

УДК 693.3

Инновационный конструкционно-теплоизоляционный бетон для изоляции и повышения устойчивости мерзлых грунтов основания

И. В. Степанова, М. Абу-Хасан, В. Я. Соловьева

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Степанова И. В., Абу-Хасан М., Соловьева В. Я. Инновационный конструкционно-теплоизоляционный бетон для изоляции и повышения устойчивости мерзлых грунтов основания // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2022. — Т. 19. — Вып. 2. — С. 378–389. DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-378-389

Аннотация

Цель: Создание высокоэффективного теплоизоляционного конструкционного бетона, рекомендуемого для изоляции и предотвращения оттаивания вечномерзлых грунтов. **Методы:** При проведении исследований использовали ГОСТ 25820—2014 «Бетоны легкие. Технические условия», ГОСТ 25485—2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия». Определение прочности и обработка результатов — по ГОСТ 10180—2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам»; коэффициент теплопроводности определяли по ГОСТ 7076—99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме»; морозостойкость бетона по ГОСТ 10060—2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости»; плотность бетона в состоянии естественной влажности — по ГОСТ 12730.1—2020 «Бетоны. Методы определения плотности». Установлено экспериментально, что для создания высокоэффективного теплоизоляционно-конструкционного бетона целесообразно в качестве заполнителя использовать пеностекло фракции 1,25–2,5 мм, D250, $\lambda \approx 0,06$ Вт/м·°С и для создания прочной и надежной матрицы на цементной основе эффективно использовать тонкодисперсный микрокремнезем в сочетании с комплексной химической добавкой на поликарбоксилатной основе, модифицированной нанодисперсиями диоксида кремния, SiO₂. **Результатами** физико-механических исследований подтверждено, что эффективно использовать совместно частицы диоксида кремния микро- и наноразмера в сочетании с ПАВ, представленными поликарбоксилатными полимерами, при этом формируется пеностеклобетон с наилучшими показателями по прочности на сжатие и значительно повышается прочность на растяжение при изгибе, коэффициент трещиностойкости наномодифицированного пеностеклобетона, $K_{тр} = R_{изг}/R_{сж} = 3,6/13,3 = 0,27$, имеет достаточно высокое значение, что должно обеспечивать повышенную трещиностойкость и надежность защитному покрытию. Для повышения плотности, прочности без ухудшения теплоизолирующих показателей целесообразно дополнительно использовать в качестве наполнителя тонкомолотый доменный шлак, который повышает связность пеностеклобетонной смеси и прочность пеностеклобетона. **Практическая значимость:** Рациональное соотношение компонентов наномодифицированной пеностеклобетонной смеси обеспечивает создание

высокоподвижной пеностеклобетонной смеси, обладающей хорошей удобоукладываемостью, и на ее основе формируется уникальный теплоизоляционно-конструкционный материал со следующими характеристиками: $D900$; $\lambda = 0,14 \text{ Вт/м} \cdot \text{°C}$, $B_{12}, B_{ib}, 2,9 F_1 300$, что характеризует его как теплоизоляционный материал повышенной надежности и долговечности, который целесообразно рекомендовать для суровых регионов Арктики.

Ключевые слова: Пеностеклобетон, пеностекло, теплоизоляционно-конструкционный материал, надежность, долговечность, комплексная химическая добавка, коэффициент теплопроводности, морозостойкость, прочность.

Введение

Дорожное строительство в Арктике, в зоне вечной мерзлоты, ведется в экстремальных природно-климатических условиях, в основном при низких температурах в зимний период, который длится до десяти месяцев. В арктической зоне грунты, представленные песчаниками, глинами, суглинками, являются проблемными грунтами и ведут они себя непредсказуемо.

Грунты подвергаются сезонному промерзанию; увлажнению в непродолжительный летний период — все это создает неблагоприятные, суровые условия строительства дорожных магистралей в северных районах.

В период короткого арктического лета температура имеет невысокие положительные значения, в основном от 0 до 10 °C, и при этом происходит оттаивание грунтов на разную глубину от 0,1 до 2,0 м.

Неравномерное таяние грунтов оказывает негативное влияние на устойчивость верхнего дорожного покрытия, это приводит к его деформациям и возможному появлению трещин, а также в результате частичного оттаивания грунта происходит его «проседание», теряется монолитность, а при понижении температуры до отрицательных значений происходит замерзание влаги в массиве грунта, что приводит к пучению, все это создает определенные сложности и при строительстве дорожной конструкции, и при ее эксплуатации. Повреждение дорожных конструкций создает определенные проблемы в технологиче-

ском и экономическом плане, так как ремонтные работы в условиях Арктической зоны сложно проводить, что значительно снижает пропускную способность магистрали, а также необходимо учитывать, что стоимость ремонтных работ в условиях Арктической зоны очень высокая.

Мерзлый грунт представляет систему, состоящую из воды, газа, льда и твердых частиц, которая представляет единый материал, обладающий достаточно высокой прочностью, примерно 5,0–7,0 МПа. Одной из задач при строительстве дорог в условиях Арктической зоны является создание таких условий, которые позволили бы сохранить основание дорожной конструкции в мерзлом состоянии, соответственно, необходимо достаточно надежно изолировать его от возможного оттаивания в летний период, а также предотвратить возможность попеременного сезонного промерзания — оттаивания.

Для решения данной проблемы требуются специальные технологические предложения.

В качестве мероприятий, предотвращающих сезонное оттаивание мерзлых грунтов, используется способ изолирования грунтов путем создания песчаной подушки или насыпи из торфа выше горизонта вечной мерзлоты. Для сохранения основания в мерзлом состоянии необходимо создавать насыпь из указанных материалов высотой 2,5–3,0 м, что является трудоемким и затратным мероприятием, изолирующий материал в больших объемах требуется перевозить на большие расстояния.

В последнее время для изоляции основания рассматривается использование материалов в виде блоков из пенопласта, пенополистирола, которые не отличаются достаточной прочностью и долговечностью [1–5].

Основными требованиями, предъявляемыми к изолирующим материалам, являются следующие:

- пониженное водопоглощение;
- достаточная прочность;
- пониженное значение коэффициента теплопроводности;
- повышенная морозоустойчивость;
- повышенная коррозионная устойчивость;
- повышенная долговечность (повышенный срок службы).

По нашему мнению, набором указанных физико-механических характеристик может обладать конструкционно-теплоизоляционный бетон на основе портландцемента, который при высоких показателях прочности и особенно прочности на растяжение при изгибе обеспечивает повышенную устойчивость к трещинообразованию и при пониженном коэффициенте теплопроводности должен обеспечивать эффективную изоляцию основания. Созданию такого инновационного материала посвящено данное научно-экспериментальное исследование.

Материалы и методы исследований

Для создания инновационного конструкционно-теплоизоляционного материала в качестве основного компонента использовали уникальный наполнитель, представленный пеностеклом. Основной химический состав пеностекла — оксиды кремния, калия, натрия, алюминия, магния, кальция.

Пеностекло производится различных фракций, в данном научном исследовании использовали: 0–2,5 мм; 1,25–2,5 мм; 2,5–4,0 мм;

- средняя плотность пеностекла изменяется от 100 до 350 кг/м³;

- коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,04–0,06$ Вт/м·°С;

- коэффициент водопоглощения $\leq 2,0$ % практически не впитывает влагу;

- устойчив, без признаков разрушения, в широком диапазоне температур от –200 °С до +500 °С;

- в химическом отношении достаточно инертный материал не вступает во взаимодействие с бензином, кислотами, щелочами и другими агрессивными веществами;

- прочность на сжатие составляет 0,5–1,2 МПа;

- обладает повышенным сроком службы.

2. Для дополнительного повышения устойчивости пеностеклобетона к трещинообразованию осуществляли дисперсное армирование смеси при помощи циркониевой фибры, волокна которой характеризуются повышенной прочностью на разрыв. Длина волокон составляет 4,5–5,0 мм и 10–12 мм; диаметр волокна составляет 10 ± 1 мкм.

3. В качестве вяжущего использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31008—2016 со следующими физико-механическими характеристиками:

- нормальная густота цементного теста, % — 26,2;

- начало схватывания, мин. — 182;

- конец схватывания, мин. — 245;

- прочность на сжатие, в возрасте 28 суток, МПа — 51,6.

4. Песок для строительных работ по ГОСТ 8736—2014 «Песок для строительных работ. Технические условия».

- Модуль крупности песка $M_k = 2,3$.

Содержание пылевидных и глинистых частиц — 1,3 %.

- Содержание глины в комках — нет.

Используемый песок относится к группе песка средний I класса.

5. В качестве эффективного наполнителя использовали тонкодисперсный микрокремнезем (SiO_2) в аморфном состоянии с величиной удельной поверхности, $S_{уд} \approx 13\,000$ м²/кг, марки МК85.

6. В качестве реакционно-активного компонента исследовали комплексную химическую добавку с повышенным пластифицирующим, пенообразующим и активирующим эффектами действия с целью получения материала, обладающего достаточно высокой прочностью, трещиностойкостью, и при этом необходимо, чтобы материал характеризовался улучшенными теплоизолирующими свойствами. Добавка использовалась в сухом виде. Основой добавки являются поликарбоксилатные полимеры на основе этилового эфира метакриловой кислоты с насыпной плотностью $\rho = 0,55 \text{ г/см}^3$ и значением водородного показателя $\text{pH} = 5,5$, дополнительными компонентами добавки являются гексацеаноферрат калия, нанодисперсии диоксида кремния, SiO_2 , с размером частиц $\approx 60 \text{ нм}$ и воздухововлекающий компонент на основе высокомолекулярного сульфоната олефина. Техническое название добавки «Наноактив МСВ-21».

При проведении исследований использовали ГОСТ 25820—2014 «Бетоны легкие. Технические условия» и ГОСТ 25485—2019 «Бетоны ячеистые. Общие технические условия».

Для определения прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе изготавливали образцы-кубы размером $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$ и образцы-балки размером $100 \times 100 \times 400 \text{ мм}$, твердение которых осуществлялось в нормальных условиях ($t = 20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, $W \geq 95 \%$). Испытание образцов и обработка результатов осуществлялись по ГОСТ 10180—2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Коэффициент теплопроводности определяли по ГОСТ 7076—99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Для этого изготавливали образцы-пластины размером $100 \times 100 \times 25\text{--}30 \text{ мм}$.

Морозостойкость бетона определяли по ГОСТ 10060—2012 «Бетоны. Методы определе-

ния морозостойкости». Для этого изготавливали образцы-кубы размером $100 \times 100 \times 100 \text{ мм}$.

Плотность бетона в состоянии естественной влажности определяли по ГОСТ 12730.1—2020 «Бетоны. Методы определения плотности».

Результаты исследований

Цель данного исследования заключалась в создании инновационного конструкционно-теплоизоляционного бетона, обладающего достаточно высокими показателями прочности, $\geq 10 \text{ МПа}$ при пониженном значении коэффициента теплопроводности, $\lambda \leq 0,2 \text{ Вт/м} \cdot ^\circ\text{C}$.

На первом этапе исследования производили выбор рациональной фракции пеностекла, использование которого обеспечивало бы хорошую удобоукладываемость и повышенную связность пенобетонной смеси.

По предварительно проведенным подборам и исследованиям на первом этапе использован следующий расход материалов на 1 м^3 пенобетонной смеси:

- портландцемент — 450 кг;
- песок — 210 кг;
- микрокремнезем — 45 кг;
- пеностекло — 125 кг (500 л);
- добавка сухая «Наноактив МСВ-21» — (2 мас. % от массы цемента) — 9,0 кг;
- добавка эфир целлюлозы — (0,1 мас. % от массы цемента) — 0,45 кг;
- вода ($\text{В/Ц} = 0,46$) — 205 кг.

Результаты проведенных исследований представлены в табл. 1.

Анализ данных, представленных в табл. 1, показывает, что наилучшей удобоукладываемостью при высоких показателях прочности характеризуется состав № 2, при использовании пеностекла фракции 1,25–2,5 мм, имеющего плотность $\rho = 240 \text{ кг/м}^3$.

Все дальнейшие исследования по созданию инновационного пеностеклобетона проводили с

ТАБЛИЦА 1. Определение рационального размера пеностекла по изменению показателей прочности и удобоукладываемости

№ п/п	Портланд-цемент, кг/м ³	Пеностекло, с размером фракции, мм				Прочность на сжатие, МПа в возрасте 7 суток	Примечание
		0–1,0	1,25–2,5	2,5–4,0	4,0–6,0		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	450	+	–	–	–	5,8	Пониженная растекаемость бетонной смеси
2	450	–	+	–	–	5,6	Хорошая поверхность и хорошая удобоукладываемость
3	450	–	–	+	–	3,8	На поверхности много зерен пеностекла
4	450	–	–	–	+	3,3	Расслоение

использованием пеностекла фракции 1,25–2,5 мм. Плотность полученного пеностеклобетона в состоянии естественной влажности составила ~ 1200 кг/м³, и при этом коэффициент теплопроводности имел значение $\lambda = 0,356$ Вт/м·°С.

Полученные характеристики требовалось совершенствовать для повышения надежности и теплоизолирующей способности материала, чтобы создаваемый пеностеклобетон смог выполнять роль защитно-изолирующего материала.

Улучшение указанных параметров возможно в результате оказания эффективного реакционного воздействия на пеностеклобетонную систему.

При совершенствовании свойств пеностеклобетона необходимо учитывать, что пеностеклобетонная смесь должна покрывать поверхность грунта, которая не является идеально ровной, поэтому целесообразно создавать защитно-изолирующую смесь повышенной подвижности и материал на ее основе повышенной трещиностойкости [6–11].

С этой целью рассмотрели использование тонкодисперсного реакционно-активного компонента, представленного микрокремнеземом, где основной фазой является диоксид кремния, SiO₂, обладающий достаточно высокой реакционной активностью в результате его повышенной дисперсности, степень дисперсности которого в 4 раза выше, чем у портландцемента.

Присутствие диоксида кремния, SiO₂, в микрокремнеземе имеет важное значение для последующего его взаимодействия с продуктами гидратации портландцемента, представленными гидросиликатами или гидродиоксидом кальция, которое должно способствовать образованию повышенного количества гидратных фаз, обладающих определенной структурой, чаще всего представленной в виде удлиненных волокон. Повышенное образование комплексных гидратных соединений любой структуры оказывает положительное влияние на твердеющий материал, на уплотнение формирующейся структуры бетона, на повышение его прочности на сжатие и на повышение прочности на растяжение при изгибе, что оказывает положительное влияние и на улучшение показателей долговечности (морозостойкости и коррозионной стойкости).

Использование тонкодисперсного микрокремнезема рационально использовать совместно с химической добавкой, обладающей пластифицирующим эффектом. В качестве такой добавки исследовали комплексную химическую добавку «Наноактив МСВ-21».

Для оценки влияния микрокремнезема в сочетании с комплексной химической добавкой использовали следующий состав:

- портландцемент — 450 кг/м³;
- песок 187,5–142,5 кг/м³;

ТАБЛИЦА 2. Совершенствование свойств пеностеклобетона при дополнительном использовании микрокремнезема в сочетании с комплексной химической добавкой

№ п/п	Портланд-цемент, кг/м ³	Микрокремнезем, мас.% от массы цемента (кг)	Добавка «Наноактив МСВ-21», мас.% от массы цемента	Пеностекло, фр. 1,25–2,5 мм, кг/м ³ пеностеклобетонной смеси	Прочность в возрасте 28 суток, МПа	
					На сжатие	На растяжение при изгибе
1	2	3	4	5	6	7
1	450	—	1,5 (6,75)	125	10,2	1,7
2	450	—	2,0 (9,0)	125	11,1	1,9
3	450	—	2,3 (10,35)	125	11,3	1,8
4	450	5,0 (22,5)	2,0 (9,0)	125	11,8	2,2
5	450	10,0 (45,0)	2,0 (9,0)	125	13,3	3,1
6	450	15,0 (67,5)	2,0 (9,0)	125	13,5	3,0

- микрокремнезем 22,5–67,5 кг/м³;
- пеностекло 125 кг/м³ (500 л);
- добавка «Наноактив МСВ-21» — 1,5–2,3 мас. % от массы цемента — 6,75–10,35 кг/м³;
- вода (В/Ц — 0,36) — 162 л.

Эффективность действия микрокремнезема в сочетании с комплексной химической добавкой оценивалась по изменению показателей прочности на сжатие и растяжение при изгибе. Результаты исследований представлены в табл. 2.

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что при использовании пеностеклобетонной смеси состава № 5 формируется пеностеклобетон с наилучшими показателями по прочности на сжатие и особенно значительно повышается прочность на растяжение при изгибе, как следствие, повышается устойчивость к трещинообразованию пеностеклобетона.

Установлено, что рациональное количество микрокремнезема составляет 10 мас. % от массы цемента при обязательном использовании комплексной химической добавки «Наноактив МСВ-21», чтобы обеспечить достаточную подвижность пеностеклобетонной смеси, соответствующую марке П5.

Принимая во внимание, что для обеспечения надежной защиты и теплоизоляции основания толщина пеностеклобетонного слоя должна

составлять ~ 20 см, и при этом, чтобы исключить армирование, которое требуется при такой толщине, целесообразно при производстве пеностеклобетонной смеси дополнительно осуществлять дисперсное армирование при помощи прочной, экологически чистой морозоустойчивой циркониевой фибры.

Рациональное количество фибры, по результатам проведенных экспериментальных исследований, должно составлять 0,1–1,15 мас. % от сухой составляющей части пеностеклобетонной смеси. Проведенные экспериментальные исследования показали, что введение циркониевой фибры дополнительно повышает прочность на растяжение при изгибе на 16 %, не ухудшая показатель прочности на сжатие, и при этом коэффициент трещиностойкости пеностеклобетона представляет отношение $R_{изг}/R_{сж} = 3,6/13,3 = 0,27$.

Данный показатель имеет достаточно высокое значение, что должно обеспечить особую трещиностойкость и надежность защитному покрытию.

При создании пеностеклобетонной смеси целесообразно обратить внимание, что для равномерного ее распределения по поверхности твердого неровного грунтового основания требуется смесь повышенной подвижности, которая должна обладать повышенной связностью. Для исключения возможного расслоения высокопод-

вижной смеси необходимо дополнительно вводить в ее состав тонкодисперсный наполнитель.

В процессе научного исследования провели сравнительную оценку эффективности действия наполнителя, представленного тонкомолотым известняком или тонкомолотым шлаком в количестве 10–15 мас. % от массы цемента. Установлено, что оба компонента повышают связность пеностеклобетонной смеси, уменьшая показатель раствороотделения и водоотделения.

Дополнительное использование тонкомолотого доменного шлака (в отличие от известняка) повышает не только связность пеностеклобетонной смеси, но и прочность на сжатие на ~ 14,0 %, формируя проектную прочность на сжатие в пределах 15 МПа.

Серия проведенных исследований позволяет рекомендовать в качестве основных компонентов пеностеклобетонной смеси следующие материалы: портландцемент (ПЦ) ЦЕМ I 42,5Н; песок (П) с $M_k = 2,0–2,5$; пеностекло фр. 1,25–2,5 мм; микрокремнезем (МК) с $S_{уд} \geq 13\,000$ м²/кг; тонкомолотый доменный шлак (ТДШ) с $S_{уд} > 300$ м²/кг; циркониевая фибра; комплексная химическая добавка «Наноактив МСВ-21».

Проведенные комплексные физико-механические исследования показали, что пеностеклобетон является инновационным материалом при плотности $D = 900$, имеет коэффициент теплопроводности $\lambda = 0,14$ Вт/м · °С, что соответствует параметру высокоэффективного теплоизоляционного бетона, и при этом пеностеклобетон обладает высоким показателем прочности, соответствующим марке М150 или классу В12 В_{1б}2,9, морозостойкость соответствует марке F₁300. Впервые получен материал с уникальным сочетанием теплопроводности и прочности, который по достигнутым показателям целесообразно рекомендовать к использованию в качестве надежного, долговечного, теплоизолирующего материала вечномерзлого основания Арктических регионов.

Обсуждение результатов

Разработан высокоэффективный теплоизоляционно-конструкционный бетон с уникальным сочетанием высокого показателя прочности, $R_{сж} \geq 15$ МПа при пониженном коэффициенте теплопроводности $\lambda \leq 0,15$ Вт/м · °С.

Добиться такого сочетания показателей оказалось возможным в результате использования в качестве заполнителя пеностекла фракции 1,25–2,5 мм, которое имеет пониженный коэффициент теплопроводности $\lambda \approx 0,06$ Вт/м · °С, и в качестве матрицы использован цементно-песчаный раствор, модифицированный реакционно-активной комплексной химической добавкой на основе поликарбосилатных полимеров в сочетании с нанодисперсиями диоксида кремния. В результате повышенной реакционной активности компонентов системы в присутствии комплексной химической добавки образуется повышенное количество комплексных гидратных соединений, которые в момент образования характеризуются повышенной реакционной активностью и, как следствие, формируют повышенное количество контактов между компонентами пенобетонной системы, объединяя их в единый композитный материал с прочной структурой.

Равномерное распределение легкого заполнителя в объеме сверхпрочной матрицы обеспечило создание высокоэффективного пеностеклобетона, обладающего коэффициентом теплопроводности, характерным для легкого теплоизоляционного бетона, а прочностью и плотностью, соответствующей конструкционному материалу. Полученный теплоизоляционно-конструкционный материал обладает повышенной морозостойкостью, соответствующей марке F₁300, что характеризует его как надежный и долговечный материал.

По всем достигнутым физико-механическим показателям теплоизоляционно-конструкционный пеностеклобетон целесообразно и эффективно использовать для теплоизоляции есте-

ственных мерзлых грунтов в регионах Арктики, создавая надежное, ровное, равномерно распределенное, из-за высокой подвижности и хорошей удобоукладываемости пеностеклобетонное, покрытие, которое является хорошей основой для проведения дальнейших строительных работ при создании транспортной магистрали [12–15].

Заключение

Установлено, что для создания высокоэффективного теплоизоляционно-конструкционного пеностеклобетона необходимо использовать:

– пеностекло с размером фракции 1,25–2,5 мм с плотностью D250 и имеющего коэффициент теплопроводности $\lambda \approx 0,06$ Вт/м·°С;

– высокоэффективную комплексную химическую добавку «Наноактив МСВ-21» для создания высокопрочной и надежной матрицы на цементной основе.

Равномерное распределение гранул пено-стекла в цементной матрице формирует однородную мелкопоровую структуру затвердевшего пеностеклобетона, который отличается уникальным сочетанием следующих физико-механических показателей:

– пониженный коэффициент теплопроводности $\lambda \leq 0,15$ Вт/м·°С;

– повышенную прочность на сжатие, $R_{сж} \geq 15$ МПа;

– повышенную морозостойкость, $F_1 300$.

Пеностеклобетонная смесь характеризуется высокой подвижностью, соответствующей марке П5, и, как следствие, обладает хорошей удобоукладываемостью и укрывистостью неровной поверхности, которую целесообразно использовать для теплоизоляции мерзлого грунта Арктики.

Библиографический список

1. Трофимов Б. Ю. Методы оценки долговечности бетона с высокими эксплуатационными характеристиками / Б. Ю. Трофимов, Л. Ю. Крамар, К. В. Шульдяков // Серия конференций IOP: Материаловедение и инжене-

рия. — 2020. — № 962(2), 022010. — DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022010.

2. Крамар Л. Я. Введение пуццолановой добавки для повышения морозостойкости бетона дорожного покрытия / Л. Я. Крамар, А. И. Кыдяков, К. В. Шульдяков // Серия конференций IOP: Materials Science and Engineering. — 2018. — № 451(1), 012009. — DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012009.

3. Соловьева В. Высокоэффективная ремонтная смесь для восстановления и защиты поврежденных бетонных конструкций / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев, А. Касаткина // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — № 50. — С. 369–375. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_38.

4. Соловьева В. Высокопрочный бетон с улучшенными деформационными характеристиками для дорожных покрытий / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев // Сеть конференций E3S, Транспортная инженерия грунта в холодных регионах, Конспекты лекций по гражданскому строительству. — 2020. — Т. 50, Т. 2. — С. 339–345. — DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-15-0454-9_35.

5. Соловьева В. Повышение уровня свойств композиционных материалов для инженерных геоконструкций с применением добавок нового поколения / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев // Конспект лекций в гражданском строительстве. — 2020. — № 50. — С. 387–393. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_40.

6. Соловьева В. Бетоны с уникальными свойствами для специальных строительных конструкций / В. Соловьева, И. Степанова, Д. Соловьев // Материаловедческий форум 2018. — № 945 MSF. — С. 64–69. — DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.945.64>.

7. Николаев С. В. Методика выбора эффективного погружения и контроля глубины заполнения строительных материалов с открытой текстурой / С. В. Николаев, А. В. Бенин, А. М. Попов // Journal of Physics: Conference Seriesthis link is disabled. — 2021. — № 2131(2), 022055. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022055.

8. Караулов А. В. Исследование задач теории устойчивости грунтов симплекс-методом / А. В. Караулов, Д. В. Немцев, А. В. Коньков, В. В. Шехов // Journal of

Physics: Серия конференций. — 2021. — № 2131(3), 032019. — DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/002019.

9. Белаш Т. А. Свайные фундаменты для районов совместного проявления вечной мерзлоты и повышенной сейсмичности / Т. А. Белаш, М. Н. Митрофанова // Серия конференций ИОР: Материаловедение и инженерия. — 2018. — № 463(2), 022076. — DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022076.

10. Сватовская Л. Особенности процессов растворения в технологиях геостроительства / Л. Сватовская, К. Михайлова, А. Кабанов, Н. Хаменок // Конспект лекций по гражданскому строительству. — 2020. — № 50. — С. 421–429. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_44.

11. Сватовская Л. Информационная оценка сохранения природных геосистем в геостроительстве путем повышения качества бетона / Л. Сватовская, О. Уров, К. Михайлова, Т. Супелюк // Конспект лекций по строительству. — 2020. — № 50. — С. 405–411. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_42.

12. Сычева А. Способ производства неавтоклавног пенобетона на основе полимеров для строительства различных дорожных сооружений в холодных регионах / А. Сычева, Ю. Каменев, Л. Сватовская, А. Авсеенко // Конспект лекций по строительству. — 2020. — № 50. — С. 469–477. — DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_49.

13. Глазунов В. В. Геофизический мониторинг изменений состояния основания насыпи автомобильной дороги путем стабилизации грунта с использованием энергии

взрыва / В. В. Глазунов, Е. В. Городнова, Н. Н. Ефимова и др. // Инженерно-горная геофизика. — 2018. — 14 с. — DOI: 10.1088/1755-1315/459/3/032028.

14. Колесникова Г. Н. Моделирование условий образования низкотемпературных трещин в асфальтобетонном слое автомобильной дороги / Г. Н. Колесникова, Т. А. Гаврилов // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. — 2018. — № 56. С. 57–66. — DOI: 10.17223/19988621/56/5.

15. Нестеров А. А. Температурные деформации грунта, влияющие на транспортную непрерывность Арктики / А. А. Нестеров, А. В. Марченко, Н. К. Васильев // Транспортная инженерия грунтов в холодных регионах. — Т. 1. — С. 25–34. — DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_4.

Дата поступления: 10.05.2022

Решение о публикации: 29.05.2022

Контактная информация:

СТЕПАНОВА Ирина Витальевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Инженерная химия и естествознание»; ivstepanova88@mail.ru

АБУ-ХАСАН Махмуд Самиевич — д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения»; abukhasan@pgups.ru

СОЛОВЬЕВА Валентина Яковлевна — д-р техн. наук, проф., заведующая кафедрой «Инженерная химия и естествознание»; 9046185117@mail.ru

Innovative Structural-Heat-Insulating Concrete for Insulation and Stability Rise of Frozen Foundation Soils

I. V. Stepanova, M. Abu-Khasan, V. Ya. Soloviova

Emperor Alexander I Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Stepanova I. V., Abu-Khasan M., Soloviova V. Ya. Innovative Structural-Heat-Insulating Concrete for Insulation and Stability Rise of Frozen Foundation Soils // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2022, vol. 19, iss. 2, pp. 377–389. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2022-2-377-389

Summary

Purpose: To create highly effective heat-insulating structural concrete, recommended for insulating and preventing permafrost soil thawing. **Methods:** When conducting research, we used GOST (Russia State Standards) 25820-2014 “Lightweight concrete. Specifications”, GOST 25485—2019 “Cellular concrete. General technical conditions”. Determination of strength and processing of results according to GOST 10180-2012 “Concrete. Methods for determining strength upon control samples”; thermal conductivity coefficient was determined according to GOST 7076-99 “Construction materials and products. Method for determining thermal conductivity and thermal resistance at stationary thermal regime”; frost resistance of concrete according to GOST 10060-2012 “Concrete. Methods for determining frost resistance”; density of concrete in natural moisture state- according to GOST 12730.1-2020 “Concrete. Density determination methods”. It has been established experimentally that in order to create highly efficient heat-insulating-structural concrete, it is advisable to use as a filler a foam glass of fraction 1.25–2.5 mm, D250, $\lambda \approx 0.06 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, and for to create strong and reliable matrix on cement basis it’s effective to use finely dispersed microsilica in combination with complex chemical additive on polycarboxylate basis, modified with nano-dispersions of silicon dioxide, SiO_2 . **Results** of physical-mechanical studies have confirmed that it is effective to use particles of silicon dioxide together of micro- and nano-size in combination with surfactants represented by polycarboxylate polymers, meanwhile, foamed glass concrete with the best compressive strength and tensile strength at bending a rises significantly, coefficient of resistance to cracks of nanomodified foam glass concrete, $K_{tr.} = R_{bend.}/R_{compress.} = 3.6/13.3 = 0.27$, has rather high value which should provide for increased resistance to cracks and for reliability for a protective coating. In order to increase density/strength without deteriorating heat-insulating indicators it is advisable to use additionally a finely-ground blast-furnace slag as a filler which a rises cohesion of foam glass concrete mixture and strength of foam glass concrete. **Practical significance:** Rational ratio of components of nanomodified foam glass concrete mixture ensures the creation of highly mobile foam glass concrete mixture with good workability, and on the mixture basis, a unique heat-insulating-structural material is formed with the following characteristics: D900; $\lambda = 0.14 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, B12, $B_{ib}2.9 F_1300$ that defines it as a thermal insulation material of increased reliability and durability, which is advisable for recommendation for the Arctic harsh regions.

Keywords: Foam glass concrete, foam glass, heat-insulating-structural material, reliability, durability, complex chemical additive, thermal conductivity coefficient, frost resistance, strength.

References

1. Trofimov B. Yu., Kramar L. Yu., Shul'dyakov K. V. *Metody otsenki dolgovechnosti betona s vysokimi ekspluatatsionnymi kharakteristikami* [Methods for Evaluating the Durability of High Performance Concrete]. *Seriya konferentsiy IOP: Materialovedenie i inzheneriya* [Conference Series: Materials Science and Engineering]. 2020, I. 962 (2), 022010. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022010. (In Russian)
2. Kramar L. Ya., Kydyakov A. I., Shul'dyakov K. V. *Vvedenie puttsolanovoy dobavki dlya povysheniya morozostoykosti betona dorozhnogo pokrytiya* [Introduction of Pozzolanic Admixture to Improve Frost Resistance of Pavement Concrete IOP Conference]. *Seriya konferentsiy IOP: Materials Science and Engineering* [Series: Materials Science and Engineering]. 2018, I. 451(1), 012009. DOI: 10.1088/1757-899X/451/1/012009. (In Russian)
3. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D., Kasatkina A. *Vysokoeffektivnaya remontnaya smes' dlya vosstanovleniya i zashchity povrezhdennykh betonnykh konstruktsiy* *Konspekt lektsiy po grazhdanskomu stroitel'stvu* *ssylka otklyuchena* [Highly effective repair mortar for the restoration and protection of damaged concrete structures Abstract of lectures on civil engineering link is disabled]. 2020, 50, pp. 369–375. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_38. (In Russian)
4. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D. *Vysokoprochnyy beton s uluchshennymi deformatsionnymi kharakteristikami dlya dorozhnykh pokrytiy. Set' konferentsiy E3S, Transportnaya inzheneriya grunta v kholodnykh regionakh, Konspekty lektsiy po grazhdanskomu stroitel'stvu* [High-strength concrete with improved deformation characteristics for road surfaces. E3S Conference Network, Soil Transport Engineering in Cold Regions, Civil Engineering Lecture Notes]. 2020, Vol. 50, I. 2, pp. 339-345. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_35. (In Russian)
5. Solov'eva V., Stepanova I., Solov'ev D., Ershikov N. *Povyshenie urovnya svoystv kompozitsionnykh materialov dlya inzhenernykh geokonstruktsiy s primeneniem dobavok novogo pokoleniya* *Konspekt lektsiy v grazhdanskom stroitel'stveeta* *ssylka invalid* [Increasing the level of properties of composite materials for engineering geostructures using new generation additives Lecture notes in civil engineering this link disabled]. 2020, I. 50, pp. 387–393. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_40. (In Russian)
6. Solov'eva V., Solov'ev D., Stepanova I. *Betony s unikal'nymi svoystvami dlya spetsial'nykh stroitel'nykh konstruktsiy* [Concretes with unique properties for special building structures]. *Materialovedcheskiy forum, ssylka otklyuchena* [Materials Science Forum, link disabled]. 2018, 945 MSF Publ., pp. 64–69. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.64. (In Russian)
7. Nikolaev S. V., Benin A. V., Popov A. M. *Metodika vybora effektivnogo pogruzheniya i kontrolya glubiny zapolneniya stroitel'nykh materialov s otkrytoy teksturoy* [A technique for selecting effective immersion and controlling the infill depth of open texture building materials Journal of Physics]. *Journal of Physics: Conference Series* this link is disabled. 2021, I. 2131(2), 022055. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/2/022055. (In Russian)
8. Karaulov A. V., Nemtsev D. V., Kon'kov A. V., Shekhov V. V. *Issledovanie zadach teorii ustoychivosti gruntov simpleks-metodom* [Investigation of Problems in the Theory of Soil Stability Using the Simplex Method]. *Journal of Physics: Seriya konferentsiy* *ssylka otklyuchena* [Journal of Physics conference series is disabled]. 2021, I. 2131(3), 032019. DOI: 10.1088/1742-6596/2131/3/002019. (In Russian)
9. Belash T. A., Mitrofanova M. N. *Svaynye fundamenty dlya rayonov sovmeznogo proyavleniya vechnoy merzloty i povyshennoy seysmichnosti* [Pile Foundations for Areas of Joint Permafrost and High Seismicity]. *Seriya konferentsiy IOP: Materialovedenie i inzheneriya* [IOP Conference Series: Materials Science and Engineering]. Vol. 463 (2), I. 022076. DOI: 10.1088/1757-899X/463/2/022076. (In Russian)
10. Svatovskaya L., Mikhaylova K., Kabanov A., Khame-nok N. *Osobennosti protsessov rastvoreniya v tekhnologiyakh geostroitel'stva* *Konspekt lektsiy po grazhdanskomu stroitel'stvu* *ssylka otklyuchena* [Features of dissolution processes in geoconstruction technologies Abstract of lectures on civil engineering link is disabled]. 2020, I. 50, pp. 421–429. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_44. (In Russian)
11. Svatovskaya L., Urov O., Mikhaylova K., Supelyuk T. *Informatsionnaya otsenka sokhraneniya prirodnykh geosistem*

v geostroitel'stve putem povysheniya kachestva betona Konspekt lektsiy po stroitel'stvu ssylka otklyuchena [Informational assessment of the conservation of natural geosystems in geoconstruction by improving the quality of concrete Abstract of lectures on construction link disabled]. 2020, I. 50, pp. 405–411. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_42. (In Russian)

12. Sycheva A., Kamenev Yu., Svatovskaya L., Avseenko A. *Sposob proizvodstva neavtoklavного пенобетона на основе полимеров для строitel'stva razlichnykh dorozhnykh sooruzheniy v kholodnykh regionakh Konspekt lektsiy po stroitel'stvu. ssylka otklyuchena* [Method for the production of non-autoclaved foam concrete based on polymers for the construction of various road structures in cold regions Lecture notes on construction. link disabled]. 2020, I. 50, pp. 469–477. DOI: 10.1007/978-981-15-0454-9_49. (In Russian)

13. Glazunov V. V., Gorodnova E. V., Efimova N. N., Kulikov A. I., Kulikova N. V. *Geofizicheskiy monitoring izmeneniy sostoyaniya osnovaniya nasypi avtomobil'noy dorogi putem stabilizatsii grunta s ispol'zovaniem energii vzryva* [Geophysical monitoring of changes in the state of the base of the embankment of a highway by stabilizing the soil using explosion energy Conference and exhibition]. *Inzhenerno-gornaya geofizika* [Engineering mining geography]. 2018. 14 p. DOI: 10.1088/1755-1315/459/3/032028. (In Russian)

14. Kolesnikova G. N., Gavrilov T. A. *Modelirovanie usloviy obrazovaniya nizkotemperaturnykh treshchin v asfal'tobetonnom sloe avtomobil'noy dorogi* [Modeling the

conditions for the formation of low-temperature cracks in the asphalt concrete layer of a highway]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta, Matematika i mekhanika* [Bulletin of the Tomsk State University, Mathematics and Mechanics]. 2018 (56), pp. 57–66. DOI: 10.17223/19988621/56/5. (In Russian)

15. Nesterov A. A., Marchenko A. V., Vasil'ev N. K., Kondrashov Yu. G., Alkhimenko A. I. *Temperaturnye deformatsii grunta, vliyayushchie na transportnyuyu nepreryvnost' Arktiki* [Temperature deformations of the soil, affecting the transport continuity of the Arctic]. *Transportnaya inzheneriya gruntov v kholodnykh regionakh* [Soil transport engineering in cold regions]. Vol. 1, pp. 25–34. DOI: 10.1007/978-981-15-0450-1_4. (In Russian)

Received: May 10, 2022

Accepted: May 29, 2022

Author's information:

Irina V. STEPANOVA — PhD in Engineering, Associate Professor of Engineering Chemistry and Natural Sciences Department; ivstepanova88@mail.ru

Mahmud S. ABU-KHASAN — D. Sci. in Engineering, Professor of Building Constructions, Buildings and Facilities Department; abukhasan@pgups.ru

Valentina Ya. SOLOVIOVA — D. Sci. in Engineering, Professor, Head of Engineering Chemistry and Natural Sciences Department; 9046185117@mail.ru