

## References

1. Opredeleniye osnovnykh raschetnykh hydrologicheskikh harakteristik. SP 33-101-2003. – M.: FGUP TSPP, 2004. – 74с.
2. Proshlyakov I.V. Imitatsionnaya model vodootdachi sklonov dlya rascheta poverhstnogo dozhdovogo stoka I vodnoj erozii // Eroziya pochv, selevyje potoki i metody borjby s nimi: sb. Nauch. Trudov. Tbilisi, GruzNIIGiM. – Tbilisi: GruzNIIGiM, 1985. – S. 134–146.
3. Befani A.N. Teoriya formirovaniya dozhdovykh pavodkov I metody ih rascheta / v kn.: Mezhdunarodny symposium po pavodkam I ih raschetam, t. I. – M.: Izd-vo literatury po stroitelstvu, 1969. – S. 273–294.
4. Vinogradov Yu. B. Voprosy gidrologii dozdevyh pavodkov na malyh vodosborah Srednej Azii I Yuzhnogo Kazahstana // Trudy KazNIGMI, vyp. 28. – L.: Hydrometeoizdat, 1967. – 262s.
5. Befani A.N. Osnovy teorii livneвого stoka / Trudy Odesskogo hydromet. Institute. Vyp. 4, ch.1. – Odessa: OGMI, 1949. – S. 39–175.

Received on 12.01.2016.

## Information about the authors

**Proshlyakov Igor Valentinovich**, candidate of technical sciences, professor of the chair «Hydrology, hydrogeology and runoff regulation» FSBEI HE RSAU-MAA named after C. A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova.19; tel. 8(499) 976-17-45; e-mail:iprosh@mail.ru

**Ismailylov Gabil Khudushogly**, doctor of technical sciences, professor, head of the chair «Hydrology, hydrogeology and runoff regulation» FSBEI HE RSAU-MAA named after C. A. Timiryazev; 127550, Moscow, ul. Pryanishnikova.19; tel. 8(499) 976-23-68; e-mail:gabil-1937@mail.ru

УДК 502/504:624.131:627.8

**В. И. СМЕТАНИН, В. Н. АВЕРЬЯНОВ**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ УПЛОТНЕНИЯ ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ ПРИ ВОЗВЕДЕНИИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

*С целью повышения надежности грунтовых гидротехнических сооружений выполнены исследования влияния уплотнения на формирование структуры глинистого грунта. В лабораторных и производственных условиях изучена возможность уплотнения глинистых грунтов природной влажности до состояния, характеризуемого коэффициентом водонасыщения  $S_r \geq 0,9$ , при котором формируется устойчивая дисперсионная структура, стабильные физико-механические свойства и наименьшая водопроницаемость глинистого грунта. Ориентация на оптимальную влажность, стандартную максимальную плотность и пределы отклонения от этих величин согласно действующих в России нормативных документов не всегда позволяет достигнуть такого же состояния грунта. На основе изучения процесса изменения структуры глинистых грунтов при уплотнении сформулированы новые технологические параметры: консистенция и коэффициент водонасыщения. По консистенции грунта природной влажности выбираются грунтоуплотняющие механизмы, а по значению коэффициента водонасыщения  $S_r \geq 0,9$  определяются значения плотности  $\rho_d$  в зависимости от природной влажности уплотняемого грунта. Уплотнение глинистых грунтов природной влажности при возведении гидротехнических сооружений позволяет избежать необходимости выполнения трудоемких 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.*

*Гидротехническое сооружение, противофильтрационное устройство, глинистый грунт, технология уплотнения, плотность сухого грунта, влажность грунта, структура глинистого грунта, технологические параметры уплотнения, грунтоуплотняющие механизмы, консистенция, коэффициент водонасыщения, водопроницаемость, коэффициент фильтрации, физико-механические характеристики грунта.*

**Введение.** Строительство и реконструкция грунтовых гидротехнических сооружений сопряжены спослойной 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  $W_{opt}$ , при которой достигается максимальная стандартная плотность сухого грунта  $\rho_{dmax}$ .

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 влагоемкости 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/см<sup>3</sup> (в методе Американской ассоциации государственных служащих автомобильных дорог – AASHTO) до  $27,0 \cdot 10^{-1}$  Дж/см<sup>3</sup> (в модифицированном методе AASHTO). Также производят лабораторное уплотнение грунта циклическими статическими нагрузками, моделирующими воздействие уплотняющих механизмов на грунт (методы, разработанные во ВНИИГ имени Б. Е. Веденева). 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  $\rho_d$  от его влажности  $W$ , на которых выделены значения максимальной плотности сухого грунта  $\rho_{dmax}$  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, показано 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].

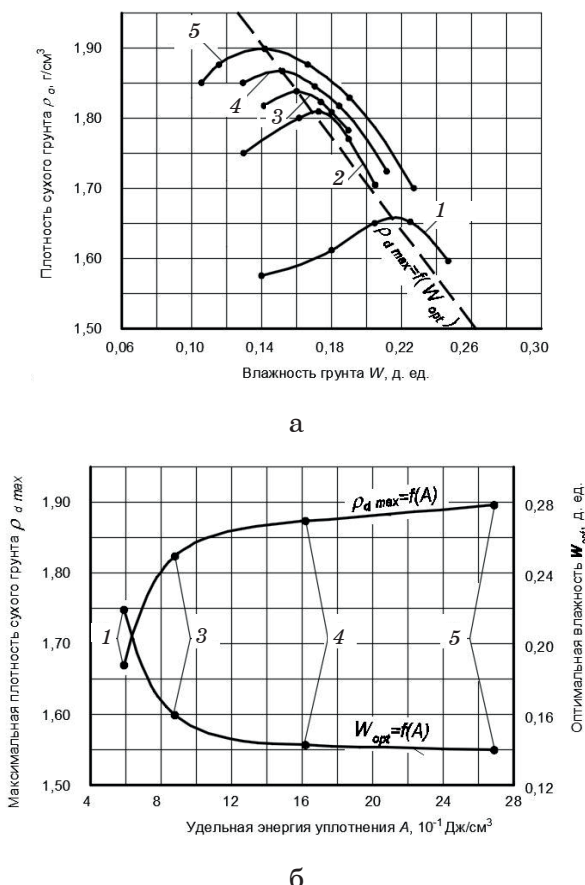


Рис. 1. Сравнение результатов лабораторного уплотнения песчанистого суглинка методами, использующими ударное воздействие на грунт: а – зависимости плотности сухого грунта  $\rho_d$  от влажности  $W$ ; б – зависимость максимальной плотности сухого грунта  $\rho_{d \max}$  и оптимальной влажности  $W_{opt}$  от удельной энергии уплотнения  $A$ ; 1 – стандартный метод AASHTO ( $A = 5,9 \cdot 10^{-1}$  Дж/см<sup>3</sup>); 2 – метод Проктора (ручное трамбование грунта,  $A$  – не определяется); 3 – ГОСТ 22733-2002 ( $A = 8,8 \cdot 10^{-1}$  Дж/см<sup>3</sup>); 4 – калифорнийский метод ( $A = 16,2 \cdot 10^{-1}$  Дж/см<sup>3</sup>); 5 – модифицированный метод AASHTO ( $A = 27,0 \cdot 10^{-1}$  Дж/см<sup>3</sup>)

Кривые зависимости  $\rho_d$  от  $W$ , полученные на основании лабораторных испытаний грунта, в большинстве случаев, не соответствуют полученным при обработке резуль-

татов производственного уплотнения. Поэтому при строительстве гидротехнических сооружений, например плотин, перед началом возведения противофильтрационных 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 расчетными показателями деформативности, прочности, пучинистости, поэтому невозможно представить, на сколько снижается надежность конструкции вследствие некоторого недоуплотнения грунта; даже при достижении требуемой плотности глинистый грунт может иметь консистенцию от твердой до текучепластичной, соответственно в широком интервале изменяется и его прочность [4].

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. Еще 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 ученые: 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, а 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 распределенного по карте отсыпки равномерным слоем, в нем формируется структура, отличная от природной. Разрушаются агрегаты, уменьшается межагрегатная пористость

и создается 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 остается 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 слоев, что доказано большим объемом полевых исследований Е. Лефлайва и М. Шаефмера [7].

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

$$\rho_d \geq \frac{S_r \rho_s \rho_w}{S_r \rho_w + W \rho_s},$$

где  $S_r = 0,9$  (значение коэффициента водонасыщения, при котором в процессе уплотнения формируется устойчивая диспергационная структура грунта);  $\rho_s$  – плотность частиц грунта, зависящая от минералогического состава, может изменяться в пределах 2,70...2,75 г/см<sup>3</sup> и для большинства глинистых грунтов составляет 2,72 г/см<sup>3</sup>;  $\rho_w$  – плотность воды, 1 г/см<sup>3</sup>;  $W$  – 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 обобщенным 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.

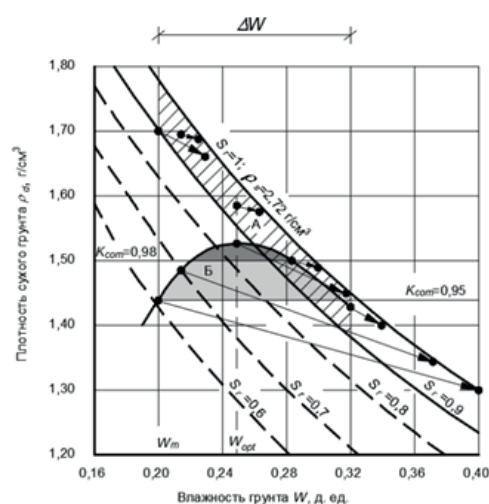
Если грунт в естественной залежи имеет твердую ( $I_L < 0$ ) или полутвердую ( $0 \leq I_L \leq 0,25$ ) консистенцию, то для его уплотнения в сооружении требуются механизмы с наибольшей энергией воздействия на уплотняемый грунт, такие как самоходные виброкатки с кулачковым вальцом типа «педфут», трамбующие плиты или тяжелые 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 пневмокотки со средним удельным давлением, а для грунта мягкопластичной консистенции ( $0,50 \leq I_L \leq 0,75$ ) – легкие катки или бульдозеры, оказывающие наименьшее энергетическое воздействие на уплотняемый грунт. Грунты текучей ( $I_L > 1,00$ ) и текучепластичной ( $0,75 < I_L \leq 1,00$ ) консистенции, а также пересохшие грунты с влажностью, меньшей максимальной молекулярной влагоемкости, 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 грун-

тоуплотняющий 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 рисунке 2 показана область требуемых значений плотности и влажности для глины твердой и полутвердой 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 В	Твердая	Полутвердая	Тугопластичная
Показатель текучести $I_L$ , д. ед.	0	0,25	0,50
Угол внутреннего трения $\phi$ , 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 диспергационной структуры в уплотняемой глине твердой и полутвердой консистенции (А), в сравнении с требованиями к уплотнению грунтов по СП 45.13330.2012 (Б):  $\Delta W$  – диапазон изменения природной влажности глины;  $W_{opt}$  – оптимальная влажность по ГОСТ 22733-2002;  $W_m$  – максимальная молекулярная влагоемкость;  $S_r$  – коэффициент водонасыщения;  $K_{com}$  – коэффициент уплотнения;  $\rho_s$  – плотность частиц грунта; стрелки показывают изменение плотности и влажности уплотненной глины при замачивании и водонасыщении

Из рисунка видно, что грунт, уплотненный в соответствии с новыми технологическими требованиями (А) при полном водонасыщении не изменяет свою консистенцию и, соответственно, механические характеристики. Грунт, уплотненный в соответствии с требованиями ныне действующих нормативных документов (Б), в аналогичных условиях может в значительной мере изменять свою консистенцию с твердой 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 слоев грунта, обеспечивающих соблюдение вышеуказанных технологических параметров уплотнения, должен производиться на основе опытной укатки грунта.

Наиболее высокие требования к качеству исполнения предъявляются к противодиффузионным устройствам, выполняемым в виде экранов. 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 водоема 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 тяжелых неогеновых глин, из легких 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 м<sup>3</sup>, с погрузкой в автосамосвалы МАЗ-5549, МАЗ-551 и транспортировали в опытные насыпи, где укладывали при природной влажности, соответствующей твердой и полутвер-

дой консистенции, слоями 0,25х0,30 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 – груженным автосамосвалом БелАЗ-540, а в насыпях суглинков – скрепером Д-357. Перед укладкой каждого последующего слоя поверхность предыдущего увлажняли по норме 5х7 л/м<sup>2</sup> для получения качественного контакта слоев. Опытные насыпи глин состояли из двух слоев грунта, а насыпи суглинков – из четырех.

После окончания возведения насыпей на их поверхности закладывали 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, совмещенные с кривыми стандартного уплотнения в лабораторных условиях по ГОСТ 22733-2002 и по модифицированному методу ААШО. Как видно из графика на рисунке 3, опытные точки, полученные при уплотнении глинистых грунтов природной влажности твердой и полутвердой консистенции, легли в зоне изменения коэффициентов водонасыщения  $S_r = 0,9...1,0$ , соответствующей правым ветвям кривых стандартного уплотнения грунта в лаборатории как по ГОСТ 22733-2002, так и по модифицированному методу ААШО. Подобную картину подтверждают результаты полевых исследований уплотнения легких

и тяжелых глин твердой и полутвердой консистенции, выполненные по нашим методическим руководством лабораторией крупномасштабных гидравлических и геотехнических исследований Министерства Топлива и Энергетики Украины на строительстве Днестровской ГАЭС. Полученные значения плотности  $\rho_d$ , при соответствующих им влажностях  $W$  грунта, также попали в область, ограниченную технологическими параметрами от  $S_r = 0,9 \dots 1,0$ .

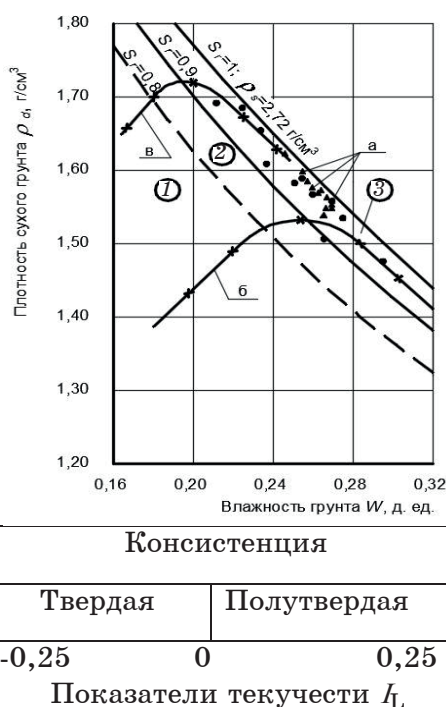


Рис. 3. Результаты уплотнения глины груженым автосамосвалом БелАЗ-540 за 8 проходов по следу на слое 0,3 м (а), совмещенные с кривыми стандартного уплотнения в лабораторных условиях по ГОСТ 22733-2002 (б) и по модифицированному методу ААSНO (в): 1, 2, 3 – соответственно, области флокуляционной (коэффициент водонасыщения равен  $S_r < 0,8$ , переходной –  $S_r = 0,8 \dots 0,9$  и диспергационной –  $S_r > 0,9$  структуры грунта; ● – пробы из верхнего слоя опытной насыпи; ▲ – пробы из нижнего слоя опытной насыпи; × – стандартное уплотнение в лаборатории

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 слоев грунта толщиной по 0,25x0,30 м, а также кулачковым виброкатком HAMM массой 24 т слоев грунта толщиной по 0,30x0,35 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 твердой и полутвердой консистенции кулачковым виброкатком ATLAS массой 16 т приведены на рис.4.

Из 18 проб, отобранных в насыпи, только 1 проба имела коэффициент водонасыщения ниже 0,9, то есть обеспеченность значений  $S_r \geq 0,9$  составила 95 %. Плотность сухого грунта  $\rho_d$  при той же обеспеченности составила 1,56 г/см<sup>3</sup>. При 50 % обеспеченности  $S_r = 0,97$ , а плотность  $\rho_d = 1,61$  г/см<sup>3</sup>. Максимальное значение плотности сухого грунта  $\rho_d = 1,69$  г/см<sup>3</sup> при  $S_r = 1$ .

Исследования водопроницаемости уплотненных 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 замен пленочного 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.

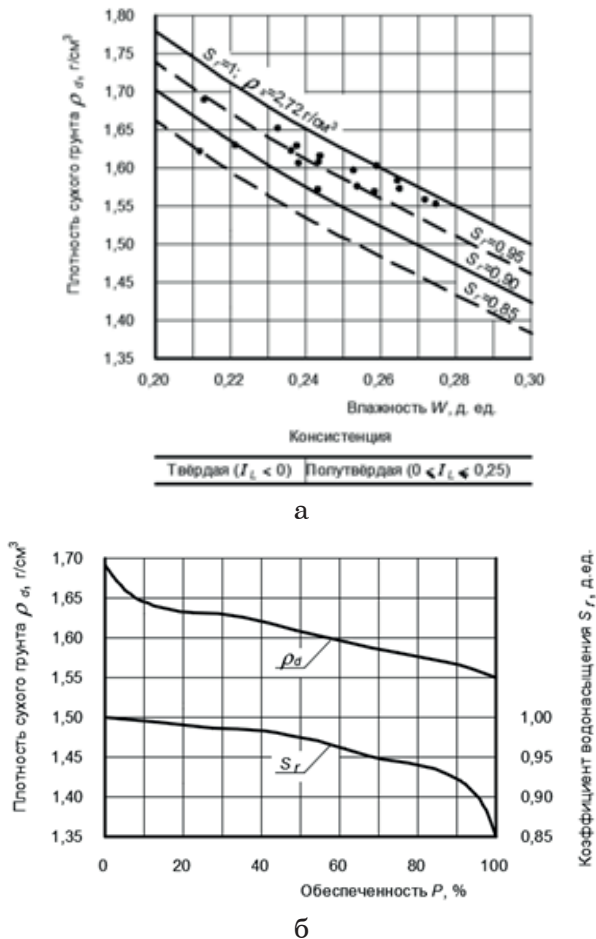


Рис. 4. Результаты уплотнения глины кулачковым виброкатком ATLAS массой 16 т за 10 проходов по следу на слое толщиной 0,3 м: а – зависимость плотности сухого грунта  $\rho_d$  от влажности  $W$ ; б – графики обеспеченности плотности сухого грунта  $\rho_d$  и коэффициента водонасыщения  $S_r$

**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 диспергационную.

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 приведенную выше зависимость с учетом природной влажности уплотняемого грунта, определяют минимально допустимую плотность  $\rho_d$ , при достижении которой достигается переход флокуляционной структуры глинистых грунтов в диспергационную.

Уплотнение глинистых грунтов природной влажности при возведении грунтовых сооружений позволяет избежать необходимости выполнения трудоемких 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 противофильтрационных элементов плотин // Гидротехническое строительство. – 2005. – № 3. – С. 15–18.
2. **Striegler W.** Boden mechanische Grenzwerte zur Verdichtung natürlicher Erddichtungsstoffe im Wasserbau // WWT • 18. Jahrgang 1968. Heft 2, 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 СОУЗДОРНИИ. Уплотнение земляного полотна и конструктивных слоев дорожных одежд. – М.: СОУЗДОРНИИ, 1980. – С. 9–15.
5. Практика проектирования и строительства арочных, земляных, каменнонабросных 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 уплотненной глины // Перевод № 2076. НИС Гидропроекта. – М.: Гидропроект, 1962. – 35 с.
7. **Лефлайв Е. Шаефнер М.** Значение толщины слоев для уплотнения насыпи.



Перевод с французского // Информационное издание ВИНТИ «Геология». Выпуск 7. Реферат Е455. – М.: ВИНТИ, 1981. – 8 с.

Материал поступил в редакцию 03.02.2016.

#### Сведения об авторах

**Сметанин Владимир Иванович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Организация и технология строительства объектов природообустройства»; ФГБОУ

ВО РГАУ-МСХА имени К.А. Тимирязева; 127550, г. Москва, ул. Большая Академическая, д.44; тел.: 8-499-976-07-13; e-mail: smetanin2000@yandex.ru.

**Аверьянов Виталий Николаевич**, соискатель ученой степени кандидата наук, генеральный директор АО «Проектно-изыскательское научно-исследовательское бюро «ГИТЕСТ»; 125212, г. Москва, Ленинградское шоссе, д.43А.; тел.: 8 (926) 280-01-20, e-mail: 2800120@mail.ru.

**V. I. SMETANIN, V. N. AVERYANOVV**

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«Russian Timiryazev State Agrarian University», Moscow

## IMPROVEMENT OF THE TECHNOLOGY OF CLAY SOILS COMPACTION AT ERECTION OF HYDRAULIC STRUCTURES

*With the aim of improving the reliability of soil hydraulic structures investigations of the compaction influence on the formation of clay soil structure were performed. Under the laboratory and industrial conditions the possibility of clay soils compaction of the natural moisture up to the condition characterized by a degree of water saturation  $S_r \geq 0.9$  under which stable disperse structure, stable physical-mechanical characteristics and the lowest clay soils permeability are formed was studied. The orientation to the optimal moisture, standard maximum density and these values tolerances according to the current Russian normative documents does not always allow achieve the same soil condition. Based on the investigation of the process of changes of the clay soils structure under compaction there are formulated new technological parameters: consistency and water saturation coefficient. Depending on the consistency of the natural soil moisture soil compaction mechanisms are chosen, and according to the value of water saturation coefficient  $S_r \geq 0.9$  there are determined density values  $\rho_d$  depending on the natural moisture of the compacted soil. The compaction of clay soils of the natural moisture content at erecting hydraulic structures allows avoid the necessity of labor-intensive works on bringing the soils to the optimum moisture which reduces the construction time and construction cost. The proposed technology of organization of clay soils compaction improved by new technological parameters can be used at erection of soil structures in road construction and in other sectors of the economy.*

*Hydraulic structure, impervious device, clay soil, compaction technology, dry soil density, moisture content, clay soil structure, technological parameters of compaction, soil compaction mechanisms, consistency, water saturation coefficient, water permeability, permeability coefficient, physical-mechanical soil characteristics.*

#### References

1. Zharnitsky V. Ya. Operativnoye opredeleniye parametrov Proktora glinistykh gruntov, ispolzuemykh dlya ustroystva protivofiljtratsionnykh elementov plotin // gidrotekhnicheskoye stroiteljstvo. – 2005. – № 3. – S. 15–18.
2. Striegler W. Boden mechanische Grenzwertezur Verdichtung natuerlicher Erddichtung sstaffeim Wasserbau // WWT • 18. Jahrgang 1968. Heft2, p. 52–55.
3. Smetanin V. I., Zemskov V. N. Rekuljativatsiya zemel s ispoljzovaniyem osadkov

stochnyh vod // Prirodoobustrojstvo. – 2013. – № 2. – S. 15–20.

4. Evgenjev I. E. O differentsirovanii trebovanij k plotnosti gruntov zemlyanogo polotna / Trudy SOYUZDORNII. Uplotneniye zemlyanogo polotna I konstruktivnyh sloev dorozhnyh odezhd. – M.: SOYUZDORNII, 1980. – S. 9–15.

5. Praktika proektirovaniya i stroiteljstva arochnykh, zemlyanyh, kamenno-nabrosnyh I betonnyh gravitatsionnyh plotin v USA. Plotiny iz mestnyh materialov // Perevod 626.3/II-69. Institut «Gydroproject». – M.: Gydroproject, 1985. – S. 46–48.

6. Lamb T. V. Struktura uplotnennoj gliny // Perevod № 2076. NIS Gydroprojecta. – M.: Gydroproject, 1962. – 35 s.

7. Leflaiv E., Shaefner M. Znachenije tolshchiny sloev dlya uplotneniya nasypi. Perevodsfantsuzskogo// Informatsionnoye izdaniye VINITI «Geologiya». Vypusk 7. Referat E455. – M.: VINITI, 1981. – 8 s.

Received on 03.02.2016.

#### Information about the authors

Smetanin Vladimiri Ivanovich, doctor of technical sciences, professor of the

chair «Organization and technology of construction of objects of environmental engineering»; FSBEI HE RGAY-MTAA; 127550, Moscow, ul. Boljshaya Akademicheskaya, 44, tel.: 8-499-976-07-13; e-mail: smetanin2000@yandex.ru.

Averyanov Vitaliy Nikolaevich, candidate for a candidate degree, General director of AO «Design-survey research bureau «GITEST»; 125512, Moscow, Leningradskoye shosse, 43A.; tel. 8 (926) 280-01-20, e-mail: 2800120@mail.ru.

УДК 502/504:631.445.12

#### А. М. СИЛКИН

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева», г. Москва

#### Н. Ф. ЖАРНИЦКАЯ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ивановский государственный химико-технологический университет», г. Иваново

## ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРУЕМОСТИ И ПРОЧНОСТИ ТОРФОВ

*Торф, вследствие своего образования, состава сложения и состояния коренным образом отличается от минеральных грунтов как по деформируемости, так и по прочности. Результаты исследований деформируемости торфов под жестким плоским штампом при постепенно возрастающей нагрузке позволили выявить четыре фазы: уплотнение с перемещением твердых частиц (каркас торфа) в зоне под штампом только вертикально вниз; уплотнение и срез каркаса по периметру штампа с перемещением твердых частиц только вниз; «катастрофический» срез каркаса (провал штампа), выдавливание из него в зоне, находящейся под штампом, вместе с водой гумуса, и боковое расширение каркаса, но с продолжением уплотнения; разрушение каркаса и выдавливание его из-под штампа. Результаты испытаний показали возможность устройства сетевых ГТС с жесткой водопроводящей трубой, уложенной непосредственно на естественное торфяное основание. Результаты исследования торфов как естественных оснований сетевых сооружений мелиоративных систем показали, что прочность торфов в одних случаях обеспечивается их сопротивлением сжатию и срезу, а в других – сопротивлением сжатию и разрыву. Задача – правильно определить эти показатели.*

*Торф, сапрпель, степень разложения, степень зольности, штамп, водопроводящая часть, трубчатые сетевые сооружения, деформируемость и прочность торфов, зольность конституционная и наносная.*

**Введение.** Торф как основание различных сооружений использовался с древних времен и поныне; в Швейцарии на глубине 2 м в торфе были обнаружены остатки свайных фундаментов, которые, по мнению археологов, были построены за 1000 лет до нашей эры; в Германии в 1918 году при раскопках была обнаружена гать-дорога шириной более 3-х метров, в виде настила из бревен, находящаяся в

торфе на глубине 1,0...1,2 м. Аналогичные дороги на болотах, погребенные слоем торфа мощностью до 3,0 м, были найдены в Голландии, Австрии, Венгрии и других странах. В России на одном из болот Ленинградской области под слоем торфа на глубине 2,5 м была обнаружена шоссе-ная дорога Екатерининского времени. С девятнадцатого века на торфах стали возводить и гидротехнические сооружения.