DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-3-5-22

*Плеханова С.В., кандидат технических наук, доцент,
Российский государственный университет им. А.Н. Косыгина, Россия,
Виноградова Н.А.*, кандидат технических наук, старший преподаватель,
Национальный исследовательский Московский государственный
строительный университет (НИУ МГСУ), Россия*
*Ответственный автор E-mail: vinogradova@mgsu.ru

ПОЛУЧЕНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО СЛОЯ ИЗ МОНОЛИТНОГО НЕАВТОКЛАВНОГО КОНСТРУКЦИОННО-ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО ФИБРОПЕНОБЕТОНА

Аннотация: теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность получения конструкционно-теплоизоляционного пенобетона неавтоклавного твердения с улучшенными строительно-техническими характеристиками для устройства теплоизоляционного слоя в конструкции дорожной одежды за счет трехмерного дисперсного армирования полипропиленовой фиброй. На основе результатов исследований влияния технологических факторов на свойства пенобетона установлено оптимальное содержание (до 0,25% от массы цемента) и длину (12 мм) армирующих полипропиленовых волокон, что позволяет получить высокие показатели прочности дисперсно-армированного цементного камня на изгиб (увеличение на 12-20%) и на сжатие (увеличение на 6-12%) по сравнению с неармированным цементным камнем пенобетона неавтоклавного твердения. Проведен анализ процесса структурообразования дисперсноармированного пенобетона с позиций системного подхода на основе многофакторных полиномиальных моделей влияния соотношения наполнителя и вяжущего, а также количества дисперсных армирующих волокон, который определяется оптимальными условиями распределения твердой и газовой фаз, а также армирования смежных межпоровых перегородок пенобетона, связывая их в один асоциат, что обеспечивает совместную работу материала при разного рода внешних воздействиях. Разработан метод повышения долговечности дорожной одежды и устранения влияния эффекта морозного пучения на качество дорожного покрытия за счет введения в конструкцию дорожной одежды необходимой величины эффективного теплоизоляционного слоя. Проведен анализ закономерности процесса теплопередачи в массиве грунта земляного полотна и многослойной дорожной одежде. На основе проведенного анализа установлены величины необходимого сопротивления теплопередаче дорожной одежды для природно-климатических районов страны и предложена методика расчета величины теплоизоляционного (морозозащитного) слоя дорожной одежды. Разработана методика расчета величины теплоизоляционного слоя с использованием монолитного фибропенобетона и номограммы для определения необходимой величины теплоизоляционного слоя из монолитного неавтоклавного конструкционно-теплоизоляционного фибропенобетона классов D600-D1000.

Ключевые слова: дорога, одежда, бетон, развитие, структура

Введение

Согласно требованиям строительных норм слои дорожной одежды должны не только воспринимать нагрузки, но и влиять на изменение глубины промерзания земляного полотна (то есть предполагается необходимость устройства соответствующего теплоизоляционного слоя). Это приводит к увеличению толщины дорожной одежды, и обычно, к удорожанию стоимости строительства автодорог. Выходом из этой ситуации является использование новых теплоизоляционных материалов с низким коэффициентом теплопроводности и достаточной несущей способностью. При этом, в процессе строительства дорог объем слоев дорожной одежды должен быть такой, как объем снятого грунта земляного корыта. Поэтому использование традиционных материалов, таких песок и щебень, для устройства теплоизоляционного слоя дорожной одежды является не только экономически необоснованным, но и нецелесообразным в конструктивном аспекте [11].

Материалы в конструкции дорожной одежды располагают по уменьшению прочности в соответствии с затуханием по глубине напряжения от временной нагрузки. Следует учитывать жесткость и коэффициент температурного расширения смежных слоев дорожной одежды, так как при большом их различии в походной одежде возникают трещины. Целесообразнее всего, чтобы отношение модулей упругости смежных слоев из слабосвязных материалов не превышало 5-6 мм в одном из слоев не должно возникать пластических смещений при действии расчетных нагрузок. Поскольку сдвигающие напряжения в дорожной одежде

уменьшаются с глубиной, по мере удаления от поверхности можно укладывать материалы, обладающие все меньшей прочностью [15].

Если общая толщина дорожной одежды, полученная из расчета на прочность, меньше толщины, установленной по морозостойкости, то следует предусмотреть дополнительные морозозащитные или теплоизоляционные слои. В этом случае конструкцию основы дорожной одежды нужно назначают одновременно с проектированием морозозащитных или теплоизоляционных и дренажных слоев.

Автомобильные дороги принципиально отличаются от большинства строительных сооружений другого назначения [4]. В конструктивном отношении они характеризуются значительной протяженностью, приближением к фактическому рельефу, малой материалоемкостью верхнего слоя покрытия с различными видами поверхности (асфальтобетон, цемент, бетон) которые контактируют на значительной площади в равной степени с двумя разнородными средами – природной средой окружающей среды и грунтом основания дороги, или искусственным сооружением [1].

В настоящее время на автомобильных дорогах России, как и во всем мире, преобладают дорожные одежды нежесткого типа с несколькими асфальтобетонными поверхностными слоями [14]. Так, 81% государственных автодорог имеют асфальтобетонное покрытие, 8,7% – цементобетонное и 10,2% – щебенку. Асфальтобетонными – 51,1% территориальных дорог, 23,8% районных и 19,8% сельских. Наряду с высокотехнологическими и эксплуатационными показателями упомянутые выше покрытия нежесткого типа характеризуется существенными недостатками – высокой чувствительностью к температурно-увлажнительным колебаниям, непрерывным изменениям прочности и деформативных характеристик с течением времени в связи с естественным старением вяжущего, что существенно осложняет позитивный прогноз относительно их долговечности [10]. Такие конструкции дорожной одежды автодорог нежесткого типа обычно под действием транспортной нагрузки ускоренно разрушаются, что требует неплановых ремонтов уже в раннем периоде эксплуатации [7]. Сравнение межремонтных сроков службы указывает на тенденцию их сокращения на протяжении последних 20 лет. Разрушения дорожных одежд автомобильных дорог проявляются в разной степени в зависимости от режима их эксплуатации и характера нагрузки, определяются физико-химическими, механическими и погодными-климатическими факторами влияния, которые в результате совместного действия влияют на изменение качественных характеристик дорожного покрытия нежесткого типа в процессе эксплуатации [3].

Одной из причин ухудшения состояния автомобильных дорог в значительной степени является несоответствие эксплуатационных характеристик дорожно-строительных материалов повышенной транспортной нагрузкой и определенным несовершенством методов расчета при проектировании дорожных одежд. В зависимости от срока службы и уровня надежности дорожную одежду нежесткого типа разделяют на три типа: капитальный, облегченный и переходный [8]. При выборе конструктивного типа дорожной одежды исходят из интенсивности движения, состава и условий интенсивности транспортного потока, требований безопасности, комфорта движения, природных условий и актуальных технико-экономических расчетов [13]. При проектировании необходимо учитывать специфику каждого климатического региона, которая зависит от погодных условий, местонахождения и роли данного региона для общей экономики страны в целом.

Транспортное строительство в целом и дорожное строительство, в частности, является отраслью материало- и энергоемкой, что накладывает свой отпечаток на стоимость и сроки выполнения ремонтно-строительных работ [9]. В большинстве случаев при строительстве земляного полотна и дорожных одежд применяют традиционные водостойкие и морозоустойчивые (стабильные) щебеночные, песчаные или песчано-гравийные материалы, сохраняют достаточную прочность и устойчивость независимо от интенсивности влияния водно-теплого режима [6]. Такие конструктивы дорожных одежд имеют существенную стоимость, и их применение возможно только после проведения соответствующих технико-экономических расчетов [2].

Важной характеристикой автомобильных дорог является многослойность дорожной одежды или непосредственно дорожного несущего слоя. При этом пористый характер, как основного материала покрытия – бетона, как на органическом, так и на неорганическом вяжущем, а также и основы с подстилающим грунтом, в том числе [12]. Вместе с тем многослойность конструкций дорожной одежды может вызвать определенную концентрацию температурного воздействия на границе раздела слоев одежды, то есть именно там, где должна существовать эффективная связь между элементами покрытия.

Для повышения долговечности дорожных слоев на практике довольно широко применяют как армирующие прослойки в виде синтетических материалов, так и другие варианты прослоек. Но эффективность их применения не подкреплена обоснованием и теоретической базой, которая бы позволяла подробно рас-

считывать асфальтобетонные слои дорожной одежды с учетом всех особенностей работы армирующих синтетических прослоек [5].

Методы и материалы

На основе анализа стандартных методик и расчетных способов определения толщины теплоизоляционного слоя дорожной одежды следует констатировать факт, что это громоздкий алгоритм, который численно сформулировать однозначно трудно. На сегодняшний день существует несколько основных методик расчета толщины теплоизоляционных прослоек дорожных одежд:

- методика DOTROPS базируется на определении термического сопротивления конструктива дорожной одежды (применяется при расчете дорожной конструкции в странах СНГ);
- методика UTMCAAS основывается на использовании в качестве характеристики грунта коэффициента влагопроводности, который определяется экспериментально-опытным путем (допускается применять при расчете конструкций дорожной одежды в странах СНГ);
- методика CCOASROTC, в основе которой заложены климатические характеристики конкретного региона страны (критерии зимнего влагонакопления под дорожной одеждой и зимнего морозного пучения) рекомендована к использованию в России. Данная методика в своем первоначальном виде требует значительного количества дополнительных расчетов, поэтому для облегчения механизма расчета нормами рекомендовано использовать номограмму;
- методика СОРВТR основана на расчете дорожной одежды по термическому сопротивлению с учетом расчетной температуры воздуха и глубины нулевых амплитуд температур (данная методика не нашла широкого применения, поскольку требует значительного количества специальных параметров, которые не всегда приведены в достаточном количестве в нормативной литературе);
- методика TIATDOS, которая основана на учете глубины промерзания почвы и эмпирически определенных коэффициентах. Суть этой методики заключается в выравнивании границ промерзания земляного полотна под проезжей частью дорожной одежды и по тротуару (обочине).

Приведенный в действующих строительных нормах расчет конструкции дорожной одежды на морозоустойчивость имеет целью обеспечение эффекта необходимой выносливости дорожного покрытия против нарушения устойчивости при неравномерном набухании грунтов земляного полотна, то есть недопущение появления деформаций от морозного пучения, которые могут превышать предельно допустимые расчетные параметры. Но данный алгоритм расчета не учитывает фактических теплотехнических характеристик используемых строительных материалов, применяемых в конструкции дорожной одежды. Зато, при этом методикой рекомендуется применять в расчете эквивалент теплотехнических свойств материалов дорожной одежды. Такой метод расчета является морально устаревшим и малоэффективным в том, что не отражает реальных теплофизических характеристик новейших строительно-дорожных материалов, которые могут быть применены для устройства теплоизоляционного слоя дорожной одежды в современных проектных решениях автомобильных дорог. Поэтому более целесообразно использовать при расчете дорожной одежды на морозостойкость методику СОРВТR.

Данная методика требует данные приведенного расчетного или фактического термического сопротивления теплопередаче грунтов для каждой конкретной местности.

Для внедрения данной методики расчета конструкции дорожной одежды в проектную практику проектирования автомобильных дорог в России необходимо, в первую очередь, определить необходимые показатели термического сопротивления для каждого из климатических районов по регионам России. Для определения данного расчетного параметра необходимо взять за основу базовые законы теплообмена в дифференциальном и аналитическом (с целью получения конкретных значений) виде.

Результаты и обсуждения

Эффект промерзания конструкции дорожной одежды и земляного полотна под ним характеризуется закономерностями (уравнение теплопроводности Фурье – уравнение, определяющее закон изменения температуры со временем при теплопередаче через теплопроводность)

$$c \frac{dT(r)}{dt} = -\nabla q(r) + S(r) \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость, q – тепловой поток, S – источник тепла.

В случае, когда тепловой поток пропорционален градиенту температуры (закон Фурье) имеет следующий вид:

$$q = -k\nabla T \quad (2)$$

где q – поток тепла, T – температура, k – некоторый коэффициент пропорциональности (коэффициент теплопередачи).

Таким образом, закон теплопроводности набирает формы:

$$c \frac{dT}{dt} = k\nabla^2 T + S \quad (3)$$

Отсюда теплопроводность является функцией от времени t , температуры T и коэффициента пропорциональности k :

$$q = f(t, T, K) \quad (4)$$

Коэффициент пропорциональности k или коэффициент теплопередачи равен

$$k = \frac{\lambda F}{\delta} \quad (5)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, F – площадь, через которую проходит тепловой поток, δ – толщина материала, через который проходит тепловой поток.

Тогда дифференциальное уравнение теплопроводности будет иметь такой аналитический вид:

$$Q = \frac{\lambda F}{\delta} \Delta t = \frac{\lambda F}{\delta} (t_m - t_x) \quad (6)$$

где Δt – разница температур, t_t – температура теплой зоны (поверхности), t_x – температура холодной зоны (поверхности).

В случае дорожной одежды за разницу температур необходимо брать разницу между температурой самой холодной пятидневки для данного региона и температурой под конструкцией дорожной одежды.

Если термическое сопротивление R определять как величину обратную к коэффициенту теплопередачи k , т.е. $R = 1/k$, а площадь передачи тепла принять равной 1 м^2 , то уравнение для теплового потока можно записать следующим образом:

$$q = k(t_m - t_x) = \frac{t_m - t_x}{R} \quad (7)$$

В свою очередь, термическое сопротивление для однослойной конструкции определяется по формуле:

$$R = \frac{\delta}{\lambda} \quad (8)$$

Поскольку конструкция дорожной одежды – это многослойная конструкция, то термическое сопротивление следует определять по формуле:

$$R = \frac{1}{\alpha} + \sum R_i = \frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \dots + \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (9)$$

Таким образом, общее выражение для теплового потока, проходящего через конструкцию площадью F за единицу времени t можно представить в виде:

$$q = \frac{t_m - t_x}{\frac{1}{\alpha} + \frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} + \frac{\delta_4}{\lambda_4} + \dots + \frac{\delta_i}{\lambda_i}} \quad (10)$$

Если рассматривать конструкцию дорожной одежды в условиях эксплуатации, то его термическое сопротивление следует рассматривать как функцию от толщины материала δ , влажности W , температуры материала t и плотности материала ρ , то есть:

$$R = f(\delta, \lambda) = f(\delta, W, t, \rho) \quad (11)$$

Поскольку уравнение теплопроводности выведено на основе общих законов физики, то оно описывает теплопроводность в общем виде. Поэтому для получения математического результата необходимо из

общего количества процессов выделить необходимый (характерный для конструкции дорожной одежды). Для этого применим условия однозначности (предельные условия).

Уравнение теплового потока в общем виде имеет вид:

$$q = k(t_m - t_x) = \frac{t_m - t_x}{R} \quad (12)$$

Рассмотрим две схемы дорожной одежды (рис. 1.). Первая схема дорожной одежды характеризуется определенным количеством слоев (три) и имеет термическое сопротивление теплопередаче R_1 . Вторая схема дорожной одежды состоит из других материалов и имеет другое количество слоев (четыре) и для нее характерно сопротивление теплопередаче R_2 . При этом для обеих конструкций дорожной одежды температура наружного воздуха составляет t_x , а температура под дорожной конструкцией составляет t_r .

Рис. 1. Схема двух конструкций дорожной одежды с одинаковыми значениями температур на поверхности каждого из конструктивов и разными значениями сопротивления теплопередаче конструктива (а, б)

Fig. 1. Diagram of two pavement structures with the same temperature values on the surface of each of the structures and different values of the resistance to heat transfer of the structure (a, b)

Следовательно, тепловой поток, проходящий через эти конструкции, составляет:

$$q_1 = \frac{t_m - t_x}{R_1} \quad (13)$$

$$q_2 = \frac{t_m - t_x}{R_2} \quad (14)$$

Проведя простые математические преобразования получим следующий вид:

$$q_1 R_1 = t_m - t_x \quad (15)$$

$$q_2 R_2 = t_m - t_x \quad (16)$$

Таким образом:

$$t_m - t_x = q_1 R_1 = q_2 R_2 \quad (17)$$

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad (18)$$

Следовательно, тепловые потоки, которые проходят через различные конструкции при одинаковой разности температур обратно пропорциональны термическому сопротивлению теплопередачи этих конструкций.

Если разные конструкции дорожной одежды имеют одинаковое сопротивление теплопередаче и одинаковую внешнюю температуру, а температура от дорожной одежды разная (рис. 2.), то получим:

Рис. 2. Схема двух конструкций дорожной одежды с различными значениями температур на поверхности каждого из конструктивов и различными значениями сопротивления теплопередаче конструктива (а, б)

Fig. 2. Diagram of two pavement structures with different temperature values on top of each of the structures and different values of the heat transfer resistance of the structure (a, b)

при условии $R = \text{const}$

$$q_1 = \frac{t_m - t_x}{\text{const}} \quad (19)$$

$$q_2 = \frac{t_4 - t_x}{\text{const}} \quad (20)$$

$$\text{const} = \frac{t_m - t_x}{q_1} \quad (21)$$

$$\text{const} = \frac{t_4 - t_x}{q_2} \quad (22)$$

Итак:

$$\frac{t_m - t_x}{q_1} = \frac{t_4 - t_x}{q_2} \quad (23)$$

$$\frac{t_m - t_x}{t_4 - t_x} = \frac{q_1}{q_2} \quad (24)$$

Приравняв полученные соотношения, получим:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{R_2}{R_1} = \frac{t_m - t_x}{t_4 - t_x} \quad (25)$$

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{t_m - t_x}{t_4 - t_x} \quad (26)$$

Таким образом, соотношение сопротивлений теплопередаче различных дорожных конструкций является обратно пропорциональным разнице температур на внешней и внутренней поверхности этих конструкций, то есть к разнице температур на поверхности дорожной одежды – температура воздуха самой холодной пятидневки для данного региона и температуры земляного полотна дорожной одежды.

Если разница температур на внешних поверхностях конструкции изменяется, то это изменение приводит к увеличению (уменьшению) теплового потока, проходящего через эту конструкцию, поскольку величина теплового потока прямо пропорциональна разности температур.

Для обеспечения условия $q = \text{const}$ в различных конструкциях с различным термическим паром необходимо:

$$q_1 = \text{const} = \frac{t_m - t_x}{R_1} \quad (27)$$

$$q_2 = q_1 = \text{const} = \frac{t_4 - t_x}{R_1} - x \quad (28)$$

где x – коэффициент пропорциональности, который представляет собой дополнительный тепловой поток, то есть:

$$x = f(t, R) \quad (29)$$

В аналитическом значении это можно представить следующим образом:

$$x = \frac{\Delta t}{R_1} = \frac{t_4 - t_m}{R_1} \quad (30)$$

Для получения числовых значений рассмотрим не конструкцию дорожной одежды, а грунт, залегающий массивом. Процесс морозного пучения грунта земляного полотна дорожной одежды происходит тогда, когда его температура опускается ниже нуля. Температура почвы, как правило, находится в слое, который залегает ниже глубины промерзания грунта.

Тогда термическое сопротивление массива грунта до глубины его залегания можно представить следующим образом:

$$R_{gr} = \frac{\delta}{\lambda} = \frac{H_{mrz}}{\lambda_{gr}} \quad (31)$$

где H_{mrz} – нормативная глубина промерзания

λ_{gr} – теплопроводность грунта (принимается среднее значение теплопроводности замерзшего грунта при минимальной и максимальной влажности по методическим рекомендациям по расчету водно-теплового режима для разработки оптимальной конструкции земляного полотна автомобильных дорог).

Такое аналитическое выражение в полной мере отражает то, что

$$R = f(\delta, \lambda) = f(\delta, W, t, \rho) \quad (32)$$

Поскольку глубина промерзания установлена на основе многолетних наблюдений в регионах, для которых характерны определенные природно-климатические характеристики (температура и относительная влажность воздуха зимой и тому подобное) и свойства грунтов (влажность, плотность, скорость распространения температуры).

В течение последнего десятилетия в зарубежных странах (США, Канада, Германия, Финляндия, Швейцария и др.) с целью снижения толщины морозозащитных слоев в дорожных конструкциях применяют слои из теплоизоляционных материалов, толщину которых выбирают таким образом, чтобы при появлении максимально критического морозного периода зимой нижняя граница промерзания не достигла морозо-чувствительных слоев грунтового основания конструктива автомобильной дороги).

С целью устранения эффекта зимнего пучения в конструкции дорожной одежды необходимо обеспечить в основе грунта земляного полотна дорожной одежды стабильные условия, обеспечивающие положительную температуру. Данный способ гарантирует защиту от замерзания воды в почве и образования кристаллов льда, которые увеличиваясь в объеме, вызывают зимнее пучение дорожной одежды. Такая конструкция дорожной одежды будет оставаться равной в течение целого года, что существенно улучшит качество дорожного покрытия, особенно в автомобильных дорогах нежесткого типа (асфальтобетон, покрытие из бетонных мелкоштучных элементов).

Температура почвы ниже уровня температуры ежегодных ее колебаний составляет +4°C. Обеспечение данной температуры в основе земляного полотна дорожной одежды создаст условия для благоприятного водно-теплового режима эксплуатации дорожного полотна.

С целью защиты конструкции дорожной одежды от зимнего пучения, тепловой поток, проходящий через данную дорожную конструкцию должен быть равным или меньшим по тепловой поток, который проходит через массив грунта до зоны на уровне глубины промерзания, то есть:

$$q_{gr} = \frac{\Delta t}{R_{gr}} = \frac{t_m - t_x}{R_{gr}} \quad (33)$$

$$q_2 = q_{gr} = \frac{\Delta t}{R_2} = \frac{t_4 - t_x}{R_2} \quad (34)$$

откуда

$$K_2 q_{gr} = t_4 - t_x \quad (35)$$

$$R_2 = \frac{t_4 - t_x}{q_{gr}} = \frac{t_4 - t_x}{\frac{t_m - t_x}{R_{gr}}} = \frac{R_{gr}(t_4 - t_x)}{t_m - t_x} = \frac{\frac{H_{mrz}}{\lambda_{gr}}(t_4 - t_x)}{t_m - t_x} \quad (36)$$

где t_r – температура самой холодной пятидневки данной местности, t_x – температура почвы ниже уровня промерзания (0°C), t_4 – рекомендуемая температура почвы в основе земляного полотна дорожной одежды (+4°C), H_{mrz} – нормативная глубина промерзания с учетом поправки, λ_{gr} – теплопроводность грунта земляного полотна под конструкцией дорожной одежды.

Расчетные усредненные значения температур самой холодной пятидневки в каждом районе приведены в табл. 1. В использованную формулу целесообразно подставлять (с целью унификации) среднее значение сопротивления теплопередаче мерзлого грунта в состояниях максимальной и минимальной влажности.

Таблица 1

Температура самой холодной пятидневки для климатических районов

Table 1

The temperature of the coldest five-day period for climatic regions

Климатический район, подрайон		Расчетная температура холодной пятидневки, t_x
I – Северо-западный		-22
II – Юго-восточный		-20
III – Горный	IIIА – Предгорье	-18
	IIIБ – Уральский	-16
IV – Южный регион		-15
V – Дальневосточный регион		-12

В результате анализа математических вычислений на основе полученной зависимости и выведенных усредненных расчетных значений, исходя из глубины промерзания грунта, H_{mrz} , получены величины требуемого термического сопротивления теплопередаче для дорожных одежд автомобильных дорог (R_{neob}), которые располагаются на почвах разного типа (песок, супесь, суглинок и глина) в определенном климатическом районе (табл. 2).

Таблица 2

Величина термического сопротивления конструкции дорожной одежды

Table 2

The value of the thermal resistance of the pavement structure

Климатический район	Глубина промерзания почвы, H_{mrz} , см	Минимальное требуемое значение сопротивления теплопередачи дорожной конструкции R_{neob} , что располагается на основе, $m^2K/Вт$		
		песок	супесь	суглинок и глина
I	165	1,054	1,455	1,598
	150	0,958	1,323	1,453
II	130	0,843	1,164	1,279
	110	0,714	0,985	1,082
IIA	95	0,628	0,867	0,952
	80	0,529	0,730	0,801
IIB	95	0,642	0,886	0,973
	80	0,541	0,746	0,820
IV	95	0,650	0,898	0,986
	80	0,548	0,756	0,831
IV	95	0,685	0,945	1,038
	80	0,577	0,796	0,874

Для моделирования влияния средней плотности пенобетона и минимально необходимого значения сопротивления теплопередачи дорожной одежды на толщину теплоизоляционной прослойки из пенобетона, армированного волокнами полипропиленовой фибры, для различных типов грунтов в работе выполнен расчет в соответствии с планом двухфакторного трехуровневого эксперимента. В качестве переменных факторов выбраны минимально необходимое значение сопротивления теплопередаче дорожной конструкции в зависимости от типа почвы: для песка ($X_1=1,054; 0,984; 0,914 m^2K/Вт$), для супеси ($X_1=1,455; 1,355; 1,255 m^2K/Вт$), для глины и суглинка ($X_1=1,598; 1,488; 1,378 m^2K/Вт$) и среднюю плотность пенобетона ($X_2=600; 800; 1000 кг/м^3$).

Проверку значений коэффициентов регрессии на адекватность уравнений регрессии выполняли по критериям Стьюдента и Фишера.

Основные характеристики плана эксперимента, матрица планирования и результаты эксперимента в зависимости от типа грунта приведены в табл. 3 – табл. 8. При планировании эксперимента был выбран следующий контрольный параметр:

Y – необходимая толщина теплоизоляционной прослойки из пенобетона в конструкции дорожной одежды.

Таблица 3

Характеристика плана эксперимента (тип почвы-песок)

Table 3

Characteristics of the experiment plan (soil type-sand)

Характеристика	Факторы	
	Сопротивление теплопередаче, $m^2K/Вт$, (X_1)	Плотность пенобетона, $кг/м^3$, (X_2)
основной уровень “0”	0,984	800
нижний уровень “-1”	0,914	600
верхний уровень “+1”	1,054	1000
Интервал варьирования	0,07	200

Таблица 4

Матрица планирования и результаты полного двухфакторного эксперимента (тип почвы-песок)

Table 4

Planning matrix and results of a complete two-factor experiment (soil type-sand)

В нормализованных факторах		В натуральных факторах		Толщина пенобетона, м
X_1	X_2	Сопротивление теплопередаче, $R_{необ}$, $m^2K/Вт$	Плотность пенобетона, $кг/м^3$	Y
1	-1	1,054	600	0,12
0	-1	0,984	600	0,11
-1	-1	0,914	600	0,10
1	0	1,054	800	0,17
0	0	0,984	800	0,16
-1	0	0,914	800	0,14
1	1	1,054	1000	0,23
0	1	0,984	1000	0,21
-1	1	0,914	1000	0,19

Таблица 5

Характеристика плана эксперимента (тип почвы-супесок)

Table 5

Characteristics of the experiment plan (type of soil-sandy loam)

Характеристика	Факторы	
	Сопротивление теплопередаче, $m^2K/Вт$, (X_1)	Плотность пенобетона, $кг/м^3$, (X_2)
основной уровень “0”	1,355	800
нижний уровень “-1”	1,255	600
верхний уровень “+1”	1,455	1000
Интервал варьирования	0,1	200

Таблица 6

Матрица планирования и результаты полного двухфакторного эксперимента (тип грунта – супесь)

Table 6

Planning matrix and results of a complete two-factor experiment (soil type – clay sand)

В нормализованных факторах		В натуральных факторах		Толщина пенобетона, м
X_1	X_2	Сопротивление теплопередаче, $R_{необ}$, $m^2K/Вт$	Плотность пенобетона, $кг/м^3$	Y
1	-1	1,455	600	0,17
0	-1	1,355	600	0,16
-1	-1	1,255	600	0,14
1	0	1,455	800	0,25
0	0	1,355	800	0,23
-1	0	1,255	800	0,21
1	1	1,455	1000	0,34
0	1	1,355	1000	0,32
-1	1	1,255	1000	0,29

Таблица 7

Характеристика плана эксперимента (тип почвы-глина и суглинок)

Table 7

Characteristics of the experiment plan (soil type-clay and loam)

Характеристика	Факторы	
	Сопротивление теплопередаче, $\text{м}^2\text{К/Вт}$, (X_1)	Плотность пенобетона, кг/м^3 , (X_2)
основной уровень “0”	1,488	800
нижний уровень “-1”	1,378	600
верхний уровень “+1”	1,598	1000
Интервал варьирования	0,11	200

Таблица 8

Матрица планирования и результаты полного двухфакторного эксперимента (тип почвы-глина и суглинок)

Table 8

Planning matrix and results of a complete two-factor experiment (soil type-clay and loam)

В нормализованных факторах		В натуральных факторах		Толщина пенобетона, м
X_1	X_2	Сопротивление теплопередаче, $R_{\text{необ}}$, $\text{м}^2\text{К/Вт}$	Плотность пенобетона, кг/м^3	Y
1	-1	1,598	600	0,19
0	-1	1,488	600	0,18
-1	-1	1,378	600	0,16
1	0	1,598	800	0,28
0	0	1,488	800	0,26
-1	0	1,378	800	0,23
1	1	1,598	1000	0,38
0	1	1,488	1000	0,35
-1	1	1,378	1000	0,32

Вычисление коэффициентов уравнений регрессии выполнено с применением матричного подхода к регрессионному анализу. Результаты коэффициентов уравнений регрессии показано в таблице 9. Вычислениями критерия Фишера показано, что полученные уравнения регрессии адекватно описывают экспериментальные данные.

Таблица 9

Коэффициенты уравнений регрессии

Table 9

Coefficients of regression equations

Функции отклика	Коэффициенты регрессии					
	B_0	B_1	B_2	B_{12}	B_{11}	B_{22}
тип грунта: песок						
Y	0,158	0,015	0,050	0,005	-0,002	0,003
тип грунта: супесь						
Y	0,232	0,020	0,080	0,005	-0,003	0,007
тип почвы: глина и суглинок						
Y	0,259	0,023	0,087	0,008	-0,003	0,007

Анализом полученных коэффициентов полиномиальных регрессионных уравнений (табл. 9) и экспериментально-статистических моделей дорожной конструкции установлено, что при росте средней плотности пенобетона для обеспечения минимально необходимого значения сопротивления теплопередаче дорожной конструкции необходимо увеличивать толщину конструкции.

По данным уравнениям регрессии получены изопараметрические поверхности и диаграммы, которые адекватно описывают влияние средней плотности пенобетона и минимально необходимого значения сопротивления теплопередаче дорожной конструкции на толщину теплоизоляционного слоя из пенобетона для различных типов почв (рис. 3).

При применении в конструкции дорожной одежды теплоизоляционного слоя из монолитного пенобетона необходимо выполнить расчет необходимой толщины этого слоя. Для этого следует выполнить следующий расчет:

$$R_{tep} = R_{neob} - R_{od} \quad (37)$$

где, R_{tep} – сопротивление теплопередаче теплоизоляционной прослойки, $\text{м}^2\text{К} / \text{Вт}$,

R_{neob} – необходимое сопротивление теплопередаче дорожной конструкции, $\text{м}^2\text{К} / \text{Вт}$,

R_{od} – сопротивление теплопередаче дорожной конструкции, рассчитанной из условий прочности, $\text{м}^2\text{К}/\text{Вт}$.

$$R_{od} = \frac{1}{\alpha} + \sum R_i = \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (38)$$

где, α – коэффициент теплообмена (экспериментально установлено, что $1/\alpha = 0,04 \text{ м}^2\text{К} / \text{Вт}$);

δ_i – толщина i-го слоя конструкции дорожной одежды,

λ_i – коэффициент теплопроводности i-го слоя конструкции дорожной одежды, $\text{Вт}/(\text{мК})$

$$h_{tep} = R_{tep} \lambda_{tep} \quad (39)$$

где λ_{tep} – теплопроводность пенобетона, $\text{Вт}/(\text{м К})$.

а

б

Рис. 3. Изопараметрические поверхности изменения толщины теплоизоляционной прослойки из пенобетона для дорожной одежды на основе песка (а); супеси (б); глины и суглинка
Fig. 3. Isoparametric surfaces of changes in the thickness of the thermal insulation layer of foam concrete for road pavement based on sand (a); clay sand (b); clay and loam

По разработанному алгоритму методика, предлагаемая для расчета дорожной одежды основывается на основных положениях, предложенных с учетом усовершенствований, представленных статье для основных природно-климатических зон регионов России.

Алгоритм методики расчета имеет следующий вид:

Конструкция дорожной одежды принимается гарантированно морозостойкой, если выполняется условие:

$$l_{zdim} \leq l_{zdim}^{dop} \quad (40)$$

где l_{zdim} – расчетная величина морозного пучения дорожной одежды, см; l_{zdim}^{dop} – мороза чувствительных – допустимая величина морозного пучения конструкции дорожной одежды (табл. 10).

Таблица 10

Допустимая величина морозного пучения дорожной одежды

Table 10

Permissible value of frost heaving of road clothing

Тип дорожной одежды	Вид покрытия	Допустимая величина морозного пучения, l_{zdim}^{dop} , см
Капитальный	асфальтобетонное	0
Облегченный	асфальтобетонное	4
Переходной	переходное	6

При определении нормативной глубины промерзания многослойной дорожной одежды H_{mrz} до полученного значения нормативной глубины промерзания грунта Z_{max}^H вводится корректирующая поправка Δ (табл. 11.), которая увеличивает глубину промерзания.

$$H_{mrz} = Z_{max}^H + \Delta \quad (41)$$

Таблица 11

Глубина промерзания почвы и соответствующая величина поправки

Table 11

The depth of soil freezing and the corresponding correction value

Z_{max}^H , см	70	80	90	100	110	120
Поправка Δ , см	10	15	20	30	40	45

Величину термического сопротивления конструкции дорожной одежды рассчитанной из условий прочности (без теплоизоляционной прослойки) определяют обычно по формуле

$$R_{od} = \frac{1}{\alpha} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} \quad (42)$$

где α – коэффициент теплообмена (экспериментально установлено, что

$$1 / \alpha = 0,04 \text{ м}^2\text{К} / \text{Вт});$$

δ_i – толщина i-го слоя конструкции дорожной одежды, м;

λ_i – коэффициент теплопроводности i-го слоя конструкции дорожной одежды, Вт/(мК).

Если расчет осуществляется при условии, что величина допустимого морозного вспучивания дорожного полотна $l_{zdim}^{dop} = 0$, то расчет величины морозоопасного (теплоизоляционного) слоя выполняют по формуле:

$$h_{тер} = R_{тер} \lambda_{тер} \quad (43)$$

где $R_{тер}$ – величина необходимого сопротивления теплопередаче теплоизоляционной прослойки, м²К/Вт;

$\lambda_{тер}$ – теплопроводность пенобетона, Вт/(м К).

Величина требуемого сопротивления теплопередаче теплоизоляционного слоя дорожной одежды определяется по формуле:

$$R_{тер} = R_{neob} - R_{od} \quad (44)$$

где R_{neob} – необходимое сопротивление теплопередаче дорожной конструкции, м²К / Вт (таблица 12),

R_{od} – сопротивление теплопередаче дорожной конструкции, рассчитанное из условий прочности, м²К / Вт.

Если расчет величины теплоизоляционной прослойки проводят из условий наличия допустимого морозного пучения, то необходимо сопротивление теплопередаче дорожной конструкции $R_{neob(dop)}$ определяют по формуле:

$$R_{neob(dop)} = R_{neob} K_{od} K_{vol} d \quad (45)$$

где R_{neob} – необходимое сопротивление теплопередаче дорожной конструкции, м²К / Вт;

K_{od} – коэффициент, учитывающий срок службы дорожной одежды между капитальными ремонтами (табл. 12);

K_{vol} – коэффициент, учитывающий схему увлажнения рабочего слоя основы стабилизированного грунта земляного полотна (соответствует расчетной относительной влажности грунтов земляного полотна);

d – понижающий коэффициент для дорожного района (0,95).

Таблица 12

Значение коэффициента, учитывающего срок службы дорожной одежды

Table 12

The value of the coefficient that takes into account the service life of the road surface

Тип дорожной одежды	Значение коэффициента K_{od} при гарантированном сроке службы дорожной одежды между капитальными ремонтами		
	менее 10 лет	10 лет	20 лет
Капитальный	0,70	0,85	1,0
Облегченный	0,80	0,90	1,0

С целью оптимизации алгоритма расчета по подбору толщины теплоизоляционного слоя из монолитного пенобетона, армированного волокнами полипропиленовой фибры, разработаны номограммы (рисунок 4.5). Расчет проведен при условии обеспечения защиты теплоизоляционной прослойки от увлажнения.

Результаты данных исследований отображены на рис. 4.

для основы из песка (а);

для основы из супеси (б);

для основы из глины и суглинка (в)

Рис. 4. Номограммы для подбора оптимальной величины теплоизоляционного слоя с фибропенобетона классов D600, D800, D1000

Fig. 4. Nomograms for selecting the optimal value of the thermal insulation layer from fibre foam concrete of classes D600, D800, D1000

Армирование волокнами позволяет использовать новые принципы проектирования и изготовления в результате совмещения армирующих элементов и матрицы образуется комплекс свойств композита, не только включает исходные характеристики его компонентов, но и качества, которыми отдельные компоненты не обладают. Появление новых свойств в композитах связано с гетерогенной структурой, которая обуславливает наличие большой поверхности, раздела между волокнами и матрицей.

Дисперсное армирование бетона позволяет изменить характер его разрушения от хрупкого до пластичного вследствие перераспределения напряжений между матрицей и дисперсной арматурой.

Макроструктура фибропенобетона может рассматриваться как система, состоящая из двух составляющих – бетонной матрицы и армирующих волокон. Непрерывным структурообразующим компонентом является хрупкая матрица. Введение армирующих волокон придает ей пластические качества.

Выводы

Разработана методика расчета конструкции дорожной одежды с учетом эффекта промерзания конструкции дорожной одежды и земляного полотна для проектирования автомобильных дорог в каждом климатическом районе страны, которая базируется на определении требуемых показателей термического сопротивления конструкции. Установлено, что с целью защиты конструкции дорожной одежды от зимнего пучения, тепловой поток, который проходит через данную дорожную конструкцию, должен быть равным или меньшим по тепловой поток, который проходит через массив грунта до зоны на уровне глубины промерзания. Получены величины требуемого термического сопротивления теплопередаче для дорожных одежд автомобильных дорог для климатических районов страны, которые располагаются на почвах разных типов (песка, супеси, суглинка и глины). С помощью метода математического планирования эксперимента определена толщина теплоизоляционного слоя из пенобетона, армированного волокнами полипропиленовой фибры, для разных типов почв. В качестве переменных факторов которого выбрана минимально необходимое значение сопротивления теплопередаче дорожной конструкции в зависимости от типа почвы. С целью оптимизации алгоритма расчета по подбору толщины теплоизоляционного слоя монолитного пенобетона, армированного волокнами полипропиленовой фибры, разработаны номограммы для различных типов почв и марки пенобетона по средней плотности.

Литература

1. Bhatt P.P., Kodur V.K.R., Shakya A.M., Alkhrdaji T. Performance of insulated FRP-strengthened concrete flexural members under fire conditions // *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2021. № 15 (1). P. 177 – 193. <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0714-z>
2. Bida S.M., Aziz F.N., Jaafar M.S., Hejazi F., Nabilah A.B. Thermal performance of super-insulated precast concrete structural sandwich panels // *Energy and Buildings*. 2018. № 176. P. 418 – 430. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.004>
3. Carstens S., Pahn M. (2019). Pull-out capacity of GFRP connectors in the edge area of precast concrete sandwich walls. In *IABSE Symposium, Guimaraes 2019: Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management – Report* (P. 1282 – 1288).
4. De Sousa C., Barros J.O., Azenha M., Lameiras R. Polymer and cement-based fiber-reinforced composite materials for sandwich slabs [Polymer- und zementbasierte, faserbewehrte Verbundwerkstoffe für Sandwichelemente] // *Betonwerk Und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology*. 2014. № 80 (9). P. 64 – 73.
5. Ekenel M. Testing and acceptance criteria for fiber-reinforced composite grid connectors used in concrete sandwich panels // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2014. № 26 (6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000915](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000915)
6. El-Mahdy O.O., Hamdy G.A., Hisham M. Efficiency of insulation layers in fire protection of FRP-confined RC columns-numerical study // *Structural Engineering and Mechanics*. 2021. № 77 (5). P. 673 – 689. <https://doi.org/10.12989/sem.2021.77.5.673>
7. Goulouti K., de Castro J., Keller T. Aramid/glass fiber-reinforced thermal break – Structural system performance // *Composite Structures*. 2016. № 152. P. 455 – 463. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.038>
8. Goulouti K., de Castro J., Keller T. Aramid/glass fiber-reinforced thermal break – thermal and structural performance // *Composite Structures*. 2016. № 136. P. 113 – 123. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.001>
9. He Z., Pan P., Ren J., Wang H. Experimental and Numerical Investigation of Novel I-Shaped GFRP Connectors for Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels // *Journal of Composites for Construction*. 2020. № 24 (5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001053](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001053)

10. Lameiras R., Barros J.A.O., Valente I.B., Poletti E., Azevedo M., Azenha M. (2021). Seismic behaviour of precast sandwich wall panels of steel fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. *Engineering Structures*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112149>
11. Lameiras R., Valente I., Barros J., Azenha M., Ferreira, P. (2012). Fibre reinforced polymer (FRP) connectors for Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC) sandwich panels. In *Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2012*.
12. Metell, G., Bettini N., Plizzari G. Experimental and numerical studies on the behaviour of concrete sandwich panels // *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2011. № 15 (10). P. 1465 – 1481. <https://doi.org/10.3166/EJECE.15.1465-1481>
13. Ojanen T. Moisture performance of mineral wool insulation products in highly insulated structures // In *Energy Procedia*. 2017. Vol. 132. P. 795 – 800). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.026>
14. Pantelides C.P., Surapaneni R., Reaveley L.D. Structural performance of hybrid GFRP/steel concrete sandwich panels // *Journal of Composites for Construction*. 2008. № 12 (5). P. 570 – 576. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:5\(570\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:5(570))
15. Ren P., Hou X., Rong, Q., Zheng W. Quantifying Fire Insulation Effects on the Fire Response of Hybrid-Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete Beams // *Fire Technology*. 2020. № 56 (4). P. 1487 – 1525. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00937-2>
16. Shen L., Wang J., Xu S., Amoako-Atta G. Fire resistance behavior of full-scale self-thermal insulation sandwich walls made of textile-reinforced concrete // *International Journal of Heat and Technology*. 2019 № 37 (1). P. 239 – 248. <https://doi.org/10.18280/ijht.370129>
17. Sokolova S.N., Mitina N.A. Influence of dispersed fillers Utilization of basalt fibers in the AAC technology [Einfluss von dispersen Füllern Verwendung von Basaltfasern in der Porenbetontechnologie] // *Betonwerk Und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology*. 2009. № 75 (4). P. 16 – 21.
18. Song H., Liu X., Li B. Study on New Anti-frost Heaving Filling Material and Structure Mechanical Properties of High-speed Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Region [季节性冻土区高速铁路新型防冻胀路基力学特性研究] // *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society*, 2018. № 40 (11). P. 98 – 104. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2018.11.014>
19. Wu S., Pan P., Chen M., Tang N. (2012). Numerical and experimental analysis of thermal insulation layer on heating efficiency of conductive asphalt pavement. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 30(SPEC .ISS.1), 1111–1116.
20. Xiao L., Liu G., Yan C., Xu X. Influence of polymer and fiber on the properties of special plaster mortar for aerated concrete // *Advanced Materials Research*. 2013. № 687. P. 466 – 471. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.687.466>

References

1. Bhatt P.P., Kodur V.K.R., Shakya A.M., Alkhrdaji T. Performance of insulated FRP-strengthened concrete flexural members under fire conditions. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 2021. 15 (1). P. 177 – 193. <https://doi.org/10.1007/s11709-021-0714-z>
2. Bida S.M., Aziz F.N., Jaafar M.S., Hejazi F., Nabilah A.B. Thermal performance of super-insulated precast concrete structural sandwich panels. *Energy and Buildings*. 2018. 176. P. 418 – 430. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.004>
3. Carstens S., Pahn M. (2019). Pull-out capacity of GFRP connectors in the edge area of precast concrete sandwich walls. In *IABSE Symposium, Guimaraes 2019: Towards a Resilient Built Environment Risk and Asset Management – Report* (P. 1282 – 1288).
4. De Sousa C., Barros J.O., Azenha M., Lameiras R. Polymer and cement-based fiber-reinforced composite materials for sandwich slabs [Polymer- und zementbasierte, faserbewehrte Verbundwerkstoffe für Sandwichelemente]. *Betonwerk Und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology*. 2014. 80 (9). P. 64 – 73.
5. Ekenel M. Testing and acceptance criteria for fiber-reinforced composite grid connectors used in concrete sandwich panels. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014. № 26 (6). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000915](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000915)
6. El-Mahdy O.O., Hamdy G.A., Hisham M. Efficiency of insulation layers in fire protection of FRP-confined RC columns-numerical study. *Structural Engineering and Mechanics*. 2021. 77 (5). P. 673 – 689. <https://doi.org/10.12989/sem.2021.77.5.673>

7. Goulouti K., de Castro J., Keller T. Aramid/glass fiber-reinforced thermal break – Structural system performance. *Composite Structures*. 2016. 152. P. 455 – 463. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.05.038>
8. Goulouti K., de Castro J., Keller T. Aramid/glass fiber-reinforced thermal break – thermal and structural performance. *Composite Structures*. 2016. 136. P. 113 – 123. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2015.10.001>
9. He Z., Pan P., Ren J., Wang H. Experimental and Numerical Investigation of Novel I-Shaped GFRP Connectors for Insulated Precast Concrete Sandwich Wall Panels. *Journal of Composites for Construction*. 2020. 24 (5). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001053](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001053)
10. Lameiras R., Barros J.A.O., Valente I.B., Poletti E., Azevedo M., Azenha M. (2021). Seismic behaviour of precast sandwich wall panels of steel fibre reinforced concrete layers and fibre reinforced polymer connectors. *Engineering Structures*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112149>
11. Lameiras R., Valente I., Barros J., Azenha M., Ferreira, P. (2012). Fibre reinforced polymer (FRP) connectors for Steel Fibre Reinforced Self-Compacting Concrete (SFRSCC) sandwich panels. In *Proceedings of the 6th International Conference on FRP Composites in Civil Engineering, CICE 2012*.
12. Metell, G., Bettini N., Plizzari G. Experimental and numerical studies on the behaviour of concrete sandwich panels. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*. 2011. 15 (10). P. 1465 – 1481. <https://doi.org/10.3166/EJECE.15.1465-1481>
13. Ojanen T. Moisture performance of mineral wool insulation products in highly insulated structures. In *Energy Procedia*. 2017. 132. P. 795 – 800). <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.026>
14. Pantelides C.P., Surapaneni R., Reaveley L.D. Structural performance of hybrid GFRP/steel concrete sandwich panels. *Journal of Composites for Construction*. 2008. 12 (5). P. 570 – 576. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2008\)12:5\(570\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2008)12:5(570))
15. Ren P., Hou X., Rong, Q., Zheng W. Quantifying Fire Insulation Effects on the Fire Response of Hybrid-Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete Beams. *Fire Technology*. 2020. 56 (4). P. 1487 – 1525. <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00937-2>
16. Shen L., Wang J., Xu S., Amoako-Atta G. Fire resistance behavior of full-scale self-thermal insulation sandwich walls made of textile-reinforced concrete. *International Journal of Heat and Technology*. 2019 37 (1). P. 239 – 248. <https://doi.org/10.18280/ijht.370129>
17. Sokolova S.N., Mitina N.A. Influence of dispersed fillers Utilization of basalt fibers in the AAC technology [Einfluss von dispersen Füllern Verwendung von Basaltfasern in der Porenbetontechnologie]. *Betonwerk Und Fertigteil-Technik/Concrete Plant and Precast Technology*. 2009. 75 (4). P. 16 – 21.
18. Song H., Liu X., Li B. Study on New Anti-frost Heaving Filling Material and Structure Mechanical Properties of High-speed Railway Subgrade in Seasonal Frozen Soil Region [季节性冻土区高速铁路新型防冻胀路基力学特性研究]. *Tiedao Xuebao/Journal of the China Railway Society*, 2018. 40 (11). P. 98 – 104. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-8360.2018.11.014>
19. Wu S., Pan P., Chen M., Tang N. (2012). Numerical and experimental analysis of thermal insulation layer on heating efficiency of conductive asphalt pavement. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, 30(SPEC .ISS.1), 1111–1116.
20. Xiao L., Liu G., Yan C., Xu X. Influence of polymer and fiber on the properties of special plaster mortar for aerated concrete. *Advanced Materials Research*. 2013. 687. P. 466 – 471. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.687.466>

*Plekhanova S.V., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
A.N. Kosygin Russian State University, Russia,
Vinogradova N.A.*, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Senior Lecturer,
National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Russia*
* Corresponding author e-mail: vinogradova@mgsu.ru

OBTAINING A THERMAL INSULATION LAYER FROM MONOLITHIC NON-AUTOCLAVED STRUCTURAL AND THERMAL INSULATION FIBRE FOAM CONCRETE

Abstract: the possibility of obtaining structural and thermal insulation foam concrete of non-autoclave hardening with improved construction and technical characteristics for the device of a thermal insulation layer in the construction of road pavement due to three-dimensional dispersed reinforcement with polypropylene fiber is theoretically justified and experimentally confirmed. Based on the results of studies of the influence of technological factors on the properties of foam concrete, the optimal content (up to 0.25% of the cement mass) and the length (12 mm) of reinforcing polypropylene fibers have been established, which allows obtaining high strength indicators of dispersed-reinforced cement stone for bending (an increase of 12-20%) and compression (an increase of 6-12%) compared with non-reinforced cement stone of non-autoclaved foam concrete. The analysis of the process of structure formation of dispersed reinforced foam concrete from the standpoint of a systematic approach based on multifactorial polynomial models of the influence of the ratio of filler and binder, as well as the number of dispersed reinforcing fibers, which is determined by the optimal conditions for the distribution of solid and gas phases, as well as the reinforcement of adjacent interstitial partitions of foam concrete, linking them into one associate, which ensures the joint work of the material under various external influences. A method was developed to increase the durability of the road surface and eliminate the influence of the frost heaving effect on the quality of the road surface by introducing the necessary amount of effective thermal insulation layer into the road surface design. The analysis of the regularity of the heat transfer process in the soil mass of the roadbed and multilayer road pavement is carried out. Based on the analysis, the values of the necessary resistance to heat transfer of road pavement for the natural and climatic regions of the country are determined and a method for calculating the value of the thermal insulation (frost-proof) layer of road pavement is proposed. A method was developed for calculating the value of the thermal insulation layer using monolithic fibre foam concrete and a nomogram to determine the required value of the thermal insulation layer made of monolithic non-autoclaved structural and thermal insulation fibre foam concrete of classes D600-D1000.

Keywords: road, pavement, concrete, development, structure.

Для цитирования: Плеханова С.В., Виноградова Н.А. Получение теплоизоляционного слоя из монолитного неавтоклавного конструкционно-теплоизоляционного фибропенобетона // Строительные материалы и изделия. 2021. Том 4. № 3. С. 5 – 22. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-3-5-22

For citation: Plekhanova S.V., Vinogradova N.A. Obtaining a thermal insulation layer from monolithic non-autoclaved structural and thermal insulation fibre foam concrete. Construction Materials and Products. 2021. 4 (3). P. 5 – 22. DOI: 10.34031/2618-7183-2021-4-3-5-22

Поступила в редакцию 9 марта 2021 г.

Принята в доработанном виде 28 марта 2021 г.

Одобрена для публикации 12 мая 2021 г.

Received: March 9, 2021.

Revised: March 28, 2021.

Accepted: May 12, 2021.