

# **Разработка комплексного вяжущего на основе отходов промышленного производства для укрепления местных грунтов, применяемых в основаниях дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения**

Плюта Ксения Викторовна

Аспирантура/кафедра автомобильных дорог.  
ФГБОУ ВО ИРНИТУ, Иркутск, Россия.

## **Аннотация**

Строительство автомобильных дорог сопряжено с потреблением большого количества высокопрочных каменных материалов, однако количество месторождений этих материалов на территории Российской Федерации ограничено. Что приводит к увеличению затрат на транспортирование и значительному увеличению общей стоимости строительства, реконструкции и ремонта автомобильных дорог.

Внедрение новых составов для укрепления местных грунтов на основе промышленных отходов является более дешевым и эффективным методом улучшения качества дорожных одежд, тем самым увеличивается межремонтный срок, что в свою очередь позволит сократить расходы на эксплуатационное обслуживание, а также позволит утилизировать отходы промышленного производства.

Учитывая вышеизложенное сформулирована цель исследования – разработка состава грунта, укрепленного неорганическим вяжущим на основе техногенных отходов Иркутской области, в основаниях дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения в условиях резко континентального климата.

В процессе выполнения работы получены физико-механические и химические характеристики отхода производства плавиковой кислоты – фторгипса, отхода тепловых электростанций – зол-уноса, грунтов. На основе полученных данных разработан состав комплексного вяжущего.

Устройство оснований дорожных одежд из местных грунтов, укрепленных комплексным вяжущим взамен использования привозных высокопрочных материалов, позволит значительно снизить стоимость строительства, реконструкции и капитального ремонта автомобильных дорог и экологическую нагрузку в регионах Российской Федерации.

**Ключевые слова:** строительство, ремонт, реконструкция автомобильных дорог; отходы промышленного производства; укрепление грунтов; фторгипс; золы уноса; неорганические вяжущие; комплексное вяжущее.

## **1. Введение**

По оценкам ФГУ НИЦПУРО, ежегодно в Российской Федерации образуется более 4 млрд. тонн отходов промышленного производства.

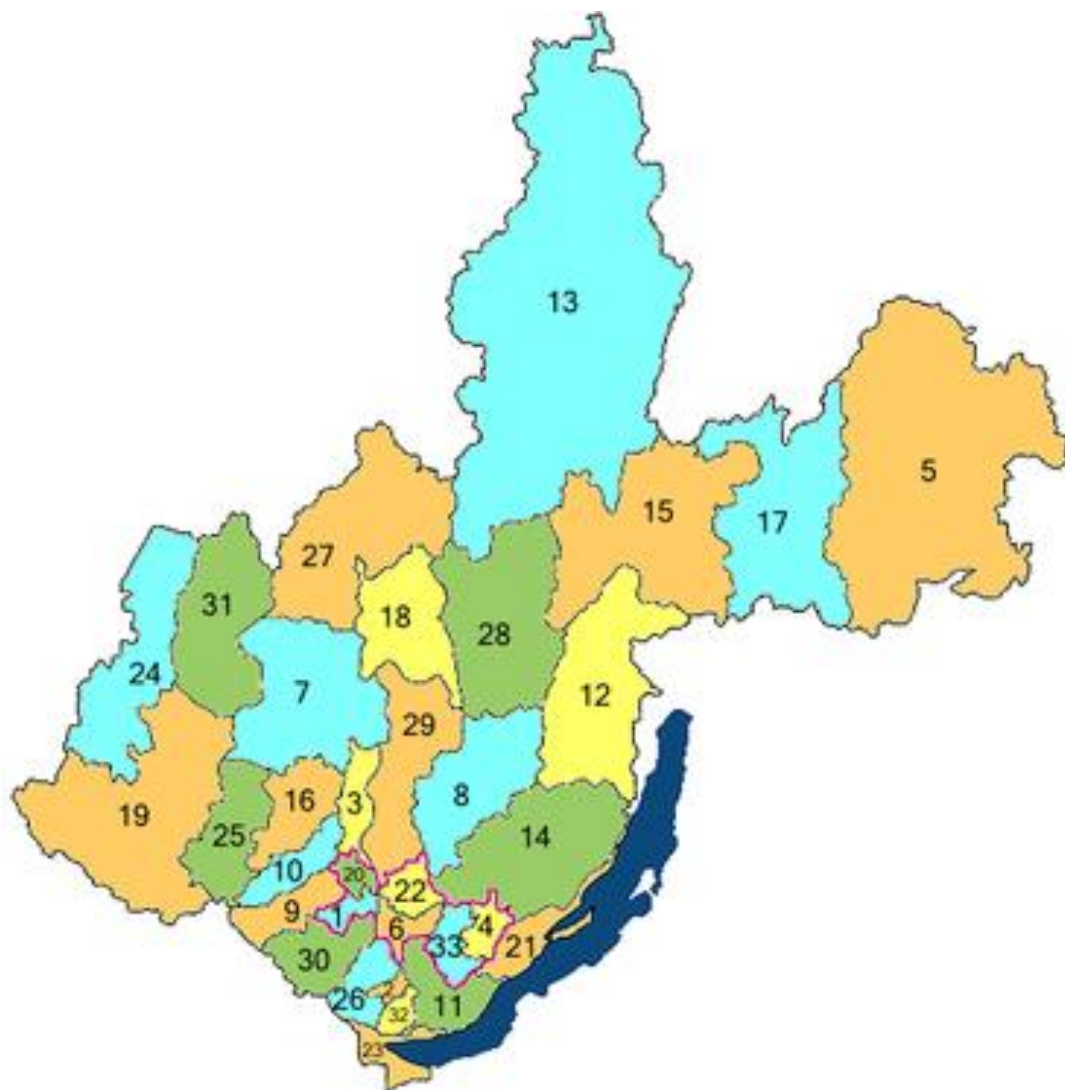
Около 93% образования всех отходов составляют отходы предприятий по добыче полезных ископаемых, главным образом топливно– энергетических (рис. 1). Менее 7 % образования отходов приходится на другие виды экономической деятельности, из которых обрабатывающие производства, производство и распределение электроэнергии, газа и воды, строительство, сельское хозяйство [1].



**Рисунок 1. Образование отходов производства и потребления по видам экономической деятельности**

Накопление техногенных отходов в районах функционирования промышленных предприятий существенно осложняет экологическую ситуацию в регионах Российской Федерации.

В частности, в Иркутской области объемы накопления отходов производства и потребления на сегодняшний день составляют 133 686 845,3 тонн (рис. 2) [2].



Муниципальное образование	Общее количество объектов размещения отходов	Количество отходов, тонны	№ на карте
Ангарское МО	11	46943151,10	2
Балаганский район	14	3306221,00	3
г. Братск и Братский район	61	105274,00	7
г. Бодайбо и район	15	5744153,00	5
Жигаловский район	11	216000,00	8
Заларинский район	31	199052,8	9
Зиминский район	20	750581,00	10
г. Иркутск и Иркутский район	18	8908533	11
Казаченско-Ленский район	28	463806,00	12
Качугский район	57	150000,00	14
Киренский район	28	717838,00	15
Куйтунский район	36	1668150,00	16
Мамско-Чуйский район	8	175350	17
МО "Катанский район"	8	673,5	13
Нижнеилимский район	29	325778,82	18
Нижнеудинский район	93	286045	19
Ольхонский район	4	105125,75	21
Слюдянский район	17	19876282,00	23
Тайшетский район	32	453624,778	24
Тулунский район	22	2539,00	25
Усольский район и г.Усолье-Сибирское	19	9354835	26
Усть-Илимский район	9	84455,6	27
Усть-Кутский район	20	281035,88	28
Усть-Удинский район	22	38795,6	29
Черемховский район	35	234595,5	30
Чунский район	29	120370,00	31
Шелеховский район	7	3342868,72	32
Боханский район	12	4933	6
Аларский район	15	7580	1
Баяндаевский район	7	7800	4
Осинский район	12	72860	22
Эжирит-Булагатский р-н	13	5062	33
Нукутский район	29	46314	20
<b>Всего по области</b>	<b>817</b>	<b>133686845,3</b>	

**Рисунок 2. Размещение отходов производства и потребления на территории Иркутской области**

Между тем, любые отходы можно рассматривать в качестве вторичных материальных ресурсов, причем они могут быть использованы в хозяйственных целях частично, либо полностью замещая традиционные виды материально-сырьевых ресурсов. Главной особенностью таких ресурсов является их непрерывная воспроизводимость.

Из отраслей материального производства, способных потреблять отходы производства, является индустрия строительных материалов. Установлено, что внедрение отходов производства может покрыть до 40 % потребности строительства в сырьевых ресурсах. Их применение позволяет на 10–30 % понизить издержки на изготовление строительных материалов, по сопоставлению с созданием их из природного сырья, а также создавать новые строительные материалы с высочайшими технико-экономическими показателями.

Дорожно-строительная отрасль остро нуждается во внедрении более дешевых и эффективных дорожно-строительных материалах, которые позволят улучшить качество дорожных одежд, тем самым, увеличив их межремонтный срок, что, в свою очередь, позволит сократить расходы на эксплуатационное обслуживание автомобильных дорог.

Традиционно, в конструкциях дорожных одежд применяются слои покрытия из горячих асфальтобетонных смесей на основании из высокопрочных каменных материалов. Минимальная толщина конструктивных слоев дорожных одежд назначается в соответствии с требованиями ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд», СП 34.13330-2012 «Автомобильные дороги» [3,4] (табл. 1).

Таблица 1. Требования к толщине слоев согласно СП 34.13330-2012 [4]

<i>Материалы покрытий и других слоев дорожной одежды</i>	<i>Толщина слоя, см</i>
Крупнозернистый асфальтобетон (с размером зерен до 40 мм)	7
Мелкозернистый асфальтобетон (до 20 мм)	5
Щебеночно-мастичный асфальтобетон (до 10 мм) и песчаный асфальтобетон (до 5 мм)	3
Щебеночные (гравийные) материалы, обработанные органическим вяжущим	8
Щебень, обработанный органическим вяжущим по способу пропитки	8
Щебеночные и гравийные материалы, не обработанные вяжущим: на песчаном основании на прочном основании (каменном или из укрепленного грунта)	15
	8
Каменные материалы и грунты, обработанные органическими или неорганическими вяжущими	10

Конструкции дорожных одежд с указанными значениями толщины конструктивных слоев для дорог 4 и 5 технической категории могут быть неэффективны с

экономической точки зрения, особенно в сельской местности, где интенсивность движения незначительна. Экономическая неэффективность обуславливается тем, что высокопрочные каменные материалы, входящие в состав смесей, должны иметь высокие марки по прочности, морозостойкости и истираемости [4]. Однако, количество месторождений высокопрочных каменных нерудных материалов в Российской Федерации крайне ограничено.

Увеличение использования отходов производства и потребления в конструктивных слоях дорожных одежд автомобильных дорог может способствовать снижению стоимости дорожно-строительных материалов и сохранению природных ресурсов.

### **1.1 Обзор существующих методов укрепления грунтов автомобильных дорог**

Укрепление грунтов – эффективный подход к строительству, реконструкции и ремонту автомобильных дорог и улично-дорожных сетей населенных пунктов, предусматривает использование местных каменных материалов и грунтов, взамен дорогих высокопрочных каменных материалов, входящих в составы смесей конструктивных слоев дорожных одежд.

Обобщение результатов наблюдений за эксплуатируемыми конструкциями дорожных одежд со слоями из укрепленных грунтов и каменных материалов в районах с неблагоприятными природными и гидрогеологическими условиями показали их существенное преимущество, по сравнению с конструкциями дорожных одежд со слоями из высокопрочных каменных материалов [5]. При устройстве слоев оснований из укрепленных грунтов, поступление влаги к грунту земляного полотна, сверху через дорожную одежду, практически исключается. В результате чего, влажность верхней части земляного полотна всегда бывает меньше, чем при устройстве традиционных щебеночных оснований на дренирующем песчаном слое. Вследствие хорошей распределяющей способности слоев из укрепленных грунтов ровность покрытий на таких основаниях обычно лучше, чем на щебеночном или гравийном основании. Преимущества эти заключаются в более длительном сохранении ровности покрытия, особенно при интенсивном морозном пучении грунтов земляного полотна. Наличие укрепленных слоев, особенно грунта рабочего слоя земляного полотна и морозозащитного слоя, полностью предотвращает смещение материала основания с материалами нижележащего слоя, улучшает условия уплотнения вышележащих слоев и обеспечивает достижение высокой ровности их поверхности и ровность покрытия [6].

Применение грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими в Российской Федерации регламентируются требованиями ГОСТ 23558-94 Смесей щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия. В дорожном строительстве существует несколько методов укрепления, приведённых в таблице 2.

Таблица 2. Классификация методов укрепления грунтов неорганическими вяжущими

<i><b>Вяжущее</b></i>	<i><b>Грунты</b></i>	<i><b>Нормативная документация</b></i>
Портландцемент или его аналоги (белитовый, спекательный шламы и т. д.) и шлакопортландцемент	<ul style="list-style-type: none"> <li>– щебеночно-песчаные смеси;</li> <li>– гравийно-песчаные смеси;</li> <li>– щебеночно-гравийно-песчаные смеси;</li> <li>– пески;</li> <li>– золошлаковые смеси;</li> <li>– все виды пылевидных и глинистых грунтов по ГОСТ 25100 с числом пластичности не более 12</li> </ul>	<p>ГОСТ 10178-85 Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия</p> <p>ГОСТ 25328-82 Цементы для строительных растворов. Технические условия</p>
Известь	<ul style="list-style-type: none"> <li>– все виды пылевидных и глинистых грунтов по ГОСТ 25100;</li> <li>– золошлаковые материалы</li> </ul>	ГОСТ 9179-77 Известь строительная. Технические условия
Золы-уноса	<ul style="list-style-type: none"> <li>– пески;</li> <li>– супесчаные и суглинистые грунты имеющие кислую среду (рН = 4÷6,5)</li> </ul>	ГОСТ 25818-91 Золы-уноса тепловых электростанций для бетона. Технические условия
Гипс	<ul style="list-style-type: none"> <li>– щебеночно-песчаные смеси;</li> <li>– гравийно-песчаные смеси;</li> <li>– щебеночно-гравийно-песчаные смеси;</li> <li>– пески;</li> <li>– золошлаковые смеси</li> </ul>	ГОСТ 125-79 Вяжущие гипсовые. Технические условия

Цементно-грунтовые основания дорожных одежд широко начали применяться еще в советское время. Цемент является дорогим строительным материалом и процесс его твердения сопровождается усадкой, что приводит к появлению трещин.

Использование извести для стабилизации пылевато-глинистых грунтов позволяет значительно улучшить гидрофобные свойства, но при этом такие грунты обладают низкой морозостойкостью.

В Российской Федерации накоплен значительный опыт применения золы-уноса, но согласно ОДМ 218 031-2013 Методические рекомендации по охране окружающей среды при строительстве, ремонте и содержании автомобильных дорог, для укрепления грунтов должны использоваться золы с высоким содержанием оксида кальция. Данный вид отхода есть далеко не в каждом регионе РФ.

Укрепление грунтов гипсовым вяжущим нерационально с экономической точки зрения, так как количество месторождений гипсового камня ограничено, кроме того, гипсовое вяжущее обладает низкой водостойкостью.

В настоящее время в Российской Федерации построено и эксплуатируется свыше 30 тыс. км автомобильных дорог с применением укрепленных грунтов для устройства оснований и покрытий дорожных одежд. [7].

На наш взгляд представляется перспективным направлением укрепление грунтов конструктивных слоёв дорожной одежды автомобильных дорог низких технических категорий с применением комплексного вяжущего на основе фторгипса и золы-уноса

### **1.1.1 Отходы промышленного производства для укрепления грунтов**

#### **1.1.1.1 Золой тепловых электростанций**

Объемы накопленных золошлаковых материалов в Российской Федерации соответствуют крупным техногенным месторождениям. Только на территории Иркутской области действуют 14 электростанций, работающих на твердом топливе, ежегодно они накапливают миллионы тонн отходов, что создает проблемы размещения и длительного хранения этих материалов [8].

Среди отходов значительный сырьевой потенциал представляет зола-уноса. Это тонкодисперсный материал, размером от долей микрона до 0,14 мм. Образуется при сжигании твердого топлива на тепловых электростанциях, улавливается в золоуловителях сухого типа. Обладает пуццолановыми свойствами, самостоятельными вяжущими свойствами.

В настоящее время перерабатывается не более 20 % этого ценного материала.

### **1.1.2 Гипсодержащие отходы**

Несмотря на большие запасы природного гипсового сырья, как за рубежом, так и в Российской Федерации имеются обширные районы, лишенные этих запасов, и потому сырье приходится перевозить на далекие расстояния, что не всегда экономически целесообразно. Предпочтительнее применять в таких районах гипсодержащие отходы производства, состоящие более чем на 90% из сульфата кальция. Так как это позволит уменьшить занимаемые площади отвалов, тем самым сократить расходы на их устройство и эксплуатацию, и снизить экологическую нагрузку.

В последние годы наблюдается тенденция накопления объема гипсовых отходов в химической промышленности в среднем 7% в год.

В частности для укрепления грунтов оснований дорожных одежд автомобильных дорог интересно применение фторгипса.

Фторгипс (фторангидрит) – побочный продукт при производстве фтористоводородной кислоты безводного фтористого водорода, фтористых солей. По составу это двухводный сульфат кальция  $\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$  с примесями исходного неразложившегося флюорита. Он может содержать также неотмытую серную кислоту [9].

В настоящее время в отвалах промышленных предприятий России накоплено около 200 млн. тонн фторгипса и ежегодно эти цифры увеличиваются на 10–15 млн. тонн отходов. На шламовых полях АО «Ангарский электролизный химический комбинат» Иркутской области содержится более 300 тысяч тонн отходов плавиковой кислоты.

В естественном состоянии фторгипс не проявляет вяжущие свойства. Дегидратация при температуре 160–1600<sup>0</sup>С приводит к появлению вяжущих свойств.

Применение фторангидрита может быть эффективным при укреплении песчаных грунтов, песчано–гравийных и золошлаковых смесей.

Учитывая вышеизложенное сформулирована цель исследования – получение комплексного неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства для укрепления грунтов оснований дорожных одежд автомобильных дорог в условиях резко континентального климата.

Для реализации цели данного проекта были поставлены следующие задачи:

- 1) Исследование отходов промышленного производства (получение физико-механических характеристик);
- 2) Определение физико-механических характеристик песчаных грунтов;
- 3) Разработка комплексного вяжущего;
- 4) Подбор составов укрепленных грунтов.

## **2. Методы и методологии**

Работа выполнена с использованием методик в соответствии с требованиями нормативных документов:

- а) ГОСТ 125-79 «Вяжущие гипсовые. Технические условия»;
- б) ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия»;
- в) ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия»;
- г) ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация»;
- д) ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия».

### **2.1. Фторгипс**

Отбор проб произведен на шламовых полях (рис. 3) АО «Ангарский электролизный химический комбинат» согласно требованиям ГОСТ 4013-82 «Камень гипсовый и гипсоангидритовый для производства вяжущих материалов. Технические условия».





**Рисунок 3. Размещение фторгипса на шламовых полях**

Содержание гидратной воды фторгипса составила 20 %, определяемое по ГОСТ 23789-79 «Вязущие гипсовые. Методы испытаний».

В естественном состоянии фторгипс не проявляет вязущие свойства. Дегидратация при температуре 160–1600<sup>0</sup>С приводит к появлению вязущих свойств.

Экспериментальным путем были определены температура и время обжига.

Далее полуводный гипс был измельчен в шаровой мельнице ШЛМ – 25 (рис. 4, рис. 5).



**Рисунок 4. Шаровая мельница ШЛМ – 25**



**Рисунок 5. Полуводный гипс**

Определены следующие физические характеристики гипсового вяжущего по ГОСТ 23789-79 «Вяжущие гипсовые. Методы испытаний»:

- тонкость помола (рис. 6);



**Рисунок 6. Определение тонкости помола гипсового вяжущего**

- стандартная консистенция (нормальная густота) (рис. 7);



**Рисунок 7. Определение стандартной консистенции гипсового вяжущего**

– сроки схватывания (рис. 8);



**Рисунок 8. Определение сроков схватывания гипсового вяжущего**



– прочность на сжатие, МПа (рис. 9);



**Рисунок 9. Определение прочности на сжатие гипсового вяжущего**

– прочность на растяжение при изгибе, МПа (рис. 10).



**Рисунок 10. Определение прочности на растяжение при изгибе гипсового вяжущего**

## **2.2. Золоуноса**

Для проведения исследований произведен отбор проб на золоотвалах тепловых электростанций ОАО «Иркутскэнерго» Ново-Иркутская ТЭЦ (рис. 11) и Иркутская ТЭЦ-9 (рис. 12).

Качественные характеристики определены в соответствии с требованиями ГОСТ 25818-2017 «Золы-уноса тепловых электростанций для бетонов. Технические условия».

Определение влажности золы произведено в соответствии с требованиями ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний»

Потеря массы при прокаливании определена в соответствии с требованиями ГОСТ 11022-95 «Топливо твердое минеральное. Методы определения зольности».

Остаток на сите N 008 определен в соответствии с требованиями ГОСТ 310.2 «Цементы. Методы определения тонкости помола».



**Рисунок 11. Новокузнецкая тепловая электростанция**



**Рисунок 12. Тепловая электростанция 9 Иркутской области**

### **2.3. Грунты**

Определение гранулометрического (зернового) состава проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний» и ГОСТ 12536-2014 «Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава».

Определение влажности песка проводилось в соответствии с требованиями ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний»

Определение влажности (в т.ч. гигроскопической) грунта методом высушивания до постоянной массы, определение верхнего предела пластичности - влажности грунта на границе текучести методом балансного конуса, определение нижнего предела пластичности - влажности грунта на границе раскатывания связных грунтов проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик».

### **2.4. Комплексное вяжущее на основе отходов промышленного производства**

В процессе получения комплексного вяжущего экспериментальным путём в лабораторных условиях определялось множество составов с различным процентным соотношением гипсового вяжущего и золы-уноса.

Для определения физико-механических характеристик изготавливались образцы-балочки 160x40x40 мм. (рис. 13).





**Рисунок 13. Формы для изготовления образцов-балочек**

Набор прочности образцов-балочек комплексного вяжущего осуществлялся в нормальных условиях. Прочность на сжатие и прочность на растяжение при изгибе балочек определялась в промежуточном возрасте 7, 28 суток и требуемом 90 суток.

### **3. Результаты**

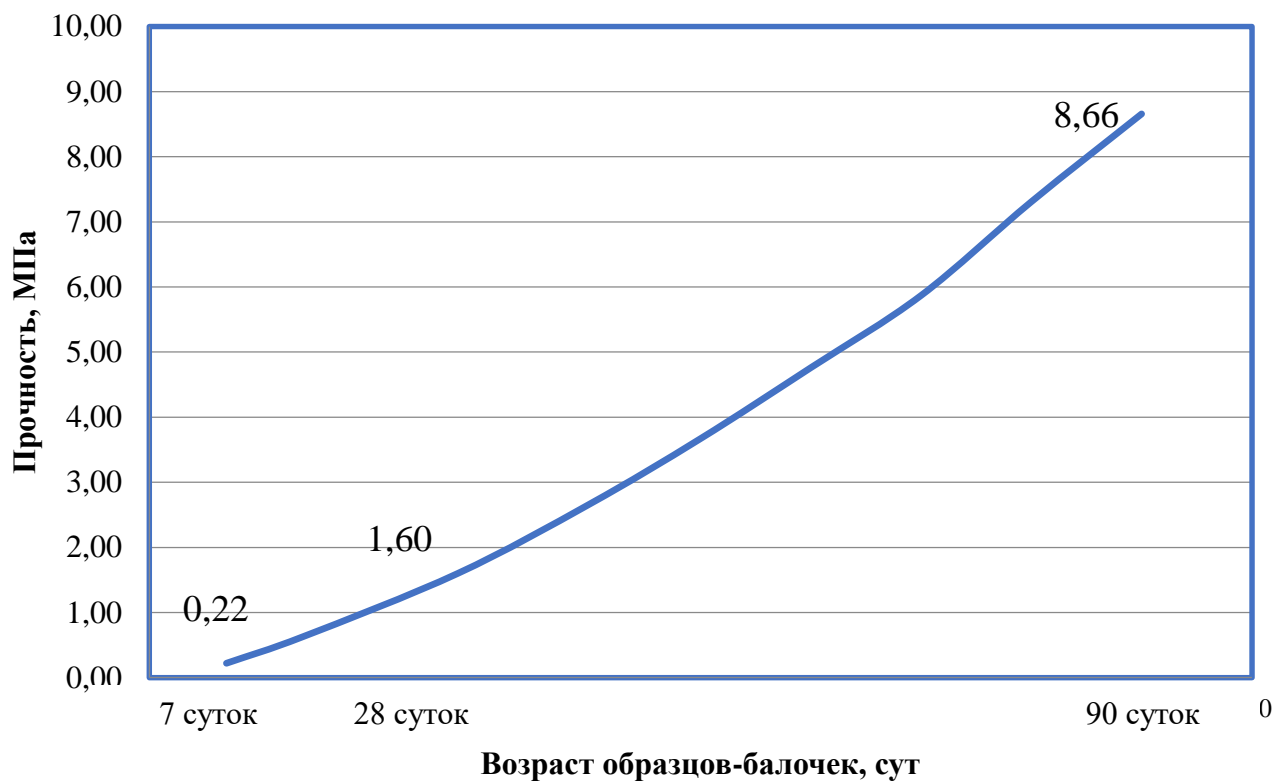
#### **3.1 Определение физико-механических и химических показателей отходов промышленного производства**

Для решения поставленных задач проведены научные исследования отходов промышленного производства – фторгипса и золы-уноса.

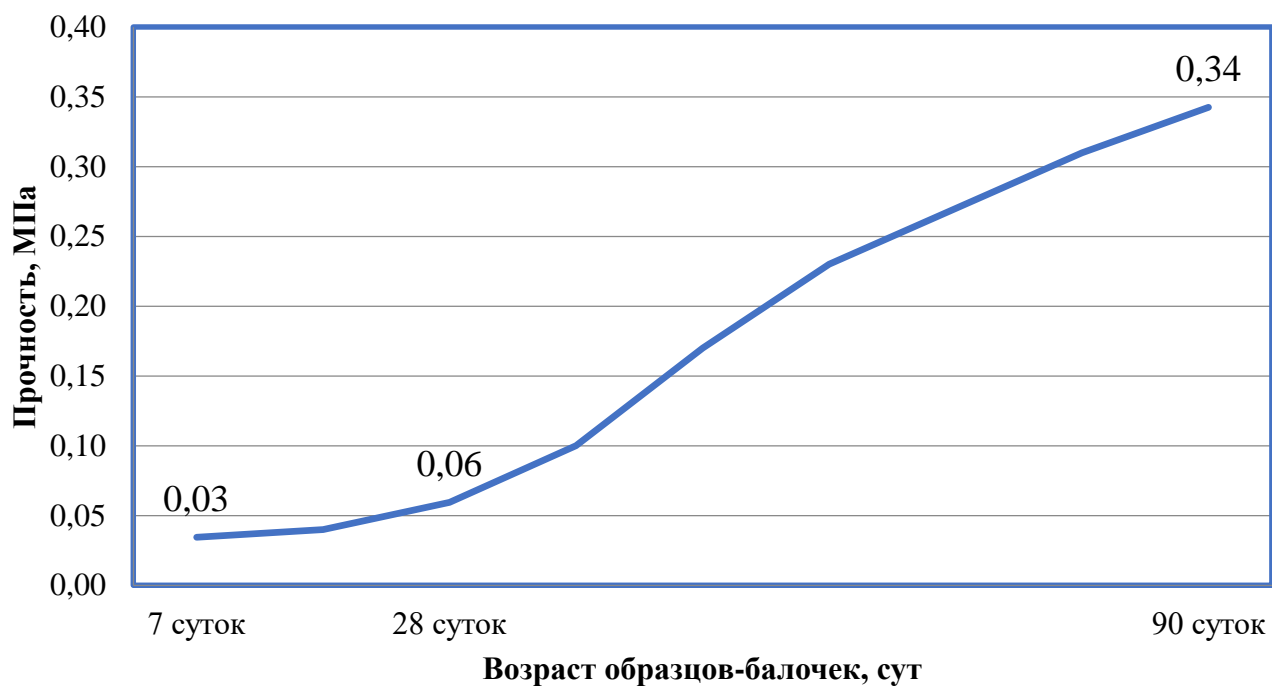
По результатам испытаний получены физические характеристики гипсового вяжущего, приведенные в таблице 3, на рисунке 14 и рисунке 15.

Таблица 3. Физические характеристики гипсового вяжущего

Физические характеристики	Возраст образцов-балочек, сут		
	7	28	90
тонкость помола	6,75 (средний помол)	9,27 (средний помол)	3,13 (средний помол)
стандартная консистенция, мм (нормальная густота)	180	180	180
определение сроков схватывания	8 мин	7 мин 30 с	1 мин 30 с
прочность на сжатие, МПа	0,22	1,20	8,66
прочность на растяжение при изгибе, МПа	0,03	0,06	0,34



**Рисунок 14. График зависимости прочности на сжатие образцов-балочек от возраста**



**Рисунок 15. График зависимости прочности на растяжение при изгибе от возраста образцов-балочек**



Химический состав фторгипса представлен в таблице 4.  
Содержание сульфата кальция составляет более 80%.

Таблица 4. Химический состав фторгипса [78].

Содержание, %	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	п.п.п.
максимальное	2,07	0,64	31,88	0,768	0,429	42,85	21,29
минимальное	1,93	0,58	31,56	0,731	0,422	42,45	22,25
среднее из 3 проб	1,97	0,61	36,67	0,745	0,426	42,65	21,76

Результаты испытаний физических характеристик золы-уноса приведены в таблице 5.

Таблица 5. Результаты лабораторных испытаний физических характеристик

Место отбора	Золы по виду сжигаемого угля	Золы в зависимости от химического состава	Влажность, %	Потеря массы при прокаливании, %	Остаток на сите №008, %
зола-уноса с Ново-Иркутской ТЭЦ	буроугольные	кислые	0,4	7,25	12,47
зола-уноса с Иркутской ТЭЦ-9	буроугольные	кислые	0,4	4,19	13,24

### 3.2 Определение физико-механических характеристик грунтов

Разработанный состав комплексного вяжущего применялся для укрепления связных и несвязных грунтов.

#### 3.2.1 Определение зернового состава и модуля крупности песка

Результаты определения зернового состава песка природного представлены в таблице 6, в таблице 7 и на рисунке 16.

Таблица 6. Результаты зернового состава

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах							
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	менее 0,16
ч. о., г	0,00	73,06	11,06	12,81	168,53	818,40	1119,87	300,49
ч.о., %	0,00	2,92	0,44	0,51	6,73	32,68	44,72	12,00
п.о., %	0,00	2,92	3,36	3,87	10,60	43,28	88,00	100,00
п.п., %	100	97,08	96,64	96,13	89,40	56,72	12,00	0,00

Таблица 7. Результаты зернового состава

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	менее 0,16
ч. о., г	4,55	5,27	69,32	336,63	460,63	123,6
ч.о., %	0,46	0,53	6,93	33,66	46,06	12,36
п.о., %	0,46	0,98	7,91	41,58	87,64	100
п.п., %	99,55	99,02	92,09	58,42	12,36	0,00

Модуль крупности песка равен  $M_k = 1,39$ .

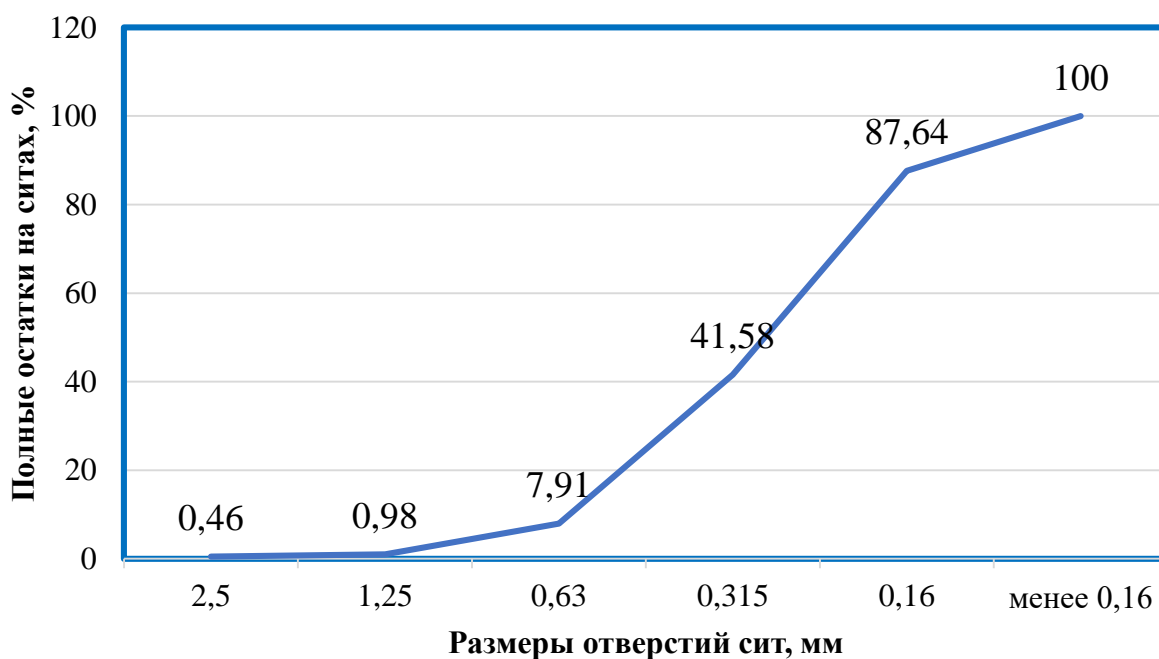


Рисунок 16. Кривая просеивания

В соответствии с требованиями ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия», песок относится к очень мелкой группе песка.

В лабораторных условиях был подобран оптимальный зерновой состав песка природного согласно требованиям ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия» п. 4.2.5, табл. 2.

Результаты определения зернового состава песка природного согласно требованиям п. 4.2.5, табл. 2 ГОСТ 23558-94 представлены в таблице 8, в таблице 9 и на рисунке 17.

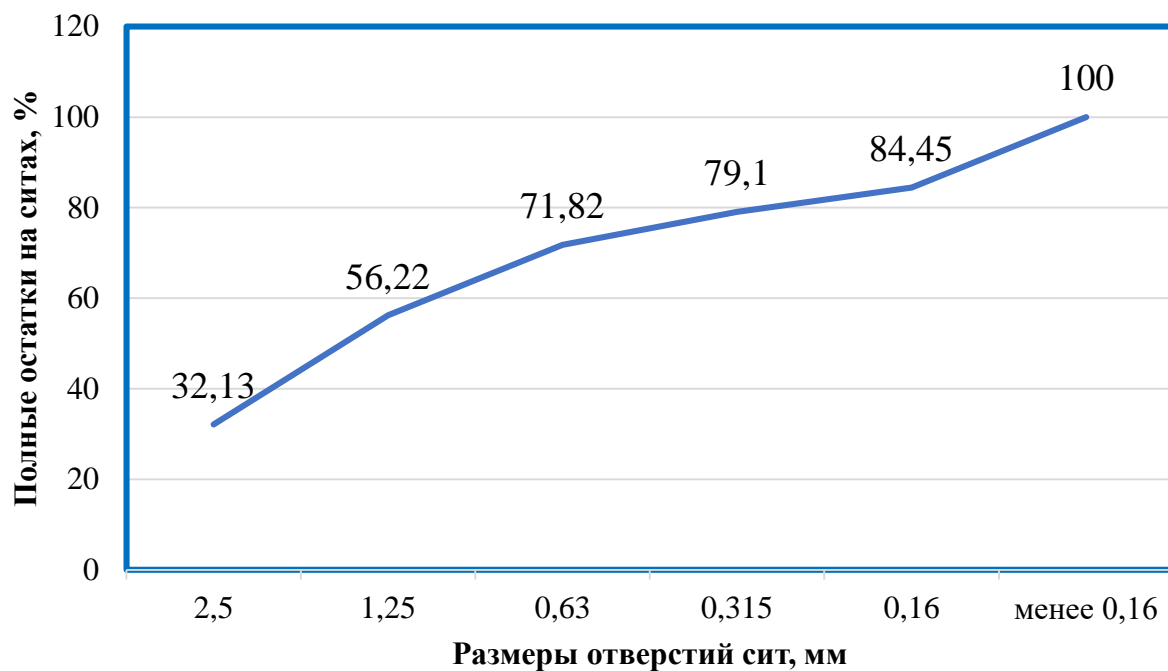
Таблица 8. Результаты зернового состава

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах							
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	менее 0,16
ч. о., г	0,00	251,38	1552,64	1164,20	753,97	351,76	258,44	751,51
ч.о., %	0,00	4,94	30,54	22,90	14,83	6,92	5,08	14,78
п.о., %	0,00	4,94	35,48	58,38	73,22	80,13	85,22	100,00
п.п., %	100	95,06	64,52	41,62	26,78	19,87	14,78	0,00

Таблица 9. Результаты зернового состава

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах					
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	менее 0,16
ч. о., г	321,29	240,91	156,02	72,79	53,48	155,51
ч.о., %	32,13	24,09	15,60	7,28	5,35	15,55
п.о., %	32,13	56,22	71,82	79,10	84,45	100,00
п.п., %	67,87	43,78	28,18	20,90	15,55	-

Модуль крупности песка равен  $M_k = 3,24$ .



**Рисунок 17. Кривая просеивания**

В соответствии с требованиями ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ. Технические условия», песок относится к группе песка повышенной крупности.

### **3.2.2 Определение зернового состава связного грунта**

Результаты определения зернового состава грунта представлены в таблице 10, в таблице 11.

Таблица 10. Результаты зернового состава

Наименование остатка	Остатки, % по массе, на ситах					
	1,0	0,5	0,25	0,1	0,05	менее 0,05
Ч. о., г	2,02	6,78	24,51	37,55	49,69	200,65
Ч.о., %	0,63	2,11	7,63	11,69	15,47	62,47
П.о., %	0,63	2,74	10,37	22,06	37,53	100,00
П.п., %	99,37	97,26	89,63	77,94	62,47	0,00

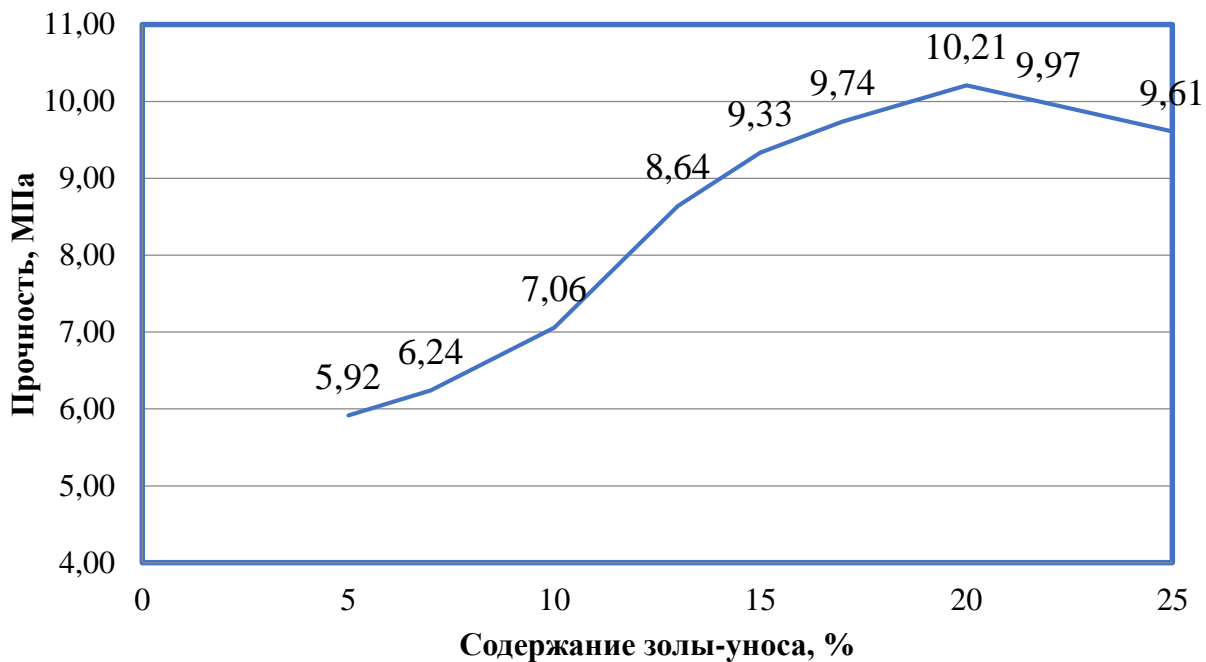
Таблица 11. Результаты испытаний грунта

Наименование показателей	Ед. изм.	Показатели		Результаты испытаний
		Наименование нормативно-технической литературы	Нормативное значение показателя	
Естественная влажность грунта	%	ГОСТ 5180-2015 п.5	не нормируется	0,95
Влажность на границе текучести	%	ГОСТ 5180-2015 п.7	-	24,15
Влажность на границе раскатывания	%	ГОСТ 5180-2015 п.8	-	9,23
Число пластичности	%	ГОСТ 25100-2011 табл. Б.16	$7 < I_p \leq 17$	14,92
Показатель текучести	д.е.	ГОСТ 25100-2011 табл. Б.19	$I_L < 0$	-0,56
Максимальная плотность грунта	г/см <sup>3</sup>	ГОСТ 22733-2016	-	1,74
Оптимальная влажность грунта	%	ГОСТ 22733-2016	-	16,32
Содержание песчаных частиц (2-0,05мм), % по массе	%	ГОСТ 25100-2011 табл. Б.17	< 50	37,53
Разновидность глинистого заполнителя	-	ГОСТ 25100-2011	суглинок лёгкий пылеватый твёрдый	суглинок лёгкий пылеватый твёрдый

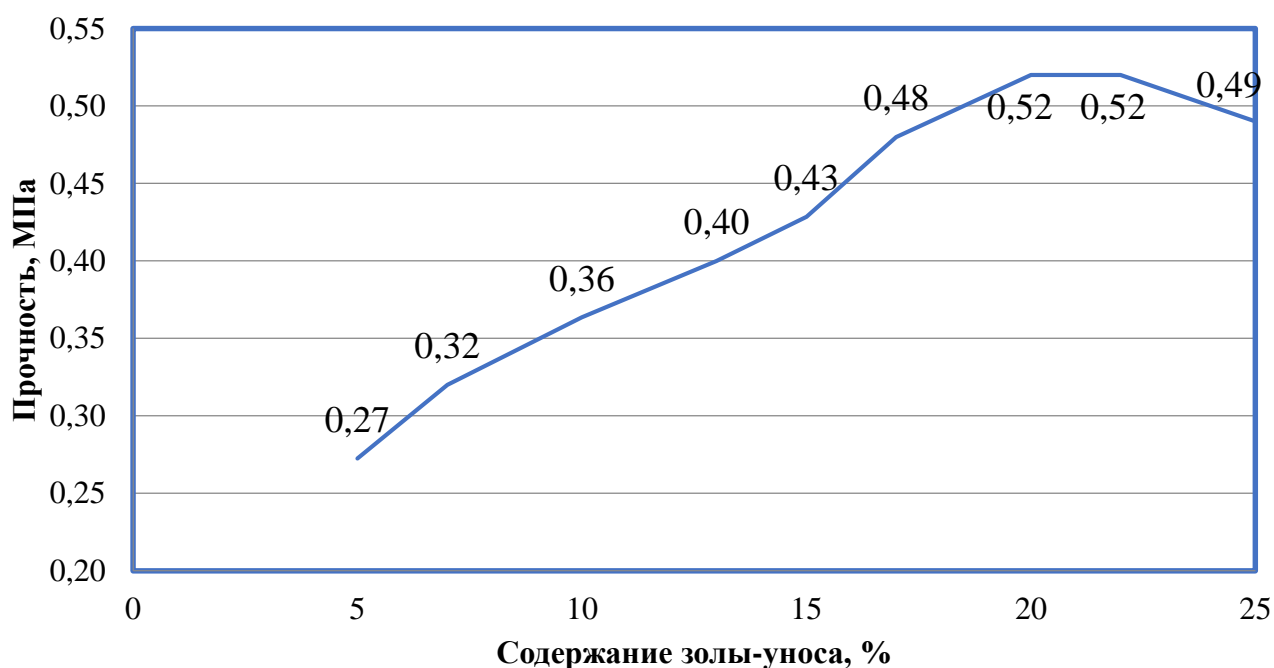
В соответствии с требованиями табл. Б16, Б17, Б19 ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация», грунт классифицируется как суглинок лёгкий пылеватый твёрдый.

### 3.3 Разработка комплексного вяжущего

Результаты испытаний на прочность образцов-балочек комплексного вяжущего приведены на рисунке 18 и рисунке 19.



**Рисунок 18. График зависимости прочности на сжатие образцов-балочек гипсового вяжущего от процентного содержания золы-уноса в возрасте 90 суток**



**Рисунок 19. График зависимости прочности на растяжение при изгибе образцов-балочек гипсового вяжущего от процентного содержания золы-уноса в возрасте 90 суток**

По результатам испытаний образцов-балочек в возрасте 90 суток установлено, что наиболее высокие показатели прочности получены при 20 процентном содержании золы-уноса.

### 3.4 Подбор составов укрепленных грунтов

Для определения оптимального процентного содержания комплексного вяжущего изготавливались образцы в соответствии с требованиями ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия», с учётом средневзвешенной влажности. Процентное содержание комплексного вяжущего составило: 12,5%, 20%, 25%, 30%, 37,5%, 50%.

При изготовлении образцов укрепленного грунта использовался прибор стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ.

### 3.5 Определение физико-механических характеристик укрепленных грунтов в лабораторных условиях

Максимальная плотность образцов укрепленных грунтов определялась по ГОСТ «22733-2016 Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности».

Количество воды определялось исходя из максимальной плотности и относительной влажности на разном процентном содержании комплексного вяжущего.

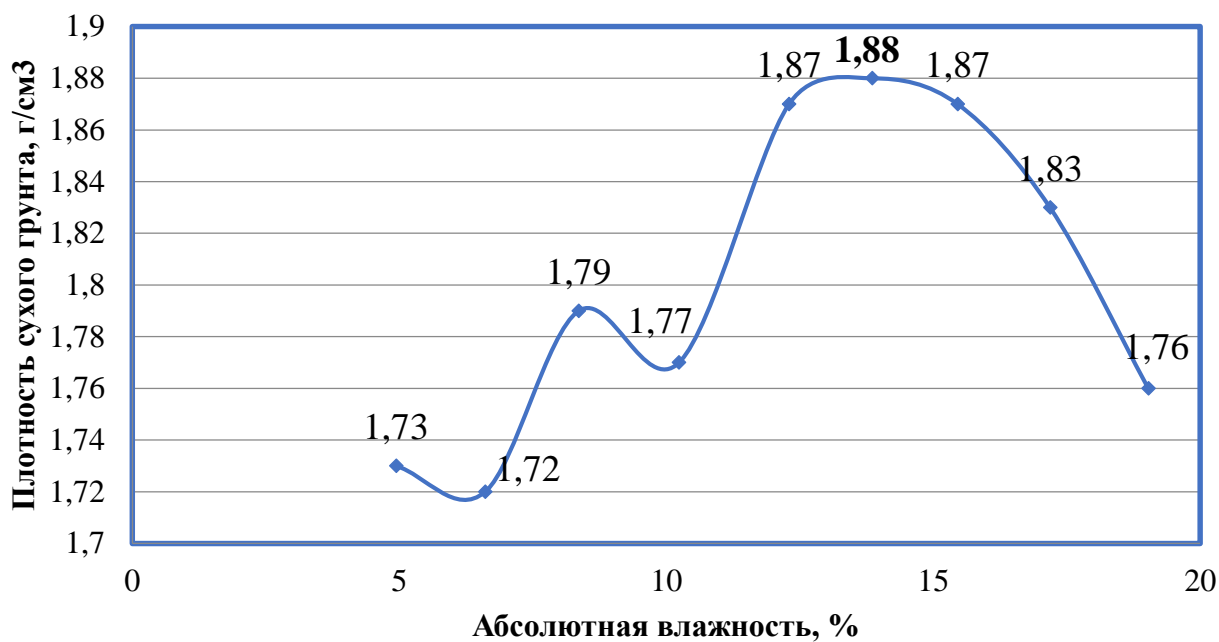
Процентное содержание компонентов:

- комплексное вяжущее – 12,5%;
- грунт – 87,5%.

Максимальная плотность достигается при оптимальной влажности равной 14% (табл. 12, рис. 20).

Таблица 12. Результаты лабораторных испытаний

Ступени изменения влажности	Плотность влажного грунта, $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Абсолютная влажность грунта, W, %	Плотность скелета грунта
1	1,81	4,94	1,73
2	1,83	6,61	1,72
3	1,94	8,36	1,79
4	1,96	10,24	1,77
5	2,10	12,3	1,87
<b>6</b>	<b>2,14</b>	<b>13,86</b>	<b>1,88</b>
7	2,16	15,46	1,87
8	2,14	17,19	1,83
9	2,01	19,03	1,76



**Рисунок 20. Графическое определение оптимальной влажности при максимальной плотности**

Процентное содержание компонентов:

- комплексное вяжущее – 20%;

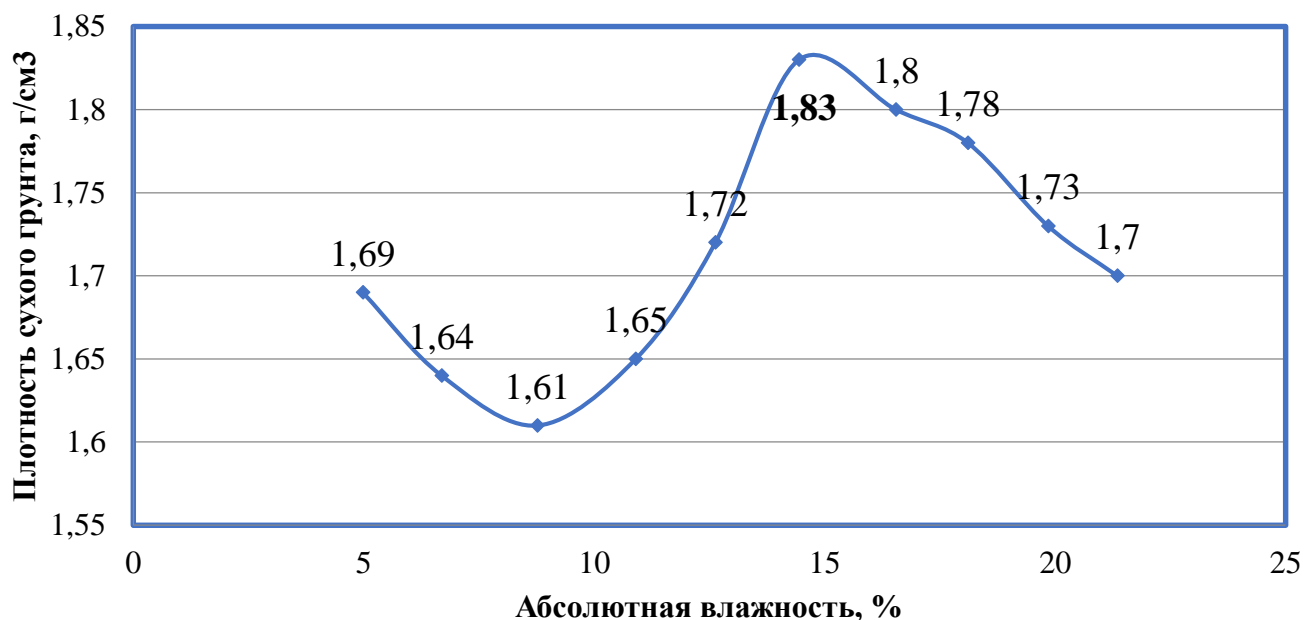
- грунт – 80%.

Максимальная плотность достигается при оптимальной влажности равной 14% (табл. 13, рис. 21).

**Таблица 13. Результаты лабораторных испытаний**

Ступени изменения влажности	Плотность влажного грунта, $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Абсолютная влажность грунта, W, %	Плотность скелета грунта
1	1,77	4,98	1,69
2	1,75	6,69	1,64
3	1,75	8,77	1,61
4	1,83	10,90	1,65
5	1,94	12,63	1,72
<b>6</b>	<b>2,10</b>	<b>14,44</b>	<b>1,83</b>
7	2,10	16,55	1,80
8	2,10	18,11	1,78
9	2,08	19,85	1,73
10	2,06	21,35	1,70





**Рисунок 21. Графическое определение оптимальной влажности при максимальной плотности**

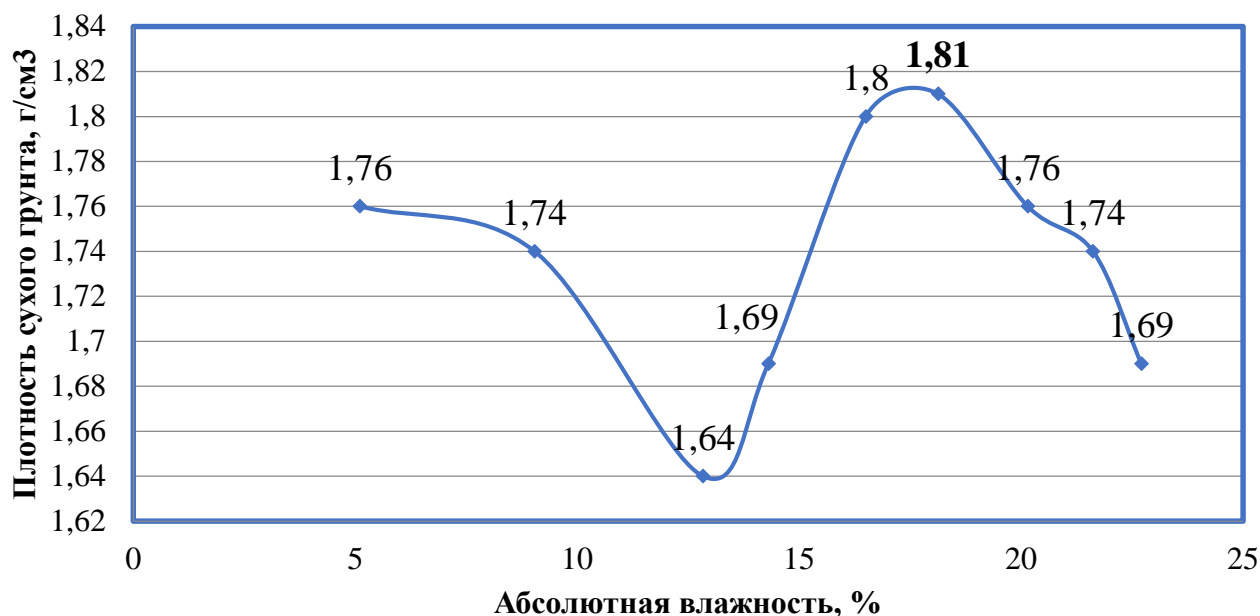
Процентное содержание компонентов:

- комплексное вяжущее – 25%;
- грунт – 75%.

Максимальная плотность достигается при оптимальной влажности равной 18% (табл. 14, рис. 22).

**Таблица 14. Результаты лабораторных испытаний**

Ступени изменения влажности	Плотность влажного грунта, $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Абсолютная влажность грунта, W, %	Плотность скелета грунта
1	1,85	5,1	1,76
2	1,90	9,04	1,74
3	1,85	12,83	1,64
4	1,94	14,31	1,69
5	2,10	16,50	1,80
<b>6</b>	<b>2,14</b>	<b>18,13</b>	<b>1,81</b>
7	2,12	20,15	1,76
8	2,12	21,62	1,74
9	2,10	22,71	1,69



**Рисунок 22. Графическое определение оптимальной влажности при максимальной плотности**

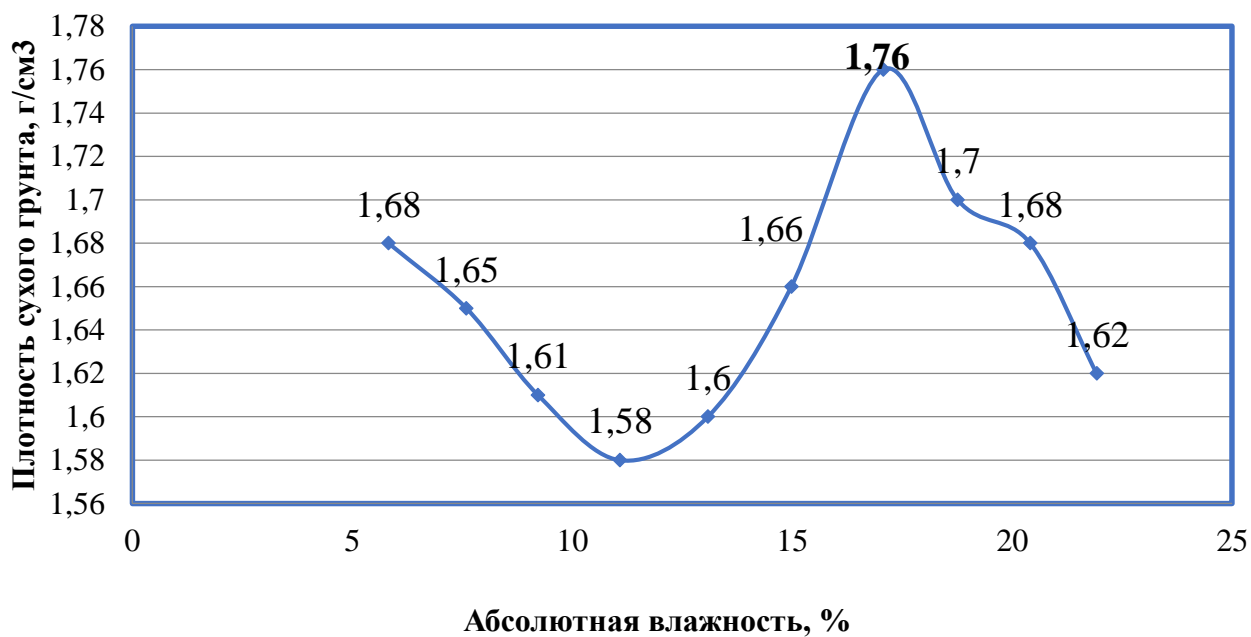
Процентное содержание компонентов:

- комплексное вяжущее – 30%;
- грунт – 70%.

Максимальная плотность достигается при оптимальной влажности равной 17 % (табл. 15, рис. 23).

**Таблица 15. Результаты лабораторных испытаний**

Ступени изменения влажности	Плотность влажного грунта, $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Абсолютная влажность грунта, W, %	Плотность скелета грунта
1	1,77	5,82	1,68
2	1,77	7,59	1,65
3	1,73	9,22	1,61
4	1,75	11,08	1,58
5	1,81	13,08	1,60
6	1,92	14,98	1,66
<b>7</b>	<b>2,06</b>	<b>17,07</b>	<b>1,76</b>
8	2,02	18,76	1,70
9	2,00	20,41	1,68
10	1,98	21,92	1,62



**Рисунок 23. Графическое определение оптимальной влажности при максимальной плотности**

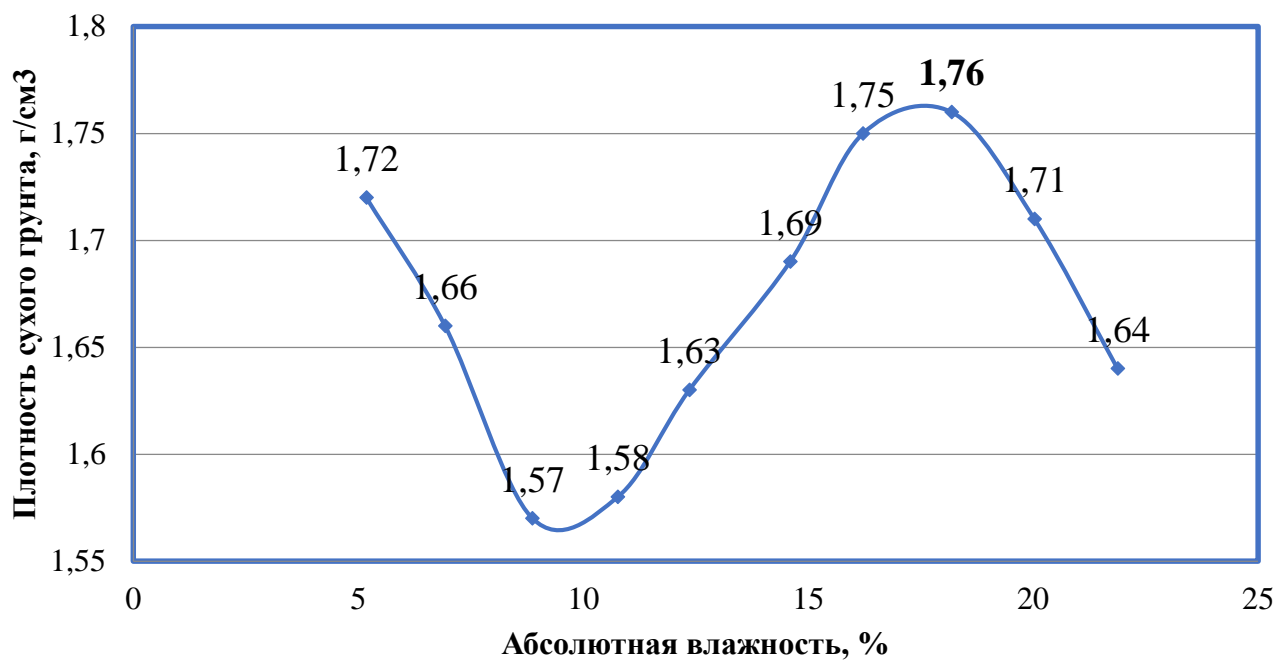
Процентное содержание компонентов:

- комплексное вяжущее – 37,5%;
- грунт – 62,5%.

Максимальная плотность достигается при оптимальной влажности равной 18 % (табл. 16, рис. 24).

**Таблица 16. Результаты лабораторных испытаний**

Ступени изменения влажности	Плотность влажного грунта, $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Абсолютная влажность грунта, W, %	Плотность скелета грунта
1	1,81	5,18	1,72
2	1,77	6,93	1,66
3	1,71	8,87	1,57
4	1,75	10,77	1,58
5	1,83	12,36	1,63
6	1,94	14,6	1,69
7	2,04	16,22	1,75
<b>8</b>	<b>2,08</b>	<b>18,19</b>	<b>1,76</b>
9	2,06	20,03	1,71
10	2,00	21,88	1,64



**Рисунок 24. Графическое определение оптимальной влажности при максимальной плотности**

Процентное содержание компонентов:

- комплексное вяжущее – 50%;
- грунт – 50%.

Максимальная плотность достигается при оптимальной влажности равной 27 % (табл. 17, рис.25).

**Таблица 17. Результаты лабораторных испытаний**

Ступени изменения влажности	Плотность влажного грунта, $\gamma$ , г/см <sup>3</sup>	Абсолютная влажность грунта, W, %	Плотность скелета грунта
1	1,65	10,13	1,5
2	1,57	14,59	1,37
3	1,59	15,9	1,37
4	1,73	17,84	1,47
5	1,75	19,81	1,46
6	1,90	22,19	1,55
7	1,96	24,49	1,57
8	1,98	25,24	1,58
<b>9</b>	<b>2,02</b>	<b>26,52</b>	<b>1,59</b>
10	2,00	28,12	1,56
11	2,00	29,42	1,54



**Рисунок 25. Графическое определение оптимальной влажности при максимальной плотности**

Полученные образцы испытывались на прочность на сжатие в промежуточном возрасте 7 суток в соответствии с ГОСТ 10180-2012. «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам» (рис. 26, рис. 27).

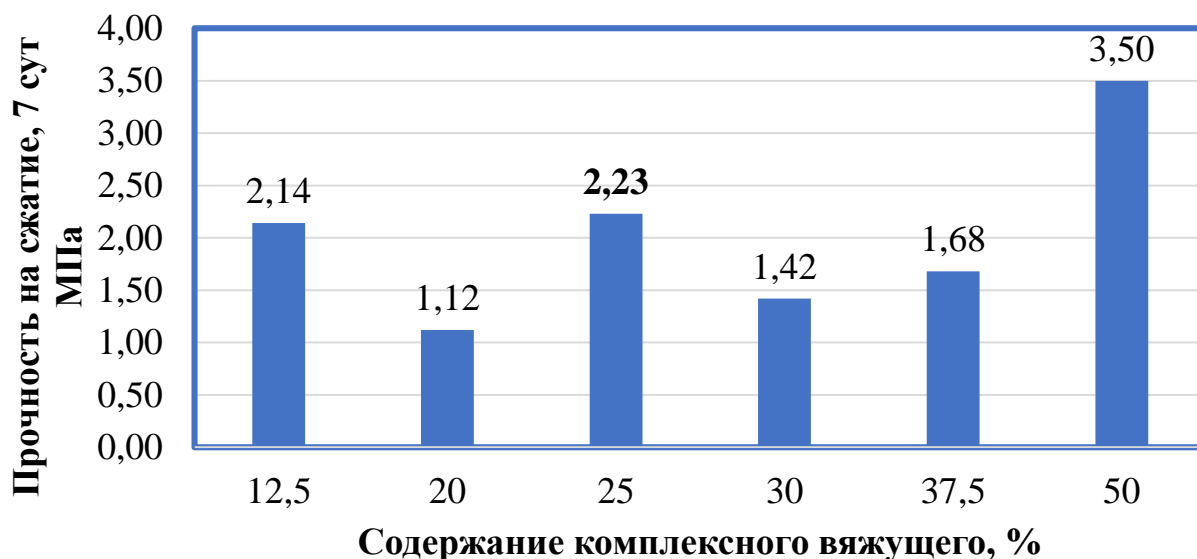


**Рисунок 26. Образцы грунта, укрепленного разработанным вяжущим на разных процентных соотношениях**



**Рисунок 27. Образцы грунта, укрепленного разработанным вяжущим на разных процентных соотношениях**

Результаты испытания укрепленного песка очень мелкой группы разработанным комплексным вяжущим в возрасте 7 суток, представлены на рисунке 28.



**Рисунок 28. Прочностные характеристики образцов в возрасте 7 суток**

Исходя из полученных данных, определено процентное содержание золы-уноса и гипсового вяжущего для укрепления песчаных грунтов. При подборе

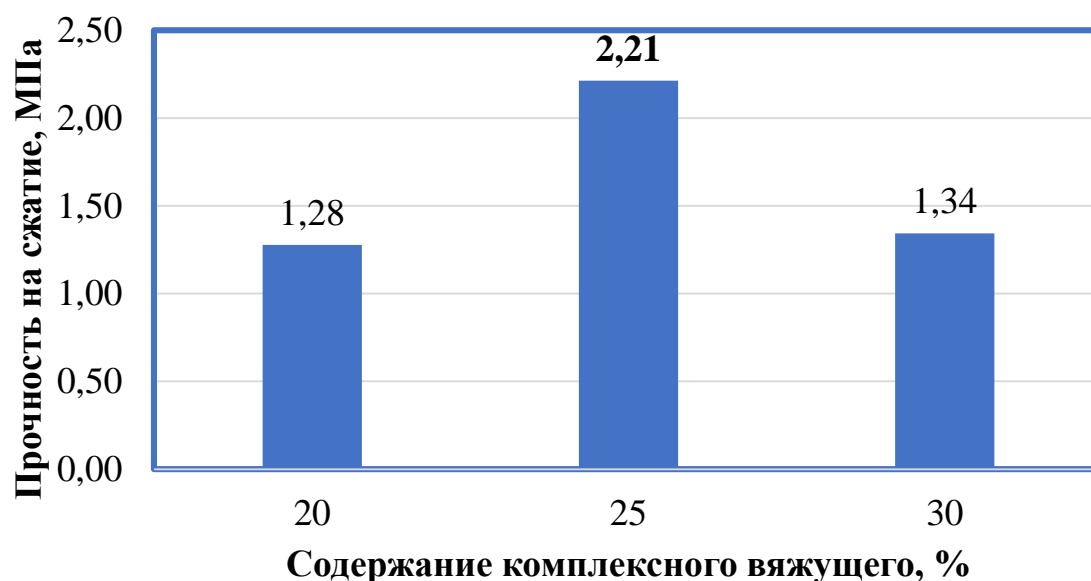
состава устанавливается такое количество вяжущего, которое при укреплении грунтов обеспечивало заданную марку по прочности.

Оптимальное соотношение компонентов составляет:

- Разработанное комплексное вяжущее – 25 %;
- Грунт – 75 %.

В лабораторных условиях проводились испытания по определению прочностных характеристик образцов укреплённого песка повышенной крупности разработанным комплексным вяжущим в количестве 20 %, 25 % и 30 %.

Результаты испытания в возрасте 7 суток, представлены на рисунке 29.



**Рисунок 29. Прочностные характеристики образцов в возрасте 7 суток**

Исходя из полученных данных можно сделать вывод о том, что зерновой состав песчаного материала, может отличаться от требований, указанных в п. 4.2.5, табл. 2 ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия».

В лабораторных условиях проводились испытания по определению прочностных характеристик образцов укреплённого суглинка лёгкого пылеватого твёрдого разработанным комплексным вяжущим в количестве 25%.

При проведении испытания на прочностные характеристики образцы не выдерживают водонасыщения, что говорит о низкой водостойкости материала и требует введение дополнительных добавок.

#### **4 Обсуждение**

В процессе выполнения работы получены физико-механические и химические характеристики отхода производства плавиковой кислоты – фторгипса, отхода тепловых электростанций – зол-уноса, несвязных и связных грунтов. На основе полученных данных разработан состав комплексного вяжущего для укрепления местных грунтов, и определены прочностные характеристики укрепленного грунта в разном процентном содержании. Полученные характеристики позволяют сделать вывод о возможности применения разработанного комплексного вяжущего на основе отходов промышленного производства для укрепления местных песчаных грунтов, а также связных (при введении дополнительных компонентов) грунтов оснований дорожных одежд автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения.

При необходимости получения более высоких показателей следует вводить добавки, повышающие прочность, морозостойкость и другие качества полученного материала на основе данных о составе грунта.

При сравнительной экономической эффективности полученного состава с уже существующими выявлено, что снижение стоимости при применении разработанного состава на основе отходов промышленного производства и местных грунтов может составлять от 15 %.

#### **5 Заключение**

В ходе выполнения работы был проведён обзор теоретического и практического опыта укрепления грунтов неорганическими вяжущими, в том числе вяжущими на основе техногенных отходов, методик и технологий по устройству укрепленных слоёв. Определены физико-механические и качественные характеристики отходов промышленного производства: фтор-гипса, золы-уноса Иркутской области и местных грунтов.

На основании полученных данных разработан состав комплексного вяжущего для укрепления местных грунтов оснований дорожных одежд автомобильных дорог. Получены прочностные характеристики на разных процентных соотношениях комплексного вяжущего.

Разработанный состав грунта впервые получен на основе отходов промышленного производства Иркутской области.

Оценка экономической эффективности применения разработанного состава показала, что снижение стоимости материалов от 15 %.

При практическом внедрении методов укрепления местных грунтов необходимо учитывать свойства обрабатываемых грунтов, влияние окружающих природных условий - геологических, климатических, гидрологических, в которой в дальнейшем будет эксплуатироваться автомобильная дорога. Также, при разработке новых составов необходимо учитывать, что все показатели должны соответствовать требованиям нормативно-технической документации.

Преимуществом наличия укрепленных слоев в конструкциях дорожной одежды является предотвращение смещения материала основания с материалами нижележащего слоя, что улучшает условия уплотнения вышележащих слоев и обеспечивает достижение высокой ровности их поверхности и ровность покрытия.



В настоящее время существует множество методов укрепления грунтов различными вяжущими, как правило, создание новых методов идет по пути совершенствования уже существующих, с применением как известных, так и нетрадиционных вяжущих.

Укрепление местных грунтов техногенными отходами позволит снизить стоимость строительства, реконструкции или ремонта автомобильных дорог с низкими техническими категориями движения, за счет применения дешёвых материалов в виде отходов промышленного производства, местных грунтов и снижения толщины слоёв дорожной одежды. Укрепление грунтов позволит уменьшить потребность в традиционных высокопрочных каменных материалах, что приведёт к экономии сырьевых ресурсов.

## Благодарность

Выражаю благодарность научному руководителю – Надежде Анатольевне Слободчиковой.

## Литература

1 Федеральная служба государственной статистики «Окружающая среда» [Электронный ресурс]. – [http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat\\_main/rosstat/ru/statistics/environment/#](http://www.gks.ru/wps/wcm/connect/rosstat_main/rosstat/ru/statistics/environment/#)(дата обращения 17.05. 2015 ).

2 Службы по охране природы и озера Байкал Иркутской области «Объекты размещения отходов производства и потребления» [Электронный ресурс]. – <http://www.irkobl.ru/sites/baikal/monitoring/kadastr/waste/>(дата обращения 17.05.2015 ).

3 ОДН 218.046-01 Проектирование нежестких дорожных одежд

4 СП 34.13330-2014 Актуализированная редакция СНиП 2.05.02-83 Автомобильные дороги

5 Связующие для укрепления грунтов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://stroy-server.ru/notes/svyazuyushchie-dlya-ukrepleniya-gruntov>(дата обращения: 14.03.2015)

6 Стабилизация дорожного покрытия переходного типа на автомобильной дороге «Няндом-Шестиозерский» в Няндомском районе Архангельской области [Электронный ресурс] : ОТЧЕТ О ВЫПОЛНЕНИИ ОПЫТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РАБОТ ПО ВНЕДРЕНИЮ ТЕХНОЛОГИИ. – Режим доступа: [http://ador.ru/data/files/docs/innovations\\_05.pdf](http://ador.ru/data/files/docs/innovations_05.pdf) (дата обращения: 10.03.2015)

7 Совершенствование теоретических основ укрепления грунтов комплексными вяжущими с целью получения высокопрочных дорожных конструкций/ Роддорнии, Союздорнии. - М., 2002

8 Власова В. В.. Разработка технологии комплексного извлечения полезных компонентов из золошлаковых отходов ТЭС Иркутской области: Дис. ... канд. техн. наук. – Иркутск, 2005. – 182 с.

9 «Техногенные вторичные ресурсы» [Электронный ресурс]. – <http://refsurf.ru/4050108379.html>(дата обращения 21.05. 2015).