator of soil, coefficient (degree) of compaction, method of monoliths, method of the hole (bore bit).

Актуальной проблемой в создании надежных, безопасных и долговечных грунтовых напорных сооружений является объективный и оперативный контроль качества работ на этапе их строительства. При значительных достижениях и совершенствовании технологии строительства, повышении общего уровня знаний, опыта и технических решений аварии плотин имеют место.

Анализ распределения причин аварий, повреждений и разрушений грунтовых плотин (рис. 1) показывает, что этапы проектирования, строительства и

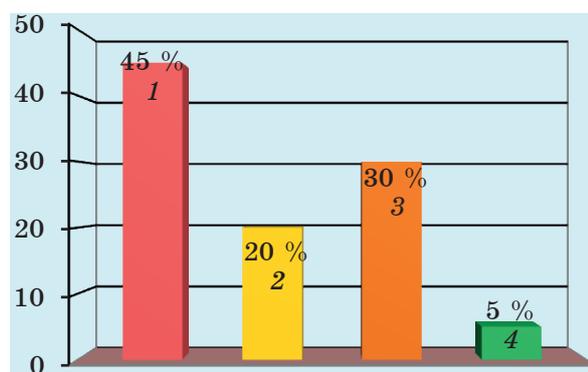


Рис. 1. Распределение причин аварий, повреждений и разрушений грунтовых плотин: 1 – ошибки проектирования; 2 – ошибки при производстве работ; 3 – ошибки эксплуатации; 4 – износ несущей конструкции

Таким образом, в решении задачи по обеспечению эксплуатационной надежности напорных грунтовых сооружений немалую роль играет этап реализации проектного решения, т. е. строительства плотин. При ответственном отношении к данному этапу в процессе возведения сооружений нередко выявляются и своевременно корректируются неточности проектных решений, разработок, требований и т. п.

Для создания напорных грунтовых сооружений наиболее часто используют глинистые грунты, хотя в производстве работ глинистый материал является наиболее сложным из-за низкой водопроницаемости, влияния погодных условий, небольшого диапазона влажности, при которой грунт допускается к укладке, условий залегания в карьере и пространственной изменчивости свойств в пределах карьера. Причем последний

эксплуатации по-прежнему определяют надежность и безопасность этих сооружений. Анализ распределения аварий (повреждения и разрушения) в зависимости от типа плотин и локализации повреждений в сооружении, бесспорно, свидетельствует о том, что преобладающая часть аварий произошла на грунтовых плотинах – 77 % (рис. 2) от общего числа рассмотренных случаев. Из них 25 % приходится на основание, 38 % – на тело плотины, 9 % – на водосбросные или водосливные сооружения и 5 % – на разные другие части плотин [1–3].

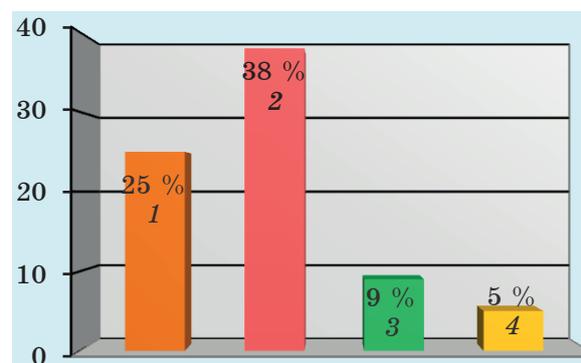


Рис. 2. Распределение аварий грунтовых плотин в зависимости от локализации повреждений в грунтовой плотине: 1 – основание; 2 – тело плотины; 3 – водосливные сооружения; 4 – другие части плотин

указанный фактор является одним из наиболее серьезно осложняющих контроль качества укладки глинистого грунта в тело плотины. Из сказанного следует, что для точного представления о составе, свойствах, пространственной изменчивости глинистых грунтов в карьерах и оценки качества уложенного грунта в насыпь, наряду с прямыми (стандартными) методами важно иметь оперативные методы определения геотехнических параметров грунта и, на этой основе, оперативные методы контроля качества укладки глинистых материалов в насыпь.

Анализ, полученный по результатам устройства земляных и каменно-земляных плотин, позволяет обобщить не только опыт оценки качества укладки глинистых грунтов, но и опыт ускоренного (оперативного) определения геотехнических параметров связанных

грунтов (пределов Аттерберга, параметров Проктора, прочностных характеристик, водопроницаемости) в зависимости от квалификационных показателей грунта, представляющих собой совокупность известных, периодически контролируемых и достаточно легко определяемых показателей физических свойств грунта, объединенных в один квалификационный модуль в определенной комбинации.

В геотехническом контроле, как и для инженерно-геологических прогнозов, особенно важным и рациональным при определении строительных параметров грунтов является принцип косвенной их оценки по основным физическим характеристикам с помощью несложных математических зависимостей, позволяющих при необходимости быстро оценивать влияние на результат изменения показателей грунтов, входящих в эти формулы.

Грунты, как известно, относятся к системам, где взаимное влияние факторов велико. Поэтому задача исследования возможности разработки тех или иных распределений для описания такого важнейшего свойства грунтов, как их изменчивость может иметь два пути:

теоретическое обоснование типа распределения с позиции физической сущности модели грунта, в описании которой используется рассматриваемый показатель;

перебор статистических моделей и оценка каждой из них с точки зрения соответствия опытным данным по рассматриваемому показателю.

Конечно, принципиально предпочтителен первый подход. Однако в связи с трудностями его реализации из-за отсутствия к настоящему времени удовлетворительного теоретического обоснования распределения показателей свойств грунтов, разработка оперативных методов определения контролируемых показателей свойств грунтов выполнялась в рамках второго подхода, где статистический аспект надежности выдвигается на передний план.

В технологических картах, устраиваемых грунтовых плотин необходимо, чтобы плотность грунта в сухом состоянии, полученная после уплотнения, была близка к плотности в сухом состоянии по Проктору. Для уточнения вышесказанного введено понятие, которое называют

либо показателем уплотнения, либо коэффициентом уплотнения или степенью уплотнения, но смысл которого – отношение плотности сухого грунта в слое после уплотнения ρ_{di} к максимальной плотности сухого грунта ρ_{dmax} при испытании по Проктору

$$k_{com} = \rho_{di} / \rho_{dmax}. \quad (1)$$

Величина коэффициента уплотнения k_{com} для каждой разновидности грунта назначается в зависимости от конструктивных особенностей и класса капитальности сооружения, местоположения и сейсмичности района, а также от результатов технико-экономического обоснования.

Для грунтовых напорных сооружений плотность грунта, укладываемого послойно с уплотнением, на основе уже известной максимальной плотности ρ_{dmax} по Проктору [1–4] должна соответствовать условию:

$$\rho_{di} \geq k_{com} \rho_{dmax}. \quad (2)$$

Быстрое, надежное и достоверное установление параметров уплотнения в технологических картах при абсолютном соблюдении условия (2) и является задачей оперативного геотехнического контроля.

Важнейшими факторами, оказывающими наибольшее влияние на оперативность геотехнического контроля качества уплотнения любых грунтовых материалов, являются определение их влажности и контроль качества грунтов или грунтовых смесей.

Требования нормативных документов по определению влажности грунтов при 105 °С в течение 6...8 часов являются в известной степени формальными, так как не учитывают типа и вида грунта, объема пробы, технических возможностей сушильных приборов. В этой связи нормативные положения с достаточной для практических целей точностью могут корректироваться в зависимости от конкретных условий [1–4]. Согласно требованию, ограничивающему содержание в грунтах солей и органических веществ, температура сушки исследуемых образцов грунта при выполненном параллельном контроле может быть повышена до 200 °С. Как показала практика, разница в результатах не превышала 2 %. При температуре сушки выше, чем в два раза от нормативной, разница в полученных результатах по некоторым образцам

превысила 2 % (при допустимой разнице 2 %). Применение повышенной температуры высушивания образцов грунта является важным элементом повышения оперативности в оценке качества укладки глинистых материалов в сооружения.

В практике проектирования и строительства напорных грунтовых сооружений помимо «чистых» глинистых грунтов, не содержащих крупных включений, все чаще для устройства противофильтрационных элементов плотин используются грунтовые смеси, состоящие из обломков скальных и полускальных пород (от 5 до 100 мм и более) с глинистым заполнителем в количестве более 40 % и переполняющим поры, образованные крупными включениями. Иначе говоря, эти включения как бы «плавают» в мелкозем. Оперативность работ по геотехническому контролю качества укладки таких грунтовых смесей осложняется необходимостью отбора больших проб материала (несколько десятков килограммов). Поскольку свойства грунтовой смеси (водопроницаемость, прочность, плотность и др.) в целом определяется свойствами мелкозернистой части скелетного грунта (содержанием частиц диаметром менее 2 или 5 мм), метод контроля качества грунтовых смесей по плотности мелкозема по мнению авторов данной статьи представляется перспективным [1–3].

Среди известных методов контроля качества уплотнения грунтовых материалов метод А. Н. Скибина [4] по ускоренному контролю качества укладки глинистых грунтов можно считать наиболее интересным. Этот метод основан на уже известном максимальном и минимальном значении параметра Проктора по карьере, полученных еще на стадии изысканий. Если допустить, что изыскания установили полную природную изменчивость свойств грунтов в месторождении, что не всегда удается даже при наивысшей категории разведанности карьерных участков, то невозможно учесть реальную вариацию перемешивания грунта при его разработке в карьере, складировании в резервах, откуда грунт попадает в технологические карты, где при отсыпке и разравнивании в слой также происходит его перемешивание.

Отсюда следует, что параметры Проктора по данным изысканий и реальной работы карьера в ходе строительства плотины имеют отличие. В результате максимальное и минимальное значения ρ_{dmax} по карьере становятся «плавающими» показателями. А поскольку реальная вариация граничных значений параметра Проктора для мелкозема уже не является абсолютной, то это создает серьезную проблему в отношении достоверности результатов геотехнического контроля, тем более ускоренного.

Предлагаемый метод оперативного контроля качества укладки глинистых грунтов в противофильтрационные элементы плотин также основан на оценке плотности мелкозема, где мелкоземом принимается грунт с содержанием частиц менее 5 мм. Суть процесса ведения контроля заключается в следующем.

1. Из уплотненного слоя отбирается монолит массой до 1 кг и по общеизвестной методике определяется его плотность ρ . Затем монолит разрушается, высушивается при повышенной температуре и определяется влажность W грунта в монолите. Высушенный и размельченный грунт просеивается через сито с диаметром отверстий 5 мм и устанавливается содержание $m_{<5}$ частиц менее 5 мм. Влажность $W_{>5}$ включений крупнее 5 мм устанавливается заранее путем несложных выборочных определений на стадии изысканий, конечно, с обязательным периодическим контролем и уточнением в ходе строительства. Влажность мелкозема $W_{<5}$ определяется из выражения

$$W_{<5} = [W - W_{>5}(1 - m_{<5})]/m_{<5}. \quad (3)$$

Установление влажности мелкозема $W_{<5}$ необходимо для контроля проектного требования к влажности укладываемого грунта:

$$AW_{opt} \leq W \leq BW_{opt}, \quad (4)$$

где W_{opt} – оптимальная влажность по Проктору; A и B – соответственно, нижний и верхний допустимые пределы отклонения влажности укладываемого грунта при проектном коэффициенте уплотнения k_{com} .

Плотность скелета монолита и мелкозернистой части грунта, согласно [

$$\rho_d = \rho / (1 + W); \quad (5)$$

$\rho_{d<5} = (\rho_d \rho_{d>5} m_{<5}) / [\rho_{d>5} - \rho_d(1 - m_{<5})]$, (6)
где ρ – плотность монолита в целом; ρ_d – плотность скелета монолита в целом; W – влажность монолита; $\rho_{d>5}$ – плотность скелета фракций крупнее 5 мм;

$m_{<5}$ – содержание мелкозема в монолите; $\rho_{d<5}$ – плотность скелета мелкозема.

2. Определение качества уплотнения грунта в слое. Для этого из грунта разрушенного монолита отбирается проба для установления верхнего предела пластичности W_L с использованием повышенной температуры высушивания. Затем рассчитываются параметры Проктора, соответственно, ρ_{dmax} и W_{opt} по формулам (7) и (8):

$$\rho_{dmax} = 1,44 + 0,88 \ln[\rho_s / (1 + e_L)], \quad (7)$$

где $\rho_s / (1 + e_L)$ – плотность скелета грунта при влажности W_L ; $e_L = (\rho W_L) / \rho_w = \rho_s W_L$ – коэффициент пористости грунта, соответствующий влажности на границе текучести; ρ_w – плотность воды; W_L – влажность на границе текучести;

$$W_{opt} = 11,83 \ln(e_{opt} W_L) + 37,07, \quad \%, \quad (8)$$

где $e_{opt} W_L$ – квалификационный показатель грунта, представляющий собой комбинацию из физических характеристик: $e_{opt} = (\rho_s - \rho_{dmax}) / \rho_{dmax}$ – коэффициент пористости максимально уплотненного грунта; ρ_s – плотность частиц грунта; ρ_{dmax} – максимальная плотность сухого грунта; W_L – влажность на границе текучести.

Используя выражение (1), устанавливается достигнутый в слое коэффициент уплотнения $k_{com i}$ грунта и сравнивается с проектным требованием, т. е.

$$k_{com i} = (\rho_{d<5i} / \rho_{dmax i}) \geq [k_{com}]_{\text{проект}}. \quad (9)$$

Таким образом, коэффициент уплотнения устанавливается для каждого образца (пробы) с учетом его индивидуальных особенностей по гранулометрическому составу, глинистости, а не по отношению к средним показателям по карьере. При невыполнении условия (9) назначаются необходимые мероприятия обеспечивающие проектные требования по уплотнению грунта. На практике, при точном соблюдении технологических параметров укладки грунта в насыпь и проектных требований, исследуемые образцы будут иметь значения $\rho_{d<5i}$, удовлетворяющие условию (9).

3. По установленным значениям $\rho_{d<5}$; $m_{<5}$; W_L для каждой пробы и в среднем по слою вычисляются показатели прочности $tg\phi$ и C по формулам (10) и (11):

$$tg\phi = 0,231 - 0,33 \ln(e/e_L); \quad (10)$$

$$C = 21,63 - 40,39 \ln(e/e_L), \quad \text{кПа}, \quad (11)$$

где e/e_L – многофакторный квалификационный показатель состояния глинистого грунта, объективно отражающий физическую сущность его прочности после уплотнения в технологическом слое: e – коэффициент пористости уплотненного в насыпи грунта; $e_L = (\rho_s W_L) / \rho_w = \rho_s W_L$ – коэффициент пористости грунта, соответствующий влажности на границе текучести.

Коэффициент фильтрации k_f по формуле:

$$k_f = 0,574 [e / (m_{<5} W_L)]^{3,22} 10^{-7}, \quad \text{см/с}, \quad (12)$$

где $e / (m_{<5} W_L)$ – многофакторный квалификационный показатель состояния глинистого грунта, объективно отражающий физическую сущность его водопроницаемости после уплотнения в технологическом слое; e – коэффициент пористости уплотненного в насыпи грунта $e = \rho_s / \rho_d - 1$; $m_{<5}$ – содержание в пробе грунта частиц размером менее 5мм, отн.ед.; W_L – верхний предел пластичности, отн. ед.

Таким образом создается полное представление о качестве грунта, поступающего в технологические карты и его уплотнении в слое. При этом не исключаются нормативные и проектные требования к определению показателей прочности и водопроницаемости прямыми (экспериментальными) методами в зависимости от объемов укладываемого грунта.

Для повышения надежности и оперативности метода полезно составление вспомогательных номограмм из графиков вида $\rho_d = f(\rho)$; $\rho_{d<5} = f(\rho_d)$ и $k_{com} = f(\rho_{dmax})$, позволяющих проводить самоконтроль при определении плотности уложенного в насыпь грунта. На рисунке 3 представлена номограмма для различной влажности грунта W и содержания в нем мелкозема $m_{<5}$, составленная по формулам (5) и (6). Природная изменчивость свойств грунта в карьере при оценке качества его уплотнения в технологической карте учитывается другой номограммой (рис. 4), составленной по реальной вариации верхнего предела пластичности W_L глинистого материала в карьере с нанесенным проектным требованием к уплотнению грунта k_{com} . Значение коэффициента уплотнения для каждого сооружения будет свое в зависимости от конструктивных особенностей и класса капитальности, местоположения и сейсмичности района, а также от результатов технико-экономического обоснования. Контроль качества укладки грунта с использованием номограмм (рис. 3 и 4) выполняется в той же последовательности, как и при вышеописанном расчетном варианте в соответствии с определяемыми показателями: плотности образца-монолита ρ ; влажности образца-монолита W ; содержания мелкозема в образце $m_{<5}$ и уточненного для образца грунта верхнего предела пластичности W_L .

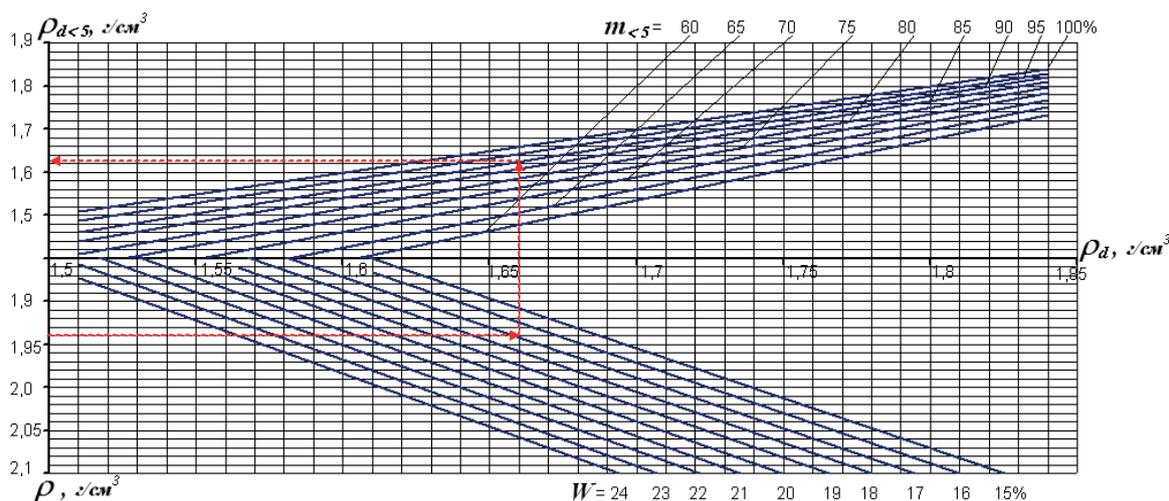


Рис. 3. Номограмма для определения плотности мелкозема в образце грунта

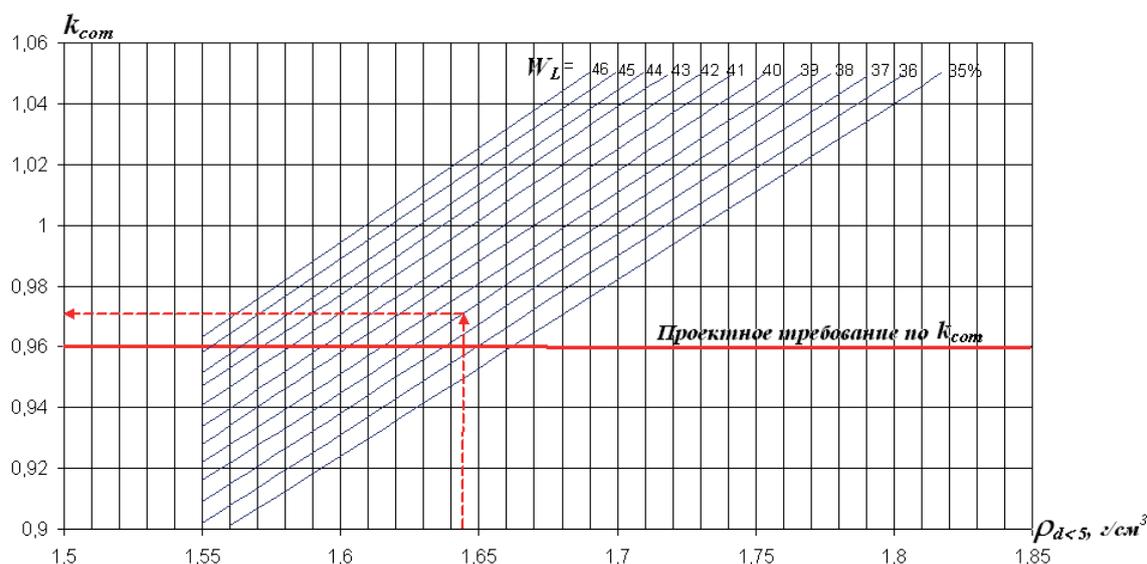


Рис. 4. Номограмма для определения коэффициента уплотнения образцов глинистого грунта

Вывод

Представленный метод контроля содержания мелкозема в образцах-монолитах, отбираемых из технологических карт, отличается простой технологией, возможностью использования его как для «чистых» глинистых грунтов, так и для грунтовых смесей. Метод не требует специального оборудования, большого ручного труда и обеспечивает высокую точность оценки.

1. **Жарницкий В. Я.** Обеспечение качества и надежности каменно-земляных плотин при строительстве. – Иваново.: Изд-во ИГЭУ им. В. И. Ленина, 2005. – 156 с.

2. **Жарницкий В. Я.** Оперативный геотехнический контроль в обеспечении качества устройства каменно-земляных плотин и прогноз их деформаций по результатам строительства. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2013. – 172 с.

3. **Жарницкий В. Я., Андреев Е. В.** Оценка эксплуатационной надежности и мониторинг технического состояния низконапорных грунтовых плотин. – М.: ФГБОУ ВПО МГУП, 2014. – 146 с.

4. **Скибин А. Н.** Ускоренный контроль качества укладки глинистых грунтов в тело земляных напорных сооружений // Гидротехническое строительство. – 1991. – № 3. – С. 27–31.

Материал поступил в редакцию 02.09.2015.

Жарницкий Валерий Яковлевич, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости»

Тел. +7 (905) 720 30 72

Силкин Александр Михайлович, доктор технических наук, профессор кафедры «Основания и фундаменты, строительство и экспертиза объектов недвижимости»

Тел. +7 (916) 510 43 64