Исследование стабилизации мергеля органическими вяжущими

Е.И. Королев, Е.Н. Сычкина, А.Б. Пономарев

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ); г. Пермь, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Рассмотрен мергель, используемый в качестве основного материала для дорожных насыпей и оснований кустовых площадок на некоторых нефтяных месторождениях Пермского края. Этот грунт имеет различные прочностные характеристики в сухом и водонасыщенном состоянии: достаточно высокие значения сопротивления одноосному сжатию в сухом состоянии, которые резко снижаются при контакте с атмосферными или грунтовыми водами. При увлажнении и разрушении мергель способен переходить в пластичное состояние, сопровождаемое резким понижением значений прочности и возрастанием деформируемости.

Материалы и методы. Осуществлен подбор оптимального вяжущего, выполнены испытания прочности на образцах, изготовленных на основе различного содержания вяжущего и периода отверждения. Рассматриваемый параметр прочности — предел прочности при одноосном сжатии. Часть лабораторных испытаний проведена на искусственном мергеле, который был воссоздан по гранулометрическому составу в лабораторных условиях для расширения статистических данных испытаний. Для нестабилизированного мергеля проведены лабораторные исследования по определению оптимальной влажности, плотности частиц грунта, пределов текучести и пластичности. Отверждение образцов происходило в различных температурных условиях.

Результаты. Исследование как стабилизированного, так и нестабилизированного грунта сфокусировано в основном на показателях прочности, изменениях пластических свойств, требованиях к уплотнению, соотношении параметра прочности и характеристик сжимаемости образцов мергеля. Отмечено снижение плотности и влажности с повышением количества вяжущего в образце. Значительное улучшение и стабилизация изучаемых образцов наблюдается при 4%-ном содержании вяжущего.

Выводы. Доказано многократное возрастание прочности мергеля при его стабилизации, предложен оптимальный вид вяжущего и показаны зависимости прочности образцов грунта от содержания вяжущего.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: мергель, стабилизация, вяжущее, портландцемент, известь, дорожная насыпь, модуль упругости, прочность, гранулометрический состав

Благодарность. Авторы выражают искреннюю благодарность профессору Дитмару Адаму за курирование данного исследования. Экспериментальная работа, представленная в настоящей статье, выполнена на базе лаборатории Института геотехники Венского технического университета в 2019 г. Авторы также благодарят сотрудников лаборатории за оказанную помощь.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Королев Е.И., Сычкина Е.Н., Пономарев А.Б. Исследование стабилизации мергеля органическими вяжущими // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. Вып. 1. С. 58–71. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.58-71

Study of marl stabilization with organic binders

Egor I. Korolev, Evgeniya N. Sychkina, Andrey B. Ponomaryov

Perm National Research Polytechnic University (PNRPU); Perm, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The paper considers marl used as the primary material for road embankments and multiple-well platforms at some oil fields of the Perm' Territory. This ground has different strength parameters in dry and water-saturated conditions. Rather high values of the resistance to uniaxial compression in dry conditions abruptly fall when contacting atmospheric or ground water. Being damped and destroyed, marl is capable of transiting into the plastic state with abrupt reduction of strength and growth of deformability.

Materials and methods. The optimal binder was selected. Strength tests were performed on samples made based on of various binder contents and hardening periods. The considered strength parameter is the ultimate uniaxial compression strength. A part of the laboratory tests was carried out with artificial marl, which was recreated by granulometric composition to expand the statistical data of the tests. Laboratory studies for non-stabilized marl were conducted to determine the optimal humidity, density of ground particles, yield limit, and plastic limit. The hardening of the samples occurred under different temperature conditions.

Results. The study of both stabilized and non-stabilized ground samples is mainly focused on strength indicators, changes in plastic properties, compaction requirements, correlation of strength, and compressibility characteristics of the marl samples.

There is a decrease in density and humidity, with an increase in the amount of binder in the sample. Significant improvement and stabilization of the studied samples were observed for 4-% binder content.

Conclusions. The study proved many increases in the strength of marl during its stabilization. The optimal type of binder was proposed. Dependences of the strength of ground samples on the binder content were shown

KEYWORDS: marl, stabilization, binder, Portland cement, lime, road embankment, elasticity modulus, strength, granulometric composition

Acknowledgement. The authors would like to express their sincere gratitude to Professor Dietmar Adam for his supervising this study. The experimental work presented in this paper was performed at Institut für Geotechnik (Technische Universität Wien (TU Wien)), Institute of Geotechnics, Technical University of Vienna) in 2019. Also, the authors thank the laboratory staff for their help.

FOR CITATION: Korolev E.I., Sychkina E.N., Ponomaryov A.B. Study of marl stabilization with organic binders. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2020; 15(1):58-71. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.1.58-71 (rus.).

ВВЕДЕНИЕ

Местные грунты, используемые для отсыпки земляного полотна подъездных дорог к нефтяным месторождениям, зачастую могут иметь особые свойства. Ввиду отдаленности площадок строительства, подъездных дорог нефтяных месторождений от объектов строительной индустрии, замена грунта для отсыпки земляного полотна является сложной и экономически неоправданной задачей. Объектом исследования является мергель, используемый в качестве основного материала для дорожных насыпей и оснований кустовых площадок на некоторых нефтяных месторождениях Пермского края. Этот грунт имеет различные прочностные характеристики в сухом и водонасыщенном состоянии: достаточно высокие значения сопротивления одноосному сжатию в сухом состоянии, которые резко снижаются при контакте с атмосферными или грунтовыми водами [1]. При увлажнении и разрушении мергель способен переходить в пластичное состояние, сопровождаемое резким понижением значений прочности и возрастанием деформируемости. Кроме того, строительство кустовых площадок и дорожных насыпей на месторождении осложнено наличием слабых и переувлажненных грунтов в основании.

В настоящее время конструкции дорожных насыпей и кустовых площадок, сложенных из мергеля, требуют ежегодного ремонта после весенних паводков (рис. 1).

Данная работа призвана решить вопрос об увеличении эксплуатационных показателей и долговечности конструкций грунтовых сооружений, сложенных из мергеля при помощи стабилизации грунта органическими вяжущими. Для достижения

поставленной цели авторами были решены следующие задачи:

- 1) определены физико-механические характеристики образцов мергеля, отобранных с откоса насыпи подъездной дороги нефтяного месторождения;
- 2) подобрано вяжущее для стабилизации образцов по предварительно определенному гранулометрическому составу грунта;
- 3) подготовлены образцы с различным содержанием вяжущего;
- 4) проведены испытания образцов на одноосное сжатие;
- 5) сформулированы выводы по результатам исследования.

Мировой опыт показывает, что стабилизация используется для осушения грунтов на строительных площадках, а также позволяет существенно повысить прочность и устойчивость грунтовой конструкции, улучшая пластические, уплотняющие и прочностные свойства грунта [10]. Исследованиями стабилизации грунтов занимались многие отечественные и зарубежные ученые [2, 5–18]. Ранее в работе [2] было доказано увеличение физико-механических и прочностных свойств высокопластичной глины при помощи стабилизации известью. Аналогичные результаты наблюдались в исследовании стабилизации мелкозернистых грунтов при помощи цемента и золы [8]. Микроскопический анализ частиц мергелевой глины, стабилизированной известью, показывает, что длительная обработка известью вызвала уменьшение размера частиц в образце, что может привести к ухудшению геотехнических свойств данного грунта, однако испытаний образцов на прочность не проводилось [11]. По имеющимся данным [12], образцы мергеля демонстрируют увеличение жесткости и прочности при сдвиге

Рис. 1. Состояние дорожной насыпи на 2019 г.: щебень, вдавленный в верхний слой насыпи; открытые обломки мергеля, подверженные разрушению на откосах

Fig. 1. Condition of a road embankment in 2019: crushed stone pressed into the top layer of the embankment, open fragments of marl subjected to destruction on the slopes

при стабилизации известью, вместе с тем физические характеристики изученного мергеля отличны от мергеля, рассмотренного в данной работе. Таким образом, вопрос стабилизации мергеля является малоизученным. Особый и первостепенный интерес представляет изучение стабилизации мергеля с точки зрения его прочностных параметров, ввиду неоднозначных свойств грунта в сухом и водонасыщенном состояниях.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для исследования были отобраны образцы грунта с поверхности откоса дорожной насыпи месторождения. Экспериментальная часть исследования проводилась на базе лаборатории Института геотехники Венского технического университета, где были определены физико-механические характеристики, гранулометрический состав грунта и проведены испытания на одноосное сжатие согласно европейским нормативам.

Определение оптимальной влажности проводилось по методу Проктора в соответствии с ASTM D1557. С помощью перемешивающей машины подготовлено четыре образца различной влажности,

уплотненных в цилиндрической форме диаметром 100 мм. Уплотнение производилось в три слоя. Перед каждой последующей засыпкой слоя в форму, уплотненная поверхность слегка разрыхлялась для более плотного сцепления слоев друг с другом. После уплотнения образцы были приведены к единому объему путем среза ножом выступающих кромок грунта, взвешены и помещены в сушильный шкаф. Сухие образцы вновь взвешены. Полученные значения оптимальной влажности могут быть использованы для определения фактического коэффициента уплотнения при отсыпке насыпи основания автомобильных дорог [21].

Определение плотности частиц грунта осуществлялось в соответствии со стандартом DIN EN ISO 17892-3. Испытание проводилось пикнометрическим методом. Для данного теста было отобрано по 20 г грунта, выбран пикнометр, подготовлена песчаная баня. Процедура взвешивания производилась при помощи точных весов для пустого пикнометра с крышкой, для пикнометра с сухим грунтом, а также для пикнометра, заполненного дистиллированной водой. Кипение дистиллированной воды, перемешанной с грунтом, происходило в течение двух часов для удаления абсорбированного воз-

духа и расчленения агрегатов глинистого грунта. В остывший пикнометр была долита дистиллированная вода до верха крышки, образец взвешен при помощи точных весов. Измерялась температура воды для более точного определения объема воды в пикнометре. Результаты измерений занесены в протокол испытаний.

Предел текучести и предел пластичности устанавливались в соответствии с ISO/TS 17892-12. Искомые значения определялись как пределы Аттерберга, для этого использовался аппарат Касагранде и аппарат падающего конуса. Данные испытания предназначены для грунтов с содержанием мелких частиц более 40 %. Образцы мергеля высушивались в печи при температуре 50 °C и просеивались до фракции < 0,4 мм. После добавления дистиллированной воды к сухому материалу образцы твердели в течение нескольких часов в запечатанном контейнере непосредственно до момента проведения испытаний.

Ввиду того, что гранулометрический состав оказывает значительное влияние на физико-механические свойства грунта [20], его определение необходимо. Гранулометрический состав пробы мергеля определен согласно DIN EN ISO 17892-4 с набором сит 100; 63; 20; 6,3; 2; 0,63; 0,2; 0,063. От объема частиц наименьшего размера была взята навеска 30 г и разбавлена с водой для определения размера частиц аэрометрическим методом. Водяная суспензия грунта просеяна через сито с размером отверстий 0,02 мм. Суспензия, пропущенная через сито 0,02 мм, была залита в прозрачный цилиндр, добавлена вода с 25%-ным раствором аммиака концентрацией 0,5 см³/л для проведения испытания по определению размера частиц грунта согласно нормативу.

В связи с ограниченным объемом мергеля отобранного для испытаний и необходимости статистической обработки данных, было принято решение создать пробы искусственного мергеля, используя данные гранулометрического состава пермского мергеля и мергель, имеющийся в наличии в лаборатории Венского технического университета. По полученным данным размера частиц пермского мергеля создан искусственный мергель путем смешивания предварительно просеянных грунтов различной крупности. Для искусственной смеси грунта определены размеры частиц по методике, описанной выше.

Опираясь на данные кривой гранулометрического состава исследуемых образцов, подобран вид вяжущего и подготовлены образцы. Влажность подготавливаемых наборов грунта была доведена до оптимальной, подготовлена смесь вяжущего. Перемешивание вяжущего с грунтом произведено вручную. Отделены массы грунта с 2 и 4 % вяжущего по влажной массе образца.

По итогам уплотнения образцов получено:

- два образца оригинального мергеля с 2-х и 4%-ным содержанием вяжущего по влажной массе грунта соответственно;
- девять образцов искусственного мергеля: образец без вяжущего и по четыре образца с 2-х и 4%-ным содержанием вяжущего по влажной массе грунта соответственно.

Уплотнение образцов производилось согласно EN 13286-53. Подготовлены цилиндрическая форма для уплотнения образцов диаметром 56 мм и аппарат осевого сжатия WILLE Geotechnik UL 25. Согласно стандарту, уплотнение происходило постепенно до максимальной нагрузки на образец в 1000 кПа. Масса подготовленных наборов оригинального и искусственного мергелей была разделена на равные части для равности объемов уплотняемых образцов. Данный метод позволил обеспечить однородность уплотнения для всех образцов, а также наиболее достоверно воспроизвести метод уплотнения грунта на строительной площадке самоходными катками. Образцы были помещены в пластиковые контейнеры во избежание потери влаги во время твердения. Для отслеживания динамики набора прочности стабилизированных образцов разработан план хранения и испытания образцов на одноосное сжатие, представленный в табл. 1.

Условия хранения при температуре 45 °C обеспечили более быстрое твердение образцов и позволили осуществить набор прочности как после твердения в течение 28 сут при температуре 20 °C.

После выдержки образцы испытаны на одноосное сжатие. Статическое одноосное сжатие используется для вычисления физических свойств грунта. Во время испытания происходит разрушение образца грунта внешней фиксированной нагрузкой, во время которого измеряют образовавшиеся деформации [19].

По результатам испытаний на одноосное сжатие были построены диаграммы набора прочности, рассчитаны модуль упругости, сухая и влажная плотность, а также влажность образцов. Данный тест позволил выявить насколько хорошо работает вяжущее, т.е. насколько эффективна стабилизация грунта в количественном отношении к вяжущему, а также к его типу. Тест на одноосное сжатие проводился согласно EN ISO 17892-7 с использованием аппарата осевого сжатия WILLE Geotechnik UL 25. Испытания проводились в соответствии с планированием эксперимента, представленным в табл. 1. По каждой схеме готовилось по одному образцу. Перед началом испытаний каждый образец взвешивался, измерялись его геометрические размеры. При нагружении задавались следующие параметры разрушения образца: опускание пресса со скоростью 0,2 %/мин по высоте образца, согласно нормативу. Максимальная дефор-

Табл. 1. Планирование экспериментов и условия хранения образцов

Table 1. Experiment planning and sample storage conditions

Наименование образца / Sample denomination	Время твердения, сут / Hardening time, day	Условия твердения / Hardening conditions
Искусственный мергель, 0 % вяжущего / Artificial marl, 0 % of binder	1	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 2 % вяжущего / Artificial marl, 2 % of binder	3	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 2 % вяжущего / Artificial marl, 2 % of binder	3	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 4 % вяжущего / Artificial marl, 4 % of binder	3	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 4 % вяжущего / Artificial marl, 4 % of binder	3	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 2 % вяжущего / Artificial marl, 2 % of binder	6	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 2 % вяжущего / Artificial marl, 2 % of binder	6	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 4 % вяжущего / Artificial marl, 4 % of binder	6	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Искусственный мергель, 4 % вяжущего / Artificial marl, 4 % of binder	6	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation
Оригинальный мергель, 2 % вяжущего / Original marl, 2 % of binder	6	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Оригинальный мергель, 2 % вяжущего / Original marl, 2 % of binder	6	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation
Оригинальный мергель, 4 % вяжущего / Original marl, 4 % of binder	6	20 °С, без потери влаги / 20 °С, without desiccation
Оригинальный мергель, 4 % вяжущего / Original marl, 4 % of binder	6	45 °С, без потери влаги / 45 °С, without desiccation

мация образца была назначена равной 20 %, максимальная нагрузка — 10 МПа. Измерения производились через каждые 5 с. После разрушения образец помещен в сушильный шкаф до полного удаления влаги и определения сухой массы образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Согласно протоколам испытаний были определены: оптимальная влажность W_{opt} , плотность частиц грунта ρ_s , предел текучести W_L и предел пластичности W_p . Итоги определения физических характеристик сведены в табл. 2. Результатом испытаний по определению гранулометрического состава как оригинального, так и искусственного мергеля стала кривая гранулометрического состава, приведенная на рис. 2 и 3 соответственно.

По данным рис. 2 можно сделать вывод о том, что распределение количества частиц различного размера оригинального и искусственного образцов мергеля схожи. Ярко выраженное массовое преобла-

дание крупных или мелких частиц в образцах отсутствует. Таким образом, учитывая что цемент обычно используется для стабилизации грунтов с преобладанием крупных частиц, а известь — для стабилизации мелкозернистого грунта, для наиболее надежной стабилизации грунта было принято использование вяжущего в виде смеси цемента марки ЦЕМ II/В-Ш 32,5Н, соответствующего ГОСТ 31108-2003, и гашеной извести в процентном соотношении 50/50. ЦЕМ II — портландцемент с известняком от 6 до 20 %, класса прочности 32,5, нормальноотвердеющий.

Полученные диаграммы набора прочности на осевое сжатие и изменения модуля упругости относительно возраста образца, кривые зависимости деформаций образца от вертикальной нагрузки представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Значения механических характеристик мергелей, полученные в результате испытаний оригинального мергеля, приведены в табл. 3.

В рамках испытаний для оригинального мергеля были выполнены условия твердения в течение

Табл. 2. Значения некоторых физических характеристик мергеля

Table 2. Values of some physical characteristics of marl

Искомая характеристика / Required characteristic	Единицы измерения / Measurement unit	Значение / Value
Оптимальная влажность W_{opt} / Optimal humidity W_{opt}	%	17
Плотность частиц грунта ρ_s / Ground particle density ρ_s	г/см ³ / g/cm ³	2,62
Предел текучести W_L / Yield limit W_L	%	34
Предел пластичности W_p / Plastic limit W_p	%	22

Рис. 2. Кривые гранулометрического состава оригинального и искусственного мергелей

Fig. 2. Granulometric composition curves for original and artificial marls

шести суток при температуре 20 и 45 °С. Согласно данным, приведенным в табл. 3, значение прочности на осевое сжатие для образца № 2 практически в 2 раза превосходит прочность на осевое сжатие для образца № 1. Прочность возрастает от 348,8 до 813,1 кН/м². Такой прирост прочности объясняется условиями хранения образца № 2, обеспечивающими более быстрое твердение. Схожая динамика наблюдается для образцов № 3 и 4 в возрастании прочности на осевое сжатие от 483,8 до 1036 кН/м².

Для уточнения динамики прочностных характеристик стабилизируемого грунта во времени рассматривались испытания на одноосное сжатие искусственного мергеля. По результатам испытаний получены диаграммы набора прочности на осевое сжатие и изменения модуля упругости относитель-

но возраста образца, кривые зависимости деформаций образца от вертикальной нагрузки. Диаграммы представлены на рис. 5 и 6 для грунта с 2%-ным содержанием вяжущего, на рис. 7 и 8 с 4%-ным содержанием вяжущего. Значения физико-механических характеристик искусственного мергеля, определенных по итогам испытаний, сведены в табл. 4.

Результаты испытаний образцов с содержанием 2 % вяжущего показывают увеличение прочности на осевое сжатие более чем в пять раз в течение шести суток твердения при температуре 20 °С от 88,5 до 489,6 кН/м² с одновременным увеличением модуля упругости. Анализируя результаты испытаний образцов № 8 и 9, можно отследить дальнейшее увеличение прочности, благодаря «ускоренным» условиям твердения до 1388,0 кН/м². Схожая ди-

Рис. 3. Диаграмма изменения прочности на осевое сжатие и модуля упругости для образцов оригинального мергеля во времени

Fig. 3. Temporal development of uniaxial compression strength and elasticity modulus for original marl samples

Рис. 4. Кривые нагрузка–деформация для стабилизированных образцов оригинального мергеля

Fig. 4. Stress-deformation curves for stabilized original marl samples

Табл. 3. Результаты испытаний оригинального мергеля

Table 3. Test results for the original marl

Номер образца / Sample number	1	2	3	4
Содержание вяжущего, %, от влажной массы грунта / Binder content, %, of the damp ground mass	2	2	4	4
Возраст образца, сут / условия твердения, °	6 / 20	6 / 45	6 / 20	6 / 45
Прочность на осевое сжатие, кН/м ² / Uniaxial compression strength, kN/m ²	348,8	813,1	483,8	1036,0
Деформация при разрушении, % / Deformation at rupture, %	1,59	2,12	1,35	1,50
Модуль упругости E , МН/м ² / Elasticity modulus E , MN/m ²	21,9	38,6	35,8	71,0
Влажная плотность ρ , г/см ³ / Damp density ρ , g/cm ³	1,91	1,89	1,85	1,85
Сухая плотность ρ_d , г/см ³ / Dry density ρ_d , g/cm ³	1,64	1,64	1,57	1,59
Влажность W , % / Humidity W , %	16,9	15,4	17,6	16,24

Рис. 5. Диаграмма изменения прочности на осевое сжатие и модуля упругости для образцов искусственного мергеля с 2%-ным содержанием вяжущего во времени

Fig. 5. Temporal development of uniaxial compression strength and elasticity modulus for the artificial marl samples with 2% binder content

Рис. 6. Кривые нагрузка–деформация для образцов искусственного мергеля с 2%-ным содержанием вяжущего
Fig. 6. Stress-deformation curves for artificial marl samples with 2-% binder content

Рис. 7. Диаграмма изменения прочности на осевое сжатие и модуля упругости для образцов искусственного мергеля с 4%-ным содержанием вяжущего во времени
Fig. 7. Temporal development of uniaxial compression strength and elasticity modulus for the artificial marl samples with 4-% binder content

Рис. 8. Кривые нагрузка–деформация для образцов искусственного мергеля с 4%-ным содержанием вяжущего

Fig. 8. Stress-deformation curves for artificial marl samples with 4%-binder content

Табл. 4. Результаты испытаний искусственного мергеля

Table 4. Test results for the artificial marl

Номер образца / Sample number	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Содержание вяжущего, %, от влажной массы грунта / Binder content, %, of damp ground mass	0	2	2	2	2	4	4	4	4
Возраст образца, сут / условия твердения, °C / Sample age, day / hardening conditions, °C	1 / 20	3 / 20	6 / 20	3 / 45	6 / 45	3 / 20	6 / 20	3 / 45	6 / 45
Предел прочности (UCS) q_u , кН/м ² / Ultimate compression strength (UCS) q_u , kN/m ²	88,5	495,2	489,6	913,0	1388,0	559,2	737,0	1304,0	1396,0
Деформация при разрушении, % / Deformation at rupture, %	8,80	1,71	1,52	1,99	1,41	1,19	2,29	1,57	2,05
Модуль упругости E , МН/м ² / Elasticity modulus E , MN/m ²	1	29,0	32,6	46,2	99,6	47,3	32,2	83,7	69,3
Влажная плотность ρ , г/см ³ / Damp density ρ , g/cm ³	2,1	2,03	2,04	2,04	2,03	2,13	2,01	1,99	2,04
Сухая плотность ρ_{d3} , г/см ³ / Dry density ρ_d , g/cm ³	1,79	1,75	1,75	1,77	1,77	1,85	1,74	1,73	1,75
Влажность W , % / Humidity W , %	17,2	16,5	16,1	15,2	14,5	15,2	15,9	15,1	16,7

намика наблюдается для образцов с 4 % вяжущего. Максимальная прочность на осевое сжатие составила 1396,0 кН/м². По диаграммам на рис. 5 и 7 можно сделать вывод о том, что основную прочность образцы набирают в первые три дня после уплотнения образцов, т.е. большая часть вяжущего вступает в реакцию в первые три дня твердения.

Анализируя значения физических характеристик образцов, можно сделать вывод о снижении плотности образцов с увеличением количества вяжущего. Вяжущее имеет меньшую массу и занимает часть объема образца, оказывая влияние на его плотность.

Наблюдается снижение влажности с повышением количества вяжущего в образце. Данная динамика объясняется потребностью цемента и извести во влаге для проведения процесса гидратации. Чем больше вяжущего, тем больше влаги в образце должно быть задействовано.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе исследования определены значения физико-механических характеристик мергеля, исполь-

зуемого в качестве материала дорожных насыпей и кустовых площадок на нефтяном месторождении Пермского края.

Исследованием доказано многократное возрастание прочности мергеля при его стабилизации, предложен оптимальный вид вяжущего и показаны зависимости прочности образцов грунта от содержания вяжущего.

По максимальной прочности на осевое сжатие, превышающей 1 МПа, можно утверждать, что вяжущее подобрано правильно, мергель успешно стабилизирован в лабораторных условиях, прочностные характеристики образцов возросли многократно. Однако остается ряд вопросов в изучении стабилизированных образцов мергеля с точки зрения морозостойкости, стабилизации образцов мергеля при влажности как ниже, так и выше оптимальной, детального изучения химического состава мергеля для выявления наиболее экономически выгодного варианта стабилизации, а также рекомендаций по стабилизации мергеля непосредственно на строительной площадке с учетом сложных инженерно-геологических условий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ponomaryov A.B., Sychkina E.N., Kleveko V.I. Use of marl as ground base for embankments. *Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*. 2019. Pp. 280–283. DOI: 10.1201/9780429058882-55
2. Kavak A., Kızılcıelik M.M., Bilgen G. Stabilization of high plasticity clay with quick and hydrated lime // *Proceedings of the XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE)*. Brandl & D. Adam (eds.). 2014. Pp. 665–672.
3. Charles I., Herrier G., Chevalier C., Durand E. A real scale experimental dike in lime-treated soil // *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015. Pp. 1989–1994.
4. Akazawa Y., Fukuda M., Iwasaki Y., Nakazawa J. Reconstitution of foundation platform of Prasat Suor Prat by compaction of original soil with slaked lime, Angkor Ruins, Cambodia // *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013. P. 3097.
5. Susinov B., Josifovski J. Lime stabilization of silty soft soil // *Proceedings of the 5th International Young Geotechnical Engineers Conference — 5th iYGE*. 2013. P. 147. DOI: 10.3233/978-1-61499-297-4-147
6. Левкович Т.И., Мевлидинов З.А., Сидорович А.С., Вишталенко М.В., Воронин Е.И. Особенности стабилизации глинистых грунтов // *Проблемы инновационного биосферно-совместимого социально-экономического развития в строительном, жилищно-коммунальном и дорожном комплексах* : мат. 4-й Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 55-летию строительного факультета и 85-летию БГИТУ. Брянск, 01–02 декабря 2015 г. Брянск, 2015. С. 211–215.
7. Пат. РФ № 2592588. Состав для стабилизации глинистого грунта и способ создания грунтовых дорог с его использованием / В.В. Зырянов : патентообл. Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии твердого тела и механохимии Сибирского отделения Российской академии наук (ИХТТМ СО РАН); заявл. № 2015122867/03, 15.06.2015; опубл. 27.07.2016. Бюл. № 21.
8. Vukićević M., Pujević V., Marjanović M., Jocković S., Maraš-Dragojević S. Fine grained soil stabilization using class F fly ash with and without cement // *Proceedings of the XVI ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015. Pp. 2671–2676. DOI: 10.1680/ecsmge.60678
9. Gidigas S.S.R., Gawu S.K.Y. Pozzolana-cement stabilisation of a black cotton soil from Ghana //

XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE). H. Brandl & D. Adam (eds.). 2014. P. 34.

10. Подольский Вл.П., Нгуен Ван Лонг, Нгуен Дык Ши. О возможности расширения ресурсной базы дорожного строительства за счет стабилизации и укрепления грунтов // Научный вестник Воронежского ГАСУ. 2014. № 1 (33). С. 102–111. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21257222>

11. Elert K., Nieto F., Azañón J.M. Effects of lime treatments on marls // Applied Clay Science. 2017. Vol. 135. Pp. 611–619. DOI: 10.1016/j.clay.2016.10.047

12. Cardoso R., Maranha das Neves E. Hydro-mechanical characterization of lime-treated and untreated marls used in a motorway embankment // Engineering Geology. 2012. Vol. 133. Pp. 76–84. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.02.014

13. Salehin S. Investigation into engineering parameters of marls from Seydoon dam in Iran // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2017. Vol. 9. Issue 5. Pp. 912–923. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.05.002

14. Soltani A., Taheri A., Khatibi M., Estabragh A.R. Swelling potential of a stabilized expansive soil: a comparative experimental study // Geotechnical and Geological Engineering. 2017. Vol. 35. Issue 4. Pp. 1717–1744. DOI: 10.1007/s10706-017-0204-1

15. Preteseille M., Lenoir T. Mechanical fatigue of a stabilized/treated soil tested with uniaxial and biaxial flexural tests // Transportation Research Proceedings. 2016. Vol. 14. Pp. 1923–1929. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.159

16. Левкович Т.И., Мевлидинов З.А., Тулякина Н.А., Вишталенко М.В. Исследование прочности песчаных грунтов, укрепленных цементом

с добавкой «ДорЦем ДС-1», для использования при строительстве оснований автомобильных дорог // Транспортные сооружения. 2019. Т. 6. № 2. С. 8. URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS219.pdf> DOI: 10.15862/09SATS219

17. Akinwumi I.I., Booth C.A., Diwa D., Mills P. Cement stabilisation of crude-oil-contaminated soil // Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering. 2016. Vol. 169. Issue 4. Pp. 336–345. DOI: 10.1680/jgeen.15.00108

18. Dydyshko P.I., Olkhina S.V., Tarasenko A.V., Rzhnitsyn D.A. Stabilization of earthwork by introducing reinforcing additives when mixing soil // International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). 2019. Vol. 8. Issue 7. Pp. 2969–2981. URL: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i7/G6247058719.pdf>

19. Попова П.С., Захаров А.В. Обзор существующих методов определения модуля деформации грунта // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2018. Т. 1. С. 141–149.

20. Черпахин М.В., Шабеев С.Н. К вопросу о повышении несущей способности дорожных одежд из раздробленных горных пород рационального гранулометрического состава // Россия молодая : сб. мат. IX Всероссийской науч.-практ. конф. молодых ученых с междунар. участием. Кемерово, 18–21 апреля 2017 г. Кемерово, 2017. С. 51005.

21. Таборская О.А. Свойства мезенского мергеля как грунтового материала, перспективы его применения // Ломоносовские научные чтения студентов, аспирантов и молодых ученых — 2017 : сб. мат. конф. Архангельск, 15–22 апреля 2017 г. Архангельск, 2017. С. 2072. URL: https://narfu.ru/upload/medialibrary/ac8/SBORNIK_-2017.pdf

Поступила в редакцию 15 октября 2019 г.

Принята в доработанном виде 7 ноября 2019 г.

Одобрена для публикации 28 декабря 2019 г.

О Б АВТОРАХ: **Егор Игоревич Королев** — магистрант кафедры строительного производства и геотехники; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; egorkorolev@yahoo.com;

Евгения Николаевна Сычкина — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; РИНЦ ID: 655291; aspirant123@mail.ru;

Андрей Будимирович Пономарев — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительного производства и геотехники; **Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)**; 614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 29; РИНЦ ID: 412637; spstf@pstu.ru.

REFERENCES

1. Ponomaryov A.B., Sychkina E.N., Kleveko V.I. *Use of marl as ground base for embankments. Geotechnics Fundamentals and Applications in Construction: New Materials, Structures, Technologies and Calculations*. 2019; 280-283. DOI: 10.1201/9780429058882-55
2. Kavak A., Kızılcelik M.M., Bilgen G. Stabilization of high plasticity clay with quick and hydrated lime. *Proceedings of the XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE)*. H. Brandl & D. Adam (eds.). 2014; 665-672.
3. Charles I., Herrier G., Chevalier C., Durand E. A real scale experimental dike in lime-treated soil. *Proceedings of the XVI ECSMGE Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015; 1989-1994.
4. Akazawa Y., Fukuda M., Iwasaki Y., Nakazawa J. Reconstitution of foundation platform of Prasat Suor Prat by compaction of original soil with slaked lime, Angkor Ruins, Cambodia. *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2013; 3097.
5. Susinov B., Josifovski J. Lime stabilization of silty soft soil. *Proceedings of the 5th International Young Geotechnical Engineers Conference — 5th iYGEC*. 2013; 147. DOI: 10.3233/978-1-61499-297-4-147
6. Levkovich T.I., Mevlidinov Z.A., Sidorovich A.S., Vishtalenko M.V., Voronin E.I. Features of stabilization of clayey soils. *Problems of innovative biosphere-compatible socio-economic development in the construction, housing and communal and road complexes : materials of the 4th International scientific and practical conference dedicated to the 55th anniversary of the faculty of construction and the 85th anniversary of BGITU, Bryansk, December 01–02, 2015*. Bryansk, 2015; 211-215. (rus.).
7. Patent Russian Federation No. 2592588. Composition for stabilisation of clay soil and method for creating ground roads using thereof / V.V. Zyryanov; State Chemistry and Mechanochemistry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (ISSC SB RAS). Appl.: No. 2015122867/03, 15.06.2015; publ.: 27.07.2016. Bull. No. 21.
8. Vukićević M., Pujević V., Marjanovi M., Jocković S., Maraš-Dragojević S. Fine grained soil stabilization using class F fly ash with and without cement. *Proceedings of the XVI ECSMGE. Geotechnical Engineering for Infrastructure and Development*. 2015; 2671-2676. DOI: 10.1680/ecsmge.60678
9. Gidigas S.S.R., Gawu S.K.Y. Pozzolana-cement stabilisation of a black cotton soil from Ghana. *XV Danube — European Conference on Geotechnical Engineering (DECGE)*. H. Brandl & D. Adam (eds.). 2014; 34.
10. Podolsky V.I.P., Nguyen Van Long, Nguyen Duc Sy. On the possibility of the expansion of a road construction resource by the soil stabilization and consolidation. *Scientific Herald of the Voronezh State University of Architecture and Civil Engineering. Construction and Architecture*. 2014; 1(33):102. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21257222> (rus.).
11. Elert K., Nieto F., Azañón J.M. Effects of lime treatments on marls. *Applied Clay Science*. 2017; 135:611-619. DOI: 10.1016/j.clay.2016.10.047
12. Cardoso R., Maranha das Neves E. Hydro-mechanical characterization of lime-treated and untreated marls used in a motorway embankment. *Engineering Geology*. 2012; 133:76-84. DOI: 10.1016/j.enggeo.2012.02.014
13. Salehin S. Investigation into engineering parameters of marls from Seydoon dam in Iran. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2017; 9(5):912-923. DOI: 10.1016/j.jrmge.2017.05.002
14. Soltani A., Taheri A., Khatibi M., Estabragh A.R. Swelling potential of a stabilized expansive soil: a comparative experimental study. *Geotechnical and Geological Engineering*. 2017; 35(4):1717-1744. DOI: 10.1007/s10706-017-0204-1
15. Preteseille M., Lenoir T. Mechanical fatigue of a stabilized/treated soil tested with uniaxial and biaxial flexural tests. *Transportation Research Procedia*. 2016; 14:1923-1929. DOI: 10.1016/j.trpro.2016.05.159
16. Levkovich T.I., Mevlidinov Z.A., Tulyankina N.A., Vishtalenko M.V. The study of strength of sandy soils reinforced with cement with the addition of “DorZem Ds-1”, for use in the construction of foundations of road. *Journal of Transport Engineering*. 2019; 6(2):8. URL: <https://t-s.today/PDF/09SATS219.pdf> DOI: 10.15862/09SATS219 (rus.).
17. Akinwumi I.I., Booth C.A., Diwa D., Mills P. Cement stabilisation of crude-oil-contaminated soil. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers — Geotechnical Engineering*. 2016; 169(4):336-345. DOI: 10.1680/jgeen.15.00108
18. Dydyshko P.I., Olkhina S.V., Tarasenko A.V., Rzhantsyn D.A. Stabilization of earthwork by introducing reinforcing additives when mixing soil. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*. 2019; 8(7):2969-2981. URL: <https://www.ijitee.org/wp-content/uploads/papers/v8i7/G6247058719.pdf>
19. Popova P.S., Zakharov A.V. Overview of existing methods for determining the deformation modulus of soil. *Modern Technologies in Construction. Theory and Practice*. 2018; 1:141-149. (rus.).
20. Cherepakhin M.V., Shabayev S.N. On the issue of increasing the load-bearing capacity of road surfaces made of crushed rocks of rational granulometric composition. *Rossiia molodaya : collection of materials IX*

all-Russian scientific and practical conference of young scientists with international participation, Kemerovo, April 18–21, 2017. Kemerovo, 2017; 51005. (rus.).

21. Taborskaya O.A. Features of Mezen marl as a soil material, outlook of its application. *Lomono-*

sov scientific readings of students, postgraduates and young scientists. Proceedings of the conference : conference proceedings. Arkhangelsk, April 15–22, 2017. Arkhangelsk, 2017; 2072. URL: https://narfu.ru/upload/medialibrary/ac8/SBORNIK_-2017.pdf (rus.).

Received October 15, 2019.

Adopted in a revised form on November 7, 2019.

Approved for publication December 28, 2019.

B I O N O T E S : **Egor I. Korolev** — master student of the Department of Construction Technology and Geotechnics; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; egorkorolev@yahoo.com;

Evgeniya N. Sychkina — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technology and Geotechnics; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; ID RISC: 655291; aspirant123@mail.ru;

Andrey B. Ponomaryov — Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction Technology and Geotechnics; **Perm National Research Polytechnic University (PNRPU)**; 29 Komsomolsky prospekt, Perm, 614990, Russian Federation; ID RISC: 412637; spstf@pstu.ru.