

Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение  
высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНЖЕНЕРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Автомобильные дороги и городские сооружения»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

\_\_\_\_\_ В.В. Серватинский

подпись

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 г.

## ДИПЛОМНАЯ РАБОТА

270205.65 «Автомобильные дороги и аэродромы»

**Исследование характеристик стабилизированного грунта,  
применяемого в конструкции дорожных одежд**

Пояснительная записка

|                      |         |                  |                |
|----------------------|---------|------------------|----------------|
| Научный руководитель | _____   | ст. пр.          | Е. А. Чайкин   |
|                      | подпись |                  |                |
| Выпускник            | _____   |                  | Д. А. Тетерин  |
|                      | подпись |                  |                |
| Консультанты:        |         |                  |                |
| Экономика            | _____   | к. т. н., доцент | В. В. Гавриш   |
|                      | подпись |                  |                |
| Охрана труда         | _____   | к. б. н., доцент | Е. Ю. Гуменная |
|                      | подпись |                  |                |
| Нормоконтролер       | _____   | ст. пр.          | Е. А. Чайкин   |
|                      | подпись |                  |                |

Красноярск 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |    |
|--|----|
| Введение.....  | 3  |
| 1 Теоретическое обоснование  |    |
| 1.1 Российский и зарубежный опыт использования стабилизированных<br>грунтов.....                             | 4  |
| 1.2 Классификация и гранулометрический состав грунтов.....   | 6  |
| 1.3 Области применения стабилизированных<br>грунтов.....   | 10 |
| 1.4 Минералогические и химические составы грунтов.....   | 11 |
| 1.5 Основные принципы укрепления грунтов и других местных<br>материалов.....                                 | 17 |
| 1.6 Укрепление грунтов цементом.....   | 28 |
| 1.7 Технология и механизация работ по конструированию дорожных<br>одежд из стабилизированных<br>грунтов..... | 44 |
| 2 Проведение испытаний   |    |
| 2.1 Проведение испытаний на приборе Instron.....   | 64 |
| 2.2 Проведение испытаний на морозостойкость.....   | 78 |
| 2.3 Обработка результатов.....   | 78 |
| 3 Экономическая составляющая   |    |
| 3.1 Сравнение стоимости.....   | 81 |
| 4 Охрана труда   |    |
| 4.1 Охрана труда в технологии укрепления грунтов.....  | 83 |
| Заключение.....  | 91 |
| Список использованных источников.....  | 92 |

## **ВВЕДЕНИЕ**

Цель данной курсовой работы – замена щебеночного основания в конструкциях дорожных одежд на основания из местных грунтов, посредством стабилизации последних шлакопортландцементом.

Для этого, в пределах Красноярска было отобрано 3 вида грунтов: суглинок полутвердый, песок мелкий и почвенно-растительный грунт. Каждый из этих грунтов был укреплен 5% и 10% шлакопортландцемента. А также для каждого грунта, экспериментальным путем, была подобрана оптимальная влажность.

В рамках данной курсовой работы была проведена серия опытов для определения предела прочности на сжатие, предела прочности на изгиб и морозостойкости.

Результаты всех исследований, а также выводы о возможности использования данных стабилизированных грунтов в конструкции дорожных одежд, приведены в разделе 2.

## **1 Теоретическое обоснование**

### **1.1 Российский и зарубежный опыт использования стабилизированных грунтов**

В 1926 году в Ленинградском дорожно-исследовательском бюро были проведены опыты по известкованию грунтов. В ходе опытов было установлено, что добавки гашёной извести в количестве 5 % от массы грунта уменьшает липкость и пластичность глинистых грунтов и увеличивает сопротивление размоканию. С 1927 по 1931 год под Москвой были проведены опытные работы по укреплению известью глинистых и чернозёмных грунтов. В послевоенный период известкование грунтов получило дальнейшее развитие в работах ДорНИИ, Саратовского автодорожного института и других НИИ. Были разработаны практические рекомендации по внедрению метода известкования грунтов в дорожном строительстве. С 1950 по 1955 год был построен ряд опытных участков дорог, где в качестве оснований, а также покрытий, использовался местный грунт, укреплённый известью. По данным С. А. Морозова, известкование дерновоподзолистых грунтов обеспечило во всех опытных участках более высокие показатели прочности образцов на сжатие в водонасыщенном состоянии, чем при укреплении цементом. Однако известкованные грунты имеют низкую морозостойкость, поэтому их надо применять главным образом в основаниях дорожных одежд.

За границей, цементно-грунтовые технологии начали развиваться в первой половине XX века. В 20-х годах в США из цементогрунтов делали покрытия просёлочных дорог. После II мировой войны этот метод получил распространение в Англии, Бельгии, Голландии и других европейских странах. Так, в Голландии, начиная с 1956 года, было укреплено десятки миллионов квадратных метров почвы. Почти всюду она была песчаной и

поэтому данная технология получила название пескоцементной. В 80-х годах прошлого века в ФРГ ежегодно около 1 млн. т цемента расходовалось на стабилизацию песков на севере страны (портовые сооружения Гамбурга, складские площадки), при строительстве просёлочных дорог. Также в США цементогрунт использовали на строительстве 60 водохранилищ для защиты берегов от эрозии, а также при устройстве земляных плотин.

В 1974 году во Франции была построена автодорога А62 (к северу от Бордо). Дорожная одежда состоит из цементно-песчаной смеси толщиной 30 см., гравийно-песчаной смеси, укрепленной цементом толщиной 30 см, и асфальтобетона толщиной 68 см. Цемент (шлакопортландцемент) вводили в смесь в количестве 6 % от сухой массы песка. Содержание воды в смеси колебалось от 8 до 10 %. Смешивание производилось на месте, машиной с 200 вертикальными лопатками диаметром 12 см и производительностью 4000–5000 м<sup>2</sup>/сут. Для уплотнения применяли виброкатки и уплотнители на пневматическом ходу. Во Франции, начиная с 80-х годов прошлого столетия, ежегодно укрепляется более 10 000 км покрытия просёлочных дорог.

С 1980 по 1990 год в Японии разработано 13 типов установок для изготовления свай различными методами из грунтобетона. В Италии объём свай из цементогрунта составил 11 млн. м<sup>3</sup>.

В 1952-1967 годах УНИИОСП и ЦНИИЭП Сельстрой, совместно с другими организациями, провели исследовательские и опытно-конструкторские работы по применению цементогрунта при возведении фундаментов малоэтажных зданий и сооружений. В этот период в Новороссийской и Омской областях, Алтайском и Краснодарском краях было возведено около 70 зданий и сооружений, в основном малоэтажных, передающих на фундаменты сравнительно небольшие (до 150 кН/м) сжимающие нагрузки. Обследование фундаментов этих зданий после 20 лет эксплуатации не выявило следов разрушения материала.

В России в 1958–1976 годах лесхозами Ленинградской области, совместно со специалистами Ленинградской лесотехнической академии, было построено и испытано 40 опытных участков просёлочных дорог с применением побочных продуктов и отходов лесохимической промышленности — древесной смолы, древесносмолистого пека, а также цемента, извести, жидкого стекла, чёрного сульфатного щёлока (ЧСЩ), хлористого кальция и др. Особенно хорошие результаты показали опытные участки Новгородской дороги Лисинского лесхоза Ленинградской области. При строительстве этих участков в качестве добавок для укрепления грунтов использовались цемент и ЧСЩ. Перемешивание грунтов с реагентами производили дорожной фрезой Д-530, а также с помощью передвижного смесителя Д-370.

## **1.2 Классификация и гранулометрический состав грунтов**

Самые разнообразные горные породы в широком диапазоне их состава и генезиса принято называть грунтами. При строительстве автомобильных дорог и аэродромов грунты широко используются в качестве природного местного материала для устройства земляного полотна.

Все грунты подразделяются на три класса:

1) грунты со сплошными жесткими кристаллизационными связями (магматические, метаморфические и осадочные породы разной прочности);

2) грунты без жестких связей между отдельными зернами или частицами (осадочные крупнообломочные, песчаные и глинистые породы, включая также почвы различных типов);

3) искусственные грунты без жестких связей и с жесткими связями (отходы промышленности и дробления скальных пород, а также различные виды укрепленных грунтов).

Грунты различного геологического возраста, состава и происхождения подразделяются на скальные и нескальные.

Скальные грунты характеризуются монолитностью и наличием прочных жестких кристаллизационных связей, нескальные грунты жестких связей между частицами не имеют. Это — обломочные грунты, содержащие частицы различных размеров, характеризующиеся разнообразными свойствами и химико-минералогическим составом.

В настоящей дипломной работе рассматриваются методы укрепления различных видов и разновидностей грунтов, лишенных жестких связей, что вызывает необходимость придания им требуемой прочности, монолитности и морозостойкости.

Основным исходным материалом (сырьем), подвергаемым укреплению при строительстве автомобильных дорог и аэродромов путем смешения грунта с различными вяжущими материалами и другими веществами, обычно являются нескальные природные и искусственные грунты (без жестких связей между частицами): крупнообломочные, песчаные и глинистые виды и разновидности.

Для укрепления могут быть использованы малопрочные скальные грунты, по обязательно раздробленные на частицы разных размеров.

Эффективному укреплению подвергаются различные виды и разновидности искусственных грунтов, представляющих собой обломочные (дискретные) отходы промышленных предприятий (металлургические и топливные шлаки, золошлаковые смеси, золы уноса, продукты дробления и обогащения каменных пород).

В соответствии с требованиями СП 34.13330.2012, а также ГОСТ 25100-2011 природные и искусственные нескальные грунты в зависимости от величины обломков, содержания и соотношения частиц различных размеров подразделяются на:

*крупнообломочные* несцементированные грунты при содержании частиц размером крупнее 2 мм более 50% по массе;

*песчаные* грунты, характеризующиеся сыпучестью в сухом состоянии и содержащие частицы крупнее 2 мм менее 50% по массе;

*глинистые* грунты, характеризующиеся связностью в сухом и пластичностью во влажном состоянии и числом пластичности более 1.

При правильном выборе вяжущих материалов и введении добавок в оптимальном соотношении эффективному укреплению могут подвергаться грунты в очень широком диапазоне их гранулометрического состава.

В таблицах 1.1 и 1.2 приводятся лишь наиболее часто применяемые на практике вяжущие вещества в сочетании с добавкой или без добавки активных и других веществ. После предварительного подбора состава смесей и испытания образцов виды вяжущих материалов и их эффективное сочетание с добавками других веществ существенно могут быть расширены и, следовательно, расширено количество вариантов в составе смесей, обеспечивающих требуемые прочность, морозостойкость и другие свойства конструктивного слоя из укрепленных грунтов.

Таблица 1 – Крупнообломочные и песчаные грунты

| Виды крупнообломочных и песчаных грунтов                      | Содержание частиц по крупности, % от массы сухого грунта | Пригодность грунтов при укреплении их вяжущими материалами   |
|---|--|--|
| Щебенистый (при преобладании окатанных частиц — галечниковый) | Более 50% крупнее 10 мм                                  | Весьма пригоден при добавке: портландцемента, шлакопортландцемента; портландцемента + молотые шлаки или золошлаковые смеси, либо золы уноса; извести + молотые шлаки или золы уноса; портландцемента + битумные эмульсии или жидкий битум, либо нефть; жидкого битума или каменноугольного дегтя; активных зол УНОСЯ и др. |
| Дресвяный (при преобладании окатанных частиц — гравийный)     | Более 50% крупнее 2 мм                                   | То же  |
| Песок гравелистый   | Более 25 % крупнее 2 мм                                  | »  |



## Окончание таблицы 1

|                     |                           |   |
|---------------------|---------------------------|---|
| » крупный           | Более 50% крупнее 0,5 мм  | Весьма пригоден при разнозернистом составе и применении вяжущих веществ, указанных выше   |
| » средней крупности | Более 50% крупнее 0,25 мм | Пригоден, но менее, чем крупный и гравелистый песок при добавке: портландцемента или шлакопортландцемента; портландцемента + молотые шлаки или золошлаковые смеси, либо золы уноса; извести + молотые шлаки или золы уноса; портландцемента + битумные эмульсии или жидкий битум, либо нефть, СаС1 <sub>2</sub> , СДБ и другие вещества; карбамидных смол + + битумные эмульсии или нефть; молотых шлаков или активных зол уноса с добавками других веществ |
| Песок мелкий        | Более 75% крупнее 0,1 мм  | Пригоден при добавке тех же вяжущих и других веществ, как и при укреплении песков средней крупности   |
| » пылеватый         | Менее 75% крупнее 0,1 мм  | Пригоден при добавке тех же вяжущих и других веществ, как и при укреплении песков средней крупности и мелких песков   |

## Таблица 2 – Глинистые грунты

| Число пластичности | Содержание песчаных частиц, % от массы сухого грунта | Разновидности глинистых грунтов | Пригодность грунтов при укреплении их вяжущими материалами   |
|--------------------|--|---------------------------------|--|
| 1—7                | >50%   | Супесь легкая, крупная          | Весьма пригодна при добавке: портландцемента или шлакопортландцемента; портландцемента + известь, либо СаС1 <sub>2</sub> или СДБ; молотых доменных или топливных шлаков + СаС1 <sub>2</sub> , или NaCl, или других активных веществ; портландцемента + битумная эмульсия или жидкий битум, или нефть; активных зол уноса с добавкой или без добавки извести или цемента; жидких битумов или каменноугольных дегтей с добавкой или без добавки цемента или извести; карбамидных смол с добавкой или без добавки битумной эмульсии или нефти |
| 1—7                | >50%   | Супесь легкая                   | То же  |
| 1—7                | 20—50  | » пылеватая                     | Пригодна при добавке тех же вяжущих веществ, как и при укреплении легких супесей, но с увеличенным расходом вяжущих материалов и добавок других веществ  |
| 1—7                | <20  | » тяжелая, пылеватая            | Пригодна при добавке тех же вяжущих и других веществ, как при укреплении пылеватых супесей, но получаемая степень укрепления несколько ниже  |

## Окончание таблицы 2

|       |                |                   |   |
|-------|----------------|-------------------|---|
| 7—12  | >40            | Суглинок легкий   | Весьма пригоден при добавке портландцемента и шлакопортландцемента без или с добавкой CaCl <sub>2</sub> или других солей; пригоден при добавке карбамидных смол + битумная эмульсия или нефть; жидких битумов или каменноугольных дегтей или без добавки извести или цемента; цемента + + золы уноса; извести                                   |
| 7—12  | <40            | То же, пылеватый  | Пригоден при добавке: портландцемента или шлакопортландцемента с добавкой или без добавки извести или CaCl <sub>2</sub> , либо других солей; извести или известково-шлакового цемента; портландцемента с добавкой золы уноса или золошлаковых солей; жидких битумов или дегтей с добавкой или без добавки цемента или извести, карбамидных смол |
| 12—17 | >40            | Суглинок тяжелый  | Пригоден при добавке: извести молотой негашеной или гашеной; известково-шлакового цемента с увеличенным содержанием извести; портландцемента-1-извести или CaCl; NaCl либо другие соли или ПАВ; жидкого битума или каменноугольного дегтя + цемент или известь, либо ПАВ  |
| 12—17 | <40            | То же, пылеватый  | Пригоден при добавке: извести молотой негашеной или гашеной; известково-шлакового цемента с увеличенным содержанием извести; портландцемента + известь или CaCl <sub>2</sub> ; NaCl либо другие соли или ПАВ; жидкого битума или каменноугольного дегтя + цемент или известь, либо ПАВ  |
| 17—27 | >40            | Глина песчанистая | То же   |
| 17—27 | >40            | Глина пылеватая   | Грунт является непригодным для укрепления любыми вяжущими материалами вследствие большой технологической трудности его обработки и ввиду очень больших добавок вяжущих веществ  |
| 27    | Не нормируется | Глина жирная      | Грунт является непригодным для укрепления любыми вяжущими материалами вследствие большой технологической трудности его обработки и ввиду очень больших добавок вяжущих веществ  |

### 1.3 Области применения стабилизированных грунтов

В данной дипломной работе делается упор на стабилизацию грунтов цементом, поэтому в этом подразделе перечислены области применения цементогрунта:

- Строительство проселочных дорог
- Устройство слоев основания автомобильных дорог
- Покрытия складских площадок, автостоянок

- Постели оснований железных дорог
- Фундаменты отдельных типов зданий
- Возведение больших земляных плотин

#### **1.4 Минералогические и химические составы грунтов**

При установлении пригодности того или иного вида грунта для укрепления вяжущими материалами необходимо учитывать и направленно использовать минералогический и химический составы укрепляемого грунта.

При этом следует отметить, что изменение гранулометрического состава возможно, а иногда и выгодно с экономической стороны.

Изменение же минералогического и химического составов укрепляемого грунта является практически невыполнимым требованием. Грунты, в особенности глинистые их разновидности, представляют собой полидисперсные полиминеральные системы. Свойства таких систем весьма сложны и изменчивы и комплексно отражают особенности входящих в систему частиц различной степени дисперсности и состава.

Минералогический и химический составы грунта оказывают значительное влияние не только на физические свойства и степень устойчивости грунта, но также на результаты укрепления.

Минералогический и химический составы резко отличаются в зависимости от исходного состава горной породы, степени ее раздробления, условий формирования и залегания.

Крупнообломочные грунты представляют собой обломки горных пород, состоящие обычно из групп минералов. С увеличением степени раздробленности горной породы и переносом продуктов выветривания частицы грунта преимущественно состоят из отдельных стойких минералов, например, кварца. Преобладание зерен кварца наиболее характерно для многих песчаных грунтов (барханные, дюнные и др.).

В глинистых грунтах минералогический состав особенно неоднороден, так как в них накапливаются в большем или меньшем количестве различные тонкодисперсные глинистые минералы.

Установлено, что большинство минералов, слагающих грунт, являются кристаллическими веществами. Многочисленный класс минералов представлен силикатами, которые составляют примерно 85% состава земной коры и наиболее характерны для различных грунтов, используемых в дорожном и аэродромном строительстве. Наибольшее распространение и значение имеют следующие минералы, относящиеся к классу силикатов.

*Полевые шпаты* характеризуются большой твердостью, спайностью и хорошо заметным стеклянным блеском. Различают два основных вида полевых шпатов: калиево-натриевые (ортоклазы) и кальциево-натриевые (плагиоклазы).

Полевые шпаты — сравнительно прочные минералы, они практически нерастворимы в воде. При выветривании этих минералов в условиях медленного выноса из них щелочных элементов могут образовываться гидрослюда.

*Роговая обманка и авгит* представляют собой сложные силикаты, содержащие в своем составе железо, кальций и магний.

*Слюда* бывают двух видов: биотит (черная слюда) и мусковит (белая слюда). Слюда относится к сложным алюмосиликатам, в состав которых, помимо других элементов, входят железо, магний и калий. Эти минералы характеризуются совершенной спайностью, небольшой твердостью и относительно малой стойкостью в отношении воздействия различных факторов выветривания.

Во многих грунтах, особенно в условиях IV и V дорожно-климатических зон, часто встречается минерал вторичного происхождения — кальцит.

*Кальцит* (известковый шпат) относится к классу карбонатов. Твердость его небольшая (3).

В больших скоплениях кальцит образует при определенных условиях горные породы — кристаллические известняки и мрамор. Кальцит легко распознается по вскипанию при действии 10%-ной HCl в результате выделения углекислоты.

*Доломит*, представляющий собой двойную соль кальция и магния, по химическому составу стоит близко к кальциту.

Весьма широко распространен в природе и в грунтах, используемых в дорожном строительстве,

Минерал кварц. *Кварц* представляет собой двуокись кремния ( $\text{SiO}_2$ ) и относится к классу окислов. Кварц — один из главных и наиболее прочных минералов магматических пород (твердость его по шкале Мооса равна 7). В метаморфических породах (например, кварцитах) и в рыхлых обломочных (кварцевых песках) содержание этого минерала доходит почти до 100%. В химическом и физическом отношении кварц весьма устойчивый минерал.

*Бурый железняк*, или лимонит ( $2\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ), — минерал вторичного происхождения, буровато-желтого или красно-бурого цвета, характеризуется различной твердостью (1—5). Он образуется путем разложения магнитного железняка или же выпадения из грунтовых вод в местах выхода их на дневную поверхность отложений, называемых болотной рудой; распространен в природе в виде самостоятельных скоплений примесей, пленок и примазок на поверхности отдельных зерен кварца, полевых шпатов или обломков различных пород. Присутствие лимонита придает характерную красновато-бурую или желтую окраску содержащим его грунтам.

*Пирит*, или серный колчедан ( $\text{FeS}_2$ ), — минерал, относящийся к классу сульфидов. Он кристаллизуется в виде кубиков различных размеров. Цвет его золотисто-желтый, блеск металлический, твердость 6,6. При действии кислорода воздуха и воды пирит выветривается с образованием серной кислоты.

Грунты, содержащие пирит в количестве более 1%, малопригодны или непригодны для укрепления портландцементом или другими видами цемента.

*Гипс* ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) является кристаллическим минералом белого или серого цвета и относится к классу сульфатов. Твердость его небольшая (2), блеск стеклянный. Гипс характеризуется заметной растворимостью (2—7 г/л). Кристаллическая или скрыто-кристаллическая безводная разновидность гипса — ангидрит ( $\text{CaSO}_4$ ) характеризуется несколько большей твердостью, чем гипс (3,0—3,5). Гипс в большем или меньшем количестве часто встречается в грунтах, залегающих в IV или V дорожно-климатических зонах.

При значительной степени дисперсности грунта, например, в супесях, суглинках и глинах среди частиц размером менее 0,005 мм преобладают вторичные слоистые алюмосиликаты (или ферросиликаты), представляющие собой тонкодисперсные минералы, называемые глинистыми минералами.

*Глинистые минералы* — продукт химического изменения первичных минералов (полевых шпатов, гидрослюд и др.). Им присущи большая степень дисперсности, значительная гидрофильность и как следствие этого большое набухание в воде.

В зависимости от содержания и состава глинистых минералов грунты становятся пластичными и липкими при определенной степени их увлажнения, проявляют связность в сухом состоянии, увеличивается в значительной степени их обменная и водоудерживающая способность и др.

Наличие указанных минералов существенно влияет на степень укрепления грунтов и формированиями структурно-механических свойств.

Для большинства глинистых минералов характерен ряд общих специфических черт: они встречаются в виде очень мелких кристаллов, размер которых не превышает нескольких микрометров и измеряется долями микрометра; кристаллы этих минералов имеют слюдоподобную, т. е. пластин-

чатую (реже игольчатую) форму; глинистые минералы обладают хорошо выраженной поглотительной (обменной) способностью; в составе этих минералов всегда присутствует химически связанная вода, которая выделяется при температуре в несколько сотен градусов. Эта температура у разных глинистых минералов различная, и поэтому ее определение является одним из методов их распознавания.

Поскольку для указанного типа минералов характерно слоистое строение, их называют слоистыми алюмосиликатами. Они представляют собой сочетание наложенных друг на друга тетраэдрических и октаэдрических слоев. В зависимости от числа этих слоев, объединенных в элементарные пакеты, различают двух-, трех- и четырехслойные минералы. Десять—двадцать элементарных пакетов образуют кристаллическую пластинку или чешуйку. Из таких пластинок, чешуек или другой формы частиц и состоит обычно масса различных глин.

Размеры пластинок или другой формы частиц редко превосходят 10 мкм, обычно составляют 1 мкм и менее.

Многочисленные глинистые минералы (называемые иногда коллоидно-дисперсными) по совокупности признаков разделяют на три основные группы: каолинит, монтмориллонит и гидрослюды.

*Каолинит*—относительно стойкий минерал, содержащийся во многих глинистых грунтах. Это простейший глинистый минерал кристаллического строения, состоящий из одного тетраэдрического и одного октаэдрического слоев. Соседние элементарные пакеты расположены таким образом, что атомы кислорода одного пакета и гидроксильные группы соседнего сближены попарно и между ними возникает прочная водородная связь —О—ОН. Поэтому у пластинок каолинита плохо выражена спайность. При увлажнении подвижность кристаллической решетки не наблюдается ввиду ее жесткости. Каолинит так же, как и галлуазит, входящий в эту же группу минералов, обладает небольшой набухаемостью при увлажнении водой и ему

свойственна малая обменная способность. Обмен катионов происходит по внешним граням кристаллов (экстрамицеллярный обмен).

*Монтмориллонит* — типичный трехслойный глинистый минерал. Элементарный пакет монтмориллонита состоит из двух внешних тетраэдрических слоев, между которыми расположен октаэдрический слой. Вершины тетраэдров так же, как и у каолинита, совмещены с вершинами октаэдров. Эти общие вершины состоят из атомов кислорода.

Связь между соседними элементарными пакетами слабая, в силу чего в межпакетное пространство может проникать вода. Этот минерал характеризуется высокой гидрофильностью. Кристаллическая решетка монтмориллонита при увлажнении приобретает подвижность и расширяется. Кроме молекул воды, в межпакетном пространстве содержатся катионы, способные к обмену. Физико-химическая обменная способность монтмориллонита очень большая и достигает 80—100 мг/экв и более на 100 г грунта. Обмен катионов у этих минералов происходит как по внешним граням кристаллов, так и в межпакетном пространстве кристаллических решеток (интрамицеллярный обмен). Поэтому физико-химический обмен катионов протекает очень медленно.

В отличие от каолинита монтмориллонит характеризуется более высокой дисперсностью. Размеры минералов монтмориллонита крайне незначительные и, как правило, не превышают 1 мкм. Наличие в грунтах большого количества монтмориллонита (например, в солонцах) придает им при увлажнении чрезмерную липкость, большую пластичность, сильное набухание, быструю и большую потерю прочности.

*Гидрослюды* (иллит и др.) — это трехслойные глинистые минералы, элементарные пакеты которых во многих случаях построены так же, как и у монтмориллонита. Межпакетная вода в иллитах и подобных им минералах обычно отсутствует, так как ионы калия прочно связывают пакеты между



собой. Эта группа минералов отличается большой изменчивостью своего химического состава.

Минералы группы гидрослюд по своим свойствам занимают промежуточное положение между каолинитом и монтмориллонитом.

Глинистые минералы образуются в природе различными путями. Наиболее частым является образование их из первичных слюд (например, мусковита, биотита и флогопита), входящих в состав магматических пород и подверженных процессам выветривания. Другой путь образования глинистых минералов—синтез их из продуктов распада первичных минералов типа полевых шпатов, амфиболов и др.

Щелочная среда и высокая концентрация оснований способствуют образованию минералов типа монтмориллонита, а кислая среда и малая концентрация оснований — типа каолинита.

## **1.5 Основные принципы укрепления грунтов и других местных материалов**

Процессы, происходящие при укреплении грунтов различными вяжущими материалами и другими реагентами, весьма разнообразны и включают:

*химические процессы* — гидратация цементных зерен, твердение продуктов гидратации и их новообразований, возникающих при взаимодействии с частицами грунта и, особенно, тонкодисперсной его частью; полимеризация и поликонденсация синтетических веществ; химическое взаимодействие с различными другими активными реагентами;

*физико-химические процессы* — обменное поглощение отдельных составных частей продуктов гидратации цемента (например,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и др.) тонкодисперсной частью грунта или поглощение других катионоактивных или анионоактивных веществ. При этом может иметь место молекулярная сорбция веществ из растворов на поверхности раздела фаз, а

также необратимая коагуляция глинистых и коллоидных веществ, их микроагрегирование и прочное цементирование;

*физические и механические процессы* — тонкое размельчение грунтовых агрегатов, точное дозирование вяжущих и других веществ, тесное и равномерное их объединение с грунтом, оптимальное увлажнение смеси и уплотнение ее до максимальной плотности с последующим длительным обеспечением требуемого режима твердения готового слоя укрепленного грунта. Указанные выше разнообразные и сложные процессы находятся в тесной взаимосвязи.

Под укреплением грунтов следует понимать весь комплекс коренных качественных воздействий на грунт, включающих: внесение вяжущих веществ и других реагентов в оптимальных дозировках и соотношениях, выполнение в установленном порядке всех технологических операций в заданном оптимальном режиме.

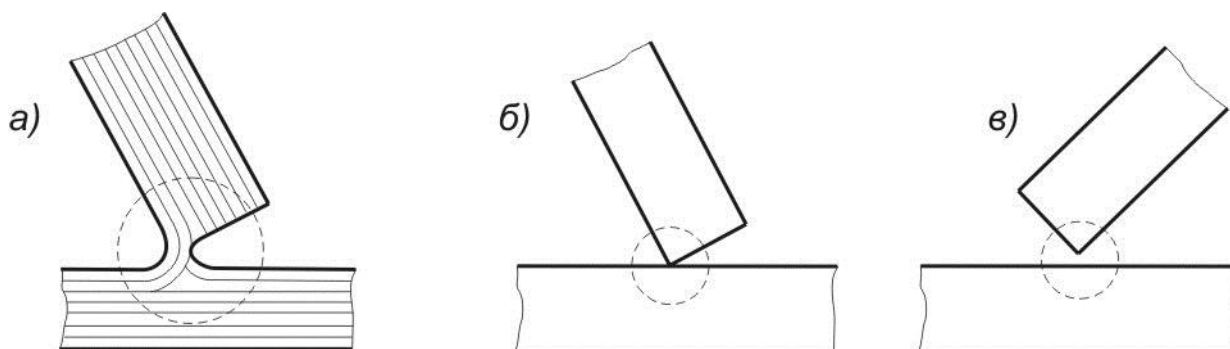


Рисунок 1 – Типы контактов

*а* — кристаллизационный или конденсационный срастания или спекания; *б* — псевдоконденсационный «точечный»; *в* — коагуляционный (с тонкой равновесной прослойкой дисперсионной среды)

В результате указанных воздействий укрепленный слой грунта должен приобретать требуемые прочность, монолитность и морозостойкость и сохранять их длительное время (20—30 лет) в сухом и во влажном состояниях.

В настоящее время разработаны и широко применяются на практике большое количество разнообразных и эффективных методов укрепления грунтов и отходов промышленности.

При разработке любых методов укрепления грунтов (природных или искусственных) в качестве основной задачи всегда является получение нового строительного материала с заданными структурно-механическими свойствами. Огромную роль при этом играет целенаправленное регулирование процессов, определяющих формирование структуры и свойств материала.

Принято различать три типа пространственных структур дисперсных систем (материалов): кристаллизационные, конденсационные и коагуляционные.

*Кристаллизационные структуры* являются наиболее прочными. Они возникают в результате сращивания кристалликов новой твердой фазы, возникающей из перенасыщенного раствора, например, при гидратационном твердении минеральных вяжущих материалов. Кристаллизационные структуры характерны тем, что они вначале развиваются на основе коагуляционных структур путем выкристаллизовывания из растворов вновь образованных гидратов, срастающихся в прочный монолит в процессе своего роста и упрочняющихся с увеличением времени их твердения (рис. 1, а).

*Конденсационные структуры* характеризуются тем, что возникают при действии наибольших сил сцепления — химических. Эти структуры отличаются высокой прочностью, хрупкостью, упругостью, не способны к остаточным деформациям и характеризуются полным отсутствием тиксотропных свойств (рис. 1, б).

*Коагуляционные структуры* характеризуются тем, что частицы дисперсной фазы образуют беспорядочную пространственную сетку. Возникновение отдельных коагуляционных связей (контактов сцепления), происходящее под влиянием относительно слабых вандерваальсовых сил,

осуществляется через тонкую прослойку жидкой фазы — дисперсионной среды. Это определяет особенности и свойства пространственных структур такого типа.

Коагуляционные структуры отличаются от структур других типов следующими свойствами: относительно малой прочностью; предельной тиксотропностью (полной обратимостью разрушения с увеличением температуры или влажности); ярко выраженной пластичностью и способностью к ползучести; высокой эластичностью (рис. 1, в).

Перечисленные три типа пространственных структур охватывают огромный круг самых разнообразных по составу и свойствам дисперсных тел и в общем виде они правильно отражают основные признаки их структуры. Однако такое схематическое деление в настоящее время является недостаточным. Назрела необходимость в более точной конкретизации и детализации типов пространственных структур с разделением их на виды и разновидности, с учетом специфических особенностей работы того или иного материала в конкретных условиях.

Такое более дробное деление структур необходимо и потому, что во многих случаях укрепленные грунты и другие местные материалы характеризуются структурами смешанного характера.

Наиболее важные особенности рассмотренных выше трех типов структур должны быть дополнены следующими требованиями, учитывающими условия формирования структуры и работу укрепленных грунтов в конструктивных слоях дорожных одежд.

При любом типе структуры укрепленные грунты, применяемые для устройства конструктивных слоев дорожных и аэродромных одежд, обязательно должны отвечать установленным требованиям в отношении их прочности, монолитности, водостойкости, морозостойкости и других свойств.

Тип структуры укрепленного грунта в основном зависит от структуры и свойств вносимого в грунт вяжущего материала. Именно вяжущий материал предопределяет качественные признаки того или иного типа структуры. Вносимые же при укреплении грунта добавки других веществ (помимо вяжущего материала), а также свойства и состав укрепляемого грунта способны вызывать лишь количественные изменения в свойствах и степени выраженности типа структуры создаваемого материала.

В настоящее время при укреплении природных и искусственных грунтов широко применяют разнообразные комплексные методы, основанные на внесении двух вяжущих материалов или вяжущего материала и других активных веществ, обеспечивающих более высокие качества укрепленного грунта (прочность, морозостойкость и деформативность).

В результате многосторонних и многолетних исследований созданы материалы, главной особенностью которых являются оптимальное сочетание положительных качеств двух типов пространственных структур, их тесное переплетение и взаимопроникание. Отсюда возникла необходимость в выделении структур смешанного типа: кристаллизационно-коагуляционной, конденсационно-коагуляционной, коагуляционно-кристаллизационной, коагуляционно-конденсационной.

Результаты исследований по изучению типов структур применительно к задачам по укреплению грунтов и разработке эффективных способов направленного регулирования процессов структурообразования показывают, что глинистые виды грунтов до их обработки вяжущими материалами также имеют характерную для них структуру. Они характеризуются коагуляционной структурой во влажном состоянии и конденсационной, а иногда и кристаллизационно-конденсационной (засоленные грунты) в сухом состоянии. Это водонеустойчивые виды структур, характеризующиеся малой прочностью, поэтому они всегда подлежат коренному и качественному преобразованию.

В таблице 3 приведены классификация методов укрепления грунтов и область их применения с учетом типа и вида приобретаемой укрепленным грунтом устойчивой структуры. В этой классификации рассматриваются лишь те вяжущие материалы и добавки, а также виды и разновидности грунтов, которые получили наиболее широкое практическое применение.

Таблица 3 – Классификация методов укрепления грунта

| Тип структуры   | Методы укрепления                    | Вяжущие материалы и другие вещества, применяемые для укрепления  | Грунты, рекомендуемые для укрепления  | Характеристики основных свойств укрепленных грунтов  | Область применения   |
|-----------------|--------------------------------------|--|---|--|--|
| Кристаллическая | I. Минеральными вяжущими материалами | Портландцементы  | Крупнообломочные грунты (песчано-гравелистые, песчано-щебенистые), пески разной крупности, супеси, суглинки, улучшенные и не улучшенные гранулометрическими добавками | Высокая прочность при сжатии и изгибе водо- и морозостойкость при соблюдении оптимальных дозировок и условий структурообразования        | Основания под цементно- и асфальтобетонные покрытия или под усовершенствованные покрытия, покрытия облегченного типа с устройством слоя износа |
|                 |                                      | Шлакопортландцементы, пуццолановые цементы и цементы других видов (молотые гранулированные доменные шлаки и др.) | То же   | Меньшая прочность и морозостойкость, повышенная хрупкость и истираемость   | То же, в IV и V дорожно-климатических зонах, а также в нижних слоях оснований в III—V зонах  |
|                 |                                      | Известь молотая негашеная или гашеная (гидратная), известь молотая негашеная гидрофобная                         | Глины, суглинки или супеси. Крупнообломочные грунты оптимального гранулометрического состава; пески при добавке золы уноса или золошлаковых смесей                    | Механическая прочность меньше чем при укреплении цементом. При добавке одной извести недостаточная морозостойкость, повышенная хрупкость | То же  |

Продолжение таблицы 3

|                 |   |  |   |  |   |
|-----------------|---|--|---|--|---|
|                 |   | Активные золы уноса горючих сланцев и бурых углей сухого отбора и удаления   | Крупнообломочные грунты оптимального и неоптимального составов, пески и супеси  | Прочность и другие свойства могут быть близкими к прочности грунтов, укрепленных цементом  | Основания под цементно- или асфальтобетонные покрытия, под усовершенствованные покрытия облегченного типа с устройством слоя износа   |
|                 |   | Техническая фосфорная кислота, обычный или двойной суперфосфат, трициптит  | Глины или суглинки некарбонатные или слабокарбонатные   | Удовлетворительная прочность и водостойкость   | Нижние и верхние слои оснований на дорогах IV—V категорий во II и III дорожно-климатических зонах   |
| Конденсационная | II. Синтетическими полимерами           | Карбамидные, фуруроланилиновые, акриловые и другие синтетические высокомолекулярные (полимерные) смолы. Сульфополимерные или лигнинопротеиновые вещества с добавками хромовых соединений или других окислителей, или поверхностно-активных веществ | Пески различного состава, супеси, легкие и тяжелые суглинки   | Высокая прочность, повышенная водо- и морозостойкость, большая хрупкость   | Основания или покрытия облегченного типа в различных природных условиях с учетом свойств применяемых полимерных веществ. Методы разрабатываются на перспективу с применением их в особых условиях |
| Коагуляционная  | III. Органическими вяжущими материалами | Битумные эмульсии и пасты, разжиженные вязкие битумы   | Крупнообломочные грунты (песчаногравелистые, песчанощебенистые) оптимального гранулометрического состава; разнородные и пылеватые пески, супеси и легкие суглинки | Упруго-вязкопластичные свойства. Хорошие водо- и морозостойкость   | Основания под цементобетонные и усовершенствованные облегченные покрытия, или как покрытия облегченного типа с устройством слоя износа во II—V дорожно-климатических зонах                        |
|                 |   | Жидкие битумы медленно- и среднегустеющие, каменноугольные дегти   | Крупнообломочные грунты оптимального состава; пылеватые пески, супеси легкие и тяжелые; суглинки улучшенные и не улуч-  | Упруго-вязкопластичные свойства, но водо- и теплоустойчивость хуже, чем при укреплении битумными эмульсиями. Прочность изменяется в зависимости от | Основания под усовершенствованные облегченные покрытия или как облегченного типа покрытия с устройством слоя износа в IV—V дорожно-климатических зонах  |

Продолжение таблицы 3

|  |   |  | шенные гранулометрическими добавками  | свойств грунта, состава и вязкости вяжущего материала   |   |
|--|---|--|---|---|---|
| Кристаллизационная или кристаллизационно-конденсационная | IV. Комплексное укрепление минеральными вяжущими материалами и добавками других веществ | <p>Портландцементы или другие виды цементов плюс добавки извести или NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> либо зол уноса, или золошлаковых смесей. Добавка зол уноса или золошлаковых смесей может сочетаться с добавкой перечисленных выше и других солей. Портландцементы плюс добавки высокомолекулярных поверхностно-активных веществ (полиакриламид, кремнийорганические и другие соединения)</p> | Крупнообломочные грунты, пески, супеси, глины   | Повышенная прочность и морозостойкость и другие особенности по сравнению с обычными цементогрунтами                       | Основания под цементно- и асфальтобетонные покрытия, а также под облегченные усовершенствованные покрытия, или как покрытия облегченного типа с устройством слоя износа в II—V дорожно-климатических зонах        |
|  |   | <p>Известь молотая негашеная или гашеная (гидратная), или молотая негашеная гидрофобная плюс добавки NaOH, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> и других солей. Активные золы уноса без добавок или с добавками указанных выше солей. Известь различного вида плюс добавки высокомолекулярных поверхностно-активных веществ</p>   | Супеси, суглинки, глины. Пески при добавке зол уноса, золошлаковых смесей или молотого гранулированного шлака | Повышенные прочность и морозостойкость и другие особенности по сравнению с грунтами, укрепленными добавками одной извести | Основания под цементобетонные и асфальтобетонные покрытия, а также под облегченные усовершенствованные покрытия, или как покрытия облегченного типа с устройством слоя износа в III—V дорожно-климатических зонах |
| Кристаллизационно-коагуляционная                         | V. Комплексное укрепление двумя вяжущими материалами                                    | Портландцемент совместно с битумными эмульсиями  | Крупнообломочные грунты, пески, супеси, легкие суглинки   | Высокая морозостойкость и прочность, повышенная деформативная способность по сравнению с цементогрунтами                  | Основания под асфальтобетонные покрытия или покрытия облегченного типа  |
| Конденсационно-коагуляционная                            |   | Карбамидные или другие смолы совместно с битумной эмульсией либо с нефтью  | То же   | То же   | То же   |



### Окончание таблицы 3

| Коагуляци<br>онно-   |                                | Битумные эмульсии<br>или жидкие битумы   | Крупнообло<br>мочные   | Повышенная<br>водо- и   | Основания под це-<br>ментобетонные  |
|--|--------------------------------|--|--|---|---|
| кристалли<br>зацион<br>ная   |                                | плюс добавки цемен-<br>та, извести или по-<br>верхностно-активных<br>веществ или извести<br>и ПАВ                                | грунты,<br>пески, разно-<br>зернистые<br>супеси, су-<br>глинки   | морозостойкост<br>ь и<br>теплоустойчиво<br>сть по<br>сравнению с<br>обычными<br>битумогрунтам<br>и  | покрытия, под<br>облегченные<br>усовершенст-<br>вованные<br>покрытия или<br>покрытия облег-<br>ченного типа с<br>устройством слоя<br>износа в III—V<br>дорожно-<br>климатических<br>зонах |
| Криптокр<br>истал<br>лизационн<br>ая                                   | VI.<br>Термиче-<br>ское        | Электрическая<br>энергия, жидкое или<br>газообразное топливо   | Суглинки,<br>глины не-<br>карбонатные,<br>или<br>слабокарбона<br>тные  | Высокая<br>механическая<br>прочность,<br>водо- и<br>морозостойкост<br>ь (при<br>клинкерном об-<br>жиге).<br>Коренное изме-<br>нение свойств и<br>химико-<br>минералогичес<br>кого состава<br>грунта | Основания под<br>усо-<br>вершенствованны<br>е капитальные и<br>облегченные типы<br>покрытий.<br>Материал в виде<br>прочного щебня<br>или гравия   |
| Коагуляци<br>онная или<br>коагуляци<br>онно-<br>кристалли<br>зационная | VII.<br>Электро-<br>химическое | Электрический по-<br>стоянный ток при<br>длительном или<br>знакопеременном<br>воздействии <sup>^</sup> -<br>добавки электролитов | Суглинки,<br>глины.<br>Наличие<br>легкораст-<br>воримых<br>солей или<br>карбонатов в<br>грунте<br>усиливает<br>электро-<br>химическое<br>воздействие<br>тока | Уменьшение<br>природной<br>влажности<br>грунта,<br>относительное<br>повышение его<br>связности и<br>устойчивости  | Откосы выемок<br>или насыпей,<br>укрепление<br>верхней части<br>земляного полотна   |

Исследованиями установлено, что результаты укрепления грунта и степень коренного изменения его первоначальных свойств с приданием укрепленным грунтам требуемых свойств (необходимой прочности, водостойкости, морозостойкости, деформативности и др.) определяются особенностями постоянно действующих и временно действующих факторов.

К *постоянно действующим факторам* следует отнести вещественный состав укрепляемых грунтов и применяемых для этих целей вяжущих материалов и других веществ. Вещественный состав предопределяет собой

минералогический и химический составы указанных компонентов смеси. При этом степень дисперсности, т. е. гранулометрический состав грунта или твердых вяжущих и других веществ, также играет весьма важную роль.

В зависимости от вещественного состава грунта и его состояния, а также особенностей, применяемых для укрепления вяжущих материалов формируются новые свойства и характер структуры укрепленных грунтов.

Таким образом, в результате взаимного влияния постоянно действующих факторов происходят коренные качественные изменения в укрепляемом грунте и создаются такие новые свойства, которые обеспечивают требуемую прочность и устойчивость дорожных оснований или облегченного типа покрытий, устраиваемых из этих материалов.

К *временно действующим факторам* необходимо отнести все технологические операции, выполняемые при обработке грунта, укладке и уплотнении готовой смеси, а также способы ухода за уплотненным слоем из укрепленного грунта.

Следует отметить, что, хотя такие технологические операции, как размельчение, равномерное перемешивание, дозирование вяжущих, уплотнение готовой смеси выполняются в относительно небольшой промежуток времени, а некоторые операции выполняются, почти одновременно (в смесительных установках), их последующее влияние и роль в конструктивном слое приближаются к постоянно действующим факторам. Например, неравномерное распределение вяжущих веществ в смеси или недостаточное уплотнение готового слоя из укрепленного грунта, плохой уход за ним резко снижают эффективность действия вяжущих материалов и других веществ.

Наоборот, равномерное перемешивание и точное дозирование вяжущих и других веществ, максимальное уплотнение смеси и выполнение других операций с высоким их качеством обеспечивают требуемые прочность и другие свойства укрепленного грунта.

Постоянно действующие факторы при укреплении грунтов и других материалов определяют собой характер, направленность и интенсивность протекания химических и физико-химических процессов как в микрообъемах вяжущих веществ, так и в зоне их контакта с поверхностью частиц грунта или их макро- и микроагрегатов. От характера и степени выраженности этих процессов во многом зависят монолитность и прочность укрепляемого грунта.

Временно действующие (технологические) факторы обуславливают в обрабатываемом грунте протекание физических количественных изменений. В том случае, когда заданная технология работ выполняется современными средствами механизации на высоком техническом уровне и с точным соблюдением времени, отводимым на каждую технологическую операцию, — временно действующие факторы, вызывающие количественные изменения в свойствах укрепляемого грунта, резко улучшают также и качественные показатели получаемого материала, формирующиеся под воздействием постоянно действующих факторов.

Таким образом, создание нового дорожно-строительного материала, получаемого на основе использования местных грунтов или других дешевых дискретных отходов промышленности, является единым взаимосвязанным процессом. Поэтому в конечном своем действии указанные выше факторы важны в равной степени, поскольку они дополняют друг друга.

В настоящее время разработаны и внедрены в практику дорожного строительства варианты укрепления грунтов различного состава и генезиса с применением неорганических или органических вяжущих материалов и других веществ. Но это не означает, что любые виды грунтов и во всех случаях могут подвергаться эффективному укреплению любыми вяжущими материалами. Разработаны определенные требования, способы подбора составов смесей и правила производства, лишь при точном соблюдении

которых обеспечивается получение должного технического и экономического эффекта при устройстве дорожных и аэродромных одежд.

Многие свойства грунта, определяющие его пригодность для укрепления, зависят от гранулометрического состава. Если это необходимо, экономически оправдано и выгодно, гранулометрический состав обрабатываемого грунта может быть существенно изменен и улучшен путем внесения тех или иных гранулометрических добавок с приданием грунту оптимального состава.

### **1.6 Укрепление грунтов цементом**

Процессы твердения гидравлических вяжущих веществ подробно изучены многими исследователями. При этом наиболее детально изучены составные части и продукты гидратации портландцемента.

Структурно-механические свойства цементного камня в разные сроки его твердения сильно зависят от его фазового состава. Из этого следует, что путем изменения последнего с помощью тех или иных факторов можно существенно регулировать свойства цементного камня, улучшая их в желательном направлении при изготовлении бетонов, строительных растворов или укреплении цементом различных грунтов.

Портландцементный клинкер до его помола и гидратации представляет собой сплав многих минералов. Процесс твердения портландцемента в основном зависит от гидратации следующих клинкерных минералов: трехкальциевого силиката, представляющего собой кальциевую соль ортокремниевой кислоты ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ). Это минерал алит, условно обозначаемый  $\text{C}_3\text{S}$ ; двухкальциевого силиката — ортосиликат кальция ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ). Минерал белит  $\text{C}_2\text{S}$ ; трехкальциевого алюмината — кальциевая соль алюминиевой кислоты ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ), условно обозначаемая

$C_3A$ ; четырехкальциевого алюмоферрита — ферритовая фаза ( $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ ). Минерал браунмиллерит  $C_4AF$ .

В составе цементного клинкера имеются и другие минералы, играющие относительно меньшую роль в процессах гидролиза и твердения.

В процессе гидратации и твердения клинкерные минералы оказывают значительное влияние друг на друга, т. е. этот процесс является взаимосвязанным и весьма сложным.

При гидратации трехкальциевого силиката образуются тоберморитоподобные гидросиликаты кальция, в которых отношение  $CaO : SiO_2$  зависит от концентрации в жидкой фазе гидрата окиси кальция.

При твердении  $C_3S$  в условиях, когда в жидкой фазе концентрация  $Ca(OH)_2$  находится в пределах 0,05—1,1 г  $CaO$  на 1 л, образуются низкоосновные гидросиликаты типа  $CaO_{(0,8-1,5)} \cdot SiO_2 \cdot H_2O_{(2,5-1)}$ . При повышении концентрации  $Ca(OH)_2$  до 1,25 г  $CaO$  на 1 л (пересыщенные растворы) образуются тоберморитоподобные гидросиликаты кальция более основные. В них отношение  $CaO/SiO_2$  находится в пределах 1,5—2,0.

Двухкальциевый силикат  $C_2S$  при нормальной температуре в процессе гидратации переходит в низкоосновный тоберморитоподобный гидросиликат кальция  $CaO_{(0,8-1,5)} \cdot SiO_2 \cdot H_2O_{(2,5-1)}$ . Установлены повышенное содержание извести в гидросиликате кальция в растворах, богатых известью  $Ca(OH)_2$ , и снижение содержания извести в растворах с малой концентрацией извести.

В том случае, когда поры цементогрунта заполнены раствором, содержащим очень малое количество извести (или вовсе ее не содержащим), происходит извлечение из гидратирующегося цемента вследствие физико-химического (обменного) поглощения катионов кальция или молекул  $Ca(OH)_2$ , тонкодисперсной частью грунта. Такое нарушение нормального хода процесса гидролиза цемента наблюдается, например, при укреплении кислых глинистых грунтов (рН менее 6,5) и приводит к формированию кристаллизационной структуры цементогрунта пониженной прочности, водо-

и морозостойкости, поскольку происходит предельное физико-химическое поглощение катионов кальция поверхностью грунтовых частиц.

При небольшой добавке в кислые грунты молотой негашеной СаО или гидратной Са(ОН)<sub>2</sub> извести происходит насыщение раствора, заполняющего поры грунта катионами кальция. При этом в порах грунта создается щелочная среда (рН равно 11 —12), процесс гидратации цемента и дальнейшего твердения цементного каркаса начинает протекать в условиях, наиболее благоприятных для твердения гидравлического вяжущего.

Главными продуктами гидратации цемента являются различного состава гидратированные силикаты, имеющие разное соотношение С<sub>3</sub>С и С<sub>2</sub>С, гидратированные алюминаты и гидроокись кальция.

По данным Х. Ф. Тейлора, силикатные и алюминатные фазы перемежаются друг с другом и, по всей вероятности, ни одна из этих фаз не является полностью кристаллической. Гидрат окиси кальция также тесно перемешан с другими гидратированными фазами и лишь частично может быть кристаллическим.

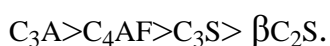
Продукты гидратации С<sub>3</sub>С в зависимости от концентрации извести в растворе и при условии достижения равновесия могут иметь следующий состав:

при концентрации меньше 0,08 г СаО/л наблюдается полное разложение С<sub>3</sub>С с переходом Са(ОН)<sub>2</sub> в раствор и выделением кремнегеля; при концентрации 0,08—1,12 г СаО/л образуются гидросиликаты кальция типа СSH (В), состав которых колеблется в пределах СаО<sub>(1,7-2,0)</sub>·SiO<sub>2(0,5-2,5)</sub>·Н<sub>2</sub>О; при гидратации цемента в насыщенных и пересыщенных растворах Са(ОН)<sub>2</sub> трехкальциевый силикат образует гидросиликат типа С<sub>2</sub>SH<sub>2</sub> и гидрат окиси кальция в твердой фазе. Состав гидросиликатов колеблется в пределах СаО<sub>(1,7-2,0)</sub>·SiO<sub>2(2-4)</sub>·Н<sub>2</sub>О.

Исследования микроструктуры портландцемента, проведенные Л. В. Гончаровой, показали, что образующиеся продукты в процессе гидратации проходят через различные стадии дисперсного состояния и превращаются из

молекул (менее 1 А) в частицы коллоидных размеров (<0,22 мкм) и больших размеров (0,2—1 мкм) кристаллических новообразований.

На основании дифрактометрических и электронно-микроскопических исследований клинкерные минералы по скорости их гидратации можно расположить в следующий ряд:



В последнее время в исследованиях, посвященных химии вяжущих материалов, процесс твердения портландцемента и других минеральных вяжущих веществ объясняют сложными химическими реакциями, результатом которых и является превращение этих веществ в камневидное тело.

А. А. Берлин, В. П. Парини, В. В. Коршак, Ю. С. Черкинский рассматривают силикатные цементы как минеральные пространственные полимеры с электростатическими связями.

В качестве сырья, используемого для получения портландцемента, широко используются глины, суглинки или глинистые сланцы при соответствующем их составе. Основные минералы, входящие в состав многих глин (каолинит, галлуазит, монтмориллонит, гидромусковит), представляют собой полиалюмосилоксаны, которые разнятся между собой по строению полимерной цепи.

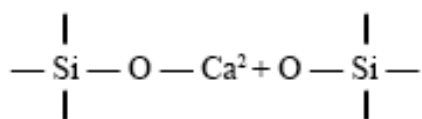
В создании прочного цементного камня большую роль играют гидросиликаты тоберморитового типа. Установлено, что тобермориты являются полимерными соединениями с более или менее упорядоченной структурой. Исследованиями Ю. М. Бутта и других установлено, что полимерные гидросиликаты обеспечивают большую прочность.

Изучение условий образования и строения силоксановых соединений, входящих в состав гидравлических цементов, показало, что в сложных превращениях силикатной составляющей портландцемента важную роль играет известь. На первой стадии синтеза клинкера известь участвует в

химической реакции с кремнекислородными соединениями. Она необходима для перевода полимерного силиката в мономерное состояние — в ортосиликат кальция. Присоединением же еще одной молекулы CaO к ортосиликату кальция достигается большая неустойчивость этого соединения, что и обуславливает повышение его активности.

В цементном камне имеются 2 основных вида ионов кальция (не считая соединений непрореагировавшего клинкера):

ионы кальция, хемосорбированные силоксаном



свободная известь в виде Ca(OH)<sub>2</sub>.

Излишняя свободная известь, выделяющаяся при затворении водой цемента, является как бы буфером, благодаря которому происходит восстановление полимерного гидросиликата при взаимодействии последнего с водой и удалении ионов кальция. С другой же стороны, свободную известь следует рассматривать как наполнитель, который в силу относительно хорошей растворимости не всегда благоприятно сказывается на свойствах цементного камня.

В целях связывания свободной извести, образующейся в процессе твердения портландцемента, применяют различные активные добавки (диатомиты, трепелы, туфы, обожженные глины, золы уноса, тонкомолотые шлаки). Как будет показано ниже, глинистые грунты различного состава и генезиса также следует рассматривать как природные активные добавки по отношению к продуктам гидратации цемента. При этом активность таких добавок грунта может играть как положительную, так и отрицательную роль в зависимости от химико-минералогического состава грунта и коллоидного состояния тонкодисперсной его части.

Активность неорганической добавки зависит от степени ее дисперсности, состава и, особенно, от содержания в ней относительно растворимой



кремнекислоты. Целым рядом исследований подтверждается тот факт, что теразновидности грунтов, которые характеризуются относительно большим содержанием растворимой (активной) кремнекислоты, показывают и более высокую прочность, и морозостойкость при укреплении их цементом. Такое увеличение прочности цементогрунта можно объяснить увеличением полимерных гидросиликатов кальция в составе цементогрунтового каркаса.

В познании механизма твердения цементов и таких дисперсных материалов, какими являются грунты, а также в создании эффективных методов направленного структурообразования при укреплении грунтов, большую роль сыграли работы акад. П. А. Ребиндера в области физико-химической механики дисперсных тел. Начальной стадией твердения является переход ионов из кристаллической решетки цементных минералов в водную среду и гидратация их в этой среде с последующей кристаллизацией из пересыщенного раствора нового устойчивого в этих условиях гидрата. Из таких новообразований и первичных частиц гидратированного вяжущего вещества до начала схватывания и при начальной стадии твердения возникает коагуляционная кратковременная структура, представляющая собой пространственную сетку, образующуюся путем беспорядочного сцепления мельчайших частиц дисперсной твердой фазы через тонкие прослойки жидкой дисперсионной среды. Прочность такой структуры сравнительно невелика, поскольку она обусловлена слабыми молекулярными силами сцепления.

Такой коагуляционной структуре свойственна тиксотропность, т. е. способность к обратимому восстановлению структуры после ее разрушения. Поэтому до начала схватывания прогидратировавшихся зерен цемента образовавшаяся коагуляционная структура может быть разрушена без ущерба в отношении прочности кристаллизационной структуры, образующейся в дальнейшем в процессе твердения цементогрунта или цементобетона.

Если же в кратковременный период коагуляционного структурообразования (исчисляемый несколькими десятками минут) разрушение этой структуры произойдет и до начала схватывания будет осуществлено вибрационное или вибрационно-статическое приложение нагрузки, вызывающее более плотную упаковку частиц, то при дальнейшем процессе твердения обеспечится повышенная прочность укрепленного грунта или цементобетона.

В процессе твердения цементогрунта в нем формируется каркас пространственной кристаллизационной структуры, характеризующейся прочностью, в десятки раз превышающей прочность коагуляционной структуры.

Гидросиликаты кальция в начальный период гидратации портландцемента возникают в небольшом количестве, но в силу своей большой дисперсности (удельная поверхность тоберморитоподобной фазы, примерно, в 1000 раз превышает удельную поверхность исходного цемента) они принимают участие в схватывании совместно с гидросульфатоалюминатом кальция.

Увеличение прочности цементогрунтового каркаса и, следовательно, прочности цементогрунта в целом с увеличением времени твердения вызывается в значительной мере обрастанием первоначально возникшего каркаса тоберморитоподобными гидросиликатами и образующимся одновременно с ними гидратом окиси кальция.

Микроскопические исследования подтверждают сказанное выше и показывают, что твердеющий цементный камень представляет собой весьма сложный конгломерат кристаллических и коллоидных (или микрокристаллических) гидратных новообразований, а также непрореагировавших еще с водой остатков цементных зерен, тонко-распределенной воды и воздуха.

В настоящее время есть основания утверждать, что при укреплении глинистых грунтов протекают такие процессы, которые в конечном счете при

определенных условиях приводят к самопроизвольному синтезу в массе обрабатываемого грунта комплексного вяжущего, образующего прочный каркас. В состав этого вяжущего входят гидратированные силикаты цемента, гидрат извести и алюмосиликатные и кремнекислые соединения, которые имеются в составе грунта.

Доказательством образования дополнительных цементирующих веществ при взаимодействии цемента и глинистых частиц является относительно заметная растворимость двуокиси кремния и глинозема, содержащихся в глинистой тонкодисперсной части грунта. Растворимость отдельных глинистых минералов не так хорошо выражена, как это наблюдается у некоторых химических соединений. Однако содержание различных примесей, степень кристаллизации минералов, тонкодисперсный гранулометрический состав и рН раствора, заполняющего поры грунта, могут являться теми факторами, которые оказывают влияние на растворимость двуокиси кремния и- глинозема.

Установлено, что в щелочной среде растворяется главным образом двуокись кремния, хотя при большом значении рН окружающая среда может воздействовать и на глинозем. Исследованиями К. В. Корренса установлено, что в дистиллированной воде в небольших количествах в раствор переходят  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  из монтмориллонита и каолинита.

И. Хашимото и М. Л. Джексон указывают на растворение примерно 3%  $\text{SiO}_2$  из каолинита, высушенного предварительно в термостате, и примерно 8%  $\text{SiO}_2$  из монтмориллонита при кипячении в 0,5 N растворе NaOH. Есть основания утверждать, что растворимость глинистых минералов повышается с уменьшением размера их частиц и снижением степени кристаллизации, поскольку это связано с увеличением удельной поверхности и снижением прочности (сопротивляемости) кристаллической структуры.

Глинистые минералы, имеющие трехслойную структуру (например, монтмориллонит), относительно более растворимы, чем минералы с

двухслойной структурой (например, каолинит), что объясняется большей удельной поверхностью трехслойных минералов и меньшим сопротивлением прониканию катионов в межслойные пространства раздвижной кристаллической решетки, свойственной таким минералам.

Большая катионообменная способность может привести к поглощению катионов (например,  $\text{Ca}^{2+}$ ) и выделению в раствор (в поровое пространство грунта) катионов водорода, что нарушит нормальный ход гидролиза цемента и образование прочных соединений.

Компоненты грунта, отличающиеся по составу и свойствам от глинистых минералов, в особенности тонкодисперсный кремнезем  $\text{SiO}_2$ , являются потенциальным источником образования вещества, цементирующего грунт. Такие компоненты могут играть очень важную роль в преобразовании свойств и укреплении глинистых фракций цементом.

Взаимодействие глинистых минералов с портландцементом и их влияние на прочность цементогрунта.

Минералогический состав грунта оказывает большое влияние на процессы гидратации и твердения прореагировавших зерен цемента и на формирование структурно-механических свойств цементогрунта. При этом такое влияние может играть как положительную, так и отрицательную роль на конечную прочность цементогрунта.

В зависимости от гранулометрического состава укрепляемых грунтов будет преобладать влияние минералогического состава грубодисперсных частиц (песчаных и гравийных) или тонкодисперсных (пылеватых и особенно глинистых).

При укреплении цементом крупнообломочных (гравийно-песчаных, щебенисто-песчаных) или песчаных грунтов решающее влияние будут оказывать такие минералы, как кварц, полевые шпаты, роговая обманка, кальцит, гипс, слюда, пирит и др. При укреплении глинистых разновидностей, особенно суглинков и глин, процессы твердения и

структурообразования будут предопределяться количеством и сочетанием тонкодисперсных глинистых минералов типа монтмориллонита, гидрослюды и каолинита, а также тонкодисперсного кварца и других минералов.

Подробное изучение влияния минералогического состава укрепляемых грунтов на кинетику твердения и на конечную прочность цементогрунта было проведено Л. В. Гончаровой. Представляют интерес опыты по сравнительному изучению влияния добавок портландцемента и чистого трехкальциевого силиката  $C_3S$  на кинетику твердения мономинеральных глин, резко отличающихся по своим свойствам и строению — каолинита и монтмориллонита (таблица 4).

Таблица 4 – Кинетика твердения мономинеральных глин

| Вязущее или состав смеси                                    | Предел прочности при сжатии образцов мономинеральных глин, укрепленных портландцементом $C_3S$ , кгс/см <sup>2</sup> , при времени твердения, сут |     |     |     |                  |
|---|---|-----|-----|-----|------------------|
|   | 1   | 7   | 28  | 90  | 1800<br>(3 года) |
| Портландцемент  | 239   | 423 | 627 | 675 | 680              |
| Трехкальциевый силикат $C_3S$                               | 25  | 45  | 67  | 201 | 227              |
| Каолинит (глуховецкая глина) + 25% $C_3S$                   | 40  | 58  | 115 | 137 | 241              |
| Каолинит (глуховецкая глина) + 25% портландцемента          | 32  | 49  | 59  | 91  | 150              |
| Монтмориллонит (аскангелевая глина) + +25% $C_3S$           | 12  | 22  | 32  | 34  | 31               |
| Монтмориллонит (аскангелевая глина) + +25% портландцемента  | 6   | 13  | 22  | 27  | 25               |
| Монтмориллонит (аскангелевая глина) + +50% $C_3S$           | 32  | 33  | 63  | 92  | 91               |
| Монтмориллонит (аскангелевая глина) + + 50% портландцемента | 15  | 29  | 39  | 50  | 43               |

Вязущие свойства портландцемента во все сроки твердения, и особенно в ранние сроки его твердения, во много раз превышают прочность образцов, приготовленных из чистого трехкальциевого силиката  $C_3S$ .

При укреплении же мономинеральных глин (каолинитовых и монтмориллонитовых) добавкой указанных выше вязущих в количестве 25%

по массе смеси прочность образцов этих глин становится существенно большей при добавке  $C_3S$ , а не портландцемента.

При этом с увеличением сроков твердения, и особенно через три года, прочность образцов укрепленной каолиновой глины значительно возрастает при добавках  $C_3S$ , а не портландцемента — в количестве 25% по массе.

При укреплении монтмориллонитовой глины добавкой  $C_3S$  или портландцемента в количестве 25% прочность с увеличением времени твердения возрастает лишь до 90-суточного срока. Через 3 года твердения намечается тенденция к снижению прочности образцов указанного состава по сравнению с прочностью образцов 90-суточного срока твердения.

Во все сроки твердения прочность образцов укрепленной каолиновой глины в несколько раз превышает прочность образцов укрепленной монтмориллонитовой глины как при добавке  $C_3S$ , так и при добавке портландцемента.

Указанное можно объяснить специфическими особенностями монтмориллонитовой глины: подвижностью кристаллической решетки, огромной удельной поверхностью, большой обменной способностью и другими свойствами.

Даже при добавке вяжущего ( $C_3S$  или портландцемента) в количестве 50% прочность образцов монтмориллонитовой глины во все сроки твердения достигает значительно меньших величин, чем у образцов каолиновой глины, укрепленной 25% вяжущего.

Существенный интерес представляют исследования механизма твердения и процессов взаимодействия глинистых частиц с гидратированными продуктами цемента, выполненные А. Герцогом и Дж. Митчеллом в США. Экспериментальные исследования выполнялись на уплотненных образцах мономинеральных глин. Укреплению подвергали каолиновую и монтмориллонитовые глины, обладающие весьма различными свойствами.

Каолинистая глина имела  $pH = 5,5$ ; емкость обмена составляла 5 мг/экв на 100 г, в том числе поглощенного кальция содержалось 3,5 мг/экв на 100 г. Монтмориллонитовая глина имела  $pH = 8,6$ ; емкость обмена составляла 85 мг/экв на 100 г, в том числе поглощенного натрия содержалось 70 мг/экв, поглощенного кальция — 8 мг/экв. В качестве вяжущего материала использовали портландцемент, содержащий около 50% трехкальциевого силиката, и чистый синтетический трехкальциевый силикат  $C_2S$ .

Уплотненные цилиндрические образцы при относительной влажности 100% выдерживали перед определением предела прочности при сжатии в течение 1, 7, 28 и 84 сут. Образцы испытывали после суточного водонасыщения в воде. Для ускорения гидратации и гидролиза цемента образцы в указанные выше сроки твердения выдерживали при температуре  $60^{\circ}C$ .

Для испытаний было приготовлено восемь серий образцов: четыре с каолинитом и четыре с монтмориллонитом. Каждый тип глины укрепляли портландцементом или чистым трехкальциевым силикатом.

Добавка вяжущего применялась в количестве 15 и 30% по массе сухой глины.

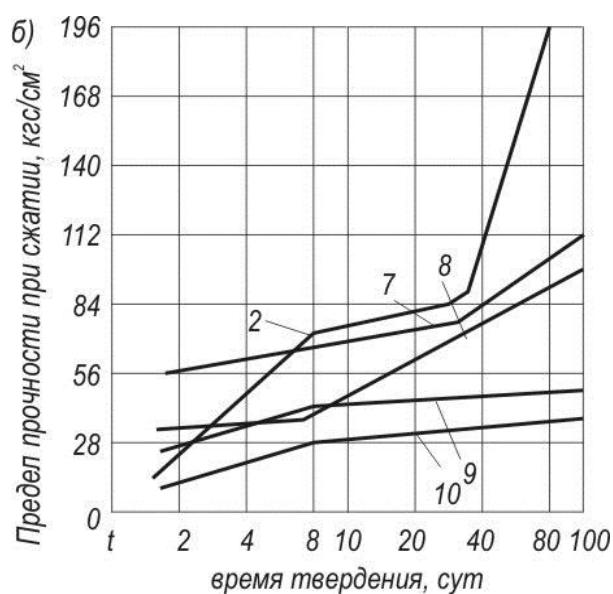
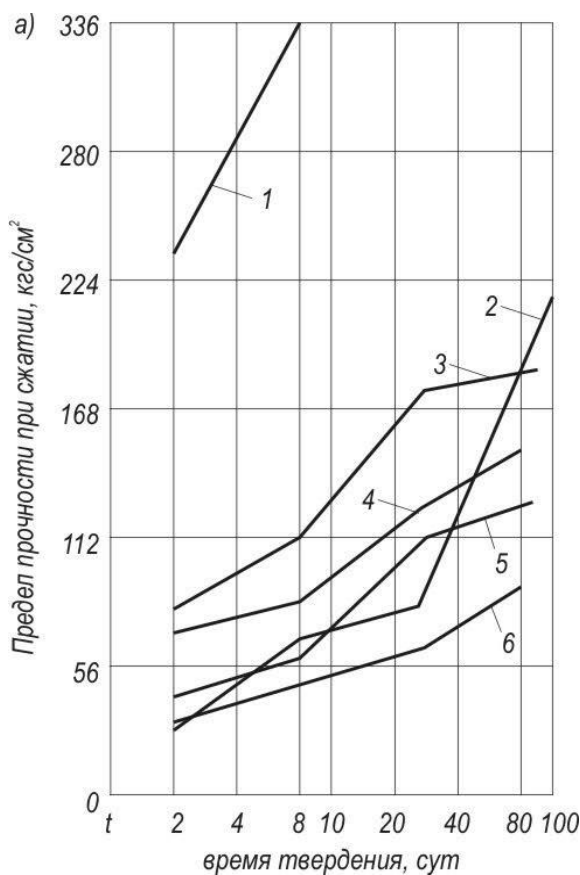


Рисунок 2 – Зависимость между пределом прочности при сжатии и времени твердения образцов смеси: *а* — каолинит + цемент; *б* — монтмориллонит + цемент;

*1* — чистый портландцемент; *2* — чистый  $C_3S$ ; *3* — каолинит + 30%  $C_3S$ ; *4* — каолинит + 30% цемента; *5* — каолинит + 15%  $C_3S$ ; *6* — каолинит + 15% цемента; *7* — монтмориллонит + 30%  $C_3S$ ; *8* — монтмориллонит + 30% цемента; *9* — монтмориллонит + 15%  $C_3S$ ; *10* — монтмориллонит + 15% цемента

Результаты испытаний приведены на рисунке 2. Эти результаты показывают следующее. Все образцы каолиновой глины как с добавкой портландцемента, так и с  $C_3S$  показали большую прочность в суточном возрасте, чем соответствующие образцы монтмориллонитовой глины с такими же добавками вяжущего материала. Скорость нарастания прочности в промежутке от 1 до 7 суток была примерно одинаковой для всех серий образцов. В образцах с каолинитом прочность при твердении через 7 и 28 сут. нарастала быстрее, чем в образцах из монтмориллонита. Образцы глин, укрепленные  $C_3S$ , во всех случаях были прочнее образцов соответствующих составов с добавкой портландцемента. Поскольку алит  $C_3S$ , входящий в состав клинкера, обуславливает в основном прочность портландцемента, то



можно было бы предположить, что чистый  $C_3S$  обеспечит более высокий предел прочности при сжатии, чем прочность, получаемая при добавке портландцемента. Как видно из рис. 2 смесей и сопровождающихся поглощением продуктов гидролиза цемента с образованием малопрочных гидросиликатов пониженной основности.

Влияние минералогического состава тонкодисперсной части грунтов на свойства цементированного грунта проверялось также и на искусственных грунтовых смесях, по своему гранулометрическому составу приближающихся к наиболее типичным грунтам Западной Сибири.

Исследования показали, что наиболее прочными и морозостойкими оказались цементогрунтовые образцы, приготовленные из смеси, глинистая часть которых была представлена гидрослюдой.

Наименьшую прочность и морозостойкость имели образцы с добавкой монтмориллонитовой глины, а среднее положение по прочности и морозостойкости заняли образцы с добавкой каолиновой глины (таблица 5).

Таблица 5 – Морозостойкость цементированного грунта

| Состав цементогрунтовой смеси  | Предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов, кгс/см <sup>2</sup> . |  | Коэффициент морозостойкости |
|--|--|--|-----------------------------|
|  | после 28-суточного твердения   | после 10 циклов замораживания-оттаивания |                             |
| Песок Вольский 30% + пылеватые частицы 45% + гидрослюдистая глина 25% + портландцемент 12%     | 75   | 68                                       | 0,90                        |
| Песок Вольский 30% + пылеватые частицы 45% + каолиновая глина 25% + портландцемент 12%         | 60   | 48                                       | 0,80                        |
| Песок Вольский 30% + пылеватые частицы 45% + монтмориллонитовая глина 25% + портландцемент 12% | 32   | 14                                       | 0,42                        |

Изучение кинетики твердения цементогрунтовых образцов, приготовленных из грунтовых смесей с различным составом глинистых минералов, показало следующее (см. табл. 4). Предел прочности при сжатии водонасыщенных цементогрунтовых образцов, твердевших во влажной среде в течение 3; 7; 28 и 105 сут., во всех смесях закономерно повышается с увеличением времени твердения.

При этом самую большую прочность имели образцы, содержащие добавку гидрослюдистой глины. Несколько меньшую прочность имели образцы с каолиновой глиной, а образцы с монтмориллонитовой глиной, как и следовало ожидать, имели значительно меньшую прочность по сравнению с каолиновой и, особенно, с гидрослюдистой глиной (рисунок 3).

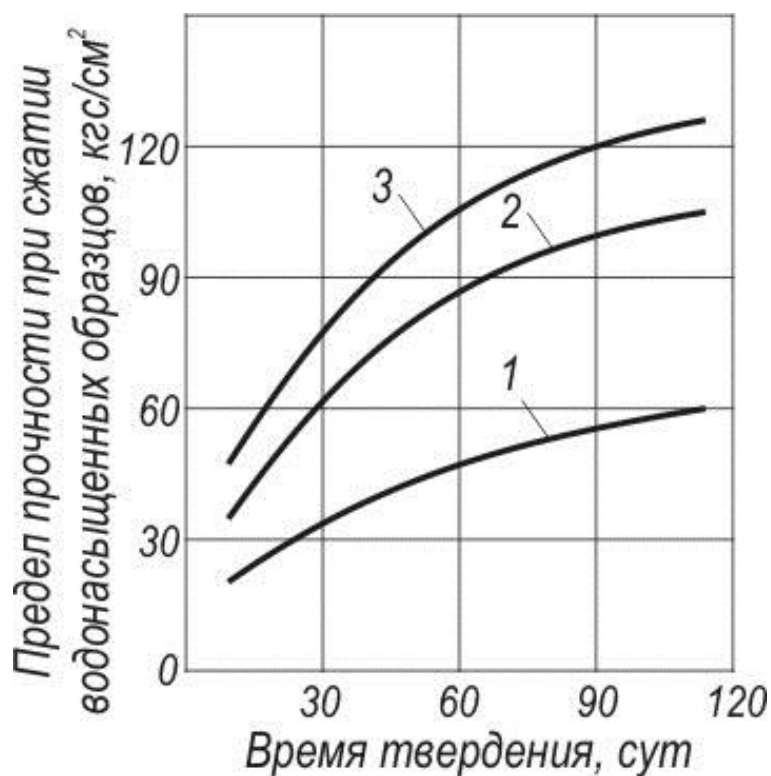


Рисунок 3 Влияние минералогического состава глин на прочность цементогрунта

1 — прочность цементогрунтовых образцов из каолиновой глины после 28 суток твердения; 2 — то же, для образцов после 120 суток твердения; 3 — прочность цементогрунтовых образцов из монтмориллонитовой глины после 28 суток твердения; 4 — то же, для образцов после 120 суток твердения; 5 — прочность цементогрунтовых образцов из гидрослюдистой глины после 28 суток твердения; 6 — то же, для образцов после 120 суток твердения

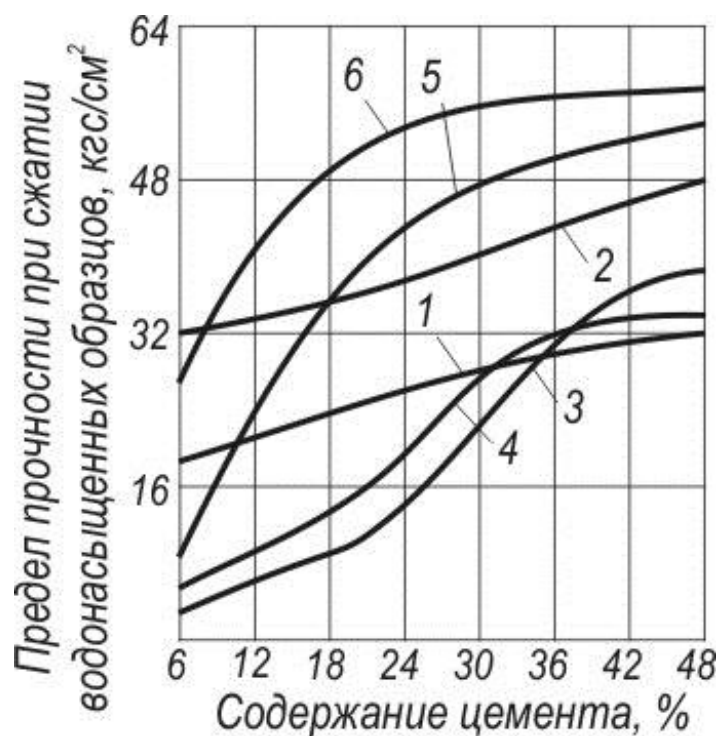


Рисунок 4 Изменение предела прочности при сжатии водонасыщенных образцов в зависимости от времени твердения

- 1— грунтовая смесь с монтмориллонитом;  
 2— то же, с каолинитом; 3 — то же, с гидрослюдой.

Таким образом, при взаимодействии с продуктами гидролиза портландцемента природа и свойства глинистых минералов проявляются по-иному, чем это наблюдается при изучении свойств минералов в отдельности.

Как показали многочисленные исследования, монтмориллонит представляет собой глинистый минерал, характеризующийся исключительно большой гидрофильностью, чрезмерным набуханием, огромной поглотительной способностью и имеет подвижную трехслойную кристаллическую решетку.

В противоположность этому минералу каолинит имеет меньшую дисперсность, в значительно меньшей степени проявляет способность к набуханию, менее гидрофилен, чем монтмориллонит, обладает малой поглотительной способностью и характеризуется жесткой двухслойной кристаллической решеткой.

Гидроглиуды по своим свойствам занимают промежуточное положение, но они ближе по свойствам к каолиниту.

Приведенные выше данные (см. рис. 3 и 4) свидетельствуют о том, что при взаимодействии с цементом гидроглиуды ведут себя по-иному и обычная закономерность в проявлении их свойств нарушается.

Указанное выше свидетельствует о том, что в естественных грунтах, в которых, как правило, в тонкодисперсной части присутствуют многие глинистые минералы в различном соотношении, можно ожидать проявление иных закономерностей, чем рассмотренные выше.

### **1.7 Технология и механизация работ**

При любом методе укрепления того или иного местного материала земляное полотно должно быть спрoфилировано и уплотнено до требуемой плотности. Затем в последовательном порядке необходимо:

- 1) размельчить частицы или макроагрегаты до заданной крупности;
- 2) добавить к грунту (материалу) вяжущий материал в количестве, установленном при лабораторном подборе смеси;
- 3) перемешать вяжущий материал с грунтом до полной однородности смеси;
- 4) ввести добавку поверхностно-активных или активных веществ в случае комплексного укрепления;
- 5) перемешать смесь до однородного состояния с одновременным ее увлажнением до оптимальной влажности, установленной при лабораторном подборе смеси;
- 6) уложить готовую смесь на ширину и толщину, предусмотренные проектом, с приданием требуемого профиля;
- 7) уплотнить смесь до максимальной плотности при соответствующей оптимальной влажности;

8) обеспечить уход за уплотненным слоем в зависимости от свойств и состава вяжущего материала и характера (типа) формирующейся структуры в слое укрепленного грунта.

В зависимости от совершенства применяемого оборудования, машин и свойств обрабатываемого материала отдельные технологические операции, перечисленные выше, могут совмещаться или многократно повторяться. В том и другом случае должны быть обеспечены качество и однородность смеси, плотность, прочность и монолитность создаваемого материала.

Первая технологическая операция — размельчение грунта или другого местного материала — производится в целях обеспечения в дальнейшем требуемой однородности смеси и удаления крупных и прочных обломков породы, что устраняет поломку рабочих органов грунтосмесительных машин.

При выполнении указанной технологической операции возможны следующие три варианта. При укреплении несвязных крупнообломочных грунтов, щебенисто- или гравийно-песчаных смесей, крупнообломочных отходов промышленности необходимо путем отгрохотки удалить из них обломки крупнее 25 или 40 мм. Если это прочные обломки, отвечающие по дробимости и износу требованиям 3-го класса прочности и выше, их после дробления можно использовать в качестве щебня или гравия для приготовления асфальто- или цементобетонных смесей, а также как добавку к материалу, который предназначается для обработки и укрепления вяжущими материалами.

В том случае, если в обрабатываемом вяжущими материале (грунте) содержатся крупные обломки размером более 20 мм и по дробимости и износу они относятся к IV классу прочности, то вся масса такого грунта (местного материала или отходов промышленности) подвергается дроблению до размеров частиц менее 10 и даже 5 мм.

Указанное требование обязательно при укреплении малопрочных известняков-ракушечников, песчаников, дресвы, изверженных метаморфических и осадочных пород, золошлаковых смесей и шлаков тепловых электростанций.

Многолетние исследования, показывают, что при (установлении пригодности дорожно-строительных материалов для устройства конструктивных слоев дорожных одежд необходимо учитывать не только свойства укрепляемого материала, но и его свойства в омоноличенном, укрепленном виде.

При этом надо обязательно знать и учитывать также и потенциальные вяжущие (цементирующие) возможности, заложенные в исходном материале, которые могут проявляться и активизироваться при небольших добавках вяжущих веществ. В результате будут обеспечены формирование прочной водо- и морозостойкой структуры и длительная надежная работа такого укрепленного материала в конструктивном слое дорожной одежды.

На основе анализа и обобщения многочисленных экспериментальных данных, накопленных при испытании малопрочных известняков третичного периода, широко распространенных в южной части Украины, В. В. Малеванским было предложено эти известняки разделить на четыре группы, характеризуя каждую из них по величине объемной массы породы:

I —  $y_0 > 2,2$  г/см<sup>3</sup> ( $R_{сж.ср} = 300$  кгс/см<sup>2</sup>; предельные значения в этой группе  $R_{сж} = 175—500$  кгс/см<sup>2</sup>);

II —  $y_0 \geq 2,2—2,0$  г/см<sup>3</sup> ( $R_{сж.ср} = 175$  кгс/см<sup>2</sup>, предельные значения в этой группе  $R_{сж} = 100—300$  кгс/см<sup>2</sup>);

III —  $y_0 = 2,0—1,8$  г/см<sup>3</sup> ( $R_{сж.ср} = 100$  кгс/см<sup>2</sup>, предельные значения  $R_{сж} = 50—175$  кгс/см<sup>2</sup>);

IV —  $y_0 < 1,8$  г/см<sup>3</sup> ( $R_{сж} < 100$  кгс/см<sup>2</sup>).

Четвертая группа — это пыльные известняки, месторождения которых разрабатываются для изготовления блоков, используемых при строительстве

зданий. Прочность таких разновидностей известняков бывает иногда весьма незначительной (20 кгс/см<sup>2</sup> и менее). Их пористость очень большая и достигает 40—45%, водонасыщение — 30%; То снижается до 1,5—1,4 кгс/см<sup>3</sup>. При распиловке таких малопрочных известняков в большом количестве накапливаются отходы (очесы), которые можно укреплять небольшими добавками портландцемента.

С измельчением даже малопрочной осадочной породы нарушаются непрочные связи между отдельными составляющими ее элементами, уменьшается пористость породы. Вместе с тем в раздробленной части (отсеве) идет накопление более прочных обломков, освежение и увеличение поверхности этих обломков. Встает задача — создать новые, более прочные цементирующие связи с обеспечением более плотной упаковки отдельных частиц. Поэтому чем прочнее горная порода и полученный из нее материал (щебень), тем больший максимальный размер частиц допустим в смеси.

Измельчение малопрочной каменной породы до указанных размеров и наличие плотной смеси по гранулометрическому составу позволяет получать прочный материал, отвечающий требованиям I и II классов прочности по СП 34.13330.2012 (таблица 6).

Таблица 6 –Прочность при сжатии каменных пород

| Наименование материала  | Крупность, мм | Добавка цемента М-300, % по массе смеси | Предел прочности при сжатии, кгс/см <sup>2</sup> |                |
|---|---------------|---|--|----------------|
|   |               |   | после 7 суток                                    | после 28 суток |
| Гранитный несортированный щебень, плотная смесь                 | 15-0          | 3                                       | 34   | 40             |
| То же   | 15-0          | 6                                       | 45   | 53             |
| Малопрочный известняк, плотная смесь; материал Группы прочности | 15-0          | 3                                       | 37   | 45             |
| То же   | 15-0          | 5                                       | 50   | 60             |
| »   | 15-0          | 7                                       | 74   | 90             |

### Окончание таблицы 6

|  |      |   |    |    |
|--|------|---|----|----|
| Малопрочный известняк, плотная смесь; III группа прочности | 10-0 | 3 | 34 | 42 |
| То же  | 10-0 | 5 | 47 | 65 |
| »  | 10-0 | 7 | 66 | 91 |
| Малопрочный известняк, плотная смесь; IV группа прочности  | 5-0  | 3 | 32 | 39 |
| То же  | 5-0  | 5 | 47 | 59 |
| »  | 5-0  | 7 | 65 | 81 |

Данные таблицы 6 свидетельствуют о том, что при правильном назначении максимального размера частиц плотная смесь, полученная при дроблении малопрочного известняка-ракушечника IV группы прочности, при ее укреплении 5—7% портландцемента приобретает прочность большую, чем прочность плотной смеси, полученной при дроблении гранита, т. е. высокопрочной изверженной породы.

Такое парадоксальное явление можно объяснить тем, что при дроблении малопрочного высокопористого известняка-ракушечника до размеров менее 5 мм происходит разрушение непрочных связей и накопление окремнелых обломков, которые имеют прочность значительно большую, чем прочность исходной породы (известняка-ракушечника). При этом плотность таких обломков также значительно больше, чем у исходного известняка, а пористость этого материала в несколько раз становится меньше, чем у известняка-ракушечника.

При укреплении указанной известняковой смеси с максимальным размером зерен 5 мм небольшими добавками портландцемента происходит прочная цементация этой смеси продуктами гидратации и гидролиза цемента. При этом в результате активации поверхности окремнелых частиц под действием гидрата окиси кальция и других соединений образуется дополнительное количество веществ, обладающих способностью к прочной



цементации. При суммарном действии этих вяжущих веществ формируется прочная пространственная структура кристаллизационного типа, обеспечивающая требуемую прочность и монолитность такого материала.

Как показали многолетние обследования дорог, построенных в ряде южных областей Украины, такой материал устраняет перемещение отдельных частиц под воздействием переменных нагрузок и природно-климатических факторов, обладает хорошей распределяющей способностью. Конструктивный слой из укрепленного материала, в том числе и из малопрочного известняка-ракушечника или песчаника благодаря его монолитности и прочности работает в упругой стадии, что обеспечивает большую надежность работы дорожной одежды в целом.

Когда укреплению подвергают различного вида глинистые грунты (супеси и особенно суглинки и глины), возникает необходимость в размельчении агрегатов (комков) грунта. В сухом состоянии такие агрегаты (комки) грунта характеризуются наличием относительно непрочных обратимых связей и псевдоконденсационной, т. е. водонеустойчивой структурой.

Следует отметить, что размельчение глинистых грунтов, особенно сухих суглинков и глин, является наиболее трудоемкой операцией в технологическом процессе, осуществляемом при укреплении таких грунтов.

В соответствии с требованиями после размельчения суммарное содержание пылевато-глинистых комков (агрегатов) размером более 5 мм в грунте не должно быть больше 25% его массы. При этом содержание комков крупнее 10 мм допускается не более 10% массы грунта.

Такое требование является минимальным и при дальнейшем совершенствовании грунтосмесительных машин должно быть изменено в сторону уменьшения допустимого содержания комков крупнее 5 мм (например, не более 20 или 15% массы грунта).

Песчаные или песчано-гравийные грунты в сухом состоянии являются сыпучими (несвязными) и у таких видов грунтов частицы находятся в

раздельном виде. Независимо от влажности поверхность их хорошо обволакивается вязко-жидкими или порошкообразными вяжущими материалами. Такие грунты не требуют предварительного размельчения и при их обработке легче получить хорошую однородную смесь.

В глинистых же грунтах, благодаря наличию большого количества свободной поверхностной энергии, частицы связаны между собой силами молекулярного притяжения. Происходит коагуляция глинистых и коллоидных частиц — образование макро- и микроагрегатов различной прочности и водоустойчивости.

Величина и прочность формирующихся в грунте агрегатов, а, следовательно, и его структура в естественном залегании зависят от многих факторов: гранулометрического, минералогического и химического составов грунта, емкости обмена и состава поглощенных катионов, содержания глинистых и коллоидных частиц, а также влажности грунта.

Прочность макро- и микроагрегатов возрастает с уменьшением их размера, и это увеличение тем больше проявляется, чем меньше влажность таких агрегатов.

Исследованиями Е. И. Путилина показано, что с увеличением размера агрегатов и их количественного содержания прочность грунта, укрепленного вяжущими материалами, резко уменьшается (рисунок 5)

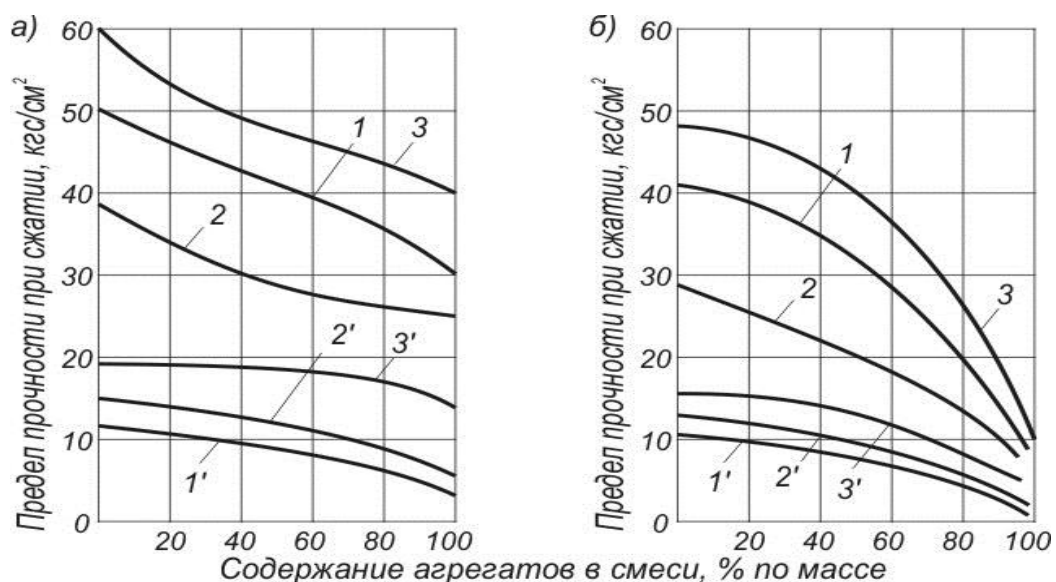


Рисунок 5 – Изменение прочности водонасыщенных образцов в зависимости от содержания в смеси грунтовых агрегатов

« — размером 5—10 мм; б — размером 10—20 мм;  
 1 — покровной глины; 2 — глинистого чернозема; 3 — солонцеватой карбонатной глины; (1—3 — при укреплении грунта портландцементом; 1'—3' — при укреплении грунта жидким битумом)

Важно также отметить, что морозостойкость укрепленных грунтов при содержании агрегатов размером более 5 мм в количестве большем, чем это предусмотрено СП 34.13330.2012, также резко уменьшается.

Изучение условий формирования структурных связей в глинистых грунтах и агрегирования тонкодисперсных фракций показало, что введение небольших добавок поверхностно-активных веществ определенного состава способствует размельчению агрегатов грунта. При этом затрата механической энергии до требуемой степени размельчения существенно уменьшается.

Установлено, что поверхностно-активные вещества (ПАВ), например смачиватель ОП-7 и сульфитно-спиртовая бражка (ССБ), в значительной степени понижают прочность структурных агрегатов глинистых грунтов при добавке их в количестве 0,1—0,8% от массы грунта. Учитывая малую дозировку вводимых в грунт ПАВ и необходимость равномерного их распределения и смачивания всего объема обрабатываемого грунта, эти

вещества должны вводиться в грунт в виде водных растворов небольшой концентрации. Из этого следует, что для эффективного размельчения глинистых грунтов должны применяться ПАВ, обладающие способностью хорошо растворяться в воде, хорошо и быстро смачивать поверхность частиц грунта и, следовательно, быстро впитываться в поры макро- и микроагрегатов грунта.

При размельчении супесчаных грунтов и использовании современных линейных грунтосмесительных машин (однопроходных машин, фрез) в большинстве случаев не требуется вводить добавку ПАВ, поскольку можно достигнуть требуемую степень размельчения грунта.

При размельчении суглинков и, особенно, глин в сухом состоянии (при влажности менее 0,2 от влажности границы текучести грунта) использование добавок ПАВ в большинстве случаев является необходимым. При правильном выборе поверхностно-активных веществ и их оптимальной дозировке, а также при добавке негашеной молотой или гашеной извести эффективность размельчения глинистых грунтов резко увеличивается.

При размельчении грунта всегда лучше превысить требование, установленное СП 34.13330.2012. Сохранение же микроагрегатов (размером менее 0,5 мм) и увеличение их прочности и водостойкости с помощью добавок ПАВ является крайне желательным.

#### Дозирование вяжущих материалов и других реагентов

Размельчение агрегатов (комков), дробление крупных обломков, содержащихся в обрабатываемом грунте или другом местном материале, — весьма трудоемкая и важная технологическая операция, но она является лишь подготовительной. С введением в подготовленный материал установленного количества вяжущих и других веществ начинается последующий важный этап в коренном преобразовании свойств укрепляемого материала.

Дозировочные устройства смесительных установок или линейных грунтосмесительных машин должны обеспечивать точное дозирование вяжущих материалов и других реагентов на заданный объем обрабатываемого материала. Точное дозирование указанных веществ на заданный объем или массу материала всегда предусматривает равномерное распределение вяжущих и других веществ в микрообъемах обрабатываемого материала. В противном случае не могут быть максимально реализованы потенциальные вяжущие и другие особенности, заложенные в добавляемых реагентах.

Равномерному распределению и смачиванию при внесении вязко-жидких или жидких реагентов, или обволакиванию частиц или микроагрегатов грунта при внесении порошкообразных веществ может препятствовать влага, имеющаяся в укрепляемом грунте или другом материале. Для глинистых грунтов наилучшее распределение сыпучих или вязко-жидких вяжущих происходит при влажности грунта менее  $0,21W_T$  ( $1W_T$ — влажность границы текучести). Введение поверхностно-активных веществ способствует лучшему смачиванию вязко-жидких веществ и улучшает их адгезию к поверхности частиц грунта. При добавке сыпучих веществ ПАВ могут также способствовать равномерному их распределению и улучшению процессов гидратации.

Выбор и оптимальная дозировка поверхностно-активных веществ устанавливаются экспериментальным путем.

При комплексном укреплении грунтов вяжущими материалами и активными или поверхностно-активными веществами осуществляется разрыв во времени при их внесении.

Например, при комплексном укреплении суглинка или глины добавками жидкого битума и извести вначале вносится в заданном количестве известь. Эта добавка перемешивается с грунтом, и смесь прикатывается. Через 12—24 часов в известковогрунтовую смесь вводится жидкий битум, смесь

перемешивается и затем выполняются последующие технологические операции.

Оптимальное увлажнение перемешивание смеси.

В состав смеси грунта или другого местного материала, укрепляемого любыми вяжущими и другими веществами, всегда в качестве обязательного компонента входит вода. Количественное содержание и роль воды в смеси бывают различными и зависят от применяемых для укрепления грунтов вяжущих и других веществ. В зависимости от естественной влажности материала, подвергаемого обработке, и учитывая, что готовая смесь перед ее уплотнением должна иметь оптимальное значение, при производстве работ могут быть три случая.

Смесь грунта с вяжущим и другими реагентами имеет влажность  $W_e$ , численно меньшую, чем оптимальная влажность  $W_o$ , установленную при лабораторном подборе для данного состава ( $W_e < W_o$ ). В этом случае производится дополнительное увлажнение смеси с учетом естественной ее влажности. В практике производства работ это наиболее распространенный случай. Возможно, что  $W$  смеси совпадает с требуемой  $W_o$ , тогда увлажнение этой смеси не производится. В осенний или ранний весенний период производства работ смесь может иметь влажность более оптимальной ( $W > W_o$ ). В этом случае путем перемешивания или выдержки в течение определенного времени смесь подсушивается, если это допустимо по условиям процессов структурообразования и твердения смеси и не ведет к уменьшению прочности готового материала в конструктивном слое дорожной одежды. Придание соответствующей для данной смеси оптимальной влажности должно обеспечить наиболее благоприятные условия для процессов структурообразования, взаимодействия отдельных компонентов (их гидратации и др.) и максимального уплотнения укрепленной смеси в дальнейшем.

Подсушивание грунта, имеющего влажность более оптимальной, может быть осуществлено также за счет химического связывания воды путем внесения добавок извести, гипса или других веществ.

При укреплении грунтов, малопрочных каменных материалов или отходов промышленности минеральными вяжущими оптимальная влажность смеси должна быть равна 0,5—0,6 от влажности границы текучести для частиц менее 2 мм.

При укреплении грунтов и других местных материалов цементом в количестве более 6—8% по массе смеси оптимальная влажность такой смеси находится в пределах 0,6—0,7 от влажности границы текучести и, следовательно, несколько превышает оптимальную влажность при стандартном уплотнении, определенную для исходного материала.

При укреплении глинистых грунтов молотой известью-кипелкой, учитывая необходимость дополнительного количества воды для гашения извести, влажность известково-грунтовой смеси  $W_0$  должна быть, как правило, в пределах (0,7-0,8)  $W_T$ .

При укреплении глинистых видов грунтов органическими вяжущими, например, жидкими битумами, влажность обрабатываемого грунта должна быть в пределах (0,2-0,3)  $W$  от влажности границы текучести грунта  $W_T$ . Влажность грунта и количество битума в смеси в сумме в среднем находится в пределах (0,5-0,6)  $W_T$ . Как показали многочисленные исследования и практический опыт, такого суммарного количества жидкой фазы бывает достаточно для протекания процессов структурообразования и максимального уплотнения смеси.

Приведенные выше примеры свидетельствуют о том, что  $W_0$  смеси может колебаться в широких пределах и зависит от состава и свойств всех компонентов смеси.

Численное значение оптимальной влажности смеси, обеспечивающее процессы структурообразования, гидратации вяжущих и максимальное

уплотнение, устанавливают экспериментальным путем, руководствуясь методикой, изложенной в СП 34.13330.2012.

Рассмотренные выше технологические операции (размельчение, дозирование вяжущих и других реагентов, равномерное их перемешивание с грунтом, увлажнение смеси до оптимальной влажности с последующим перемешиванием) являются строго обязательными для выполнения при любых методах укрепления грунтов и других местных материалов. Только при правильном их выполнении, точном дозировании всех компонентов, входящих в состав смеси, и тщательном их перемешивании может быть достигнута высокая степень однородности смеси. Это, в свою очередь, надежно гарантирует получение запроектированной прочности материала.

Однако следует отметить, что перечисленные выше технологические операции могут совмещаться или выполняться почти одновременно, или выполняться в последовательном порядке с большим разрывом во времени при многократных проходах машин по одному следу в зависимости от применяемого оборудования и типа грунтосмесительных машин.

Особенности технологии производства работ, связанные с применяемым оборудованием и типами машин, рассмотрены ниже.

Уплотнение готовой смеси.

Уплотнение готовой смеси до максимальной плотности при соответствующей для данной смеси оптимальной влажности является важнейшей и заключительной технологической операцией в производстве работ по укреплению грунтов и других местных материалов.

Тщательное и высококачественное выполнение на строительстве всех перечисленных выше технологических операций, производимых до уплотнения готовой смеси, не может компенсировать того большого ущерба, который неизбежно возникнет, если смесь будет недостаточно уплотнена.

Структура любого дорожно-строительного материала, уложенного в дорожную одежду и, следовательно, его свойства формируются в результате



уплотнения смесей. Для получения материала с заданными свойствами показатель плотности имеет исключительно важное значение. Недостаточное уплотнение смеси всегда обуславливает повышение пористости материала, а это, в свою очередь, предопределяет повышенное водонасыщение материала и меньшую его морозостойкость.

Для достижения максимальной плотности уплотняемой смеси в ее составе должно быть оптимальное количество воды, которое будет способствовать наилучшему перемещению и сближению частиц, наибольшей их упаковке. При этом пористость материала будет уменьшаться, размеры и конфигурация пор станут более однородными.

Ниже рассматриваются отдельные примеры, показывающие специфические особенности уплотнения некоторых видов смесей с различными вяжущими материалами.

С увеличением плотности грунтов, укрепленных минеральными вяжущими материалами, возрастает количество частиц в единице объема укрепленного материала и, следовательно, увеличивается число контактов твердых частиц. В результате кристаллы, образующиеся при твердении этих вяжущих, создают более разветвленный тонкий пространственный каркас, скрепляющий частицы и агрегаты грунта в более прочный монолит.

Такая же закономерность наблюдается и при уплотнении грунтов, укрепляемых комплексными методами с использованием добавок различных веществ.

Важной особенностью укрепления грунтов минеральными вяжущими, особенно при использовании добавок портландцемента, является необходимость сводить к минимуму время технологического разрыва между увлажнением готовой смеси до оптимальной влажности и началом уплотнения этой смеси. Установлено, что при укреплении грунтов портландцементом между окончанием увлажнения цементогрунтовой смеси и началом ее уплотнения допускается разрыв во времени не более 2 ч при

производстве работ свыше 15° С. При увеличении этого разрыва уплотненный цементогрунт характеризуется значительно меньшей прочностью, большей пористостью и меньшей морозостойкостью.

При одинаковом увеличении относительной плотности цементогрунтов прочность их повышается больше при укреплении крупнообломочных и песчаных грунтов и относительно меньше при укреплении глинистых грунтов.

Как показали исследования В. М. Могилевича, Р. П. Щербаковой и О. В. Тюменцевой, в пределах изменения коэффициента уплотнения от 0,90 до 1,00 существует прямолинейная зависимость между этим коэффициентом и пределом прочности цементогрунта при сжатии. С увеличением плотности грунтов, укрепленных минеральными вяжущими материалами, возрастает не только прочность.

При этом уменьшаются суммарная пористость и размеры пор, что в целом обуславливает значительное увеличение морозостойкости цементогрунта.

Так, например, тяжелый суглинок, укрепленный 12% цемента и уплотненный до коэффициента 0,90, выдерживает 18 циклов замораживания-оттаивания, а уплотненный до коэффициента уплотнения 0,98, что требуется СП 34.13330.2012, выдерживает 30 циклов замораживания-оттаивания.

Грунты, укрепленные битумными материалами, при уплотнении их до максимальной плотности мало увеличивают прочность при сжатии, но в этом случае у таких битумогрунтов существенно увеличиваются сдвигоустойчивость, водо- и морозостойкость и, следовательно их долговечность.

Смеси грунта с органическими вяжущими (битумом, дегтем) характеризуются тем, что независимо от времени их формирования присущая им коагуляционная структура остается неизменной. По этой причине разрыв во времени между окончанием смешения смеси и началом ее уплотнения не

имеет такого огромного влияния на уплотняемость смеси и ее свойства, как это бывает при уплотнении цементогрунтовых смесей.

Однако следует отметить, что при использовании в качестве вяжущих битумных эмульсий, приготовляемых на вязком битуме, или битумов, разжиженных легкими разжижителями (особенно быстрогустеющих), длительный разрыв во времени между смешением и уплотнением смеси существенно ухудшает их уплотняемость и физико-механические свойства, снижает водостойкость такого материала.

Объясняется это специфическими особенностями структуры битумных пленок, вязкость и прочность которых увеличиваются при испарении дисперсионной среды (воды, разжижителя).

Исследования по уплотнению смесей грунта с битумными эмульсиями показали, что при одинаковом составе смесей водостойкость их бывает различной в зависимости от условий уплотнения. Как показывают данные таблица 7, наибольшую водостойкость приобретает грунт, укрепленный битумной эмульсией в том случае, когда уплотнение производится сразу же после смешения (распад эмульсии еще не произошел, вязкость всей системы еще не уменьшилась и содержание жидкой фазы соответствовало оптимальному для уплотнения количеству).

Таблица 7 – Результаты смеси грунтов с битумной эмульсией

| Грунт                                      | Условия уплотнения смеси                | Объемная масса, г/см <sup>3</sup> | Водонасыщение, % | Предел прочности при сжатии водонасыщенных образцов, кг/см <sup>2</sup> |
|--|---|-----------------------------------|------------------|---|
| Супесь с числом пластичности 4,5           | Непосредственно после смешения          | 2,04                              | 5,5              | 18,5  |
| То же                                      | Смесь высохла                           | 2,04                              | 18,5             | 3,0   |
| »  | Сухая смесь перед уплотнением увлажнена | 2,08                              | 11,5             | 6,5   |
| Супесь с числом пластичности 4,5 + известь | Непосредственно после смешения          | 2,08                              | 3,7              | 36,0  |
| То же                                      | Смесь высохла                           | 2,01                              | 14,5             | 11,5  |
| »  | Сухая смесь перед уплотнением увлажнена | 2,07                              | 9,0              | 20,0  |

Высыхание смеси и ее увлажнение перед уплотнением повышают прочность и водостойкость материала, но при этом указанные показатели в 2—3 раза меньше, чем при уплотнении смесей сразу же после смешения. Опыт по укреплению барханных песков в южном Казахстане показал, что даже при высокой температуре воздуха ( $50^{\circ}\text{C}$ ), а, следовательно, и смеси, когда вязкость битумных пленок уменьшается, нельзя достигнуть требуемого уплотнения, если смесь уплотнялась на другой день после смешения.

Изложенное выше свидетельствует о том, что для большинства применяемых смесей из грунта или других местных материалов и вяжущих веществ долговечность и прочность получаемого материала существенно зависят от времени уплотнения, прошедшего после смешения.

В производственных условиях этому важному фактору, к сожалению, не всегда придают должное значение и длительность технологического процесса строго не лимитируют, в результате чего существенно снижается качество выполненных работ.

Организация производства работ должна предусматривать ускорение выполнения отдельных технологических операций и уменьшение времени между их выполнением, если это не вызывает ухудшения качества структуры и прочности материала.

Укладка и уплотнение смесей должны, как правило, производиться не позднее чем через 2—3 ч после их увлажнения до оптимальной влажности и перемешивания в случае укрепления глинистых видов грунтов и выполнения работ при температуре воздуха не более  $20^{\circ}\text{C}$ . При смешении крупнообломочных и песчаных грунтов или при производстве работ в жаркое время уплотнение готовых смесей должно производиться через 1 — 1,5 ч, что при существующих способах производства работ трудно выполнимо. Поэтому целесообразно во многих случаях производить добавку поверхностно-активных веществ, способствующих замедлению процессов

структурообразования и схватывания смеси. Тогда может быть увеличено время между окончанием приготовления смеси и началом ее уплотнения.

Исследованиями Ю. М. Васильева, А. С. Дудкина и других установлено, что при укреплении грунтов одним портландцементом или цементом и добавками  $\text{CaCl}_2$ ,  $\text{NaCl}$ , известны замедление процессов структурообразования и схватывания цементогрунтовых смесей может быть достигнуто путем добавки сульфитно-спиртовой бражки (ССБ), кремнийорганических соединений, например, ГКЖ-94, или абиетиновой смолы (в виде абиетата натрия). В этом случае удлиняется время нахождения цементогрунтовой смеси в состоянии коагуляционной структуры, происходит процесс торможения образования кристаллизационной структуры вследствие адсорбции указанных поверхностно-активных веществ на поверхности зерен цемента и продуктах его гидратации.

Положительный эффект от применения добавок поверхностноактивных веществ (ПАВ) можно получить лишь в том случае, если эти вещества вводятся в оптимальном количестве.

Например, для ГКЖ-94 и абиетиновой смолы оптимальное количество составляет в среднем 0,1% от массы укрепляемого грунта, а для ССБ — в пределах 0,15—0,3%. Смесь из супесчаного или песчаного грунта при добавке 12% портландцемента и 0,1% ГКЖ-94 в течение 12 ч находится в пластичном состоянии, при котором обеспечивается ее удобоукладываемость и сохраняется возможность уплотнения такой смеси до требуемой максимальной плотности.

При добавке ССБ в количестве 0,3% пластичное состояние цементогрунтовой смеси сохраняется 5—6 ч, а при добавке абиетиновой смолы 7—8 ч.

Роль добавок указанных выше ПАВ не ограничивается только удлинением коагуляционного периода цементогрунтовых смесей и их пластификацией. Значение этих добавок является более универсальным. Цементогрунтовые

смеси при добавке ССБ, ГКЖ-94 и абиетиновой смолы уплотняются до более высокой степени плотности при меньшей затрате работы. Затвердевший слой такого цементогрунта характеризуется более высокой прочностью и морозостойкостью.

При укреплении грунтов известью или активными золами уноса тепловых электростанций возникает другая задача. Эти вяжущие материалы характеризуются очень медленным твердением и набором требуемой прочности через длительный срок влажного твердения — 90—120 сут и более. Поэтому после приготовления смесей и оптимального их увлажнения возникает задача не замедления, а, наоборот, существенного ускорения процессов структурообразования и твердения в уплотненном слое. Установлено, что для ускорения твердения указанных смесей целесообразно применять добавки хлористого кальция, кремнефторидов, магния, натрия, аммония или других веществ.

Установление времени уплотнения и применения пластифицирующих и тормозящих или ускоряющих процессы твердения добавок поверхностно-активных и других веществ и оптимальная их дозировка должны устанавливаться при строгом учете всех применяемых реагентов, входящих в состав грунтовых и других смесей, и типа структуры в затвердевшем материале.

После уплотнения укладываемой смеси до ее максимальной плотности всегда должен быть обеспечен уход за готовым конструктивным слоем (покрытием, основанием или морозозащитным слоем).

При использовании добавок гидравлических вяжущих (портландцемента, молотых доменных шлаков, извести, зол уноса) требуется в течение длительного времени сохранить в уплотненном слое оптимальную влажность, необходимую для протекания процессов кристаллизационного твердения.

Сохранение такой влажности достигается путем нанесения паронепроницаемых пленкообразующих веществ или устройства покрытия, а также другого конструктивного слоя через одну-две рабочие смены. Последнее не только возможно, но и весьма целесообразно, например, при использовании для устройства конструктивного слоя извести, молотого шлака или активных зол уноса в качестве вяжущего материала.

Сохранение оптимальной влаги таким путем возможно при устройстве конструктивного слоя из суглинистого или глинистого цементогрунта при условии обеспечения коэффициента уплотнения в таком слое не менее 1,0.

После максимального уплотнения слоя из грунта, укрепленного жидким битумом, дегтем или битумной эмульсией, наоборот, требуется обеспечить испарение влаги из такого слоя. Следовательно, такой слой не должен покрываться пленкообразующими материалами.

Способы ухода за готовым слоем устанавливаются с учетом свойств укрепленного материала и его назначения. При этом необходимо руководствоваться нормативными требованиями, изложенными в СП 34.13330.2012 и других документах.

## 2 Проведение испытаний

### 2.1 Проведение испытаний на приборе Instron

В данном разделе в ходе испытаний на образцах, будет выяснено какие из стабилизированных нами грунтов удовлетворяют или наиболее соответствуют ГОСТам по прочности и морозостойкости. А также, стоит задача определить возможность замены проектного решения в виде отсыпки основания известняковым щебнем на стабилизацию местного грунта на 2 объектах (район Мичуринского моста и развязки Северного Шоссе и Енисейского тракта). Оба объекта представляют собой подъездные пути, со щебеночным основанием толщиной 20 см и слоем асфальтобетона толщиной 7 см, и интенсивностью движения не более 6000 автомобилей в сутки. Оба объекта являются частными проектами.

Для изготовления опытных образцов было взято 3 вида грунта:

- Суглинок полутвердый (район развязки Северного Шоссе и Енисейского Тракта)
- Песок мелкий (березовское карьероуправление)
- Почвенно-растительный грунт (район Мичуринского моста)

Таблица 8 – Характеристики грунтов

| Название грунта             | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Модуль упругости E, Мпа |
|-----------------------------|-----------------------------------|-------------------------|
| Суглинок полутвердый        | 0,25                              | 22                      |
| Песок мелкий                | 0,3                               | 26                      |
| Почвенно-растительный грунт | -                                 | -                       |

Для каждого грунта производится 2 варианта стабилизации 5% и 10%.

Рецепты стабилизированных нами грунтов:

1. Суглинок полутвердый + 10% шлакопортландцемента + 25% воды
2. Суглинок полутвердый + 5% шлакопортландцемента + 25% воды



3. Почвенно-растительный грунт + 10% шлакопортландцемента + 31% воды
4. Почвенно-растительный грунт + 5% шлакопортландцемента + 31% воды
5. Песок мелкий + 10% шлакопортландцемента + 19% воды
6. Песок мелкий + 5% шлакопортландцемента + 19% воды

Было изготовлено 18 образцов 100x100x100 мм для испытания на прочность при сжатии, 12 образцов 100x100x100 мм для испытания на морозостойкость, 12 образцов 100x100x400 мм для испытания на прочность при изгибе.

В соответствии с ГОСТ 23558-94 образцы набирали прочность в течении 7 дней. За 7 дней образцы набрали 70% прочности, поэтому получившиеся величины делим на 0,7.

Испытания прочности на сжатие и растяжение при изгибе или раскалывании обработанных материалов и укрепленных грунтов определяются по ГОСТ 10180.

Морозостойкость обработанных материалов и укрепленных грунтов определяется по ГОСТ 10060.1.

Формулы расчетов для испытаний на прочность при сжатии:

$R = N/A$  – предел прочности при сжатии,

$\varepsilon = \Delta l/l$  – относительная деформация,

$E = R/\varepsilon$  – модуль упругости,

A – площадь образца, принимаем везде равной 0,01 см<sup>2</sup>.

Формулы расчетов для испытаний на прочность при изгибе:

$\sigma = M/w$  – предел прочности при изгибе,

$M = N * 0,4/4$  - момент,

w принимаем везде равным 0,000167.

Формулы расчетов для испытаний морозостойкость:

Процент потери прочности –  $R_{cp} - R_{образца} / R_{cp} * 100$

Процент потери массы –  $m_0 - m_1 / m_0 * 100$

Таблица 9 – Испытания прочности на сжатие для суглинка с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 25%

| Номер образца        | Нагрузка $N_{max}$ (кН) | Удлинение $\Delta l_{max}$ (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация $\varepsilon$ | Модуль упругости E, Мпа |
|----------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------|
| Суглинок полутвердый |                         |                                 | 0,25                              |  | 22                      |
| Образец № 1          | 13,7                    | 0,9                             | 1,96                              | 0,006                                  | 286                     |
| Образец № 2          | 10,8                    | 1,1                             | 1,54                              | 0,002                                  | 266                     |
| Образец № 3          | 14,5                    | 2,1                             | 2,07                              | 0,003                                  | 229                     |
| Средний показатель   |                         |                                 | 1,86                              |  | 260                     |

Образцы с 1 по 1

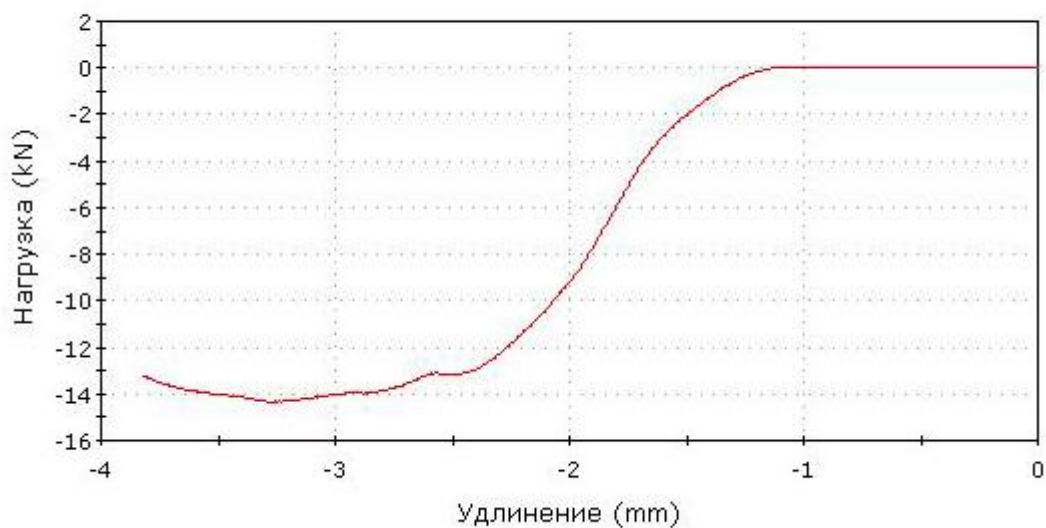


Рисунок 6 – График испытания образца № 3 на приборе Instron

Таблица 10 – Испытания прочности на сжатие для суглинка с добавлением шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 25%

| Номер образца        | Нагрузка Nmax (кН) | Удлинение Δlmax (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация ε | Модуль упругости E, Мпа |
|----------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Суглинок полутвердый |                    |                      | 0,25                              |                            | 22                      |
| Образец № 4          | 8,6                | 1,1                  | 1,23                              | 0,002                      | 179                     |
| Образец № 5          | 6,2                | 2,1                  | 0,89                              | 0,003                      | 96                      |
| Образец № 6          | 14                 | 2,2                  | 2                                 | 0,006                      | 96                      |
| Средний показатель   |                    |                      | 1,37                              |                            | 124                     |

Образцы с 1 по 1

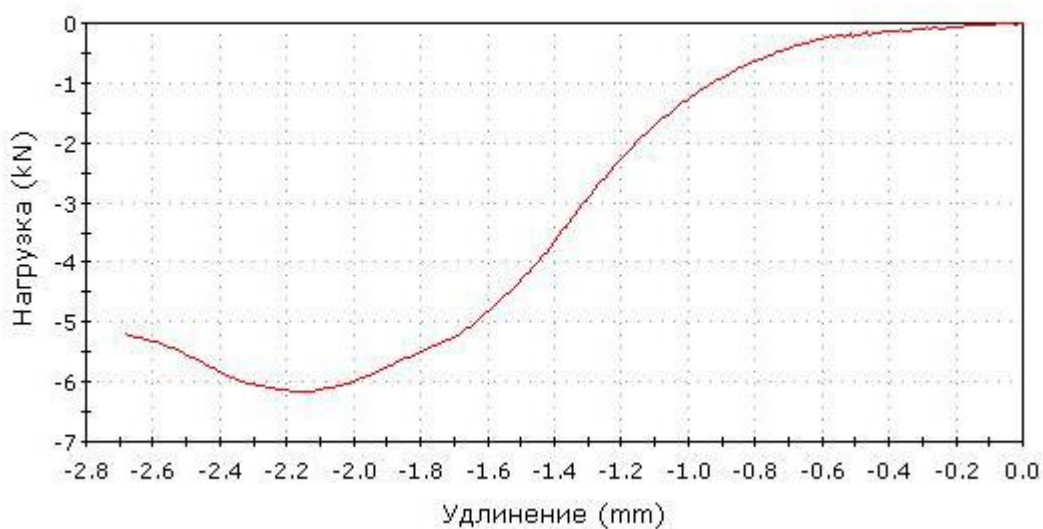


Рисунок 7 – График испытания образца № 5 на приборе Instron

Таблица 11 – Испытания прочности на сжатие для почвенно-растительного грунта с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 31%

| Номер образца               | Нагрузка Nmax (кН) | Удлинение Δlmax (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация ε | Модуль упругости E, Мпа |
|-----------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Почвенно-растительный грунт |                    |                      | -                                 |                            | -                       |
| Образец № 13                | 10                 | 1,5                  | 1,43                              | 0,002                      | 154                     |
| Образец № 14                | 6,8                | 1,3                  | 0,97                              | 0,003                      | 90                      |
| Образец № 15                | 8,7                | 1,4                  | 1,22                              | 0,003                      | 133                     |
| Средний показатель          |                    |                      | 1,37                              |                            | 126                     |

Образцы с 1 по 1

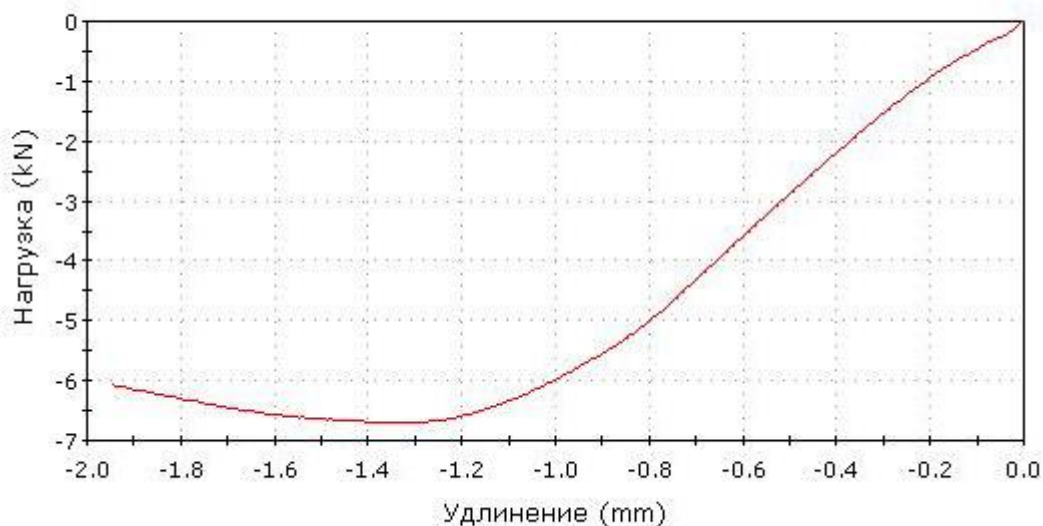


Рисунок 8 – График испытания образца № 14 на приборе Instron

Таблица 12 – Испытания прочности на сжатие для почвенно-растительного грунта с добавлением шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 31%

| Номер образца               | Нагрузка Nmax (кН) | Удлинение Δlmax (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация ε | Модуль упругости E, Мпа |
|-----------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Почвенно-растительный грунт |                    |                      | -                                 |                            | -                       |
| Образец № 16                | 4,3                | 2,5                  | 0,61                              | 0,007                      | 41                      |
| Образец № 17                | 5,5                | 1,85                 | 0,79                              | 0,002                      | 81                      |
| Образец № 18                | 2,7                | 1,2                  | 0,39                              | 0,004                      | 67                      |
| Средний показатель          |                    |                      | 0,6                               |                            | 63                      |

Образцы с 1 по 1

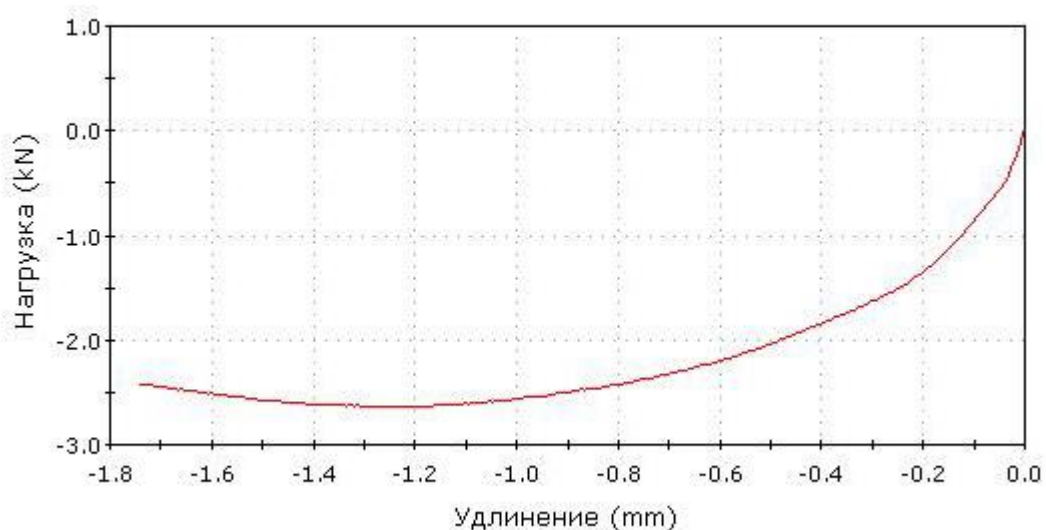


Рисунок 9 – График испытания образца № 18 на приборе Instron

Таблица 13 – Испытания прочности на сжатие для песка мелкого с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 19%

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | Удлинение Δlmax (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация ε | Модуль упругости E, Мпа |
|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Песок мелкий       |                    |                      | 0,3                               |                            | 26                      |
| Образец № 7        | 20                 | 1,75                 | 2,9                               | 0,008                      | 174                     |
| Образец № 8        | 9                  | 1,3                  | 1,29                              | 0,002                      | 286                     |
| Образец № 9        | 16,8               | 1,1                  | 2,4                               | 0,002                      | 381                     |
| Средний показатель |                    |                      | 2,2                               |                            | 280                     |

Образцы с 1 по 1

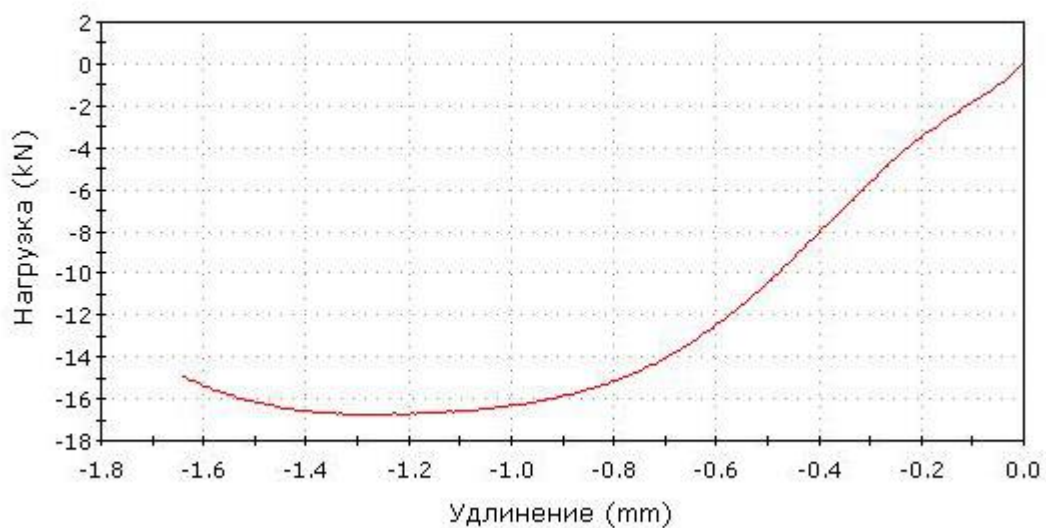


Рисунок 10 – График испытания образца № 9 на приборе Instron

Таблица 14 – Испытания прочности на сжатие для песка мелкого с добавлением шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 19%

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | Удлинение Δlmax (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация ε | Модуль упругости E, Мпа |
|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Песок мелкий       |                    |                      | 0,3                               |                            | 26                      |
| Образец № 10       | 13                 | 2,65                 | 1,86                              | 0,003                      | 190                     |
| Образец № 11       | 5,2                | 0,9                  | 0,74                              | 0,002                      | 84                      |
| Образец № 12       | 6,2                | 0,89                 | 2,4                               | 0,003                      | 47                      |
| Средний показатель |                    |                      | 1,67                              |                            | 107                     |

Образцы с 1 по 1

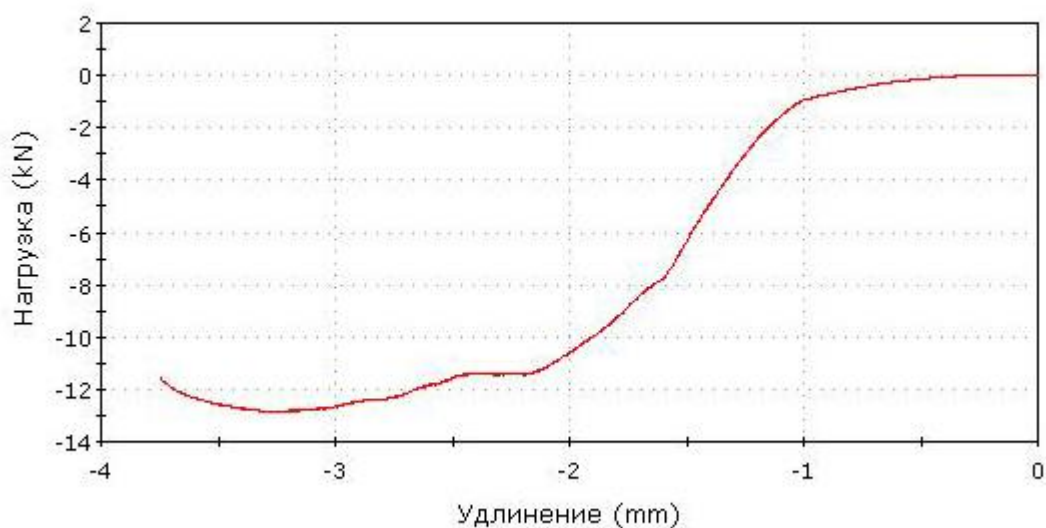


Рисунок 11 – График испытания образца № 10 на приборе Instron

Таблица 15 – Испытания прочности на изгиб для суглинка полутвердого с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 25%

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 31       | 1,42               | 0,142 | 1,21                                     |
| Образец № 32       | 1,33               | 0,133 | 1,14                                     |
| Средний показатель |                    |       | 1,175                                    |

Образцы с 1 по 1

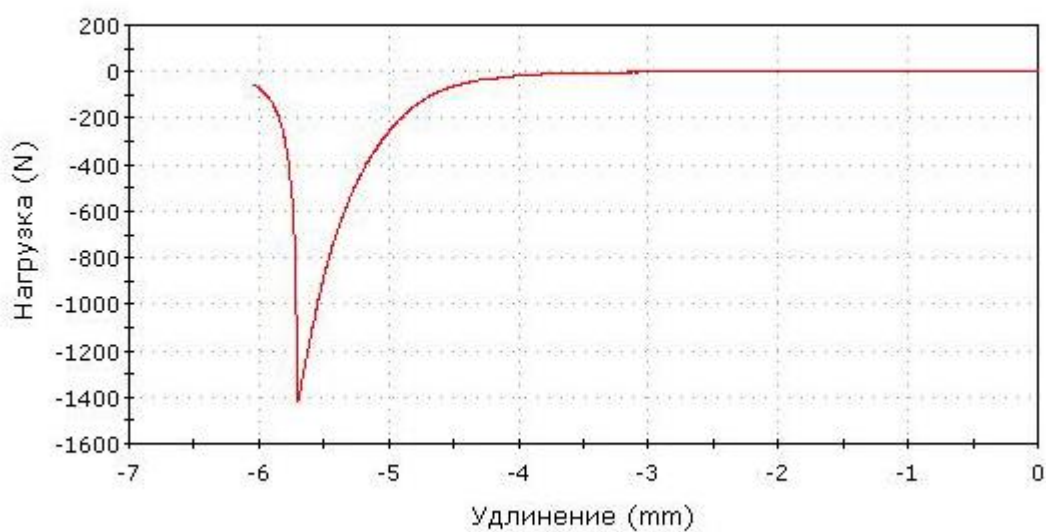


Рисунок 12 – График испытания образца № 31 на приборе Instron



Таблица 16 – Испытания прочности на изгиб для суглинка полутвердого с добавлением шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 25%

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 33       | 0,43               | 0,043 | 0,37                                     |
| Образец № 34       | 0,37               | 0,037 | 0,32                                     |
| Средний показатель |                    |       | 0,345                                    |

Образцы с 1 по 1

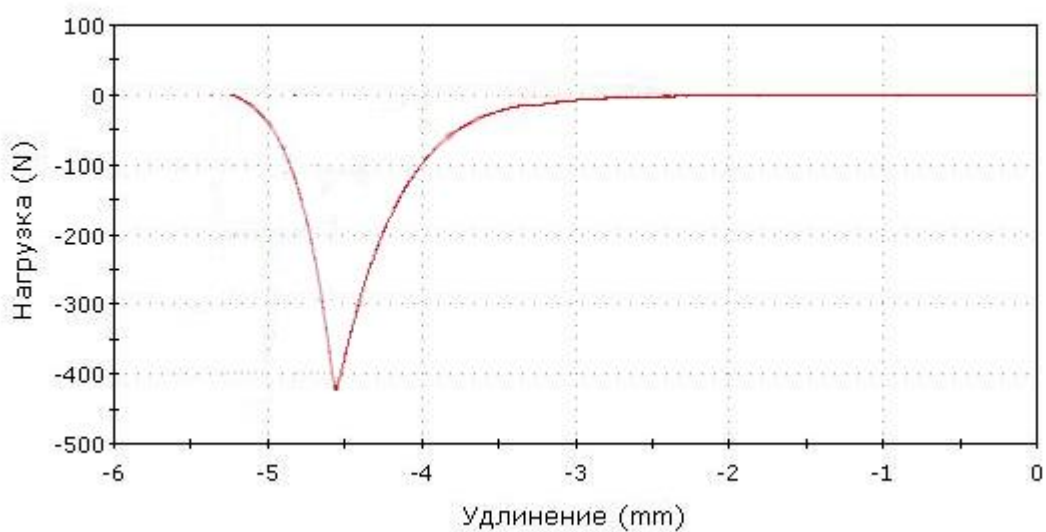


Рисунок 13 – График испытания образца № 33 на приборе Instron

Таблица 17 – Испытания прочности на изгиб почвенно-растительного грунта с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 31%

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 35       | 0,61               | 0,061 | 0,52                                     |
| Образец № 36       | 0,71               | 0,071 | 0,61                                     |
| Средний показатель |                    |       | 0,56                                     |

Образцы с 1 по 1

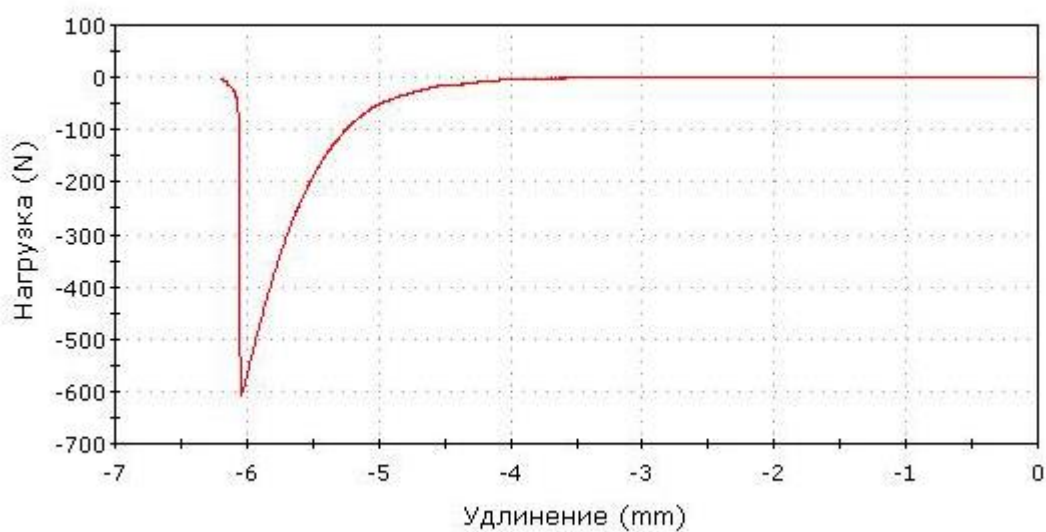


Рисунок 14 – График испытания образца № 35 на приборе Instron

Таблица 18 – Испытания прочности на изгиб почвенно-растительного грунта с добавлением шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 31%

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 37       | 0,36               | 0,036 | 0,31                                     |
| Образец № 38       | 0,4                | 0,04  | 0,34                                     |
| Средний показатель |                    |       | 0,325                                    |

Образцы с 1 по 1

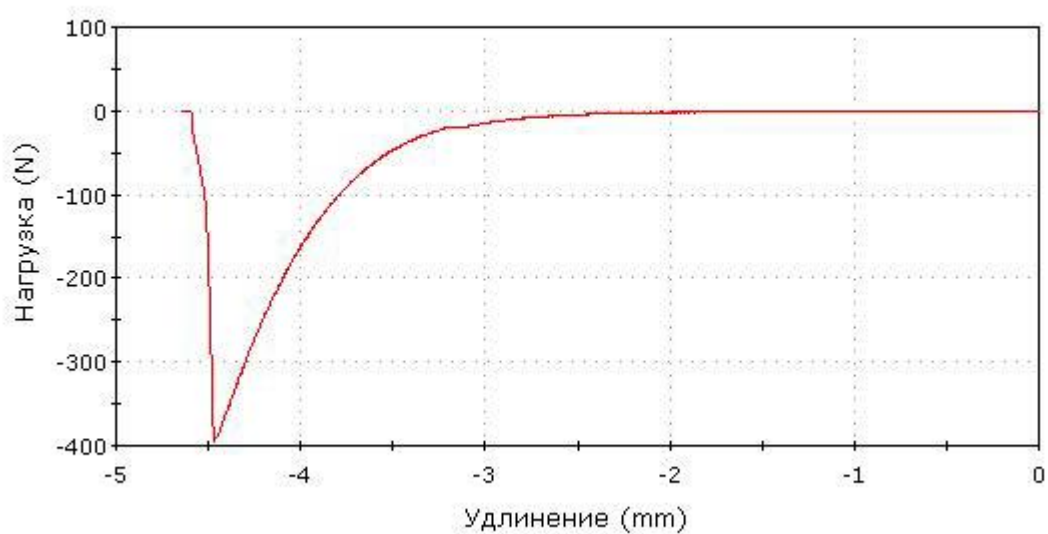


Рисунок 15 – График испытания образца № 38 на приборе Instron

Таблица 19 – Испытания прочности на изгиб песка мелкого с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 19%

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 39       | 1,32               | 0,132 | 1,13                                     |
| Образец № 40       | 1,5                | 0,15  | 1,28                                     |
| Средний показатель |                    |       | 1,205                                    |

Образцы с 1 по 1

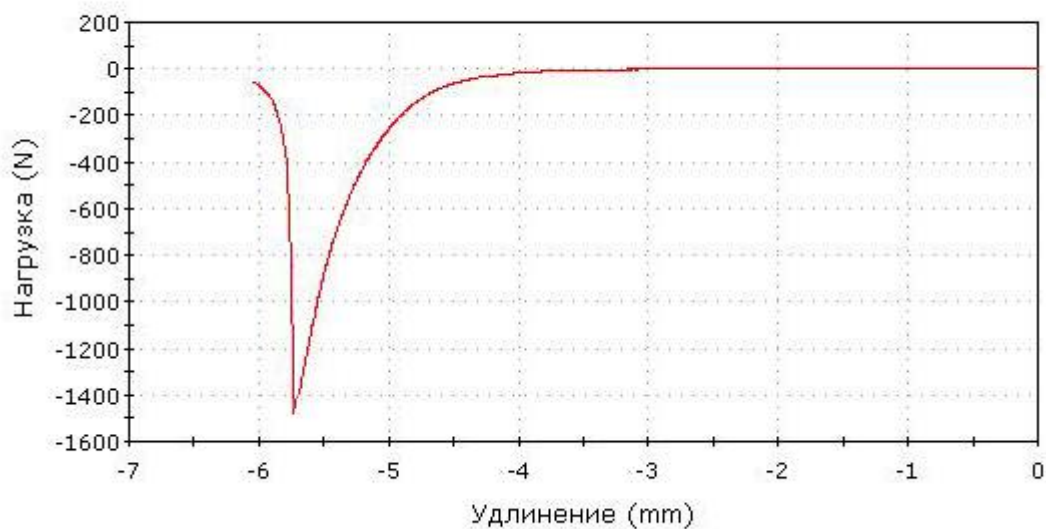


Рисунок 16 – График испытания образца № 40 на приборе Instron

Таблица 20 – Испытания прочности на изгиб песка мелкого с добавлением шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 19%

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 41       | 0,42               | 0,042 | 0,36                                     |
| Образец № 42       | 0,44               | 0,044 | 0,38                                     |
| Средний показатель |                    |       | 0,37                                     |

Образцы с 1 по 1

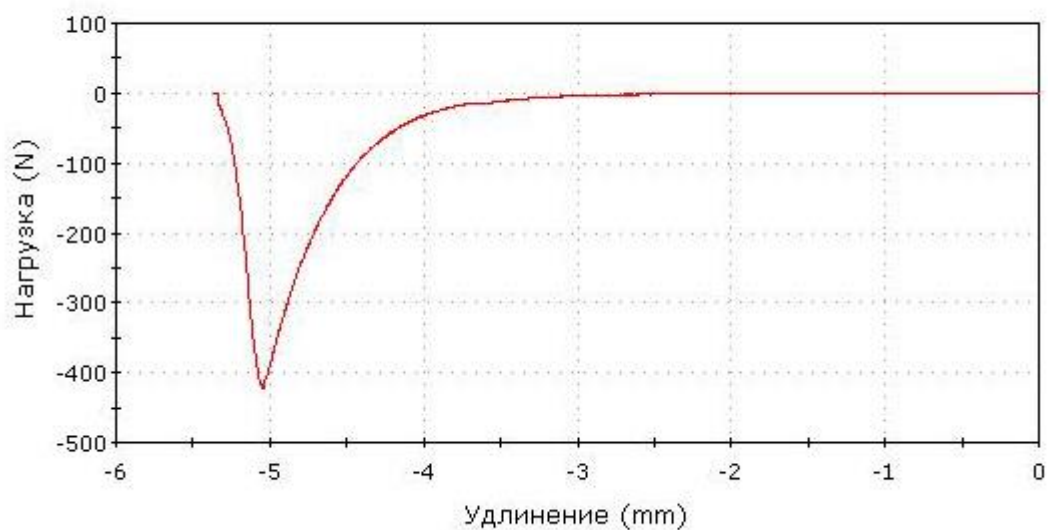


Рисунок 16 – График испытания образца № 41 на приборе Instron

## 2.2 Проведение испытаний на морозостойкость

Таблица 21 – Испытания на морозостойкость марки F25 суглинка полутвердого с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 25%

| Номер образца | Нагрузка N <sub>max</sub> (кН) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Процент потери прочности | Масса образца до замораживания и оттаивания m <sub>0</sub> , г | Масса образца после замораживания и оттаивания m <sub>1</sub> , г | Процент потери массы |
|---------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--|---|----------------------|
| Образец № 27  | 17,1                           | 2,44                              | 0                        | 1842   | 1829  | 0,7                  |
| Образец № 28  | 13,5                           | 1,9                               | 13,63                    | 1860   | 1833  | 1,45                 |

Таблица 22 – Испытания на морозостойкость марки F25 песка мелкого с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 19%

| Номер образца | Нагрузка N <sub>max</sub> (кН) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Процент потери прочности | Масса образца до замораживания и оттаивания m <sub>0</sub> , г | Масса образца после замораживания и оттаивания m <sub>1</sub> , г | Процент потери массы |
|---------------|--------------------------------|-----------------------------------|--------------------------|--|---|----------------------|
| Образец № 27  | 17,1                           | 2,44                              | 0                        | 1842   | 1829  | 0,7                  |
| Образец № 28  | 13,5                           | 1,9                               | 13,63                    | 1860   | 1833  | 1,45                 |

## 2.3 Обработка результатов

Сравним полученные результаты с требованиями ГОСТ и ОДН. Так как данные стабилизированные грунты рассматриваются в качестве основания с дальнейшим нанесением слоя износа из асфальтобетонной смеси, то в соответствии с таблицей А1 ГОСТ 23558-94 рекомендуемая марка прочности для укрепленных грунтов - М40, а марка по морозостойкости F25 (для Красноярска).

Характеристики марки М40:

Предел прочности на сжатие  $\geq 4$  Мпа

Предел прочности на изгиб  $\geq 0,8$  Мпа

Количество циклов заморозки и оттаивания – 25, с допустимой потерей прочности не более 15% и допустимой потерей массы не более 2%.

Также в соответствии с ОДН 218.046-01 для марки прочности М40 для обработанных неорганическими вяжущими материалами модуль упругости должен быть  $\geq 400$  мПа

Таблица 23 – Сравнение результатов исследования

| Наименование                    | Предел прочности на сжатие $\geq 4$ Мпа | Предел прочности на изгиб $\geq 0,8$ Мпа | Циклов заморозки и оттаивания, без критической потери прочности | Модуль упругости $\geq 400$ мПа |
|---------------------------------|---|--|---|---------------------------------|
| Суглинок полутвердый 10%        | 1,86                                    | 1,175                                    | 25  | 260                             |
| Суглинок полутвердый 5%         | 1,37                                    | 0,345                                    | -   | 124                             |
| Почвенно-растительный грунт 10% | 1,37                                    | 0,56                                     | -   | 126                             |
| Почвенно-растительный грунт 5%  | 0,6                                     | 0,325                                    | -   | 63                              |
| Песок мелкий 10%                | 2,2                                     | 1,205                                    | 25  | 280                             |
| Песок мелкий 5%                 | 1,67                                    | 0,37                                     | -   | 107                             |

Выводы: из таблицы 23 видно, что не один из 6 стабилизированных грунтов в полной мере не соответствует всем рекомендациям и требованиям ГОСТ и ОДН. Суглинок полутвердый 5%, почвенно-растительный грунт 10%, почвенно-растительный грунт 5%, песок мелкий 5% не соответствуют не одной рекомендации и требованию, поэтому дальнейшая доработка этих укрепленных грунтов является нецелесообразной.

Суглинок полутвердый 10%, песок мелкий 10% схожи по своим показателям и удовлетворяют 2 рекомендации из 3 (предел прочности на изгиб и морозостойкость), но не удовлетворяют требованию ОДН по модулю упругости. Чтобы повысить уровень прочности до необходимого, возможно увеличить долю шлакопортландцемента в грунте до 18-19%, что является экономически не целесообразно. Также возможно заменить часть цемента на

дешевый материал, такой как золы уноса. Для этого необходимо провести новую серию испытаний.

Замена основания из известнякового щебня на стабилизированный почвенно-растительный слой, в рамках проекта объекта в районе Мичуринского моста, также не представляется возможным, так как данный стабилизированный почвенно-растительный грунт показал очень низкую прочность в ходе испытаний.

В свою очередь, замена основания из известнякового щебня на объекте в районе развязки Северного Шоссе и Енисейского Тракта на суглинок полутвердый с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% является возможным, так как, во-первых, нагрузки на дорожные одежды будут низкими, во-вторых, модуль упругости у оснований из известнякового щебня произведенного в Красноярске и его окрестностях варьируется от 280 до 400 мПа, а модуль упругости местного стабилизированного суглинка 260 мПа, что всего на 7% меньше нижней границы модуля упругости щебеночного основания, что при низких нагрузках на дорожные одежды не является критичным.

В следующем разделе будет рассмотрена экономическая составляющая замены основания из известнякового щебня на стабилизированный суглинок с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% на объекте в районе развязки Северного Шоссе и Енисейского Тракта.



### 3 Экономическая составляющая

#### 3.1 Сравнение стоимости

В этом разделе будет произведено сравнение стоимости одного и того же объекта, с устройством основания из известнякового щебня и стабилизированного суглинка полутвердого с добавлением шлакопортландцемента в размере 10%.

Местоположение объекта: район развязки Северного Шоссе и Енисейского Тракта.

Проектные данные: Парковочная зона. Площадь дорожной одежды – 1980 м<sup>2</sup>, толщина слоя основания – 20 см, толщина слоя асфальтобетона – 7 см, нынешнее основание – суглинок полутвердый.

Задача: Верхняя граница слоя основания щебня (укрепленного грунта) должна быть выше нынешнего основания на 10 см.

Таблица 24 – Калькуляция на работы по устройству основания из щебня

| Наименование            | ед. изм.                   | Кол-во | цена за 1 ед.(руб.) | общая стоимость(руб.) |
|-------------------------|----------------------------|--------|---------------------|-----------------------|
| Щебень 20-40 мм (М1000) | м <sup>3</sup>             | 480    | 550                 | 264000                |
| Доставка щебня          | машн. (16 м <sup>3</sup> ) | 30     | 6000                | 180000                |
| Услуги грейдера ДЗ-180  | смена                      | 6      | 13600               | 81600                 |
| Услуги катка ДУ-84      | смена                      | 6      | 14400               | 86400                 |
| Доставка катка          | рейс                       | 1      | 6000                | 6000                  |
| Заработн. плата рабочих | смена                      | 15     | 1500                | 22500                 |
|                         |                            |        | Общая стоимость :   | <b>640500,00</b>      |

Таблица 25 - Калькуляция на работы по устройству основания из суглинка

| Наименование             | ед. изм. | Кол-во | цена за 1 ед.(руб.) | общая стоимость(руб.) |
|--------------------------|----------|--------|---------------------|-----------------------|
| Шлакопортландцемент М400 | т        | 72     | 3700                | 266400                |
| Доставка цемента         | рейс     | 3      | 4000                | 12000                 |

## Окончание таблицы 25

|  |       |    |                   |                  |
|--|-------|----|-------------------|------------------|
| Услуги самосвала КАМАЗ 65115           | час   | 12 | 1000              | 12000            |
| Услуги грейдера ДЗ-180                 | смена | 5  | 13600             | 68000            |
| Услуги катка ДУ-84                     | смена | 6  | 14400             | 86400            |
| Доставка катка                         | рейс  | 2  | 6000              | 12000            |
| Услуги экскаватора Hyundai 200w-7      | час   | 5  | 2200              | 11000            |
| Амортизация ресайклера Wirtgen WR 2500 | смена | 1  | 6000              | 6000             |
| Доставка ресайклера                    | рейс  | 1  | 10000             | 10000            |
| Заработн. плата водителя ресайклера    | смена | 1  | 2000              | 2000             |
| Услуги ПМ ЗИЛ 130                      | смена | 1  | 6400              | 6400             |
| Заработн. плата рабочих                | смена | 20 | 1500              | 30000            |
|  |       |    | Общая стоимость : | <b>522200,00</b> |

Все цены на услуги и материалы взяты в соответствии со средними по рынку. Как можно увидеть из расчетов, возведение основания из стабилизированного суглинка, при наличии собственного ресайклера, на 22,5% дешевле, чем из щебня. Стоимость покрытия из асфальтобетона не присутствует в калькуляциях, так как она будет одинаковой при любом выборе основания.

Вывод: Стабилизация местных грунтов имеет финансовый потенциал, особенно при применении этой технологии в отдалении от карьеров. А также важной частью раскрытия потенциала этой технологии является постоянный поиск комбинаций недорогих вяжущих.

## **4 Охрана труда**

### **4.1 Охрана труда в технологии укрепления грунтов**

#### Меры безопасности при работе машин

Современные методы укрепления грунтов основаны на применении широкого круга различных вяжущих и добавок химических веществ с максимальной механизацией всех технологических процессов при устройстве конструктивных слоев из укрепленных грунтов. При полной замене ручного труда машинами обеспечиваются безопасность и благоприятные санитарно-гигиенические условия труда рабочих, занятых на производстве. Вместе с тем в современной технологии укрепления грунтов соблюдение правил охраны труда особенно важно, учитывая, что для укрепления грунтов применяются часто химические вещества (и некоторые из них являются вредными для здоровья человека), а также и более высокий уровень механизации всех технологических процессов. Для обеспечения безопасности и нормальных условий труда рабочих, занятых на машинах и находящихся в зоне работ машин, должны выполняться определенные требования. Технический персонал, руководящий производством строительных работ, обязан обеспечить инструктаж всем рабочим о правилах безопасности производства поручаемых им работ, снабдив всех машинистов инструкциями по эксплуатации машин и механизмов, на которых они должны работать, а также по соблюдению правил безопасности применения вяжущих и добавок химических веществ, являющихся вредными.

К управлению машинами и механизмами должны допускаться машинисты, водители, прошедшие специальную подготовку по их устройству и эксплуатации с учетом конкретных условий производства работ на строящемся объекте. Перед началом работы машина должна быть осмотрена машинистом и все неисправности в ней устранены. При

устранении неисправностей- двигатель машины должен быть заглушен, подвижные части машины установлены в безопасное положение, заторможены или надежно закреплены. При обнаружении неисправности в процессе работы машина должна быть немедленно остановлена. По окончании работы должен быть произведен контрольный осмотр машины (механизма) и выполнены необходимые операции по ее ежедневному техническому обслуживанию. Пусковые приспособления должны быть выключены и заперты, ходовая часть заторможена. Возможность запуска машины посторонними лицами должна быть совершенно исключена.

Передачные механизмы (зубчатые колеса, цепные передачи, муфты и прочие вращающиеся детали машины) должны быть надежно и прочно ограждены со всех сторон. Снятие ограждений, кожухов, канатов при работе машины не допускается. При начале движения, пуске рабочих органов машины водитель обязан дать звуковой сигнал. При работе агрегата, составленного из трактора- тягача и прицепной машины, должна поддерживаться сигнальная связь машиниста тягача и оператора на прицепной машине. По сигналу оператора прицепной машины агрегат должен быть немедленно остановлен: при наличии препятствий, которые нельзя преодолеть выключением или подъемом рабочих органов; если перед прицепной машиной и трактором окажется человек; при поломке или неисправности отдельных частей агрегата. При одновременной и совместной работе на рабочей захватке двух и более двигающихся машин или агрегатов минимальная дистанция между ними должна быть не менее 20 м.

Во время работы машины запрещается: находиться в ней посторонним лицам, не связанным с выполнением рабочего процесса, а также загромождать кабину (площадку управления) предметами, затрудняющими доступ к органам управления; передвигаться по земляному полотну ближе 1 м к его бровке. Запрещается также находиться вблизи машины подсобным рабочим, удаляющим предметы на пути движения машины и из-под ее

рабочих органов. Заправлять машину топливно-смазочными материалами следует днем, в случае необходимости применения искусственного освещения оно должно быть электрическим. При работе дорожной фрезы не допускается находиться рабочим сзади ротора ближе 15 м; при начальном заглублении рабочих органов однопроходной грунтосмесительной машины находиться сзади нее ближе 5 м. Запрещается производить прочистку сопел дозировочно-распределительной системы фрезы и однопроходной грунтосмесительной машины при вращающемся дозировочном насосе.

При замене и креплении лопаток фрезерного ротора, мешалки и других рабочих органов грунтосмесительных машин ремонтируемые агрегаты должны быть надежно зафиксированы в положении, при котором исключено их самопроизвольное и опасное перемещение. При подсоединении к грунтосмесительной машине, распределителю цемента шланга от цементовоза с пневматической разгрузкой и при отсоединении его глаза рабочего должны быть защищены специальными очками. Эти операции необходимо выполнять при полной остановке машин. Нельзя допускать очистку вальцов, пневмоколес катка от налипшего на них материала или смачивание их вручную в процессе движения катка и производить исправление неровностей укатываемой поверхности ручным инструментом перед движущимся катком или вблизи него. При транспортировании однопроходной грунтосмесительной машины и других машин на пневматических шинах на прицепе к тягачу необходимо предварительно опробовать надежность совместной работы тормозов тягача и буксируемой машины. При остановках в пути запрещается оставлять машины на крутых уклонах, без подкладки упоров под колеса. При монтаже карьерных грунтосмесительных установок необходимо обеспечить машинисту видимость всех агрегатов, управляемых с централизованного пульта. При этом независимо от зрительной связи между машинистами на отдельных

постах обслуживания установки должна быть оборудована система звуковой или световой сигнализации.

Склады хранения жидких вяжущих должны быть оборудованы пешеходными трапами с перильными ограждениями высотой не менее 1 м и решетчатыми настилами, которые должны быть всегда чистыми от загрязнения вяжущим. Транспортные" устройства — ленточные конвейеры, перегрузочные узлы на них должны быть защищены для предупреждения запыления окружающей среды в соответствии с действующими санитарно-гигиеническими нормами. Все трансмиссионные и приводные узлы должны иметь надежные ограждения; для обслуживания трансмиссий допускаются рабочие только в установленной спецодежде. Электросиловые установки, электродвигатели должны иметь защитное заземление или зануление, при котором в случае повреждения изоляции напряжение ограничивается до безопасной величины или поврежденное электрооборудование автоматически отключается. Персонал, обслуживающий электросиловое оборудование, должен быть снабжен спецодеждой и обувью.

Меры безопасности при использовании вяжущих материалов и других вредных веществ

К числу вяжущих и добавок, используемых для укрепления грунтов в порошкообразном состоянии и чаще всего применяемых, относятся цемент, известь, золы уноса. Из этих веществ наиболее вредное воздействие на здоровье человека оказывает известь, и особенно негашеная. Наименее вредна гидрофобная известь, вследствие того что находящиеся на поверхности ее частиц пленки в значительной степени уменьшают пылимость извести. Пыль извести раздражает слизистые оболочки дыхательных путей, и особенно глаз. Тонкие частицы извести, попадая на влажную кожу, вызывают сильные ожоги, язвы и хроническое раздражение. Пыль цемента и зол уноса не имеет столь активного вредного действия на

глаза, кожу, дыхательные органы человека. Однако при длительном воздействии пыль цемента и зол уноса может вызвать у рабочих заболевание силикозом. Поэтому при работах с этими веществами особое внимание должно быть обращено на устранение пылимости этих веществ. Необходимым требованием для выполнения этого является максимальная герметизация всего технологического процесса. Погрузка и разгрузка извести и других веществ должны производиться механизированным способом, транспортироваться в цементовозах с погрузкой в баки распределительных машин пневматическим способом с герметизацией горловин, предупреждающих распыливание этих веществ.

Все механизмы, через которые проходят сыпучие материалы в распределительных устройствах, особенно гибкие шарниры, должны быть покрыты брезентовыми кожухами, предотвращающими пыление извести или других сыпучих веществ при их подаче и перемешивании с грунтом.

Чтобы предотвратить и ослабить вредное действие извести на организм человека, следует принимать также меры, обеспечивающие ограничение соприкосновения людей с этим веществом. Для этого используются индивидуальные защитные приспособления: спецодежда, резиновые перчатки, сапоги, защитные очки в кожаной оправе с респиратором. Нельзя допускать к работе с известью лиц, страдающих кожными заболеваниями и болезнями дыхательных путей, а также тех, у которых имеются на коже ссадины, трещины и раздражения. Людей, работающих с известью, следует обучить оказанию первой помощи при попадании извести на кожу и слизистые оболочки глаз. Простейшими средствами при попадании извести на кожу является нейтрализация действия ее 5%-ным раствором уксуса или растительным маслом, а затем промывка водой. При попадании извести в глаз следует немедленно промыть его водой и пострадавшего направить к окулисту.

При укреплении грунтов цементом и другими неорганическими вяжущими в качестве добавок используются водные растворы различных неорганических солей и щелочей: соды каустической, соды кальцинированной, сернокислого железа и магнезия, углекислого калия, хлорного железа, хлористого кальция, натрия двууглекислого. Из этих веществ наиболее вредными для здоровья человека являются каустическая сода  $\text{NaOH}$ , углекислый калий  $\text{K}_2\text{CO}_3$  и в несколько меньшей степени хлорное железо  $\text{FeCl}_3$  и хлористый кальций  $\text{CaCl}_2$ . Эти вещества вызывают кожные заболевания и вредно действуют на слизистые оболочки носа, глаз, а также дыхательных путей. Для предупреждения вредного действия этих веществ необходимо соблюдать меры предосторожности при работе с ними (например, ни в коем случае не брать руками кристаллы этих веществ) и работать только в спецодежде и в защитных очках. Для приготовления растворов этих веществ, дробления и транспортирования должна быть предусмотрена механизация с герметизацией этих процессов. Растворы следует приготавливать в открытых емкостях, оборудованных механическими мешалками, загрузочными приспособлениями и насосами для перекачки. Емкости для перемешивания должны быть ограждены решетками с целью исключения возможности забрызгивания работающих раствором или пеной. Неиспользованные остатки этих веществ и их растворов, а также смывные воды должны собираться в ямах, которые следует устраивать от жилья, животноводческих ферм, колодцев и водоемов на расстоянии не менее 200 м. Лица, страдающие кожными болезнями и болезнями дыхательных путей, не следует допускать к работе с применением указанных вредных веществ. При попадании этих веществ на кожу и в глаза для нейтрализации их вредного действия средства аналогичны тем, которые используются при работе с известью. При попадании на кожу хлорного железа целесообразно после промывки ее водой промыть 2%-ным раствором пищевой соды  $\text{NaHCO}_3$ .



В технологии укрепления грунтов органическими вяжущими с использованием жидких битумов, а также при приготовлении на строительстве битумных эмульсий наибольшую опасность для работающих представляют ожоги разогретым битумом. Кроме этого, при частом попадании на кожу битум может вызвать кожные заболевания. Поэтому при работе с битумом необходимо соблюдать определенные правила обращения с этими материалами и соответствующую противопожарную безопасность. Наполнение в распределительную систему машины органических материалов предусматривается только механизированным способом. При наполнении цистерны битумовоза битумом следует для избежания ожогов не допускать переполнения цистерны и делать это при заторможенной машине. При нагревании в цистерне жидкого битума запрещается производить подогрев даже при незначительно оголенных жаровых трубах. Разжигать горелки на стоянке можно только в том случае, когда битум покрывает жаровые трубы слоем более 20 см, а во время движения можно нагревать материал только при полной цистерне.

При перевозке и розливе жидких битумов следует соблюдать определенные правила движения. Транспортная скорость гудронатора или битумовоза с полной цистерной не должна превышать 20 км/ч с тем, чтобы устранить возможность выплескивания материала. При розливе битума запрещается находиться ближе чем на 10 м от распределительной трубы. Все работы с битумами (жидкими и эмульсиями) следует производить в рукавицах. При укреплении грунтов органическими вяжущими применяются в качестве добавок различные поверхностно-активные вещества (ПАВ). ПАВ используются также при размельчении грунтов и как эмульгаторы для приготовления эмульсий. При работе с поверхностноактивными веществами, особенно смолами твердых топлив, содержащими в своем составе фенолы и катионактивные вещества типа высших алифатических аминов (например, октадециламина), необходимо принимать меры предосторожности, так как

эти вещества могут вызвать заболевание слизистых оболочек и кожи. Для предотвращения этого работы следует производить в спецодежде, резиновых перчатках и сапогах. При разогреве смол твердых топлив рабочие должны находиться с наветренной стороны, чтобы избежать вдыхания вредных паров этих веществ.

Высокая культура работ в технологии укрепления грунтов, применение доступных мер защиты при работе с вредными химическими веществами, а также соблюдение охраны труда обеспечивают безопасность и санитарно-гигиенические условия труда работающих на производстве.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исходя из исследований, проведённых в рамках данной курсовой работы, в совокупности с приведенными данными из ранее написанных работ, а также проведенными экономическими подсчетами, действительными для Красноярска и его окрестностей, можно сделать вывод, что технология стабилизации местных грунтов портландцементом является конкурентоспособной и может быть реализована в Красноярском крае.

Для этого необходимо:

- 1) Проведение необходимого количества серий опытов, с разными вяжущими и активными добавками и их количеством, чтобы найти оптимальный рецепт для наиболее часто встречающихся в Красноярском крае видов грунта.
- 2) Самым оптимальным образом выстроить процесс организации работ, так как это коренным образом влияет на ценообразование.
- 3) Закупка парка современной, зарубежной техники, которая позволяет существенно увеличить объемы производства и автоматизировать процесс смешивания грунта, вяжущего, активных добавок и воды, что сводит к минимуму потерю качества при производстве.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

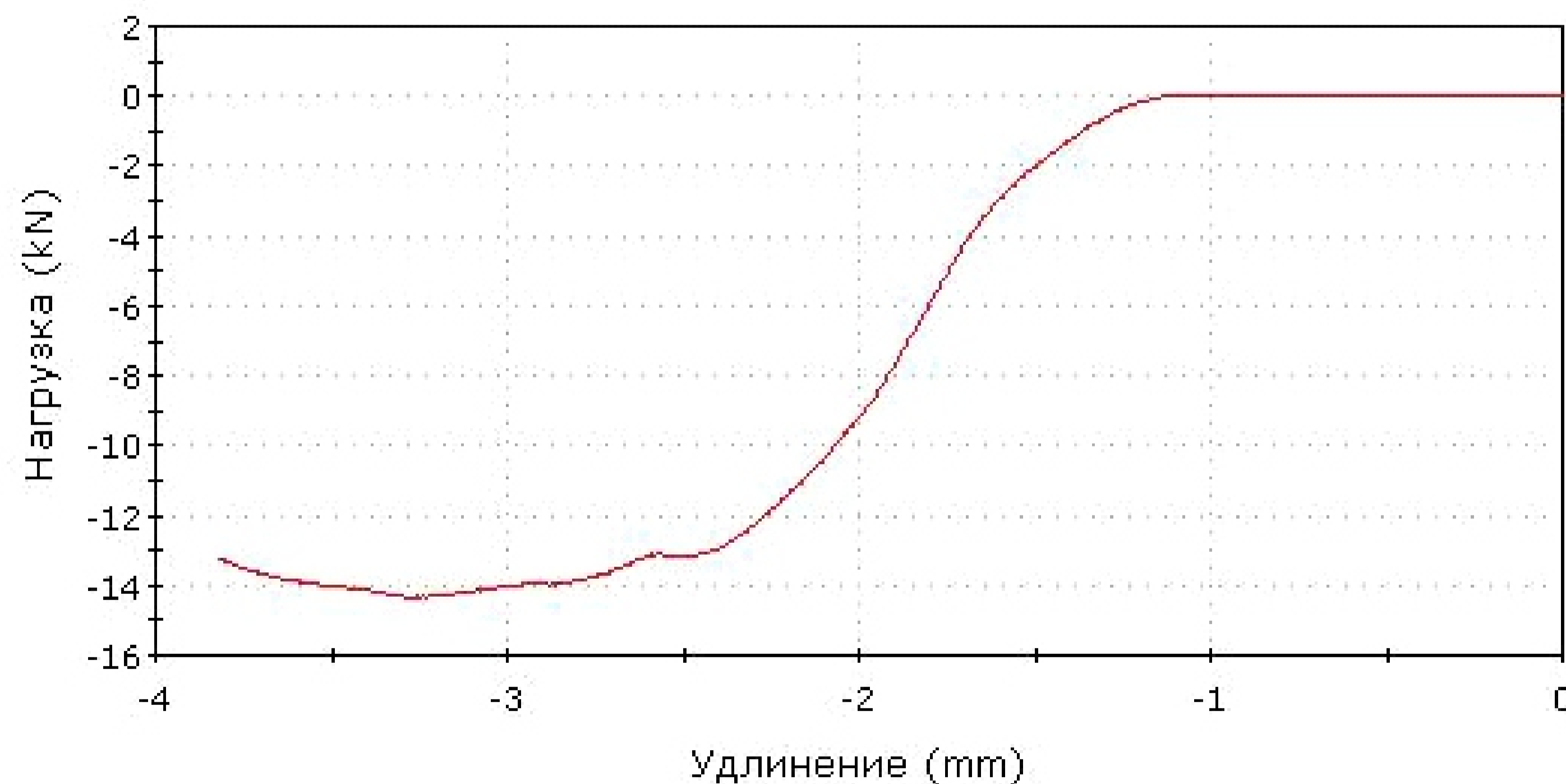
1. СП 34.13330.2012. Автомобильные дороги
2. ГОСТ 25100-2011 Грунты. Классификация.
3. ГОСТ 23558-94 Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими материалами, для дорожного и аэродромного строительства.
4. ГОСТ 10180 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам
5. ГОСТ 10060.1 Бетоны. Базовый метод определения морозостойкости.
6. ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд.
7. В.М. Безрук, И.Л. Гурячков, Т.М. Луканина, Р.А. Агапова. Укрепленные грунты. (Свойства и применение в дорожном и аэродромном строительстве) – М.: Транспорт, 1982. – 231 с.
8. В.М. Безрук, М.Н. Ритов, К.М. Глаголева, И.К. Чернов. Дорожные основания и покрытия из укрепленных грунтов – Транспорт, 1966 – 128 с.
9. Либерман М.А., Исаев В.С., Глухман Л.И., Ястребова Л.Н., Безрук В.М., Левицкий Е.Ф. Технология и механизация укрепления грунтов в дорожном строительстве. – Транспорт, 1976 – 232 с.

Испытания прочности на сжатие для суглинка с добавлением  
шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 25%.

| Номер образца        | Нагрузка $N_{max}$ (кН) | Удлинение $\Delta l_{max}$ (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация $\epsilon$ | Модуль упругости E, Мпа |
|----------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Суглинок полутвердый |                         |                                 | 0,25                              |                                     | 22                      |
| Образец № 1          | 13,7                    | 0,9                             | 1,96                              | 0,006                               | 286                     |
| Образец № 2          | 10,8                    | 1,1                             | 1,54                              | 0,002                               | 266                     |
| Образец № 3          | 14,5                    | 2,1                             | 2,07                              | 0,003                               | 229                     |
| Средний показатель   |                         |                                 | 1,86                              |                                     | 260                     |

График испытания образца № 3 на приборе Instron

Образцы с 1 по 1

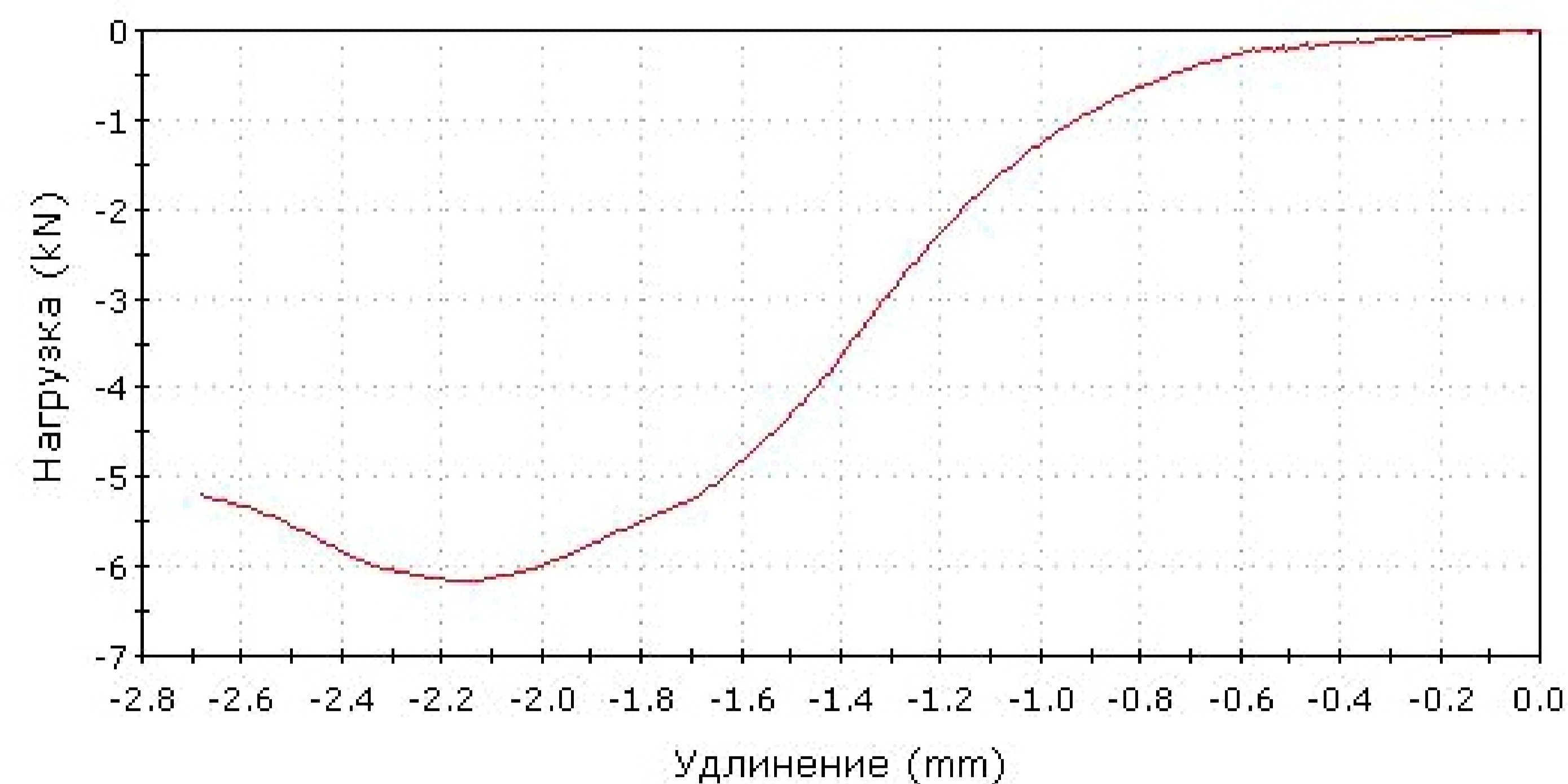


Испытания прочности на сжатие для суглинка с добавлением  
шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 25%.

| Номер образца        | Нагрузка $N_{max}$ (кН) | Удлинение $\Delta l_{max}$ (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация $\epsilon$ | Модуль упругости E, Мпа |
|----------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------------|-------------------------|
| Суглинок полутвердый |                         |                                 | 0,25                              |                                     | 22                      |
| Образец № 4          | 8,6                     | 1,1                             | 1,23                              | 0,002                               | 179                     |
| Образец № 5          | 6,2                     | 2,1                             | 0,89                              | 0,003                               | 96                      |
| Образец № 6          | 14                      | 2,2                             | 2                                 | 0,006                               | 96                      |
| Средний показатель   |                         |                                 | 1,37                              |                                     | 124                     |

График испытания образца № 5 на приборе Instron

Образцы с 1 по 1



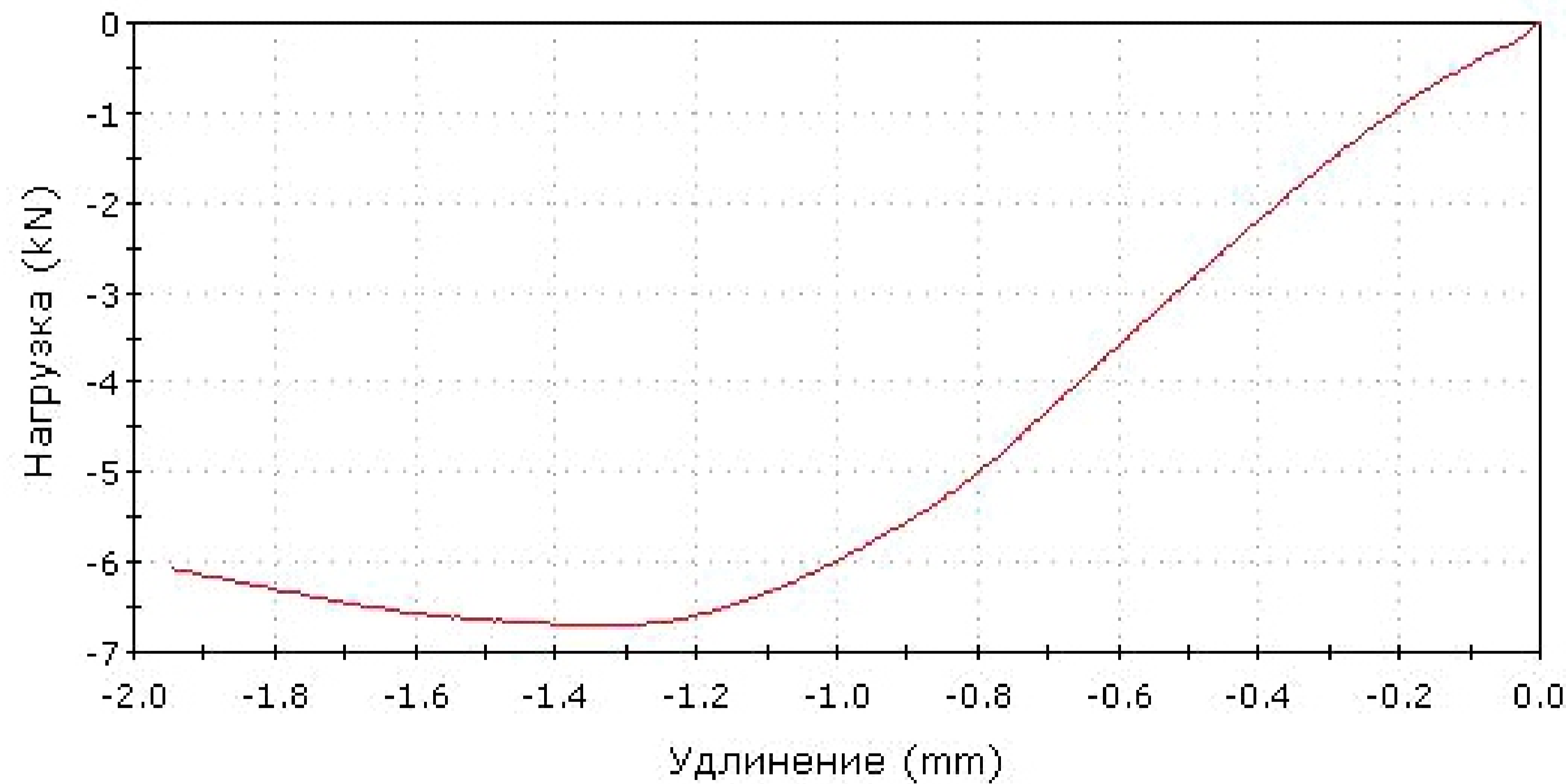
|   |             |              |       |                             |             |
|---|-------------|--------------|-------|-----------------------------|-------------|
| ДР-270205.65-2016   |             |              |       |                             |             |
| Инженерно-строительный институт<br>Сибирский федеральный университет                            |             |              |       |                             |             |
| Изм.  | Кол.        | Лист         | М.дож | Подп.                       | Дата        |
|   |             | Серватинский |       |                             |             |
| Зав. кафедр.  | Чайкин Е.А. |              |       |                             |             |
| Руководит.  | Чайкин Е.А. |              |       |                             |             |
| Исследование характеристик стабилизированного грунта, применяемого в конструкции дорожных одежд |             |              |       | Страниц                     | Лист        |
| Результаты испытания прочности суглинка на сжатие   |             |              |       | ДР                          | 1           |
| Н. контроль<br>Дипломник  |             |              |       | Чайкин Е.А.<br>Тетерин Д.А. | Листов<br>6 |
|   |             |              |       | Кафедра АД и ГС             |             |

Испытания прочности на сжатие для почвенно-растительного грунта с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 31%.

| Номер образца               | Нагрузка Nmax (кН) | Удлинение Δlmax (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация ε | Модуль упругости E, Мпа |
|-----------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Почвенно-растительный грунт |                    |                      | -                                 |                            | -                       |
| Образец № 13                | 10                 | 1,5                  | 1,43                              | 0,002                      | 154                     |
| Образец № 14                | 6,8                | 1,3                  | 0,97                              | 0,003                      | 90                      |
| Образец № 15                | 8,7                | 1,4                  | 1,22                              | 0,003                      | 133                     |
| Средний показатель          |                    |                      | 1,37                              |                            | 126                     |

График испытания образца № 14 на приборе Instron

Образцы с 1 по 1

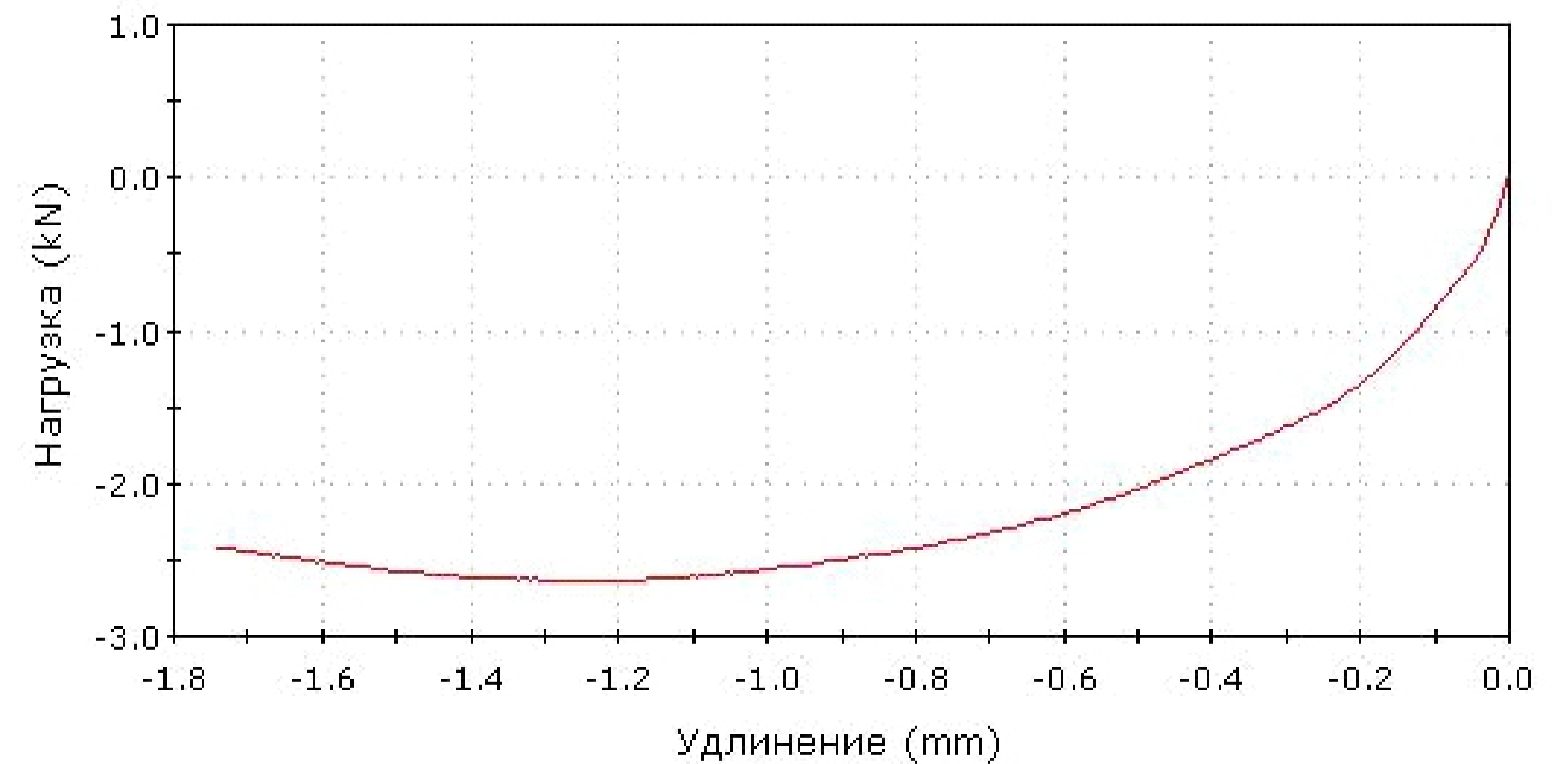


Испытания прочности на сжатие для почвенно-растительного грунта с добавлением шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 31%.

| Номер образца               | Нагрузка Nmax (кН) | Удлинение Δlmax (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация ε | Модуль упругости E, Мпа |
|-----------------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Почвенно-растительный грунт |                    |                      | -                                 |                            | -                       |
| Образец № 16                | 4,3                | 2,5                  | 0,61                              | 0,007                      | 41                      |
| Образец № 17                | 5,5                | 1,85                 | 0,79                              | 0,002                      | 81                      |
| Образец № 18                | 2,7                | 1,2                  | 0,39                              | 0,004                      | 67                      |
| Средний показатель          |                    |                      | 0,6                               |                            | 63                      |

График испытания образца № 18 на приборе Instron

Образцы с 1 по 1



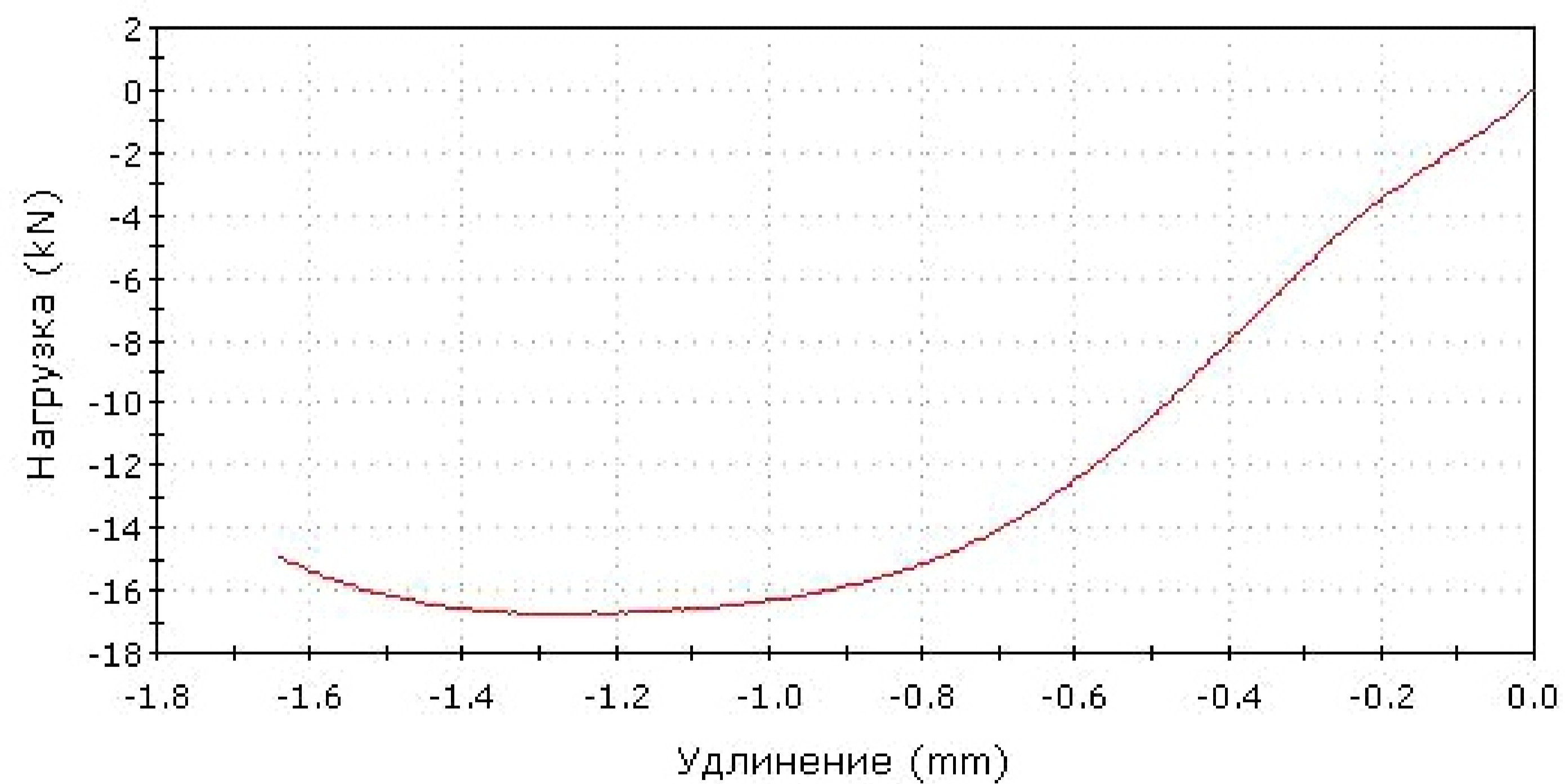
|              |              |      |        |       |      |   |      |        |
|--------------|--------------|------|--------|-------|------|---|------|--------|
|              |              |      |        |       |      | ДР-270205.65-2016   |      |        |
|              |              |      |        |       |      | Инженерно-строительный институт<br>Сибирский федеральный университет                            |      |        |
| Изм.         | Кол.         | Лист | М.доп. | Подп. | Дата |   |      |        |
| Зав. кафедр. | Серватинский |      |        |       |      | Исследование характеристик стабилизированного грунта, применяемого в конструкции дорожных одежд |      |        |
| Руководит.   | Чайкин Е.А.  |      |        |       |      | Специя  | Лист | Листов |
|              |              |      |        |       |      | ДР  | 2    | 6      |
| Н. контроль  | Чайкин Е.А.  |      |        |       |      | Результаты испытания прочности почвенно-растительного грунта на сжатие                          |      |        |
| Дипломник    | Тетерин Д.А. |      |        |       |      | Кафедра АД и ГС   |      |        |

Испытания прочности на сжатие для песка мелкого с добавлением  
шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 19%.

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | Удлинение Δlmax (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация ε | Модуль упругости E, Мпа |
|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Песок мелкий       |                    |                      | 0,3                               |                            | 26                      |
| Образец № 7        | 20                 | 1,75                 | 2,9                               | 0,008                      | 174                     |
| Образец № 8        | 9                  | 1,3                  | 1,29                              | 0,002                      | 286                     |
| Образец № 9        | 16,8               | 1,1                  | 2,4                               | 0,002                      | 381                     |
| Средний показатель |                    |                      | 2,2                               |                            | 280                     |

График испытания образца № 9 на приборе Instron

Образцы с 1 по 1

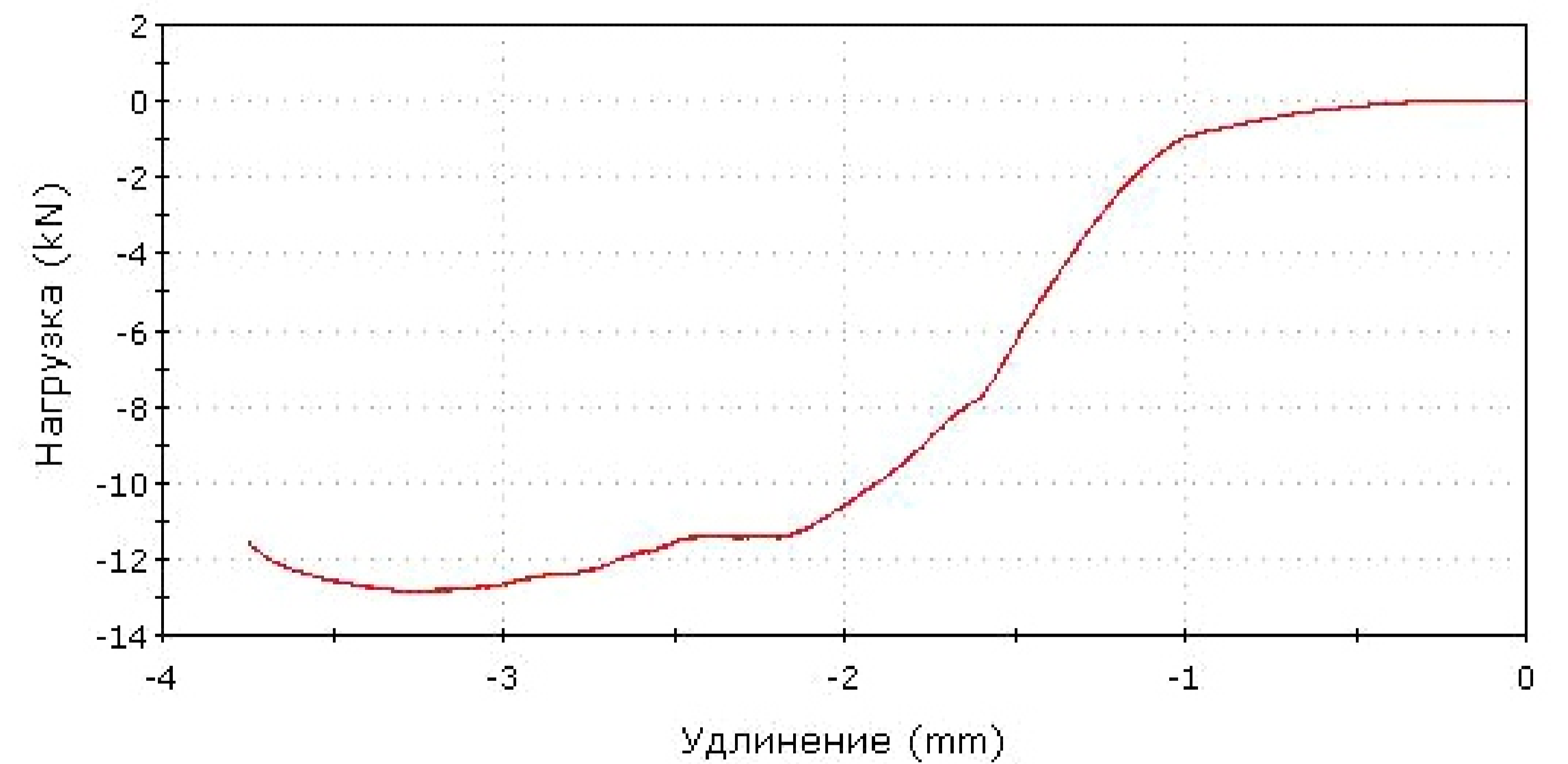


Испытания прочности на сжатие для песка мелкого с добавлением  
шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 19%.

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | Удлинение Δlmax (мм) | Предел прочности на сжатие R, Мпа | Относительная деформация ε | Модуль упругости E, Мпа |
|--------------------|--------------------|----------------------|-----------------------------------|----------------------------|-------------------------|
| Песок мелкий       |                    |                      | 0,3                               |                            | 26                      |
| Образец № 10       | 13                 | 2,65                 | 1,86                              | 0,003                      | 190                     |
| Образец № 11       | 5,2                | 0,9                  | 0,74                              | 0,002                      | 84                      |
| Образец № 12       | 6,2                | 0,89                 | 2,4                               | 0,003                      | 47                      |
| Средний показатель |                    |                      | 1,67                              |                            | 107                     |

График испытания образца № 10 на приборе Instron

Образцы с 1 по 1



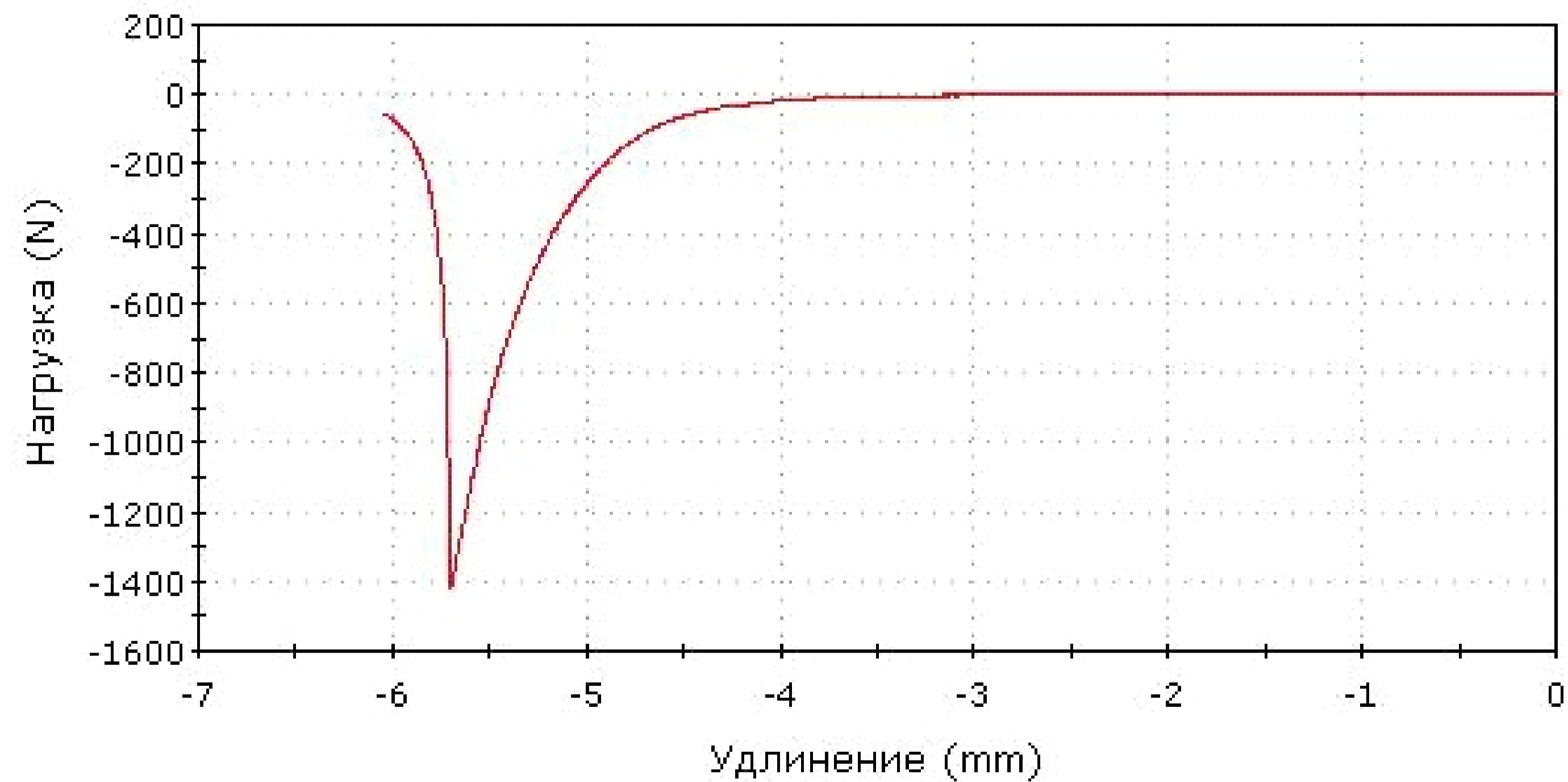
|                          |                             |      |        |       |      |   |      |        |
|--------------------------|-----------------------------|------|--------|-------|------|---|------|--------|
|                          |                             |      |        |       |      | ДР-270205.65-2016   |      |        |
|                          |                             |      |        |       |      | Инженерно-строительный институт<br>Сибирский федеральный университет                                  |      |        |
| Изм.                     | Кол.                        | Лист | М.доп. | Подп. | Дата | Исследование характеристик<br>стабилизированного грунта, применяемого<br>в конструкции дорожных одежд |      |        |
| Зав. кафедр.             | Серватинский                |      |        |       |      | Страниц   | Лист | Листов |
| Руководит.               | Чайкин Е.А.                 |      |        |       |      | ДР  | 3    | 6      |
|                          |                             |      |        |       |      | Результаты испытания<br>прочности песка на сжатие   |      |        |
| Н. контроль<br>Дипломник | Чайкин Е.А.<br>Тетерин Д.А. |      |        |       |      | Кафедра АД и ГС   |      |        |

Испытания прочности на изгиб для суглинка полутвердого с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 25%.

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 31       | 1,42               | 0,142 | 1,21                                     |
| Образец № 32       | 1,33               | 0,133 | 1,14                                     |
| Средний показатель |                    |       | 1,175                                    |

График испытания образца № 31 на приборе Instron

Образцы с 1 по 1

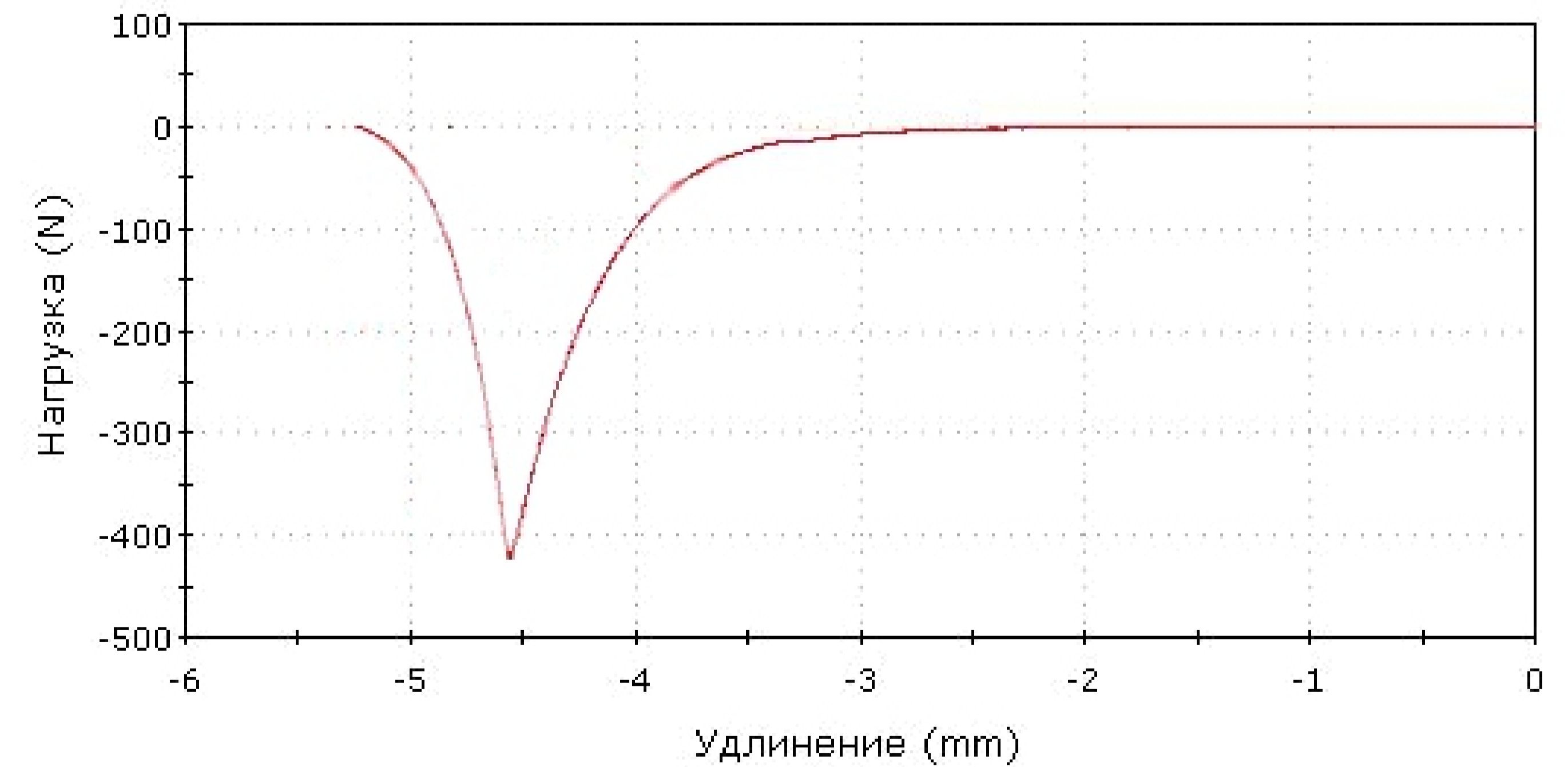


Испытания прочности на изгиб для суглинка полутвердого с добавлением шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 25%.

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 33       | 0,43               | 0,043 | 0,37                                     |
| Образец № 34       | 0,37               | 0,037 | 0,32                                     |
| Средний показатель |                    |       | 0,345                                    |

График испытания образца № 33 на приборе Instron

Образцы с 1 по 1



|              |              |      |        |       |      |   |      |        |
|--------------|--------------|------|--------|-------|------|---|------|--------|
|              |              |      |        |       |      | ДР-270205.65-2016   |      |        |
|              |              |      |        |       |      | Инженерно-строительный институт<br>Сибирский федеральный университет                            |      |        |
| Изм.         | Кол.         | Лист | М.доп. | Подп. | Дата | Исследование характеристик стабилизированного грунта, применяемого в конструкции дорожных одежд |      |        |
| Зав. кафедр. | Серватинский |      |        |       |      | Стадия  | Лист | Листов |
| Руководит.   | Чайкин Е.А.  |      |        |       |      | ДР  | 4    | 6      |
|              |              |      |        |       |      | Результаты испытания прочности суглинка на изгиб  |      |        |
| Н. контроль  | Чайкин Е.А.  |      |        |       |      | Кафедра АД и ГС   |      |        |
| Дипломник    | Тетерин Д.А. |      |        |       |      |   |      |        |

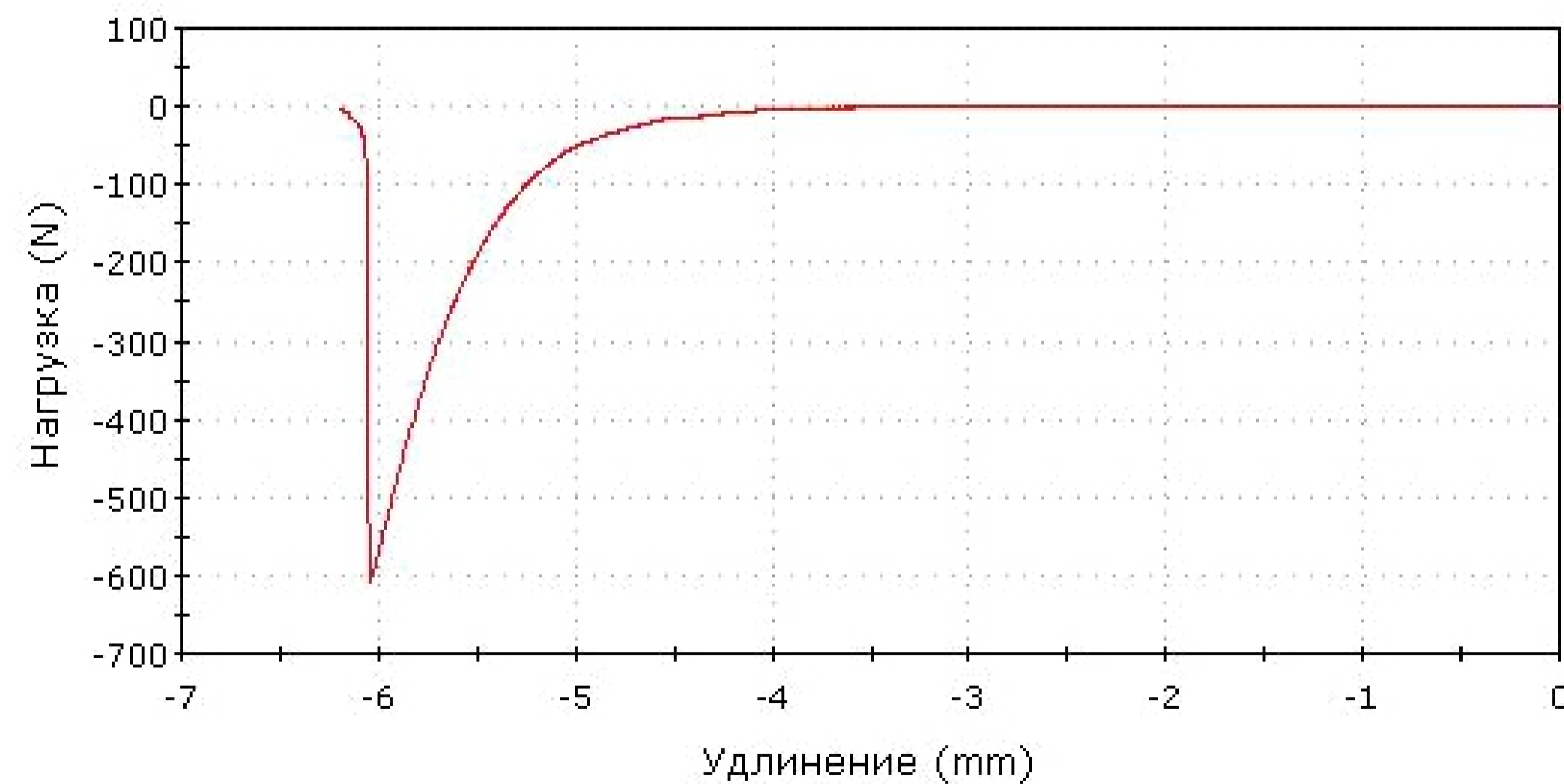


Испытания прочности на изгиб почвенно-растительного грунта с добавлением шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 31%.

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 35       | 0,61               | 0,061 | 0,52                                     |
| Образец № 36       | 0,71               | 0,071 | 0,61                                     |
| Средний показатель |                    |       | 0,56                                     |

График испытания образца № 35 на приборе Instron

Образцы с 1 по 1

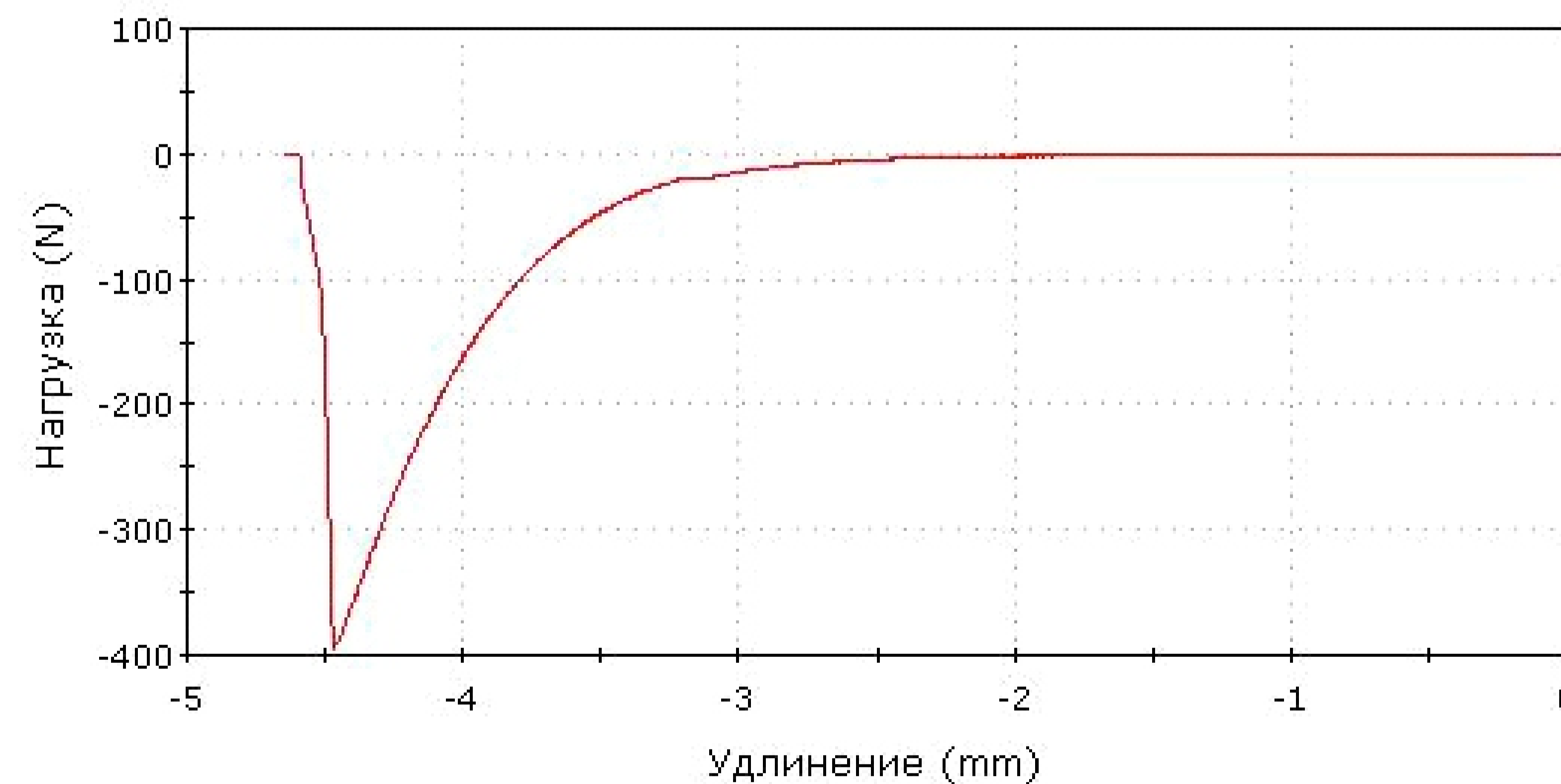


Испытания прочности на изгиб почвенно-растительного грунта с добавлением шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 31%.

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 37       | 0,36               | 0,036 | 0,31                                     |
| Образец № 38       | 0,4                | 0,04  | 0,34                                     |
| Средний показатель |                    |       | 0,325                                    |

График испытания образца № 38 на приборе Instron

Образцы с 1 по 1

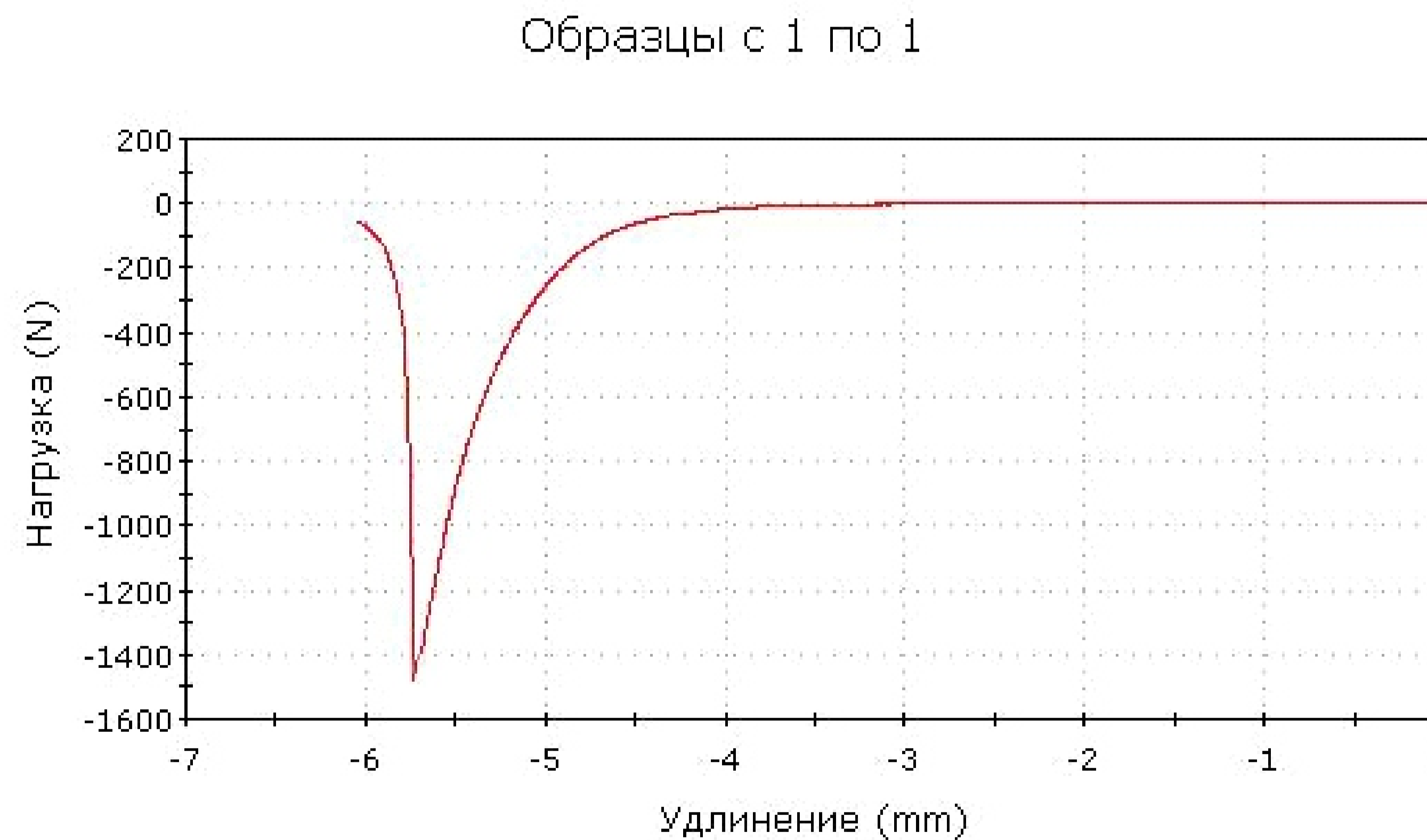


|                       |              |      |        |       |      |   |      |        |
|-----------------------|--------------|------|--------|-------|------|---|------|--------|
|                       |              |      |        |       |      | ДР-270205.65-2016   |      |        |
|                       |              |      |        |       |      | Инженерно-строительный институт<br>Сибирский федеральный университет                            |      |        |
| Изм.                  | Кол.         | Лист | М.дог. | Подп. | Дата | Исследование характеристик стабилизированного грунта, применяемого в конструкции дорожных одежд |      |        |
| Зав. кафедр.          | Сербагинский |      |        |       |      | Стадия  | Лист | Листов |
| Руководит.            | Чайкин Е.А.  |      |        |       |      | ДР  | 5    | 6      |
|                       |              |      |        |       |      | Результаты испытания прочности почвенно-растительного грунта на изгиб                           |      |        |
| Н. контроль Дипломник | Чайкин Е.А.  |      |        |       |      | Кафедра АД и ГС   |      |        |
|                       | Тетерин Д.А. |      |        |       |      |   |      |        |

Испытания прочности на изгиб песка мелкого с добавлением  
шлакопортландцемента в размере 10% и добавлением воды в размере 19%.

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 39       | 1,32               | 0,132 | 1,13                                     |
| Образец № 40       | 1,5                | 0,15  | 1,28                                     |
| Средний показатель |                    |       | 1,205                                    |

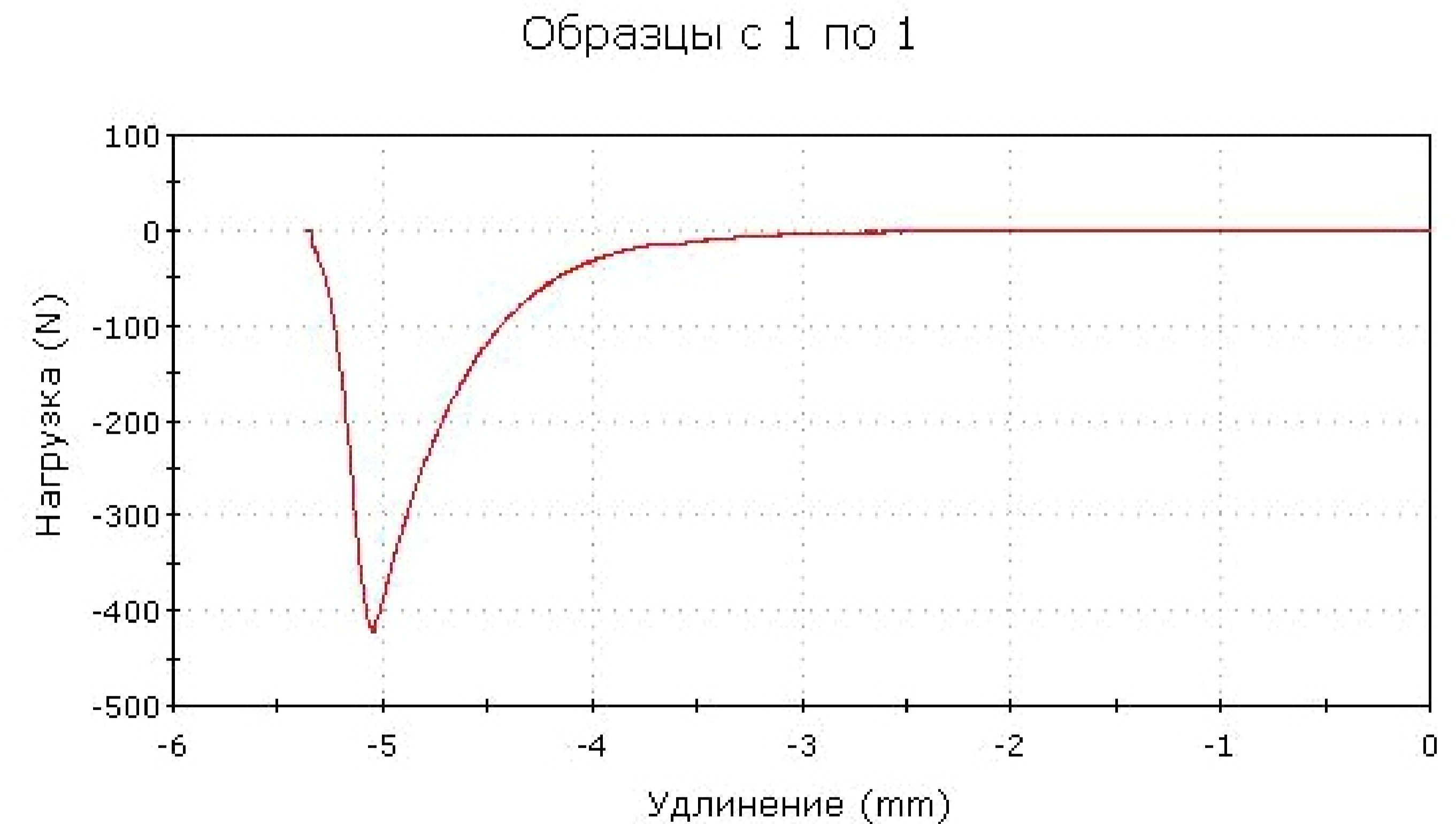
График испытания образца № 40 на приборе Instron



Испытания прочности на изгиб песка мелкого с добавлением  
шлакопортландцемента в размере 5% и добавлением воды в размере 19%.

| Номер образца      | Нагрузка Nmax (кН) | M     | Предел прочности на изгиб $\sigma$ , Мпа |
|--------------------|--------------------|-------|--|
| Образец № 41       | 0,42               | 0,042 | 0,36                                     |
| Образец № 42       | 0,44               | 0,044 | 0,38                                     |
| Средний показатель |                    |       | 0,37                                     |

График испытания образца № 41 на приборе Instron



|             |              |      |        |       |      |   |        |      |        |
|-------------|--------------|------|--------|-------|------|---|--------|------|--------|
|             |              |      |        |       |      | ДР-270205.65-2016   |        |      |        |
|             |              |      |        |       |      | Инженерно-строительный институт<br>Сибирский федеральный университет                            |        |      |        |
| Изм.        | Кол.         | Лист | М.доп. | Подп. | Дата | Исследование характеристик стабилизированного грунта, применяемого в конструкции дорожных одежд | Стация | Лист | Листов |
|             |              |      |        |       |      | ДР  | 6      | 6    |        |
|             |              |      |        |       |      | Результаты испытания прочности песка на изгиб   |        |      |        |
|             |              |      |        |       |      | Кафедра АД и ГС   |        |      |        |
| Н. контроль | Чайкин Е.А.  |      |        |       |      |   |        |      |        |
| Дипломник   | Тетерин Д.А. |      |        |       |      |   |        |      |        |