

НАУКИ О ЗЕМЛЕ

УДК 69.05(075)

DOI 10.22213/2410-9304-2018-1-76-82

А. А. Кисляков, кандидат технических наук, доцент*М. А. Кисляков*, студент*Н. К. Симаков*, студент

ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ КОНСОЛИДАЦИИ ВОДОНАСЫЩЕННЫХ ПЫЛЕВАТО-ГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ

В статье рассматриваются вопросы изучения процессов консолидации водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов. Перед исследователями ставилась задача оценки эффективности работы ленточных дрен в водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах и определения оптимального расстояния между дренами. Методика проведения полевого эксперимента основывалась на положении о необходимости максимально возможного сохранения природной структуры грунта при установке в нем аппаратуры для исследований. Принят бесконтактный способ определения послойных деформаций грунта с помощью глубинных кольцевых марок и методы определения напряжений мессдозами и датчиками порового давления, которые устанавливались в пробуренные в массиве грунта скважины.

Оборудование контрольно-измерительной аппаратурой полигонов с разным шагом дрен, а затем проведение наблюдений на них в сочетании с наблюдениями на полигоне без дрен позволяет оценить эффективность работы ленточных дрен в данных грунтах и определить оптимальное расстояние между дренами.

Ключевые слова: вертикальные дренаи, дренирование, водонасыщенные пылевато-глинистые грунты, консолидация грунтов.

Целью проведения полевых исследовательско-экспериментальных работ было изучение процессов консолидации водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов. Это объяснялось сложностью геологического строения основания инженерных сооружений и малой изученностью данных грунтов в натуральных условиях [1–5].

Перед исследователями ставилась задача оценки эффективности работы ленточных дрен в водонасыщенных пылевато-глинистых грунтах и определения оптимального расстояния между дренами [6, 7].

Были созданы три опытных полигона. При этом два полигона были продренированы с разным шагом ленточных дрен, а третий полигон оставался недренированным и считался контрольным. Опытные полигоны оборудовались контрольно-измерительной аппаратурой. В комплекс измерительной аппаратуры входили глубинные и поверхностные марки, датчики порового давления и мессдозы (датчики напряжений). Все три

опытных полигона располагались на расстоянии 100 м друг от друга. Их местоположение было выбрано из условия сходного геологического напластования [8].

Методика проведения полевого эксперимента основывалась на положении о необходимости максимально возможного сохранения природной структуры грунта при установке в нем аппаратуры для исследований. Принят бесконтактный способ определения послойных деформаций грунта с помощью глубинных кольцевых марок и методы определения напряжений мессдозами и датчиками порового давления, которые устанавливались в пробуренные в массиве грунта скважины.

Для изучения эффективности работы ленточных дрен и оценки возрастания прочности в процессе консолидации были проведены полевые испытания методом лопастного среза при помощи четырехлопастной крыльчатки. Геологическое строение основания опытных полигонов представлено грунтами,

которые относятся к верхнечетвертичным озерно-ледниковым отложениям. Их залегание крайне неравномерно (рис. 1).

В районе полигонов на поверхность выходит слой 24 (нумерация слоев дается по классификации РусГидро), представленный пылеватым легким серым однородным или неяснослоистым по строению суглинком.

Порода классифицируется как текучая. Местами этот грунт обладает мягкопластичной консистенцией и рассматривается как слой 24а. Мощность слоя 24–24а составляет 6–10 м. Глубже залегает слой 25, представленный пылеватым коричневато-серым слоистым по строению суглинком текуче-пластичной (иногда текучей) консистенции.

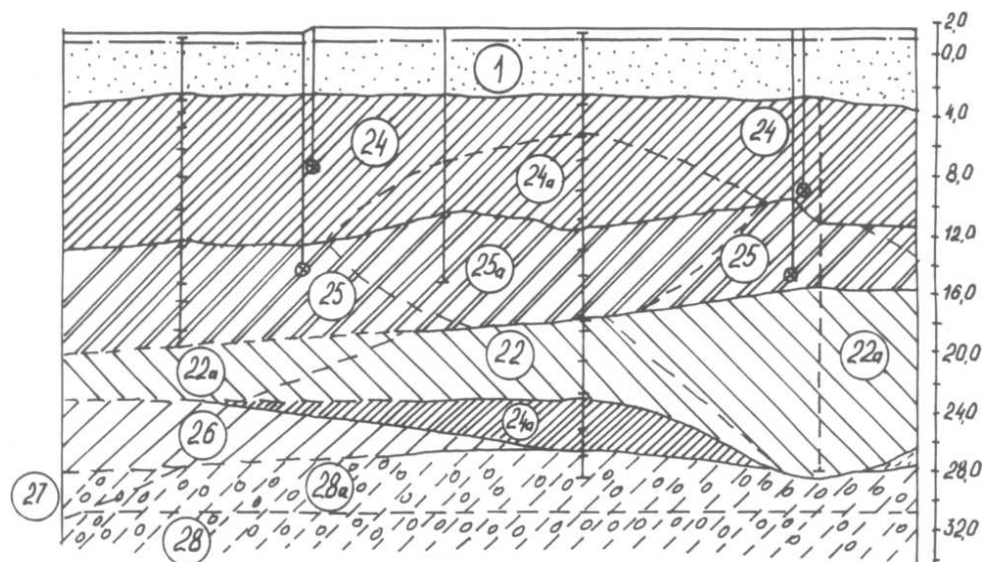


Рис. 1. Геологический разрез по оси полигона № 1

На значительных участках этот грунт обладает мягкопластичной консистенцией (слой 25а). Мощность залегания слоя 25–25а в районе полигонов составляет 6–9 м. Ниже залегают суглинки легкие темно-серые с включением гравия и гальки до 10 % мягкопластичной консистенции (слой 22а) или тугопластичной консистенции – слой 22. Все эти слои подстилаются суглинками пы-

леватыми серыми однородными от текучей до мягкопластичной консистенции, относимые к слою 26. Мощность залегания 2–7 м. Участки были отсыпаны песком до отметки +1,2–1,5 м над уровнем моря, при этом слой песка составлял 4–5 м. Основные физико-механические характеристики грунтов, служащих основанием защитных сооружений, приведены в таблице.

Физико-механические характеристики грунтов

№	Наименование показателей	Обозначение	Размерность	Пески-мелкие	Озерно-ледниковые балтийские отложения						Ледниковые отложения	
					Переотложенная морена		Суглинки средние пылеватые неяснослоистые		Суглинки тяжелые пылеватые ленточные		Суглинки легкие	
					тугопласт.	мягкопласт.	текуч.	мягкопласт.	текуч.	мягкопласт.	/с гравием и галькой/	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Удельный вес	γ	Кн/м ³	19,8	21,0	20,5	19,2	19,6	18,0	19,1	21,9	21,3
2	Коэффициент пористости	e	б/р	0,68	0,55	0,62	0,90	0,77	1,16	0,90	0,42	0,53
3	Влажность естественная	w	б/р	0,25	0,19	0,22	0,33	0,27	0,42	0,32	0,14	0,18

Окончание таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
4	Число пластичности	I_p	б/р	–	0,09	0,09	0,10	0,11	0,16	0,18	0,09	0,08
5	Показатель текучести	I_l	б/р	–	0,33	0,67	1,40	0,55	1,18	0,67	0,11	0,50
6	Степень влажности	I_w	б/р	1,00	0,95	0,97	1,00	0,96	0,99	0,98	0,92	0,95
7	Угол внутр. трения	φ	град	26	22	20	9/18	13/21	6/12	7/19	18/22	14/21
8	Сцепление	с	МПа	0,001	0,01	0,008	0,015	0,018	0,01	0,02	0,035	0,015
							0,006	0,013	0,005	0,012	0,025	0,020
9	Модуль деформации	E	МПа	18	15	10	6	8	4	8	18	12
10	Коэффициент фильтрации	k_f	м/сут	2,0	0,05	0,05	0,01	0,01	0,03	0,03	0,05	0,05
							10^{-5}	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-5}$		

Установка ленточных дрен производилась итальянским устройством «SoilMec», смонтированным на базе ДЭК-50. Дренажное устройство велось с отметки насыпи тела дамбы +1,2–1,5 м. Верхний песчаный слой пробуривался шнековым буром, которым снабжено устройство «SoilMec». В пробуренную скважину погружался пуансон, содержащий ленточную дренажную трубу. Общий вид устройства для установки дрен показан на рис. 2.

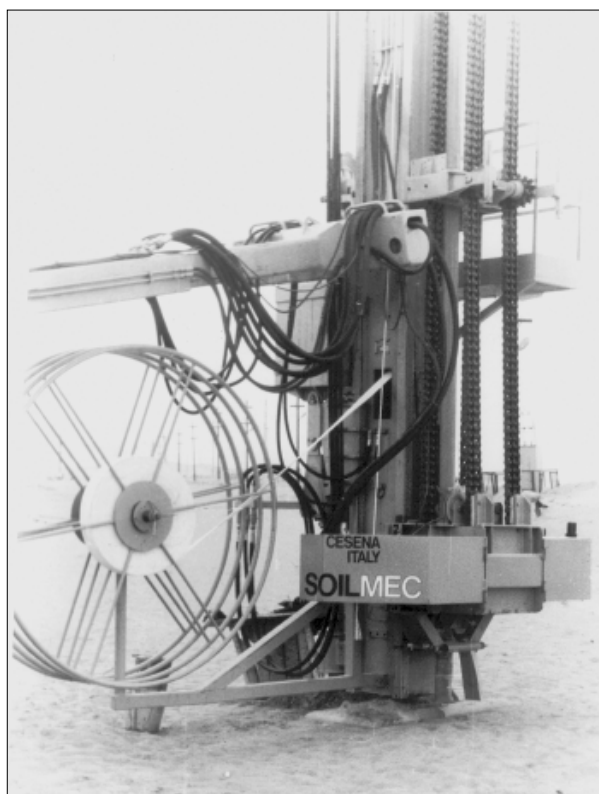


Рис. 2. Общий вид устройства для установки дрен

Ленточная дренажная труба представляет собой ребристый пластмассовый сердечник в синтетической фильтрующей оболочке. Размеры дренажной трубы составляют: ширина – 100 мм, толщина – 4 мм. Поперечный разрез дренажной трубы приведен на рис. 3. Погружаемый пуансон выполнен в виде ромба с размерами главных диагоналей 200 и 100 мм.

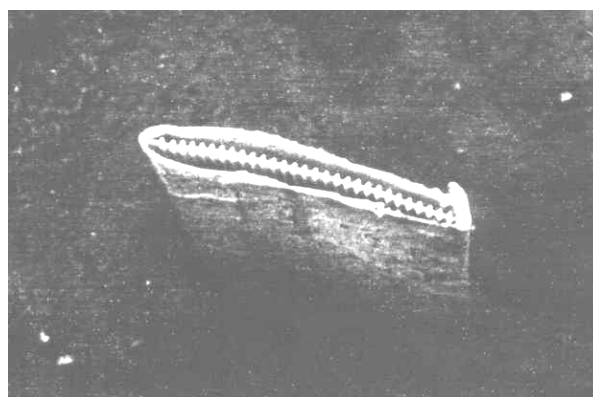


Рис. 3. Общий вид установленной в грунте ленточной дренажной трубы

Дренажное устройство осуществлялось на глубину 20 м, затраты времени на погружение одной дренажной трубы составляли 5–6 минут, из них 3/4 этого времени занимало бурение скважины в песчаном слое и вспомогательные работы и только 1/4 – погружение и извлечение пуансона.

Дренажное устройство на полигоне № 2 осуществлялось после установки контрольно-измерительной аппаратуры с шагом дрен 2,1 м. С целью сохранения аппаратуры дре-

ны устанавливались на расстоянии 1 м от скважин с марками и датчиками. На полигоне № 3 дренирование велось до установки аппаратуры с шагом дрен 3,6 м. На полигоне № 1 дрены не устанавливались, и он принят в качестве контрольного для возможности оценить эффективность работы ленточных дрен в исследуемых грунтах.

После оборудования полигонов контрольно-измерительной аппаратурой и дренирования полигонов № 2 и 3 прикладывалась нагрузка в виде песчаной насыпи с отметки +1,2 м до отметки +6,0 м, отсыпаемой последовательно слоями.

Нагружение на полигонах № 2 и 3 велось более интенсивно во времени, чем на полигоне № 1. При отсыпке пригрузочной насыпи производилось наращивание диэлектрических трубок глубинных и штанг геодезических марок, кабелей датчиков порового давления и месдоз. В процессе нагружения регулярно снимались показания контрольно-измерительной аппаратуры.

Исследования на сдвиг проводились на трех участках защитных сооружений: на полигоне № 1 (без дрен), на полигоне № 2 (шаг дрен 2,1 м), загруженных насыпью до отметки +6,0 м, и на контрольном участке, расположенном по оси дамбы в 20 м от полигона № 1 с отметкой дневной поверхности +1,2 м.

В полевых экспериментах использовалась стандартная сдвигомер-крыльчатка марки СК-8. Размеры лопастей крыльчатки составляют: высота – 15 см, ширина – 7,5 см. При испытаниях прогиб упругой пластины регистрировался индикатором часового типа.

Испытания на сдвиг проводились следующим образом. С дневной поверхности пробуривалась пионерная скважина под обсадными трубами. Глубина бурения скважины определялась как расстояние до точки проведения испытания минус 0,5 м. Затем в скважину опускалась крыльчатка и вдавливалась ниже обреза обсадных труб на 0,5 м в ненарушенный при бурении грунт. После проведения испытания на срез на данной глубине крыльчатка погружалась еще на 20–40 см и проводился повторный срез по указанной выше методике. После этого

крыльчатка поднималась из скважины, проводилось бурение скважины на новую глубину и опыт повторялся.

На полигонах № 1 и 2 контрольно-измерительная аппаратура размещалась как по оси полигонов, так и в поперечном сечении. На полигоне № 3 аппаратура была установлена только по оси полигона. Комплекс установленной измерительной аппаратуры позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов, залегающих в основании защитных сооружений, с минимальным нарушением природной структуры. Оборудование контрольно-измерительной аппаратурой полигонов с разным шагом дрен, а затем проведение наблюдений на них в сочетании с наблюдениями на полигоне без дрен позволяет оценить эффективность работы ленточных дрен в данных грунтах и определить оптимальное расстояние между дренами.

Полигон оборудовался глубинными марками для измерения послойных деформаций и поверхностными марками. Глубинные марки для определения послойных деформаций устанавливались в скважинах глубиной 20–30 м послойно через каждые 2–3 м по глубине. Бурение скважин велось ударно-канатным способом станком АВБ-2М. В качестве обсадных элементов применялись стальные трубы внешним диаметром 168 мм.

Технология установки глубинных марок заключалась в следующем (рис. 4). В грунте под защитой обсадной трубы 1 пробуривали скважину до слоя, не деформирующегося при ожидаемых нагрузках. Скважина заглубляется в этот слой на 50 см ниже обреза обсадной трубы. В скважину опускали диэлектрическую трубку 2 с закрепленным на ней якорем 3 и реперной маркой 4, представляющей собой металлическое кольцо.

После того как якорь достигал дна скважины, с помощью специального груза 6, выполненного в виде полого цилиндра и подвешенного тросом к лебедке, заанкеривали якорь в грунте, приподнимая и резко опуская груз.

Затем груз извлекали на поверхность и скважину тампонируют тиксотропным раствором до проектной отметки установки

глубинной марки 5, а обсадная труба поднималась на соответствующую высоту. Марка, представляющая собой тонкое металлическое кольцо с лапками из пружинной стали, одевалась на диэлектрическую трубку и с загнутыми лапками устанавливалась в устье обсадной трубы.

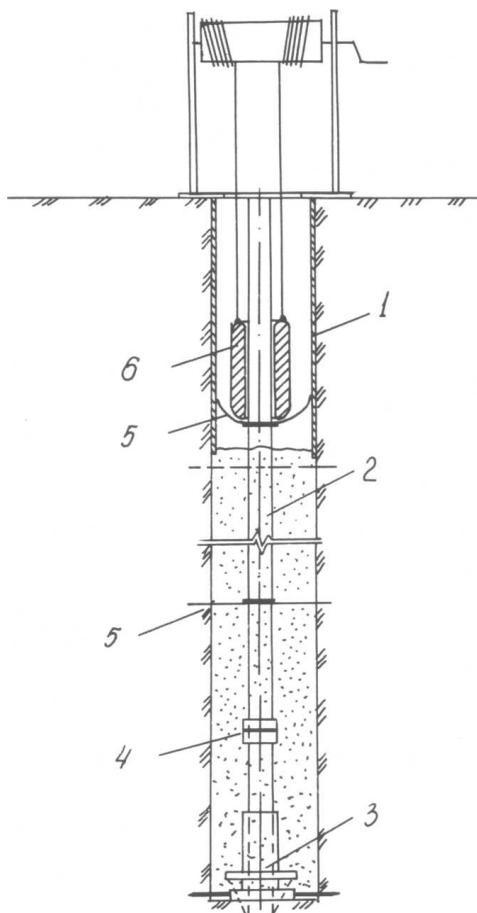


Рис. 4. Схема установки глубинных марок

Под весом груза марка опускалась до нижнего обреза обсадной трубы. При выходе из обсадной трубы лапки распрямлялись и врезались в стенки скважины. Далее груз поднимался на дневную поверхность, а скважина тампонировалась тиксотропным раствором. На эту глубину поднимали и обсадную трубу. Устанавливалась следующая глубинная марка.

После обустройства скважины глубинными марками проводились наблюдения за послойными деформациями грунтов. Положение марок определялось по бесконтактному принципу при помощи магнитно-индукционного датчика. Для этого в диэлектрическую трубку опускали магнитно-

индукционный датчик, соединенный кабелем с регистрирующей аппаратурой, и его положение фиксировалось с помощью мерной ленты, прикрепленной к датчику, по шкале-нониусу, закрепленной на верхнем конце диэлектрической трубки. Прохождение датчика через кольцо марки фиксировалось регистрирующей аппаратурой. В этот момент времени брался отчет по мерной ленте. Положение глубинных марок определялось относительно нижней реперной марки, принимаемой за ноль. Изменение положения марок во времени позволяло определять деформации грунтов основания с точностью ± 1 мм.

Кроме глубинных марок, на отметках +1,2–1,5 м были заложены поверхностные геодезические марки, представляющие собой стальную трубу с приваренной к ней снизу прямоугольной опорной плитой. Для исключения трения песка при последующей отсыпке полигона по трубе марки последняя защищалась специальной трубой, закрепленной арматурными стержнями. Осадки геодезических марок регулярно регистрировались с помощью нивелировки.

Для измерения вертикального и горизонтального давлений в грунте были установлены вертикальные и горизонтальные месдозы. Измерительным элементом месдоз является круглая мембрана, на которую наклеены тензодатчики.

Установка месдоз в грунт производилась при помощи специального механизма внедрения. При помощи лебедки на тросе механизм внедрения опускался в пробуренную под обсадными трубами скважину и заполненную до необходимой отметки тиксотропным раствором. Гидроцилиндром устройства внедряют месдозу в грунт стенки скважины. Таким образом, месдоза оказывается установленной в грунте ненарушенной структуры. После извлечения механизма внедрения скважина тампонируется до следующей отметки, до которой затем поднимают нижний обрез обсадной трубы и устанавливают очередную месдозу.

Горизонтальные и вертикальные месдозы были установлены на первом и втором полигонах. Датчики порового давления (ДПД) были установлены на трех опытных

полигонах. Установка ДПД проводилась следующим образом. Датчик порового давления помещался в матерчатый мешочек с песком, который насыщался водой. На поверхности, перед установкой, снимались нулевые показания датчика. Для обеспечения точной глубины установки датчика, он крепился к арматуре. При установке датчиков пробуривалась скважина диаметром 168 мм. В скважину насыпался песок 50 см по высоте, на который опускался датчик. После этого сверху датчика насыпался еще песок 50 см по высоте скважины. Таким образом, датчик порового давления оказывался в песчаной среде. На случай выхода ДПД из строя и для контроля регистрируемых значений порового давления, датчики устанавливались попарно. После этого производился тампонаж скважины специально приготовленной пастой из смеси вынутого при бурении грунта и бентонитовой глины.

Комплекс установленной измерительной аппаратуры позволяет исследовать напряженно-деформированное состояние слабых водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов, залегающих в основании зданий и сооружений, с минимальным нарушением природной структуры.

Оборудование контрольно-измерительной аппаратурой полигонов с разным шагом дрен, а затем проведение наблюдений на них в сочетании с наблюдениями на полигоне без дрен позволяет оценить эффективность работы ленточных дрен в данных грунтах и определить оптимальное расстояние между дренами.

Библиографические ссылки

1. Рекомендации по предпостроечному уплотнению слабых водонасыщенных грунтов временной нагрузкой с применением ленточных дрен. М. : НИИОСП, 1985.
2. Применение вертикальных дрен при уплотнении слабых водонасыщенных грунтов / В. П. Грахов, Ю. Г. Кислякова, К. А. Кисляков // Интеллектуальные системы в производстве. 2014. № 1 (23).
3. *Hansbo S.* Consolidation of clay with special reference to influence of vertical sand drains. Swedish Geot. Institute. Proc., no. 18, pp 1-160.

4. *Hansbo S.* Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains. Ground Engineering, juil, 1979.

5. *Hansbo S.* Geodrains is theory and practice, Terrafige AB Stockholm, Geotechnical Report, 1979, no. 5.

6. *Зиновьева Л. Г.* Консолидация оснований с учетом переменности характеристик грунтов в условиях дренирования и переменных нагрузок : дис. ... канд. техн. наук: 05.23.02. Л., 1989.

7. Натурные исследования поведения слабых пылевато-глинистых грунтов основания дамбы в целях управления процессом их консолидации / П. Л. Иванов, А. В. Голли, Л. Ш. Горелик, И. А. Пирогов, А. А. Кисляков, А. Г. Шашкин // Использование натуральных наблюдений для совершенствования проектирования фундаментов и изысканий в условиях слабых грунтов : материалы науч.-техн. семинара. Л. : ЛДНТП, 1989.

8. *Кисляков А. А.* Консолидация водонасыщенных пылевато-глинистых грунтов при вертикальном дренировании : дис. ... канд. тех. наук: 05.23.02. Л., 1990. 21 с.

References

1. *Rekomendatsii po predpostroechnomu uplotneniyu slabykh vodonasyschennykh gruntov vremenoj nagruzkoi s primeneniem lentochnykh dren* [Recommendations for pre-packing of weak water-saturated soils with temporary loading using tape drains]. Moscow, 1985 (in Russ.).
2. Grakhov V. P., Kislyakova Yu. G., Kislyakov K. A. (2014). *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], no. 1 (23) (in Russ.).
3. *Hansbo S.* Consolidation of clay with special reference to influence of vertical sand drains. Swedish Geot. Institute. Proc., no. 18, pp 1-160.
4. *Hansbo S.* Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains. Ground Engineering, juil, 1979.
5. *Hansbo S.* Geodrains is theory and practice, Terrafige AB Stockholm, Geotechnical Report, 1979, no. 5.
6. *Zinov'eva L. G.* (1989). *Konsolidatsiya osnovanii s uchetom peremennosti kharakteristik gruntov v usloviyakh drenirovaniya i peremennykh nagruzok* [Consolidation of foundations taking into account the variability of soil characteristics under conditions of drainage and variable loads] (PhD Thesis) (in Russ.).
7. *Ivanov P. L., Golli A. V., Gorelik L. Sh., Pirogov I. A., Kislyakov A. A., Shashkin A. G.* (1989). *Naturnye issledovaniya povedeniya slabykh pylavato-glinistykh gruntov osnovaniya damby v*

tselyakh upravleniya protsessom ikh konsolidatsii [Full-scale studies of the behavior of weak silty-clay soils of the foundation of a dam in order to control the process of their consolidation]. Proceedings of the *Ispol'zovanie naturnykh nablyudenii dlya sovershenstvovaniya proektirovaniya fundamentov i izyskanii v usloviyakh slabykh gruntov*. Leningrad: LDNTP (in Russ.).

8. Kislyakov A. A. (1990). *Konsolidatsiya vodonasyshchennykh pylevato-glinistykh gruntov pri vertikal'nom drenirovanii* [Consolidation of water-saturated silty-clay soils with vertical drainage] (PhD Thesis), Leningrad (in Russ.).

A. A. Kislyakov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov ISTU

M. A. Kislyakov, Student, Kalashnikov ISTU

N. K. Simakov, Student, Kalashnikov ISTU

Research of Consolidation of Water-Saturated Silty-Clay Soils with Vertical Drainage

The paper presents the research of consolidation of water-saturated silty-clay soils with vertical drainage. The researchers were tasked to evaluate the efficiency of prefabricated drains in water-saturated silty-clay soils and determine the optimal distance between drains. The method of carrying out the field experiment was based on the provision on the need for the maximum possible conservation of the natural structure of the soil with the installation of research equipment. A non-contact method is taken for determining stratified deformations of soil using deep ring marks and methods for determining the stresses by pressure cells and pore pressure sensors that were installed in wells drilled in balks.

The equipment of control and measuring equipment on polygons with different drainage steps, and then carrying out observations on them in combination with observations at a control site without drains, makes it possible to evaluate the efficiency of tape drains in these soils and determine the optimal distance between drains.

Keywords: vertical drains, drainage, water-saturated silty-clay soils, consolidation of soils.

Получено: 20.02.18