

УДК 661.343+67.08+625.8

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОТХОДОВ СОДОВОГО ПРОИЗВОДСТВА В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

Козлов С.Г., Вязовикова И.В., Черный С.А., Крепышева И.В.

*ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»,
Березниковский филиал, Березники, e-mail: myrjak862@yandex.ru*

В статье описываются возможности утилизации отходов ОАО «Березниковский содовый завод» в дорожном строительстве. Актуальность задачи обусловлена высоким уровнем заполнения шламонакопителя. Предложено использовать шлам без дополнительной очистки вместо глины для изготовления покрытий на грунтовых дорогах. Сравнение гранулометрических составов шлама и местной глины показало их идентичность по мелким фракциям. Анализ зависимости плотности образцов шлама от доли мелких частиц показал, что очистка слабо влияет на плотность шлама. При изучении влияния влажности на плотность образцов установлено, что максимальная плотность достигается при влажности ~19%, что соответствует естественной влажности содовых шламов. Установлено, что использование полимерного стабилизатора M_{10+50} в количестве ~0,08% масс. повышает плотность образцов шлама в ~1,4 раза. Исследование влияния минерального состава на прочность образцов показало, что если твердая фаза смеси состоит на ~50% из содового шлама, ~25% глины и ~25% щебня, то при добавлении 0,08% масс. стабилизатора M_{10+50} ее прочность достигает 11–12 МПа, что сопоставимо с прочностью бетонов марок М100/М150. Экономия от использования содовых шламов в дорожном строительстве, как показали расчеты, может составить около 2 млн руб. на 1 км дороги шириной 8 м при толщине покрытия в 10 см.

Ключевые слова: отходы содового производства, содовые шламы, дорожное покрытие, шламо-грунтовая смесь

UTILIZATION OF SODA ASH PRODUCTION WASTE IN ROAD CONSTRUCTION

Kozlov S.G., Vyazovikova I.V., Chernyy S.A., Krepyshcheva I.V.

*Perm National Research Polytechnic University, Berezniki branch,
Berezniki, e-mail: myrjak862@yandex.ru*

The article describes the opportunities for utilization of Berezniki Soda Ash Plant solid wastes in road construction. The importance of the research is determined by large volume of accumulated wastes reaching the capacity of waste storage. The authors propose to utilize the sludge from waste storage without additional purification for the replacement of clay in the manufacturing of coatings for dirt roads. The comparison of granulometric composition of sludge and local clay has revealed their similarity for small particles fraction. The analysis of sludge density has found minor influence of the additional purification stage on the properties of samples. The maximum density has been achieved for samples with 19% moisture content which is similar to the water content in the waste storage. The use of M_{10+50} polymer stabilizer at 0.08%wt. increases the density of sludge samples in 1.4 times. The optimum coating mix has been defined as 50% of soda ash sludge, 25% of clay, and 25% of crushed aggregate. With addition of M_{10+50} stabilizer, its strength reaches 11–12 MPa, which is comparable with concrete of М100/150 grades. The economic effect of sludge utilization in road construction has been estimated at 2 million rubles per 1 km length×8 m width×10 cm pavement thickness of dirt road.

Keywords: soda ash production waste, soda ash sludge, pavement, road coating blend

Березниковский содовый завод является родоначальником содовой промышленности России и выпускает свою продукцию уже 130 лет. Производство кальцинированной соды на предприятии осуществляется аммиачно-солевым способом и сопровождается образованием значительного количества твердых отходов. Их размещение требует существенных дополнительных затрат и масштабного отчуждения территории. В связи с этим одной из актуальных задач, стоящих перед предприятием, является разработка схемы эффективной утилизации твердых отходов, обеспечивающей снижение экологической нагрузки на окружающую среду и получение экономических выгод от их повторного использования [11].

Процесс отходообразования в ОАО БСЗ можно представить двумя этапами. Первичные отходы образуются уже на стадии добычи сырья в Чаньвинском известняковом карьере. Известняк используется в виде

«химического камня» в производстве соды, а в карьере остаются вскрышные породы, основную часть которых составляет глинистый материал вперемешку со щебнем. За долгие годы работы завода в отвале накоплены миллионы тонн подобных отходов, что по существу представляет собой техногенное месторождение¹ глины [14].

В дальнейшем по ходу производственного процесса при извлечении аммиака образуются кальцийсодержащие шламы, которые в виде пульпы сливают в шламонакопителя. Примерный состав шлама березниковского содового производства показан на диаграмме (рис. 1).

Шламонакопитель расположен на северо-западной окраине г. Березники, на левом берегу Камского водохранилища. Отходы ОАО БСЗ складированы в действующем

¹ Общее количество глины на месторождении по предварительным оценкам составляет около 35 млн т.

ющей и старой картах шламонакопителя, которые ограничены дамбами из щебня и дресвы известняка. Площадь действующей карты составляет 155 га, старой – около 89 га (рис. 2). По данным бурения и по имеющимся фондовым материалам, мощность накопленного шлама увеличивается в северо-западном направлении от 2,5 до 15 м. По ориентировочным расчетам объем шлама в настоящее время превышает

10 млн м³ или около 20 млн т. Рентгеноструктурный анализ пород показал, что преобладающим минералом складированных отходов ОАО БСЗ является кальцит, находящийся в кристаллическом (до 58%) и скрытокристаллическом состоянии (до 70%). Общее количество кальция находится в пределах 80–95%, причем его большее содержание характерно для 1,5-метрового верхнего слоя.

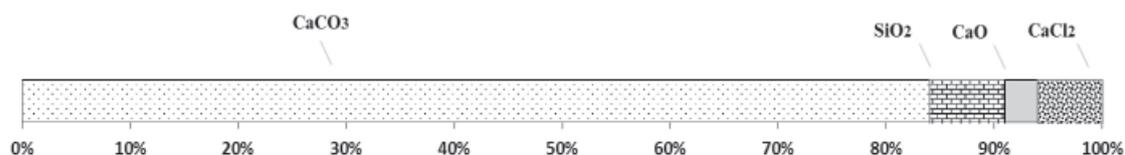


Рис. 1. Состав твердой фазы шлама содового производства [2]

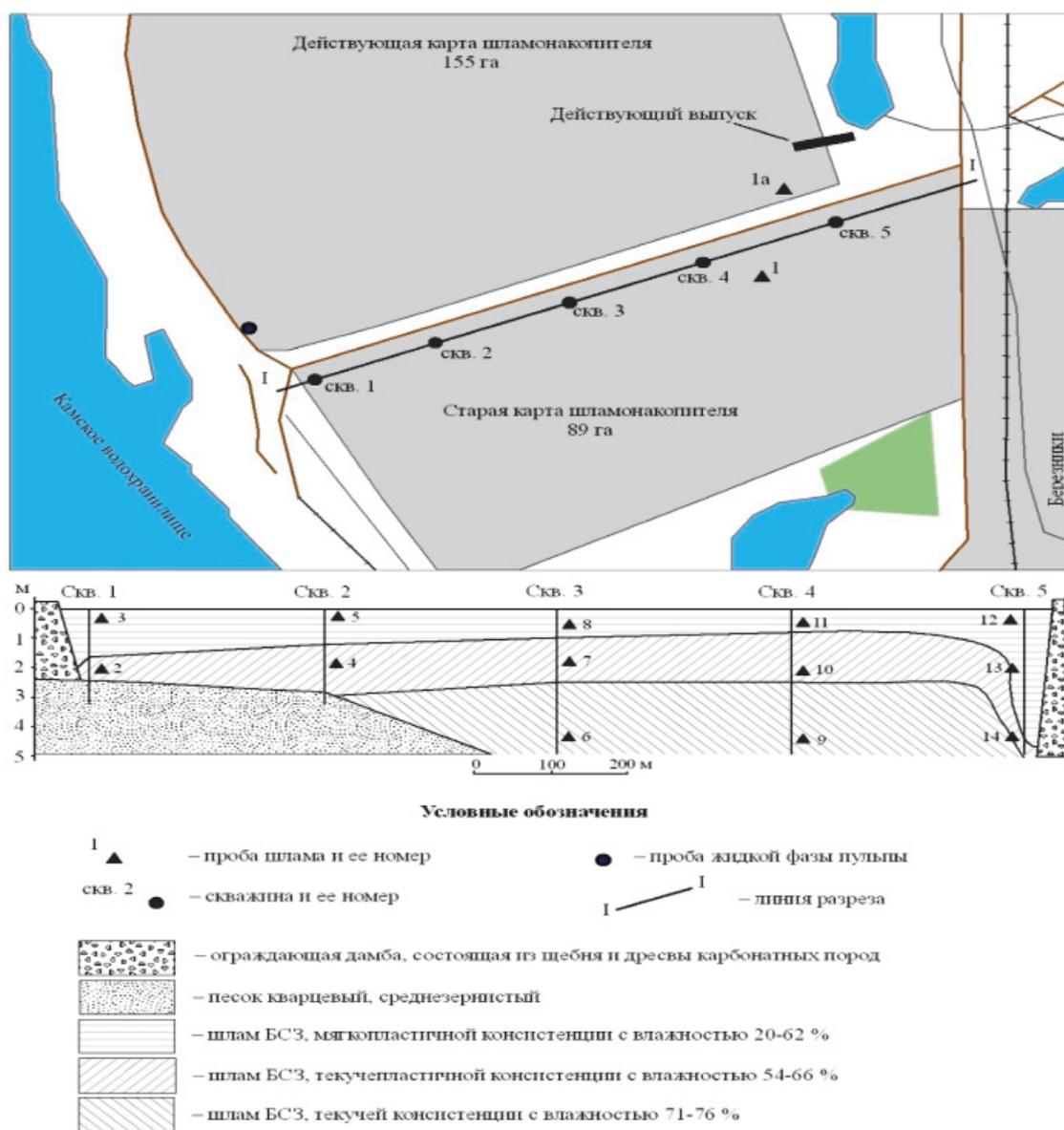


Рис. 2. Схема шламонакопителя ОАО «БСЗ» [2]

Жидкая фаза пульпы из производственного цикла имеет щелочные значения водородного показателя и среднюю минерализацию. В составе содержится значительное количество растворенных ионов: хлоридов, сульфатов, натрия и калия, аммония. Их ми-

грационная способность достаточно велика. Однако в старой карте за 30 лет эти компоненты уже «вымывты» из складированного шлама за счет инфильтрации атмосферных осадков и отсутствия свежих поступлений с пульпой (табл. 1).

Таблица 1
Химический состав жидкой фазы пульпы отходов ОАО БСЗ, в мг/л [2]

Место отбора	HCO_3^-	SO_4^-	Cl^-	NO_2^-	CO_3^{2-}	Ca^{2+}	$\text{Na}^+ + \text{K}^+$	NH_4^+	Минерализация	pH
Выпуск производственного цикла	61,0	7205	106359	3,6	-	41082	25859	204	180773	12,3
Западная часть действующей карты шламонакопителя	36,6	1884	15252	0,4	51	5511	4535	13,5	27284	11,1

В процессе производства соды образуется примерно 9–10 м³ дистиллерной жидкости на 1 т готового продукта. С учетом ограниченности оставшегося незаполненного объема действующего шламохранилища ее накопление сдерживает возможное увеличение выпуска целевой продукции. Кроме того, нарастающий объем жидкости в шламонакопителях увеличивает экологический риск инфильтрации загрязнений через защитный экран и попадания вредных веществ в источники водоснабжения. Все это делает характер задачи частичного освобождения шламонакопителей неотложным.

Для освобождения шламонакопителей и карьеров от завалов могут использоваться известные способы утилизации отходов содового производства. Подсохшие шламы и глина могут быть востребованы в сельском хозяйстве для обработки почв, в горнодобывающей промышленности для нейтрализации шахтных вод угольных шахт и восстановления ландшафтов в местах добычи серосодержащих полезных ископаемых, в строительстве для производства различных строительных материалов и конструкций, на газо-нефтедобывающих предприятиях для получения буровых растворов, а также в дорожной отрасли для производства покрытий [9].

Анализ возможных направлений утилизации отходов березниковского содового производства показал, что большинство технологий требуют определенной очистки шламов, поэтому наиболее приемлемым в этом плане является использование содовых отходов в дорожном строительстве. Именно это направление утилизации отходов предусматривает их масштабное извлечение из карьеров и шламохранилищ, и дальнейшее непосредственное использование без всякой

очистки. Подобное решение относительно недорогое и достаточно простое с технико-технологических позиций.

Основная идея выполненной научно-исследовательской работы заключается в разработке основ технологии приготовления покрытия для грунтовых дорог, в составе которого традиционно используемые глины будут заменены шламами содового производства. С этой целью была проведена серия экспериментов, основные результаты которых приведены в данной статье.

На первом этапе исследований было выполнено сравнение гранулометрических составов глины и шлама методом мокрого отсева (табл. 2) [4].

Таблица 2
Результаты анализа гранулометрического состава шлама и глины

Размер частиц, мм	Доля фракции в общем объеме, в %	
	Шлам	Глина
1,5	60	52
0,08	15	23
0,063	4	4
Менее 0,063	21	21

Как видно из табл. 2, гранулометрический состав местной глины, традиционно используемой в дорожном строительстве, весьма схож с составом содового шлама, особенно в части мелких фракций. Это важно, т.к. в процессе исследований установлено, что содержание мелких фракций в шламе существенно влияет на плотность покрытия (см. диаграмму на рис. 5 далее по тексту). Именно мелкие фракции, буду-

чи смоченными водой, заполняют полости в дорожном покрытии, формируя плотные структуры. Поэтому вторым этапом эксперимента было изучение влияния влажности на плотность приготовляемой шламо-грунтовой смеси по методу лабораторного определения максимальной плотности грунтов

[3]. Для проведения опытов смесь изготавливалась в соотношении 70% грунта и 30% шлама, что соответствует типичному составу смесей грунта и глины, часто используемых в дорожном строительстве [1]. Зависимость плотности смеси от влажности показана на рис. 3.

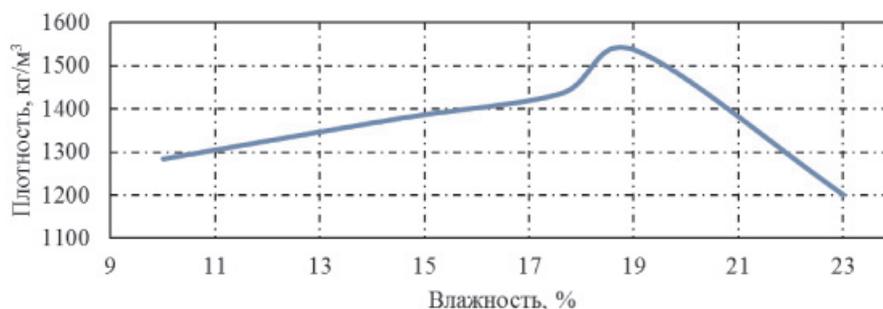


Рис. 3. Зависимость плотности смеси от ее влажности

По диаграмме видно, что максимальная плотность образцов обнаруживается при влажности ~19%, что соответствует естественной влажности содовых шламов, предлагаемых к использованию вместо глины. Ее уровень обычно составляет 18–20%. Именно при таком количестве вода наиболее плотно связывает частицы смеси, но при дальнейшем росте влажности вода ухудшает прочностные характеристики покрытия, размывая шламо-грунтовую смесь. По ходу данного эксперимента также установлено, что при равной доле мелких фракций (~21%) и одинаковой влажности

(~19%) монообразцы шлама имели плотность ~2250 кг/м³, а образцы чистой глины ~1600 кг/м³, что обеспечивает прочностные преимущества для смеси грунта со шламом в сравнении с традиционной смесью грунта с глиной.

Далее, учитывая роль мелкой фракции в усилении прочностных характеристик смесей, была изучена зависимость плотности образцов материала от доли в нем частиц размером менее 0,063 мм. Для этого были выбраны смеси грунта и шлама с различным содержанием мелких частиц. Полученная зависимость представлена на рис. 4.

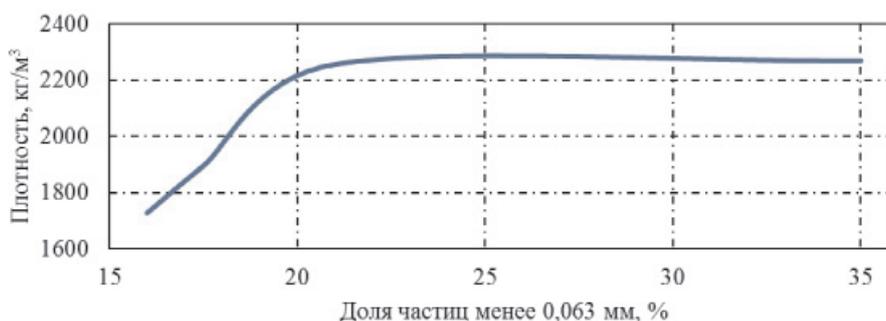


Рис. 4. Зависимость плотности шламо-грунтовой смеси от доли мелких частиц

Содержание шлама в смеси последовательно увеличивалось от 30 до 100%, а затем для увеличения доли мелкой фракции неочищенный шлам дополнялся специально очищенным. Из рис. 4 видно, что плотность образца смеси возрастает при увеличении доли мелких частиц. Подобную зависимость можно объяснить увеличением поверхности контакта фаз при уменьшении размеров частиц смеси. Более мелкие частицы образуют более плотную структуру. Неочищенный

шлам имеет долю мелких частиц ~21%, очищенный ~35% и более. Однако график зависимости показывает, что плотности очищенного и неочищенного шлама сопоставимы между собой. Поэтому с технико-экономической точки зрения для изготовления покрытия, безусловно, выгоднее использовать неочищенный шлам, исключая дополнительные расходы на его очистку.

После того как первые результаты испытаний показали, что шлам в составе

дорожной смеси улучшает ее прочностные параметры, было решено изучить возможности включения в состав смеси глинистых отходов из карьера. Однако при изготовлении опытных образцов сначала было необходимо выбрать дополнительное вяжущее для обеспечения их прочности и сохранения целостности формы. В качестве такого компонента для добавления в исходную минеральную смесь было решено использовать известный стабилизатор грунта – полимерную эмульсию марки M_{10+50} производимую американской компанией Enviroseal на основе акрилового винилацетатного сополимера. Подобные стабилизаторы на различных основах широко применяются для закрепления элементов дорожных одежд в США и странах Европы. Эмульсия M_{10+50} весьма часто приме-

няется в дорожном и аэродромном строительстве для укрепления грунтов. Опыт ее применения показывает, что выбранный стабилизатор позволяет существенно увеличить модуль упругости и прочностные характеристики грунтов. Кроме того, укрепленные выбранной эмульсией грунты обладают высокой морозостойкостью и водостойкостью, а также уменьшает пыльность покрытия. Другим плюсом является то, что эмульсия M_{10+50} может использоваться для всех видов грунта – и песчаных, и глинистых, а дорожное полотно, изготовленное с использованием эмульсии M_{10+50} может использоваться уже через 2 часа после проведения работ [10,13]. Механизм действия такого полимерного стабилизатора схематично представлен на рис. 5.

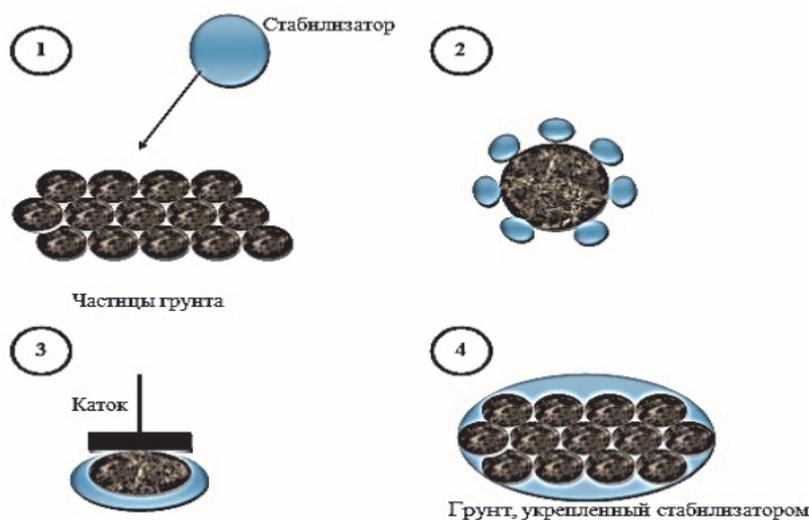


Рис. 5. Механизм действия стабилизатора

Стабилизатор вносится в материал (1), осаждается на поверхности частиц грунта (2), образуя капли. Под давлением капли растекаются (3) и заполняют пустоты между частицами минерального материала (4), связывая тем самым его в плотную структуру [7].

Учитывая, что добавка стабилизатора в грунт улучшает прочностные характеристики последнего, представлялось важным оценить воздействие эмульсии на шлам содового производства без примеси грунта. Для этого в шлам добавляли в соответствии с типовой инструкцией по использованию стабилизатора рекомендуемое количество эмульсии $\sim 0,08\%$ по массе образца [8]. Опытные испытания показали, что плотность образцов шлама при типичной влажности 19–22% с добавлением указанного количества эмульсии возрастает в $\sim 1,4$ раза.

При этом при добавлении большего количества стабилизатора плотность шламовых образцов возрастает почти линейно, что видно из диаграммы на рис. 6.

Следовательно, использование стабилизатора целесообразно и для упрочнения шламо-грунтовых смесей, планируемых к использованию в дорожном покрытии.

На заключительном этапе исследования прочность образцов в зависимости от состава приготавливаемой смеси. После замены грунта на шлам, а также добавления глины в состав смеси был добавлен щебень. Это целесообразно, т.к. на практике глинистые отходы известнякового карьера также содержат около 50% щебня в своем составе. Для этого был изготовлен ряд образцов с различными составами твердых компонентов при оптимальном уровне влажности. Образцы выдерживались

7 суток на воздухе в лабораторных условиях при температуре воздуха 20°C. Затем их подвергали нагрузке на лабораторном прессе, доводя ее до 150 кг/см², что соответствует уровню давления дорожного катка [12]. Следует подчеркнуть, что в состав всех исследуемых смесей вводилось рекомендуемое количество эмульсии М₁₀₊₅₀ согласно инструкции ее фирмы-разработчика – т.е. ~0,08% по массе образца. Результа-

ты измерений предела прочности образцов смесей различных составов приведены на рис. 7. Как видно по результатам опытов, добавление шлама и естественных твердых компонентов в состав дорожных смесей существенно повышает их прочностные характеристики, позволяя увеличить предел прочности смеси более чем в ~2,5 раза в сравнении со стандартным вариантом ее композиции (образец #1).

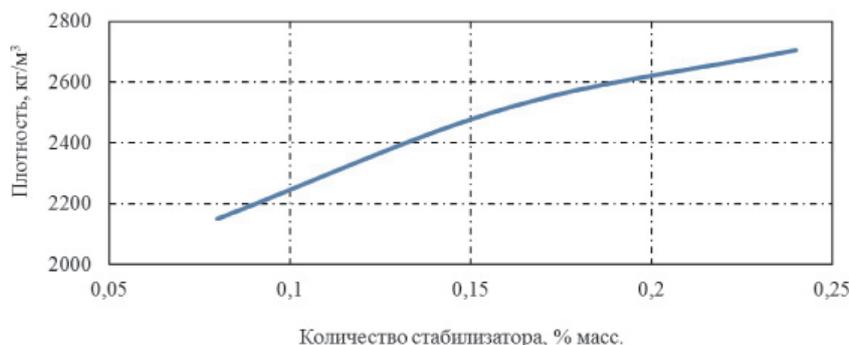


Рис. 6. Влияние количества стабилизатора на плотность содового шлама²

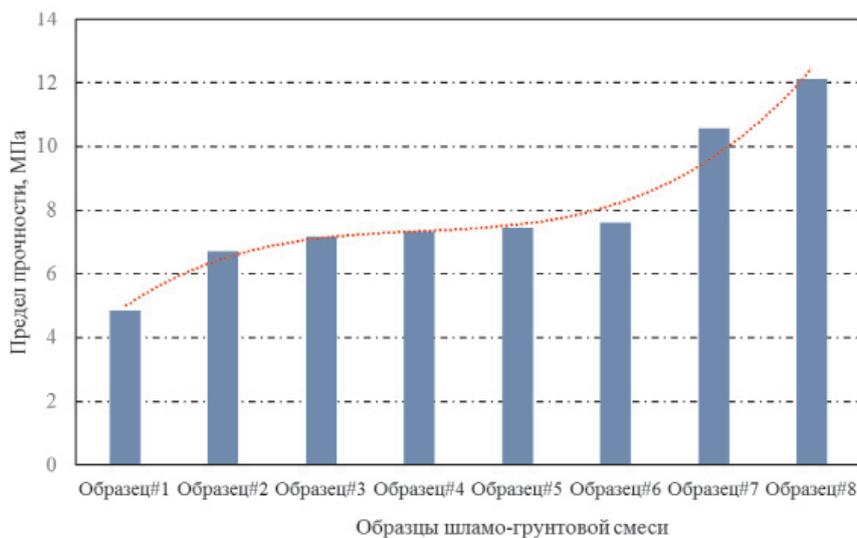


Рис. 7. Зависимость прочности шламо-грунтовой смеси от ее состава

Образцы	Состав твердых компонентов смеси
Образец#1	Грунт 70% + глина 30%
Образец#2	Грунт 70% + шлам 30%
Образец#3	Грунт 50% + шлам 50%
Образец#4	Шлам 50% + глина 50%
Образец#5	Шлам 70% + глина 30%
Образец#6	Шлам 100%
Образец#7	Шлам 50% + щебень 50%
Образец#8	Шлам 50% + глина 25% + щебень 25%

² Дальнейшее наращивание количества стабилизатора в смеси экономически невыгодно.

Результаты проведенных экспериментов показывают, что предел прочности материалов, полученных с использованием отходов содового производства и полимерного стабилизатора M_{10+50} , достигает уровня 11–12 МПа, что сопоставимо по прочности с бетонами марок М 100 (класс бетона В 7,5) и М 150 (класс бетона В 10) (рис. 8). Указанные марки бетонов применяются при проведении подготовительных работ

в строительстве, а также для непосредственного бетонирования некрупных дорожек и изготовления бетонных подушек при выполнении прочих дорожных работ. Это подтверждает техническую возможность применения шламо-грунтовых смесей, изготовленных с использованием отходов содового производства и полимерного стабилизатора M_{10+50} в качестве элементов дорожного покрытия для грунтовых дорог.

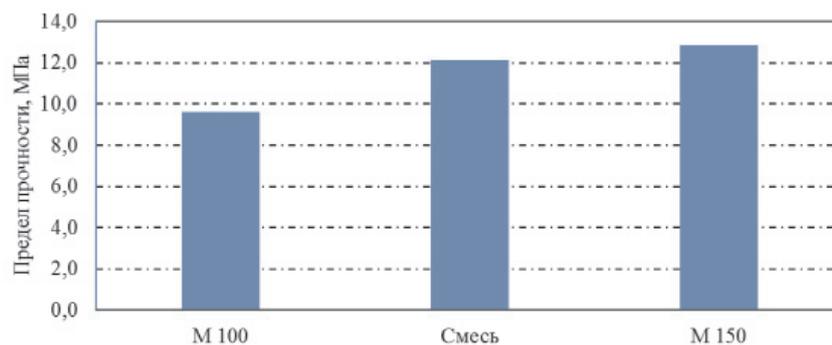


Рис. 8. Сопоставление прочности бетонов и шламо-грунтовой смеси [5]

Для оценки экономической целесообразности использования отходов содового производства в местном дорожном строительстве авторами были сопоставлены возможные затраты на возведение дорожных одежд для 1 км дороги с шириной полотна 8 м и толщиной накладываемого покрытия 10 см по традиционной и разрабатываемой технологиям. По 1-му варианту рассчитывалась стоимость покрытия с использованием цемента-грунтовой схемы, а по 2-му – с использованием содовых отходов. Сравнительный анализ смет на строительство дорог, составленных в соответствии с действующими ГЭСН, по обоим вариантам показал, что использование отходов позволяет получить экономию около 2 млн руб. на каждый километр трассы в текущих ценах. Причем основная экономия приходится на материалы, применяемые в строительстве. Резервом для снижения затрат является возможная замена дорогого импортного стабилизатора на более дешевые отечественные аналоги [6].

Кроме экономии на материалах при строительстве дорог, не менее значительным эффектом будет снижение темпов заполнения шламонакопителя и перенос возведения нового на отдаленное время. Несмотря на проблематичность прямой эколого-экономической оценки этого эффекта, он, безусловно, является целевым для ОАО «Березниковский содовый завод». Таким образом, проведенные исследования

показали, что использование отходов содового производства в дорожном строительстве технически возможно и экономически выгодно. Их применение для изготовления дорожного покрытия на грунтовых дорогах позволит не только оптимизировать расходование природных ресурсов, но и сократить крупные техногенные образования на территории Верхнекамья.

Список литературы

1. Безрук В.М. Укрепленные грунты. – М.: Транспорт, 1982. – 231 с.
2. Боков Д.А., Блинов С.М. Перспективы и опыт вторичного использования отходов промышленных предприятий Пермского края // Университетские исследования. – 2009. – № 12 / www url: http://www.uresearch.psu.ru/files/articles/21_10707.doc.
3. ГОСТ 22733–2002. Грунты. Метод лабораторного определения максимальной плотности – М.: Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.
4. ГОСТ 12536–79 Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 32 с.
5. ГОСТ 7473–94. Смеси бетонные. Технические условия – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 10 с.
6. Государственные элементные сметные нормы на строительные и специальные строительные работы. Сборник 27. Автомобильные дороги – М.: ФГУ ФЦЦС, 2009. – 100 с.
7. Добров Э.М., Емельянов С.Н., Федулов А.А. Природа формирования свойств глинистых грунтов с помощью стабилизаторов // Автомобильные дороги: Науч. техн. информ. сб. / ФГУП «Информавтдор». – М., 2002. – Вып. 2. – 36 с.
8. Инновационные технологии в строительстве дорог и ПГС: М 10+50 Полимерная эмульсия / Материалы

Представительства в РФ Paragon Management Corporation / www url: <http://www.paragongroup.ru/m10next.html>.

9. Калинина Е.В. Утилизация шламов карбоната кальция в производстве товарных продуктов строительной отрасли // Градостроительная и отраслевая экология – Вестник ПНИПУ. Урбанистика. – 2012. – № 1. – С. 97–113.

10. Кочеткова Р.Г. Влияние современных стабилизаторов на улучшение свойств глинистых грунтов // Основания, фундаменты и механика грунтов. – 2012. – № 1. – С. 10–12.

11. Материалы официального сайта ОАО «БСЗ» / www url: <http://bsz.ru>.

12. Уплотнение и укладка дорожных материалов. Теория и Практика / под ред. Я. Чиндберга. – СПб.: Тест-Принт, 1995. – 184 с.

13. Фурсов С.Г. Строительство конструктивных слоев дорожных одежд из грунтов, укрепленных вяжущими материалами // Автомобильные дороги: науч. техн. информ. сб. / ФГУП «Информавтотор». – М., 2007. – Вып. 3. – 45 с.

14. Чаньвинское месторождение известняков / под ред. А.И. Кудряшова, В.И. Фомина, В.П. Колесникова. – Пермь: Типография купца Тарасова, 1999. – 82 с.

7. Dobrov E.M., Emelyanov S.N., Fedulov A.A. Priroda formirovaniya svoystv glinistykh gruntov s pomoschyu stabilizatorov // Avtomobilnye dorogi; nauch.tekhn.inform.sb. / FGUP «Informavtodor». М., 2002. Vyp. 2. 36 p.

8. Innovatsionnye tekhnologii v stritelstve dorog i PGS: M₁₀₊₅₀ Polimernaya emulsiya / Materialy predstavitelstva v RF Paragon Management Corporation / www url: <http://www.paragongroup.ru/m10next.html>.

9. Kalinina E.V. Utilizatsiya shlamov karbonata kaltsiya v proizvodstve tovarnykh produktov stroitelnoy otrasli // Gradostroitel'naya i otraslevaya ekologiya Vestnik PNIPIU. Urbanistika. 2012. no. 1. pp. 97–113.

10. Kochetkova R.G. Vliyanie sovremennykh stabilizatorov na uluchshenie svoystv glinistykh gruntov // Osnovaniya, fundamentey i mekhanika gruntov. 2012. no. 1. pp. 10–12.

11. Materialy oficialnogo sayta ОАО «BSZ» / www url: <http://bsz.ru>.

12. Uplotnenie i ukladka dorozhnykh materialov. Teoriya i Praktika. / Pod red. Ya. Chidberga. S-Pb.: «Test-print», 1995. 184 p.

13. Furosov S.G. Stroitelstvo konstruktivnykh sloev dorozhnykh odezhd iz gruntov, ukreplennykh vyazhushchimi materialami // Avtomobilnye dorogi; nauch.tekhn.inform.sb. / FGUP «Informavtodor». М., 2007. Vyp. 3. 45 p.

14. Chanvinskoe mestorozhdenie izvestnyakov / Pod red. Kudryashova A.I., Fomina V.I., Kolesnikova V.P. Perm: «Tipografiya kuptsa Tarasova», 1999. 82 p.

References

1. Bezruk V.M. Ukreplennye grunty. М.: transport, 1982 231 p.

2. Bokov D.A., Blinov S.M. Perspektivy i opyt vtorychnogo ispolzovaniya othodov promyshlennykh predpriyatiy permskogo kraya // Universitetskie issledovaniya. 2009. no. 12 / www url: http://www.uresearch.psu.ru/files/articles/21_10707.doc.

3. GOST 22733-2002. Grunty. Metod laboratornogo opredeleniya maksimalnoy plotnosti. –М: Izd. Standartov, 2002. 12 p.

4. GOST 12536-79. Metod laboratornogo opredeleniya granulometricheskogo (zernovogo) b mikroagregatnogo sostava. –М: Izd. Standartov, 1979. 32 p.

5. GOST 7473-94. Smesi betonnye. Tekhnicheskie usloviya. М.: Izd. Standartov, 1996. 10 p.

6. Gosudarstvennyye elementnye smetnye normy na stroitelnye i spetsialnye stroitelnye raboty. Sbornik 27. Avtomobilnye dorogi. М.: FGU FCCS, 2009. 100 p.

Рецензенты:

Островский С.В., д.т.н., профессор кафедры «Химические технологии», ФГБОУ ВПО ПНИПУ, г. Пермь;

Затонский А.В., д.т.н., профессор, зав. кафедрой «Автоматизация технологических процессов», ФГБОУ ВПО «Березниковский филиал ПНИПУ», г. Березники, Пермский край.

Работа поступила в редакцию 22.11.2013.