

# Исследования теплоизоляционных свойств щебня из пеностекла в основаниях автомобильных дорог в многолетнемерзлых и пучинистых грунтах

БЕССОНОВ И.В., канд. техн. наук, гл. науч. сотр. НИИ строительной физики РААСН, Москва; ЖУКОВ А.Д., вед. науч. сотр. НИИ строительной физики РААСН, доц., канд. техн. наук, НИУ МГСУ, НИУ ВШЭ, Москва; БОБРОВА Е.Ю., канд. экон. наук, НИУ ВШЭ, Москва; ГОВРЯКОВ И.С. и ГОРБУНОВА Э.А., магистранты НИУ МГСУ, инженеры НИИ строительной физики РААСН, Москва

## Аннотация

Целью исследований являлось определение физико-механических и теплотехнических свойств пеностекляного щебня, таких как коэффициент уплотнения, прочность на сжатие, коэффициент теплопроводности в сухом и во влажном состояниях при различных степенях уплотнения, сорбционная влажность, эксплуатационная плотность. Приведены результаты испытаний. Обоснована целесообразность применения пеностекляного щебня в качестве насыпной теплоизоляции

## Ключевые слова

дорожная система, коэффициент теплопроводности, коэффициент уплотнения, пеностекляный щебень, прочность при сжатии, теплоизоляционный материал, эксплуатационная стойкость

## Abstract

The aim of the research was to determine physical, mechanical and thermal properties of the foam-glass crushed stone, such as compaction coefficient, compressive strength, thermal conductivity coefficient in dry and wet state at different degrees of compaction, sorption humidity, operational density. The results of tests given. The expediency of application of foam glass crushed stone as bulk thermal insulation substantiated.

## Keywords

coefficient of thermal conductivity, compaction factor, foam glass crushed stone, operational durability, road system, thermal insulation material

Целью исследований являлась разработка принципиальных решений по системам изоляции дорожного полотна на проблемных грунтах [1, 5]. Для достижения поставленной цели решали ряд частных задач. Были изучены свойства щебня из пеностекла, разработаны принципиальные проектные решения и проведено моделирование формирования температурных полей в массиве дорожного полотна.

В экспериментах использовался пеностекляной щебень насыпной плотностью от 100 до 180 кг/м<sup>3</sup>, производитель ООО «АйСиЭмГлассКалуга» (ICM Glass Kaluga). Максимальную степень уплотнения пеностекляного щебня определяли на установке, оснащенной вибратором и пригрузами общей массой 250 кг (рис. 1). Установлено, что максимальная степень уплотнения пеностекляного щебня насыпной плотностью 140 кг/м<sup>3</sup> и фракцией 30–60 мм составляет 50%.

Прочность при сдавливании в цилиндре определяли на щебне из пеностекла, засыпанном в контейнер и уплотненном с заданным коэффициентом. Контейнер (металлический цилиндр с внутренним диаметром 308 мм и высотой 210 мм) с уплотненным щебнем из пеностекла устанавливали на нижнюю платформу пресса (рис. 2). За прочность при сжатии щебня из пеностекла принимали среднеарифметическое значение по пяти испытаниям [2–4].

Коэффициент теплопроводности пеностекляного щебня при различных степенях уплотнения определяли в климатической камере, состоящей из двух отсеков (холодного и теплого) и проема, в котором размещался исследуемый материал (рис. 3). В холодной зоне устанавливали температуру минус 10 °С, в теплой зоне поддерживали температуру плюс 20 °С. Контейнеры с щебнем из пеностекла устанавливали в проем климатической камеры. Каждый контейнер теплоизолировали по боковым граням так, чтобы термическое сопротивление по каждой из граней изделия было не менее 5 м<sup>2</sup>·°С/Вт.

Датчики температуры устанавливали на наружную грань образца (обращенную в холодную зону) и на внутреннюю грань (обращенную в теплую зону) поверхности каждого образца. Преобразователи (датчики) теплового потока устанавливали на внутреннюю грань.

Сорбционную влажность щебня из пеностекла исследовали по методике ГОСТ 24816-2014 «Материалы строительные. Метод определе-

ния равновесной сорбционной влажности».

Для исследования свойств дорожного полотна и оценки возможности его использования на проблемных грунтах целесообразно изучение закономерностей формирования температурных полей в дорожном основании с помощью современных систем компьютерного анализа. Эти и им подобные методы широко применяются при изучении многослойных изоляционных



Рис. 1. Проведение экспериментальных определений максимальной степени уплотнения щебня из пеностекла (слева – оборудование для уплотнения щебня, справа – уплотненный образец материала)



Рис. 2. Экспериментальное определение прочности пеностекляного щебня на сжатие при различных степенях уплотнения (слева – пресс для определения прочности материала, справа – образец после испытания)



Рис. 3. Экспериментальные определения теплопроводности пеностекляного щебня в сухом состоянии при различных степенях уплотнения (слева – образец с закрепленными датчиками температур и тепловых потоков, справа – климатическая камера для определения теплопроводности)

**Таблица.** Результаты экспериментальных исследований по определению прочности пеностеклянного щебня на сдавливание в цилиндре и теплопроводности при различных степенях уплотнения

Степень уплотнения щебня из пеностекла, %	Среднее значение прочности при сдавливании в цилиндре при 10%-й деформации, МПа	Коэффициент теплопроводности пеностеклянного щебня в засыпке в сухом состоянии, Вт/(м·К)
50	1,58	0,099
40	1,56	0,086
30	1,26	0,072
20	1,10	0,086
10	0,90	0,087

систем, в том числе и оснований, контактирующих с грунтом [2, 6-9].

Коэффициент теплопроводности пеностеклянного щебня в сухом и влажном состояниях определяли в соответствии с действующими нормативами (ГОСТ Р 54853-2011 «Здания и сооружения. Метод определения сопротивления теплопередаче ограждающих конструкций с помощью тепломера», ГОСТ Р 54855-2011 «Материалы и изделия строительные. Определение расчетных значений теплофизических характеристик») со следующими изменениями: испытания проводили в климатической камере, щебень из пеностекла засыпали в контейнер из материалов с известными теплопроводностью и толщиной стенок. Внутренние размеры контейнера в плоскости движения теплового потока должны превышать средний размер гранулы щебня (в неуплотненном состоянии) не менее чем в 5 раз. В указанном эксперименте принято горизонтальное направление движения теплового потока. Расчетное количество щебня высушивали до постоянной массы при температуре (100±5) °С, после чего выдерживали в условиях лаборатории не менее 24 ч (кондиционирование). Щебень послойно утрамбовывали в контейнере до необходимой степени уплотнения.

Эксплуатационную плотность  $\rho_3$  щебня определяли с учетом степени уплотнения (10, 20, 30, 40 и 50 %). Установленное значение насыпной плотности  $\rho_n$ , кг/м<sup>3</sup>, умножали на коэффициенты уплотнения соответственно 1,1; 1,2; 1,3; 1,4 или 1,5. Например:

$$\rho_3 = 1,3 \times \rho_n \tag{1}$$

Массу щебня  $m_{исп}$ , кг, необходимую для испытания, определяли по формуле

$$m_{исп} = \rho_3 \times V, \tag{2}$$

где  $\rho_3$  – эксплуатационная плотность, кг/м<sup>3</sup>;

$V$  – объем емкости для определения прочности при сдавливании в цилиндре, м<sup>3</sup>.

Определенное по формуле (2) количество щебня засыпали слоями в емкость, периодически уплотняя и утрамбовывая. Уплотнение проводили вручную или механическим трамбованием. Щебень уплотняли до заполнения емкости по уровню верхних кромок. Коэффициент теплопроводности измеряли при средней температуре засыпки из щебня 10 °С. По достижении стационарного теплового режима фиксировали значения температур и тепловых потоков и вычисляли эквивалентную теплопроводность щебня в сухом состоянии.

Проведены экспериментальные исследования по определению прочности щебня при сдавливании в цилиндре со степенью уплотнения 10, 20, 30, 40 и 50 %. Прочность щебня определяли на образцах, уплотненных до эксплуатационной плотности. Массу щебня  $m_{исп}$ , кг, необходимую для испытания, определяли по формуле (2). Цилиндр с уплотненным пеностеклянным щебнем устанавливали на нижнюю платформу прессы. Плунжером диаметром 300 мм нагружали поверхность щебня, засыпанного в цилиндр, от 2% до 25%-й относительной деформации, т.е. до сдавливания щебня на 2...25 % от первоначальной высоты. За прочность при сдавливании в цилиндре щебня из пеностекла принимали среднеарифметическое значение по результатам пяти испытаний.

Прочность при сдавливании в цилиндре при  $N$ %-й относительной деформации  $R_{N\%}$  щебня из пеностекла, МПа, определяли по формуле

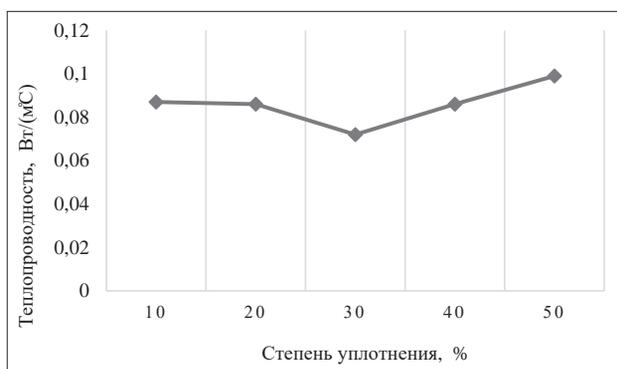


Рис. 4. Зависимость теплопроводности пеностеклянного щебня от степени его уплотнения

$$R_{N\%} = P/F, \quad (3)$$

где  $P$  – нагрузка при сдавливании заполнителя, соответствующая  $N\%$  -й относительной деформации,  $H$ ;

$F$  – площадь поперечного сечения плунжера, мм<sup>2</sup>.

При этом за основную прочностную характеристику пеностеклянного щебня принимали предел прочности при сдавливании в цилиндре при 10%-й линейной деформации, как это принято для теплоизоляционных материалов.

Результаты экспериментальных определений прочности пеностеклянного щебня на сжатие и теплопроводности при различных степенях уплотнения приведены в таблице. Установлено, что прочность при сдавливании в цилиндре при 10%-й относительной деформации повышается линейно в диапазоне степеней уплотнения от 10 до 40 % и при дальнейшем уплотнении практически не изменяется.

Отмечено снижение коэффициента теплопроводности при степени уплотнения 30 %, что объясняется наиболее плотной упаковкой гранул щебня в засыпке при минимальном объеме межзернового пространства (рис. 4). Возрастание коэффициента теплопроводности при степенях уплотнения 10 и 20 % обусловлено увеличением конвективной составляющей теплообмена (движения воздуха) в увеличивающемся объеме межзернового пространства. При степенях уплотнения 40 и 50 % происходит частичное разрушение гранул щебня из пеностекла и заполнение межзернового пространства мелкими твердыми частицами, что приводит к увеличению теплопроводности.

По итогам проведения и обработки результатов экспериментов определены прочностные характеристики насыпной теплоизоляции и значения коэффициента теплопроводности при различных степенях уплотнения.

### Выводы

В результате экспериментальных исследований и с учетом анализа конструктивных решений систем изоляции дорожного полотна установлено, что пеностеклянный щебень полностью соответствует требованиям, предъявляемым к теплоизоляционным материалам, используемым в дорожных системах при укладке дорожного полотна на многолетнемерзлых грунтах.

### Список источников

1. Анализ конструктивных решений в зависимости от типа изоляционных материалов в дорожных покрытиях в многолетнемерзлых грунтах / И.В. Бессонов [и др.] // Транспортное строительство. – 2022. – № 1. – С. 14-17.
2. Стеклобой как сырье для получения теплоизоляционного материала / А.А. Кетов [и др.] // Экология и промышленность России. – 2002. – №8. – С. 17-20.
3. Лотов В.А., Кривенкова Е.В. Кинетика процесса формирования пористой структуры пеностекла // Стекло и керамика. – 2002. – № 3. – С. 14-28.
4. Черняк Ю.Н. О физических основах процесса вспучивания легкоплавких глин и пеностекла // Стекло и керамика. – 1985. – № 10. – С. 25-28.
5. Rantala J., Leivo V. Heat, air, and moisture control in slab-on-ground // Journal of building physics. – 2009. – Vol. 32. – № 4. – P. 335-353.
6. Коротков Е.А., Четверткова Ю.Н. Пеностеклянный щебень – теплоизоляционный материал для дорожного строительства в сложных геокриологических условиях // Дорожники. – 2018. – № 1 (13). – С. 56-71.
7. Funk M. Hysteretic moisture properties of porous materials: Part 1: Thermodynamics // Journal of building physics. – 2014. – Vol. 38. – № 1. – P. 6-49.
8. Петухова Р.В., Генералчик Н.И. Пеностекло // Стекло мира. – 2004. – № 6. – С. 89-92.
9. Иванов К.С., Коротков Е.А. Исследование воздействия слоя гранулированной пеностеклокерамики на температурный режим промерзающего грунта // Фундаменты и механика грунтов. – 2017. – № 5. – С. 2-37.

Для связи с авторами:

Игорь Вячеславович Бессонов,  
bessonoviv@mail.ru