

УДК 911.37:691.5:625.81

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ
ЗОЛОШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ
НА ПРИМЕРЕ ИРКУТСКОЙ ОБЛАСТИ**

Канд. техн. наук, доцент **Н.А. Слободчикова**
(Иркутский национальный исследовательский
технический университет (ИРНИТУ)),
главный специалист-эксперт **К.В. Плюта**
(ФКУ Упрдор «Прибайкалье»)
Контактная информация: kv_plyuta@mail.ru

В настоящее время процент утилизации золошлаковых отходов составляет не более 12 %, в то время как их ежегодный прирост измеряется в миллионах тонн. В соответствии с Энергетической стратегией Российской Федерации на период до 2035 г. доля утилизированных золошлаковых отходов, в общем объеме, должна быть увеличена с 8,4 % (базовый уровень – по данным 2018 г.) до 50 %.

Одной из эффективных и наиболее емких сфер применения золошлаковых материалов является дорожное хозяйство, в частности строительство слоев земляного полотна автомобильных дорог. Однако отсутствие обширного научно-практического опыта применения этих материалов на территории Байкальского региона осложняет их использование при строительстве автомобильных дорог.

В статье сообщается о возможности применения золошлаковых смесей Иркутской области в дорожном строительстве. Рассмотрены требования к качественным характеристикам золошлаковых смесей. Приведены результаты лабораторных исследований золошлаковых смесей Иркутской области.

Ключевые слова: автомобильные дороги, отходы промышленного производства, золошлаковые смеси, утилизация, земляное полотно.

ВВЕДЕНИЕ

Ежегодно в Российской Федерации сжигается более 123 млн т твердого топлива. Объем образования золошлаковых отходов достигает 25 млн т, а количество накоплений оценивается в 1,5 млрд т, что занимает более 22 тыс. га [1]. Утилизация в РФ этих отходов составляет около 8 %

в год. В то же время в ряде стран мира объем утилизации золошлаковых отходов составляет 70-95 %, а в Нидерландах и Дании – до 100 % [2].

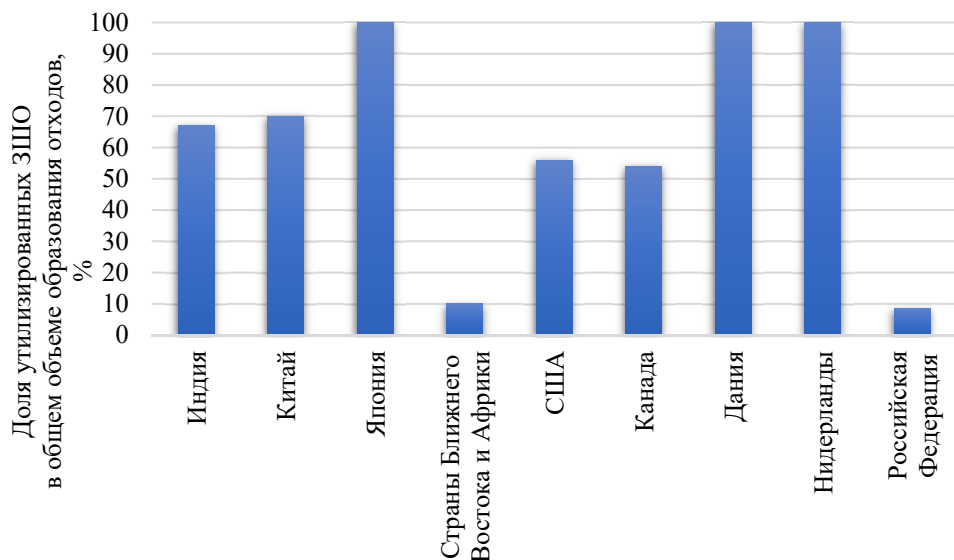


Рис. 1. Доля утилизированных золошлаковых отходов (ЗШО) от общего объема образованных отходов

Иркутская область по производству и потреблению тепловой энергии входит в состав ведущих регионов как в Сибирском федеральном округе, так и в Российской Федерации. Производство электроэнергии осуществляется 15 тепловыми электростанциями (4207,1 МВт), работающими на угле, в результате многолетнего сжигания которого на территории области накоплено более 84 млн т золошлаковых отходов [3].

Одним из эффективных и наиболее емких направлений применения золошлаковых материалов является дорожное хозяйство, в частности строительство слоев земляного полотна автомобильных дорог [4-7]. Следует отметить, что развитие данного направления является наиболее перспективным в регионах с низкой плотностью автомобильных дорог, например в Сибирском и Дальневосточном федеральных округах (табл. 1).

Таблица 1

**Протяженность автомобильных дорог
с твердым покрытием федерального, регионального и
межрегионального значения по субъектам Российской Федерации**

Наименование субъектов Российской Федерации	Протяженность автомобильных дорог, км		Площадь территории, тыс. км ²	Плотность автомобильных дорог, км на 1000 м ² территории	
	общая	с твердым покрытием		все типы покрытия	с твердым покрытием
<i>Центральный федеральный округ</i>	355 956	243 057	650	547	374
<i>Северо-Западный федеральный округ</i>	145 749	105 305	1687	86	62
<i>Южный федеральный округ</i>	148 042	106 808	448	331	238
<i>Северо-Кавказский федеральный округ</i>	90 178	71 253	170	529	418
<i>Приволжский федеральный округ</i>	355 087	244 168	1037	342	235
<i>Уральский федеральный округ</i>	105 383	79 360	1819	58	44
<i>Сибирский федеральный округ</i>	225 990	161 262	5145	44	37
<i>Дальневосточный федеральный округ</i>	127 278	85 226	6169	21	12

В российской практике дорожного строительства накоплен значительный теоретический и практический опыт применения золошлаковых материалов для возведения земляного полотна автомобильных дорог. Их применение регламентируется ОДМ 218.2.031-2013, который содержит общие требования к качественным характеристикам золошлаковых смесей (табл. 2).

Таблица 2

Требования к золошлаковым смесям согласно ОДМ 218.2.031-2013

<i>№ п/п</i>	<i>Наименование показателя</i>	<i>Требования к золошлаковым смесям</i>
<i>1</i>	<i>Зерновой состав</i>	Крупно-, средне- и мелкозернистые
<i>2</i>	<i>Степень морозной пучинистости ε_{fn}, д.е.</i>	< 0,035 – без ограничений; 0,036 – 0,07 с мероприятиями по обеспечению устойчивости земляного полотна; > 0,07 с мероприятиями по укреплению рабочего слоя
<i>3</i>	<i>Потери массы при прокаливании</i>	Низкое и среднее содержание горючих веществ
<i>4</i>	<i>Влажность</i>	–
<i>5</i>	<i>Модуль упругости, МПа</i>	30 – 85
<i>6</i>	<i>Угол внутреннего трения</i>	24 – 32
<i>7</i>	<i>Удельное сцепление</i>	0,001 – 0,004
<i>8</i>	<i>Удельная эффек- тивная актив- ность природных радионуклидов</i>	первый класс по ЕРН ($A_{эфф}$)

Качественные характеристики золошлаковых смесей зависят от многих факторов: вида и технологии сжигания угля, используемого оборудования, степени измельчения и т.п. Поэтому при оценке возможности применения золошлаковых смесей для возведения земляного полотна, кроме параметров, указанных в **табл. 2**, необходимо учитывать такие факторы как:

1. *Дробимость частиц при уплотнении слоев земляного полотна*, вследствие их незначительной прочности, что приводит к существенному изменению первоначального гранулометрического состава.
2. *Влажность золошлаковых смесей*. Несмотря на почти полное отсутствие связанной воды, золошлаковые смеси повышенной влажности плохо уплотняются, что объясняется низкими значениями угла внутреннего трения.
3. *Плотность золошлаковых смесей в теле земляного полотна*. Данный фактор не учитывается рядом методов лабораторных испытаний для определения показателей **табл. 2**, регламентированной действующей нормативно-технической документацией.

Целью работы, рассматриваемой в данной статье, было исследование свойств золошлаковых отходов ТЭЦ Иркутской области для сооружения земляного полотна автомобильных дорог, с учетом изложенного выше.

Методы исследования свойств золошлаковых отходов

Для исследования возможности применения золошлаковых смесей Иркутской области в дорожном строительстве были определены их физико-механические свойства с применением методов, изложенных в **табл. 3**.

Предварительное измельчение угля на ТЭЦ приводит к образованию незначительного количества шлаковой составляющей. По мнению авторов данной статьи, золошлаковые отходы целесообразно классифицировать как техногенный грунт в соответствии с требованиями ГОСТ 25100-2020 «*Грунты. Классификация (с Поправками)*».

В действующей нормативно-технической документации рекомендациями по предварительной подготовке аналитических проб золошлаковых смесей не учитываются особенности их применения в конструктивных элементах автомобильных дорог. В частности, определение значения угла внутреннего трения, сцепления, набухания и степени морозной пучинистости выполняется на образцах нарушенного или ненарушенного сложения. Учитывая, что золошлаковая смесь в конструкции автомобильной дороги находится в уплотненном состоянии, применение образцов нарушенного сложения или ненарушенного сложения из золотвалов не позволяет обеспечить достоверность полученных результатов.

Таблица 3

Методы лабораторных испытаний золошлаковых смесей

<i>№ п/п</i>	<i>Наименование показателя</i>	<i>Стандарты на методы испытаний</i>
<i>1</i>	<i>Зерновой состав</i>	ГОСТ 12536
<i>2</i>	<i>Степень морозной пучинистости</i>	ГОСТ 28622
<i>3</i>	<i>Потери массы при прокаливании</i>	ГОСТ 8269.1
<i>4</i>	<i>Влажность</i>	ГОСТ 8735, ГОСТ 12536
<i>5</i>	<i>Угол внутреннего трения</i>	ГОСТ 12248
<i>6</i>	<i>Удельное сцепление</i>	ГОСТ 12248
<i>7</i>	<i>Содержание фракции < 0,002 мм</i>	ГОСТ Р 8.777-2011
<i>8</i>	<i>Насыпная плотность</i>	ГОСТ 9758
<i>9</i>	<i>Максимальная плотность</i>	ГОСТ 22733
<i>10</i>	<i>Относительная влажность</i>	ГОСТ 22733

Кроме того, на значения удельного сцепления и угла внутреннего трения существенное влияние оказывает влажность, которая также не учитывается в нормативной документации.

Авторы полагают, что данные испытания должны проводиться на образцах, уплотненных при изготовлении до максимальной плотности при оптимальной влажности. Для изготовления таких образцов используется прибор стандартного уплотнения СОЮЗДОРНИИ и режущее кольцо.

*Результаты лабораторных исследований
золошлаковых смесей*

Для проведения лабораторных исследований были отобраны пробы золошлаковых смесей Иркутской области из следующих золоотвалов: ТЭЦ-6, ТЭЦ-7, ТЭЦ-9, ТЭЦ-10, ТЭЦ-11, Ново-Иркутская ТЭЦ, Усть-Илимская ТЭЦ, Шелеховский участок Ново-Иркутской ТЭЦ.

По результатам лабораторных исследований были определены характеристики проб золошлаковых смесей ТЭЦ Иркутской области (табл. 4).

Таблица 4

Результаты испытаний физико-механических свойств золошлаковых смесей

Наименование показателя	Золошлаковые смеси ТЭЦ Иркутской области							
	ТЭЦ 6	ТЭЦ 7	ТЭЦ 9	ТЭЦ 10	ТЭЦ 11	Ново-Иркутская ТЭЦ	Усть-Илимская ТЭЦ	Ново-Иркутская ТЭЦ (Шелеховский участок)
Классификация ГОСТ 25100	песок пылеватый	песок пылеватый	песок пылеватый	песок пылеватый	песок пылеватый	песок пылеватый	песок пылеватый	песок пылеватый
Содержание частиц < 0,002 мм, %	6,70	5,60	8,60	–	2,40	2,50	5,00	4,90
Тип золошлаковой смеси	мелкозернистый	мелкозернистый	среднезернистый	среднезернистый	среднезернистый	среднезернистый	среднезернистый	мелкозернистый
Потери массы при прокаливании, %	13,77	1,34	4,49	3,00	–	–	5,50	1,49
Содержание горючих веществ (Гор)	высокое	низкое	низкое	низкое	–	–	среднее	низкое
Относительная деформация морозного пучения, д.е	0,019	0,043	0,022	–	0,039	0,020	0,028	0,038
	слабопучинистый	среднепучинистый	слабопучинистый	–	среднепучинистый	слабопучинистый	слабопучинистый	среднепучинистый
Насыпная плотность, кг/м³	692,50	1060,00	993,88	955,25	1365,88	1430,78	1000,29	832,10
Максимальная плотность, г/см³	1,17	1,38	1,19	1,17	1,62	1,73	1,58	1,11
Оптимальная влажность, %	37,64	26,69	26,81	28,81	17,07	20,92	18,59	36,92
Коэффициент фильтрации, м/сут.	0,04	0,07	0,02	0,04	0,12	0,04	0,03	0,06
Угол внутреннего трения, °	13	17	4	7	22	23	19	14
Удельное сцепление, МПа	0,002	0,003	0,032	0,023	0,002	0,003	0,007	0,002

Результаты исследования изменения гранулометрического состава приведены на **рис. 2-7**.

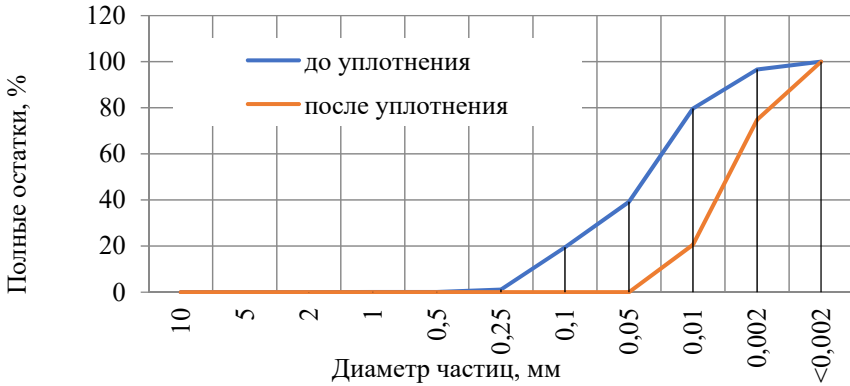


Рис. 2. Гранулометрический состав пробы Ново-Иркутской ТЭЦ (Шелеховский участок)

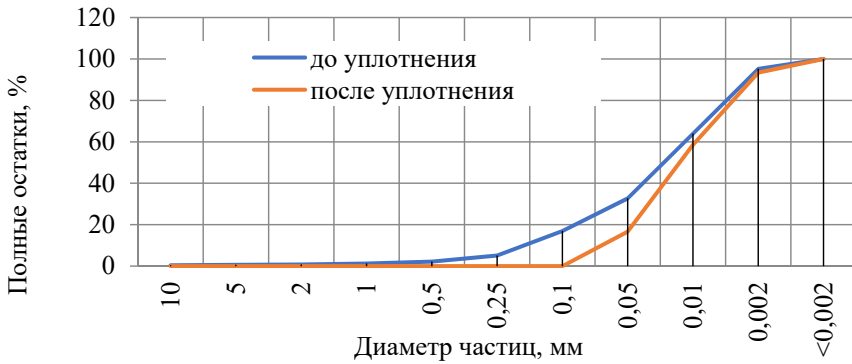


Рис. 3. Гранулометрический состав пробы ТЭЦ-9

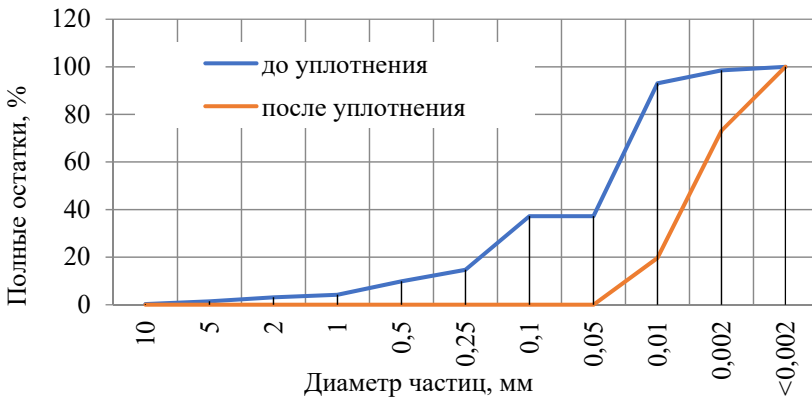


Рис. 4. Гранулометрический состав пробы ТЭЦ-11

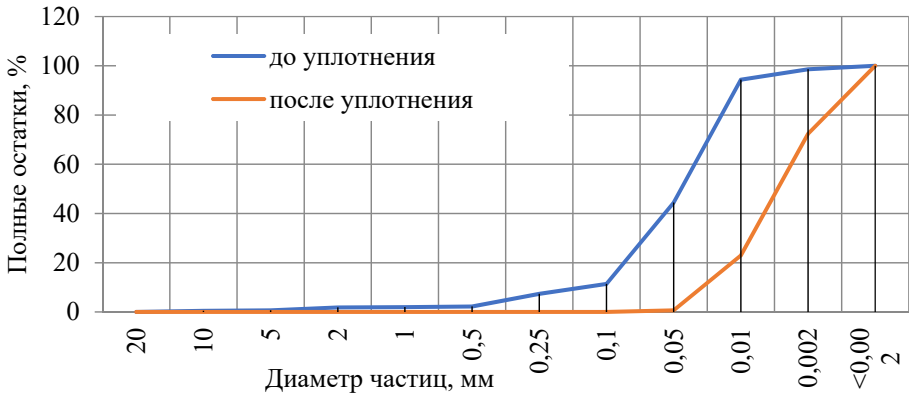


Рис. 5. Гранулометрический состав пробы Ново-Иркутской ТЭЦ

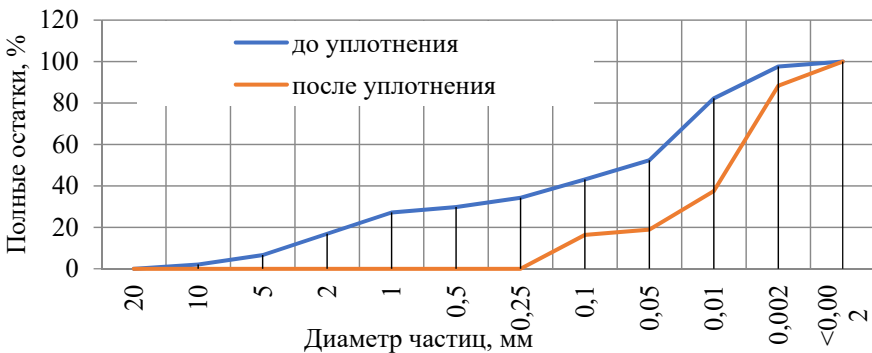


Рис. 6. Гранулометрический состав пробы Усть-Илимской ТЭЦ

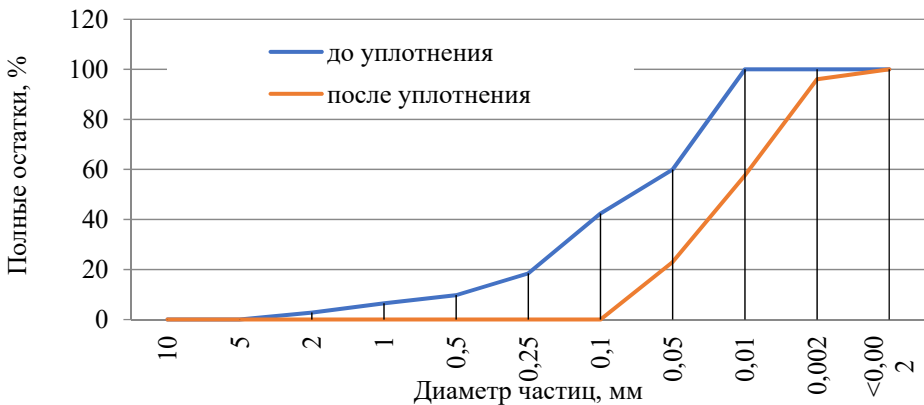


Рис. 7. Гранулометрический состав пробы ТЭЦ 10

Для количественной оценки степени дробления частиц при уплотнении используется индекс измельчения, который определяется как разность между двумя отношениями средневзвешенных величин среднего размера частиц до и после уплотнения:

$$I = \frac{\frac{\sum(a_i \cdot d_i)}{\sum a_i}}{\frac{\sum(a_j \cdot d_j)}{\sum a_j}}, \quad (1)$$

так как $\sum a_i = \sum a_j = 100\%$;

$$I = \frac{\sum a_i \cdot d_i}{\sum a_j \cdot d_j}, \quad (2)$$

где

a_i, a_j – содержание частиц каждой фракции до и после уплотнения соответственно, %

d_i, d_j – диаметр частиц до и после уплотнения соответственно, мм.

Результаты определения индекса измельчения приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты определения индекса измельчения образцов пробзолошлаковых смесей

<i>Наименование ТЭЦ</i>	<i>Индекс измельчения I</i>
<i>Усть-Илимская ТЭЦ</i>	38,27
<i>Ново-Иркутская ТЭЦ</i>	32,59
<i>Ново-Иркутская ТЭЦ (Шелеховский участок)</i>	12,47
<i>ТЭЦ 11</i>	46,74
<i>ТЭЦ 9</i>	8,35
<i>ТЭЦ 10</i>	10,74
<i>ТЭЦ 7</i>	1,31
<i>ТЭЦ 6</i>	7,07

Графики максимальной плотности имеют два и более ярко выраженных максимума и значительную величину оптимальной влажности (рис. 8). Причем значение оптимальной влажности сопоставимо со значением естественной влажности в золоотвалах (см. табл. 2).

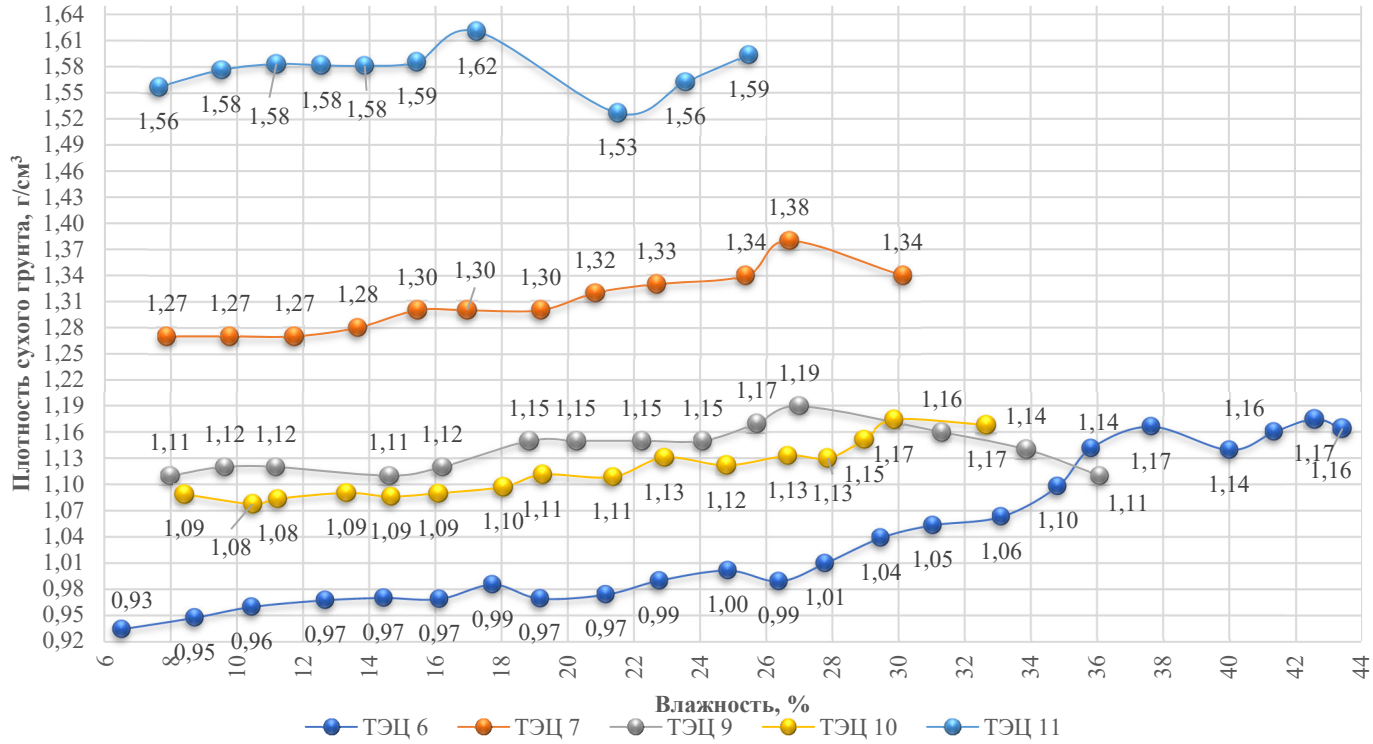


Рис. 8. Максимальная плотность проб ТЭЦ

Сопrotивление сдвигу определено на образцах, уплотненных до максимальной плотности при оптимальной влажности. Золошлаковые смеси имеют широкий диапазон угла внутреннего трения, что влияет на уплотнение слоев из золошлаковой смеси. Сниженные значения угла внутреннего трения и окатанная форма частиц обуславливают, при большой влажности, сниженное количество контактов зацепления, что приводит к выдавливанию золошлаковой смеси из-под вальца катка. В результате увеличивается ширина слоя и уменьшается его толщина.

Образцы золошлаковых смесей имеют низкие значения величины относительной деформации морозного пучения, как правило, не превышающие 0,035. Слабопучинистые и непучинистые золошлаковые смеси можно применять для возведения слоев земляного полотна практически без ограничений. Золошлаковые смеси, имеющее величину относительной деформации морозного пучения более 0,035 можно эффективно применять в сочетании с минеральными вяжущими при устройстве укрепленных конструктивных слоев автомобильных дорог.

ВЫВОДЫ

По результатам проведенных исследований золошлаковых смесей Иркутской области можно сделать следующие выводы:

1. Низкая прочность частиц золошлаковых смесей приводит к их дробимости при уплотнении и, как следствие, к значительному изменению первоначального гранулометрического состава золошлаковых смесей.
2. Графики максимальной плотности имеют два и более выраженных максимума, что свидетельствует об изменении первоначального гранулометрического состава.
3. Естественная влажность варьируется в диапазоне 20-30 %, что позволяет транспортировать золошлаковые смеси к месту производства строительных работ без дополнительных мероприятий по обеспыливанию.
4. Сопrotивление сдвигу на образцах, уплотненных до максимальной плотности при оптимальной влажности, позволяет получить более достоверные значения.
5. Золошлаковые смеси характеризуются низким значением деформации относительного морозного пучения и могут использоваться практически без ограничений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Делицын Л.М. Технологические проблемы Томтора и их решение / Л.М. Делицын, Г.Б. Мелентьев, А.В. Толстов, Л.А. Магазина, А.Е. Самонов, С.В. Сударева / Редкие земли. – 2015. – № 2 (5). – С.164-179.
2. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС / И.Ю. Золотова // Инновации и инвестиции. – 2020. – №7. – Электрон. данные. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/benchmarking-zarubezhnogo-opyta-utilizatsii-produktov-szhiganiya-tverdogo-topliva-ugolnyh-tes> (дата обращения: 21.08.2022).
3. Российская Федерация. Правительство Российской Федерации. Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года: распоряжение Правительства РФ от 09.06.2020 N 1523-р // Правительство Российской Федерации: офиц. сайт. URL: <http://government.ru/docs/all/128340/> (дата обращения: 21.08.2022).
4. Путилин Е.И. Применение зол-уноса и золошлаковых смесей при строительстве автомобильных дорог / Е.И. Путилин, В.С. Цветков // Обзорная информация отечественного и зарубежного опыта применения отходов от сжигания твердого топлива на ТЭС. – М.: СОЮЗДОРНИИ, 2003. – 61 с.
5. Дворкин Л.И. Строительные материалы из отходов промышленности: учеб.-справочн. пособие / Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин. – Ростов н/Д: Феникс, 2007. – 368 с.
6. Зубова О.В. Использование в лесном дорожном строительстве зологрунтовых смесей, обработанных вяжущими материалами: дис. ... канд. техн. наук: 05.21.01 / Зубова Оксана Викторовна; [Место защиты: Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова]. – Санкт-Петербург, 2015. – 179 с.
7. Ватин Н.И. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве / Н.И. Ватин, Д.В. Петросов, А.И. Калачев, П. Лахтинен // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 4 (22). – С. 16-22.

L I T E R A T U R A

1. Delicyn L.M. Tekhnologicheskie problemy Tomtora i ih reshenie / L.M. Delicyn, G.B. Melent'ev, A.V. Tolstov, L.A. Magazina, A.E. Samonov, S.V. Sudareva / Redkie zemli. – 2015. – № 2 (5). – S.164-179.
2. Benchmarking zarubezhnogo opyta utilizatsii produktov szhiganiya tverdogo topliva ugol'nyh TES / I.YU. Zolotova // Innovatsii i investitsii. – 2020. – №7. – Elektron. dannye. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/benchmarking-zarubezhnogo-opyta-utilizatsii-produktov-szhiganiya-tverdogo-topliva-ugolnyh-tes> (data obrashcheniya: 21.08.2022).
3. Rossijskaya Federaciya. Pravitel'stvo Rossijskoj Federacii. Energeticheskaya strategiya Rossijskoj Federacii na period do 2035 goda: rasporyazhenie Pravitel'stva RF ot 09.06.2020 N 1523-r // Pravitel'stvo Rossijskoj Federacii: ofic. sajt. URL: <http://government.ru/docs/all/128340/> (data obrashcheniya: 21.08.2022).
4. Putilin E.I. Primenenie zol-unosa i zoloshlakovyh smesej pri stroitel'stve avtomobil'nyh dorog / E.I. Putilin, V.S. Cvetkov // Obzornaya informaciya otechestvennogo i zarubezhnogo opyta primeneniya othodov ot szhiganiya tverdogo topliva na TES. – M.: SOYUZDORNII, 2003. – 61 s.
5. Dvorkin L.I. Stroitel'nye materialy iz othodov promyshlennosti: ucheb.-spravochn. posobie / L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin. – Rostov n/D: Feniks, 2007. – 368 s.
6. Zubova O.V. Ispol'zovanie v lesnom dorozhnom stroitel'stve zologruntovyh smesej, obrabotannyh vyazhushchimi materialami: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.21.01 / Zubova Oksana Viktorovna; [Mesto zashchity: Sankt-Peterburgskij gosudarstvennyj lesotekhnicheskij universitet imeni S.M. Kirova]. – Sankt-Peterburg, 2015. – 179 s.
7. Vatin N.I. Primenenie zol i zoloshlakovyh othodov v stroitel'stve / N.I. Vatin, D.V. Petrosov, A.I. Kalachev, P. Lahtinen // Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal. – 2011. – № 4 (22). – S. 16-22.

.....
**STUDY OF THE POSSIBILITIES OF USING ASH AND SLAG
MATERIALS FOR THE CONSTRUCTION OF SUBGRADE ROADS
ON THE EXAMPLE OF THE IRKUTSK REGION**

*Ph. D. (Tech.), Assistant Professor N.A. Slobodchikova,
(Irkutsk National Research Technical University),*

*Chief Specialist-Expert K.V. Plyuta
(FSI Uprdor «Pribaikalye»)*

Contact information: kv_plyuta@mail.ru

Currently, the percentage of ash and slag waste disposal is no more than 12 %, while the annual increase is measured in millions of tons. In accordance with the Energy Strategy of the Russian Federation for the period up to 2035, the share of recycled ash and slag waste, in the total volume, should be increased from 8.4 % (baseline – according to 2018 data) to 50 %.

One of the most effective and receiving areas of use of ash and slag materials is the road sector, in particular, the construction of road subgrade layers. However, due to lack of extensive scientific and practical experience in the application of these materials in the Baikal region their use is difficult when constructing roads.

This article deals with the possibility of using ash and slag mixtures from Irkutsk region in road construction. The requirements for qualitative characteristics of ash and slag mixtures are considered. The results of laboratory studies of ash and slag mixtures from Irkutsk region are given.

Key words: *roads, industrial waste, ash and slag mixtures, recycling, subgrade.*

Рецензент: д-р техн. наук А.В. Руденский (ФАУ «РОСДОРНИИ»).

Статья поступила в редакцию: 24.01.2023 г.