



ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ
НАУЧНО –
ТЕХНИЧЕСКИЙ
ЖУРНАЛ

ISSN 0016-9714

ГИДРО- ТЕХНИЧЕСКОЕ СТРОИТЕЛЬСТВО

9 2018
ЭНЕРГОПРОГРЕСС



О применении пролювиальных отложений для строительства плотин из грунтовых материалов

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

Природные особенности формирования пролювиальных отложений обуславливают необходимость регулирования их гранулометрического состава и влажности перед укладкой в тело плотин. Из пролювиальных отложений можно создавать грунтовой материал для различных зон тела плотин, в том числе щебенисто-глинистый грунт для противодиффузионных устройств, характеризующийся, при качественном уплотнении, высокой фильтрационно-суффозионной и механической прочностью, а также малой сжимаемостью. Контроль качества уплотнения такого грунта целесообразно выполнять по мелкозёму.

Ключевые слова: пролювиальные отложения, плотина, регулирование гранулометрического состава грунта, мелкозём, плотность, влажность мелкозёма, уплотнение грунта, фильтрационно-суффозионная прочность грунта.

About application of proluvial deposits for earth dams construction

Bortkevich S. V., Candidate of Engineering Sciences, Chief Engineer, Deputy Director General for Scientific-Research Work (Joint Stock Company “Project Survey and Scientific Research Bureau “GITEST”)

The natural features of proluvial deposits formation cause the need to control their granulometric composition and water content before laying into the dam body. It is possible to create soil material from proluvial deposits for various zones of dams body, including rubble-clayey soil for antifiltration devices, which, at quality compaction, are characterized by high filtration-suffusion and mechanical strength, as well as low compressibility. It is advisable to carry out quality control of compaction of such soil according to the density of the fine-grained deposit.

Keywords: proluvial deposits, dam, control of granulometric composition of soil, fine-grained deposit, density, water content of fine-grained deposit, compaction of soil, filtration-suffusion strength of soil.

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.

Пролувиальные 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 чаще стоит задача возведения тела плотин или их противодиффузионных 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;

¹ info@gitest.ru

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 противодиффузионного устройства плотины, то в первую очередь изучается её диффузионно-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, ВНИИ-

Гом им. Б. Е. Веденеева также был рекомендован состав смеси суглинка с дресвяно-щебенистым материалом, характеризующийся 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 диффузионно-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 – 35 % (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 несущими [6].

В общем все вышеуказанные рекомендации по гранулометрическому составу щебенисто-глинистых грунтов, обладающих диффузионно-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 противодиффузионных устройств.

Щебенисто-глинистые грунты для противодиффузионных устройств плотин обычно изготавливают из карьерных грунтов на механических установ-

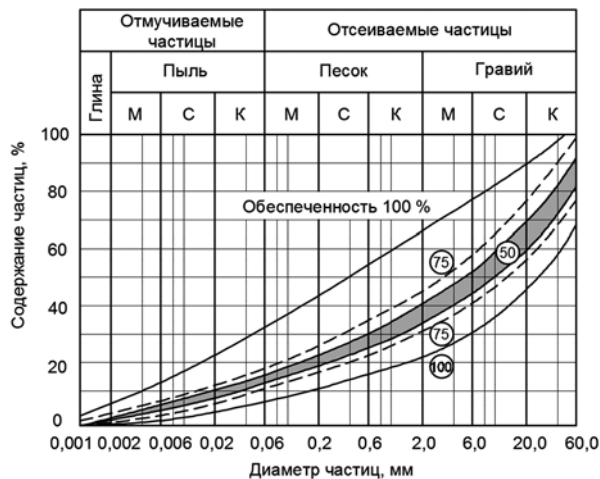


Рис. 1. Кумулятивные кривые гранулометрического состава глинобетона (по Х. Брету) с указанием их обеспеченности: 50, 75 и 100 %

ках, 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 поярусную 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 рассо-

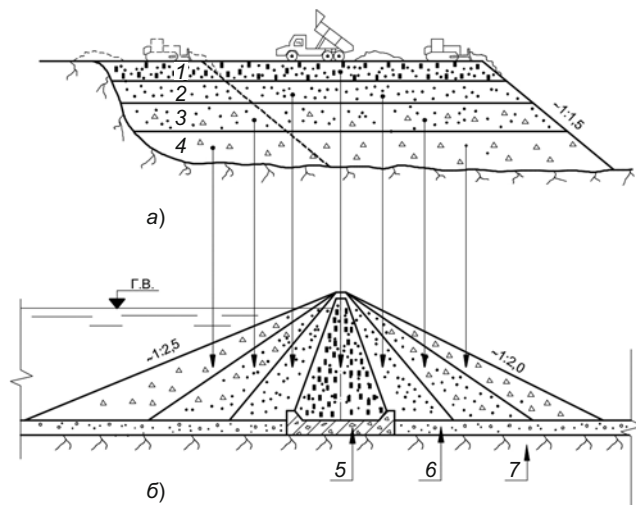


Рис. 2. Схема возведения плотины из неоднородных грунтовых материалов:

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

гласовании 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.

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 противодиффузионного 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 расчленить по структуре залежи, гранулометрическому составу грунтов, их влажности, крупности каменистых включений и пр., а также для возведения плотин из грунтов полезных выемок.

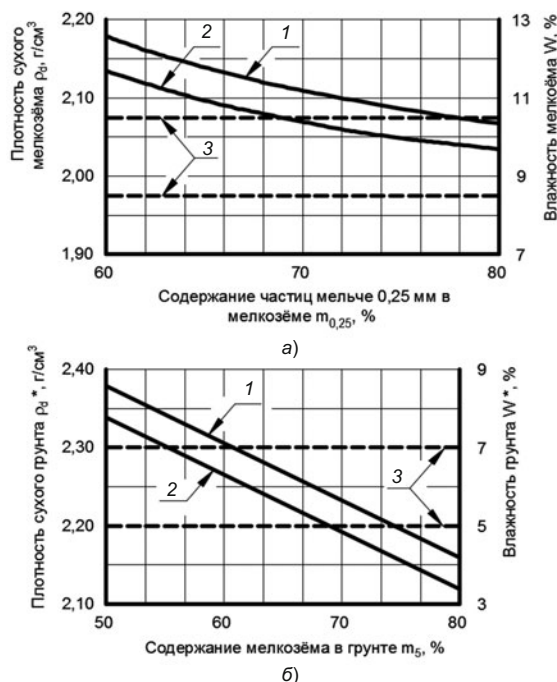


Рис. 3. Контрольные значения плотности и влажности щебенисто-глинистого грунта при возведении ядра плотины Нурекской ГЭС:

a — для мелкозёма, *б* — для грунта в целом; 1 и 2 — максимальная и минимально допустимая плотность; 3 — требуемая влажность (граничные значения)

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, но и его влажности, а также 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, характеризующего 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

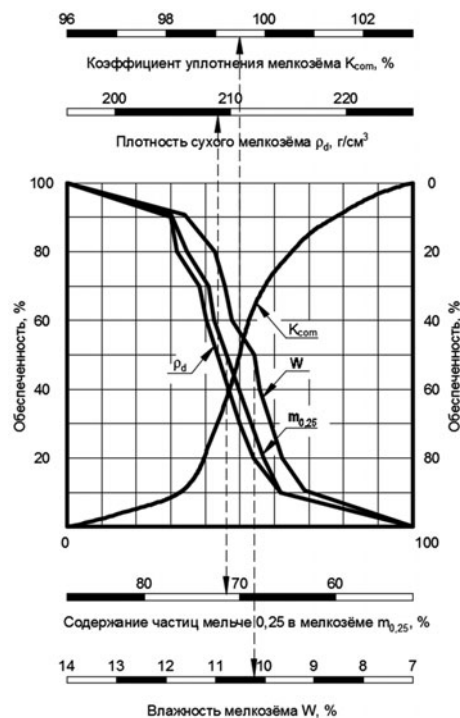


Рис. 4. Форма обобщения результатов контроля качества укладки щебенисто-глинистого грунта по мелкозёму (частицы мельче 5 мм) при строительстве плотины Нурекской ГЭС

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 [9, 12]. В таблице приведены рекомендуемые средства уплотнения щебенисто-глинистых грунтов при возведении плотин.

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 песчаных супесей. В этом случае, для исключения возможности перехода супесчаной части глинистого мелкозёма в текучее состояние при обводнении тела плотины, контрольные значения плотности мелкозёма назначают

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
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
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

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.

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 Unetrnsuchungen fur das Pumpspeicherwerk Happing // 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 / Гидропроект. 1991 (актуализация текста 01.12.2013).
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. Н., Борткевич В. С. О способах снижения порового давления в глинистых ядрах каменно-земляных плотин // Природообустройство. 2016. № 2016. № 3. С. 8 – 16.
12. Сметанин В. И., Аверьянов В. Н. Совершенствование технологии уплотнения глинистых грунтов при возведении гидротехнических сооружений // Природообустройство. 2016. № 2. С. 28 – 37.