ОДМ 218.2.061-2015

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
РОСАВТОДОР

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ГРУНТОВ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО
(РОСАВТОДОР)

МОСКВА 2015

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Федеральным государственным бюджетным учреждением «Российский дорожный научно-исследовательский институт» (ФГБУ «РОСДОРНИИ») Министерства транспорта Российской Федерации.

2 ВНЕСЕН Управлением научно-технических исследований и информационного обеспечения

3 ИЗДАН на основании распоряжения Федерального дорожного агентства от 18.01.2016 2016 г. № 85-р

4 ИМЕЕТ РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ ХАРАКТЕР

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Содержание

1Область применения..... 1
2Нормативные ссылки..... 1
3Термины и определения..... 2
4Обозначения и сокращения..... 4
5 Общие положения..... 5
6 Процессы водно-теплового режима земляного полотна и основания дорожной одежды..... 11
7 Факторы, влияющие на теплофизические характеристики грунтов..... 17
8 Факторы, влияющие на теплофизические характеристики дисперсных материалов..... 32
9 Методики определения теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов..... 41
Приложение А Теплофизическая характеристика – теплопроводность..... 63
Приложение Б Теплофизическая характеристика – теплоемкость..... 65
Библиография..... 67

ОТРАСЛЕВОЙ ДОРОЖНЫЙ МЕТОДИЧЕСКИЙ ДОКУМЕНТ

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ И ГРУНТОВ

1 Область применения

1.1 Отраслевой дорожный методический документ «Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов» (далее – методический документ) разработан в соответствии с планом научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ Федерального дорожного агентства на 2013-2015 гг. подпрограммы «Автомобильные дороги» федеральной целевой программы «Развитие транспортной системы России (2010-2020 годы), утвержденный распоряжением Росавтодора 06.08.2013 № 1120-р, с изменениями, внесенными распоряжением Росавтодора от 27.12.2013 № 2310-р.

1.2 Настоящий методический документ устанавливает рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов, возможного диапазона изменения влажности, плотности и температуры материалов и грунтов, расположенных в дорожных конструкциях в районах сезонного промерзания (оттаивания) транспортных сооружений, выбора приборов, обеспечивающих достоверные результаты изменения теплофизических характеристик материалов дорожных одежд и грунтов земляного полотна.

2 Нормативные ссылки

В настоящем методическом документе использованы ссылки на следующие документы:

Федеральный закон от 27 декабря 2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании» в редакции Федеральных законов от 09.05.2005 № 45-ФЗ, от

01.05.2007 № 65-ФЗ, от 01.12.2007 № 309-ФЗ, от 23.07.2008 № 160-ФЗ, от 18.07.2009 № 189-ФЗ, от 23.11.2009 № 261-ФЗ, от 30.12.2009 № 384-ФЗ, от 30.12.2009 № 385-ФЗ (далее – ФЗ «О техническом регулировании»)

ГОСТ Р 1.12-2004 Стандартизация в Российской Федерации. Термины и определения

ГОСТ 23250-78 «Материалы строительные. Метод определения удельной теплоемкости»

ГОСТ 30290-94 «Материалы строительные. Метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем»

СНиП II-3-79* Строительная теплотехника

СНиП 2.02.01-83. Основания зданий и сооружений

СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах

СНиП 2.06.05-84 Плотины из грунтовых материалов

СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий

СНиП 23-101-2004 Проектирование тепловой защиты зданий

СП22.13330.2011 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*

СП 25.13330.2012 Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88

ОДН 218.046-01 Проектирование нежёстких дорожных одежд

Руководство по определению физических, теплофизических и механических характеристик мёрзлых грунтов, 2010 г.

СТО 218.3.001-2006 Проектирование и устройство теплоизолирующих слоев из экструдированного пенополистирола "STYROFOAM" на автомобильных дорогах России

3 Термины и определения

В настоящем ОДМприменены следующие термины с соответствующими определениями, соответствующие СНиП II-3-79*, СНиП

23-02-2003, СНиП 23-101-2004, СП 25 .13330.2012, СНиП 2.02.04-88, СП 22.13330.2011, ОДН 218.046-01,СТБ 4.206-94:

автомобильная дорога: Инженерное сооружение, предназначенное для движения автомобилей, основными элементами которого являются земляное полотно, дорожная одежда, проезжая часть, обочины, искусственные и линейные сооружения и все виды дорожной обстановки.

водопоглощение при капиллярном подсосе: Способность образца затвердевшего раствора (бетона), высушенного до постоянной массы, к поглощению воды при атмосферном давлении за счёт капиллярных или адсорбционных сил.

грунт: Горные породы, почвы, техногенные образования, представляющие собой многокомпонентную и многообразную геологическую систему и являющиеся объектом инженерно-хозяйственной деятельности человека.

морозостойкость: Свойство материала в водонасыщенном состоянии выдерживать требуемое число циклов попеременного замораживания и оттаивания при допустимом снижении прочности и потере массы.

структура грунта: Пространственная организация компонентов грунта, характеризующаяся совокупностью морфологических (размер, форма частиц, их количественное соотношение), геометрических (пространственная композиция структурных элементов) и энергетических признаков (тип структурных связей и общая энергия структуры) и определяющаяся составом, количественным соотношением и взаимодействием компонентов грунта.

теплопроводность: Способность материала пропускать тепловой поток при условии разных температур поверхности. Степень теплопроводности материалов характеризует коэффициент, который равен количеству тепла, проходящего через стену из испытуемого материала толщиной 1 м площадью 1 м^2 за 1 ч при разности температур противоположных поверхностей стены 1 К. Коэффициент теплопроводности измеряют в Вт/(м×К).

теплоемкость: Свойство материала поглощать при нагревании определенное количество тепла. При охлаждении материалы выделяют тепло, причем тем больше, чем выше их теплоемкость. Коэффициент теплоемкости равен количеству тепла (Дж), необходимого для нагревания 1 кг материала на 1 К.

температуропроводность: Физическая величина, характеризующая скорость изменения (выравнивания) температуры вещества в неравновесных тепловых процессах. Численно равна отношению теплопроводности к объёмной теплоёмкости при постоянном давлении, в системе СИ измеряется в $м^2/с$.

химическая или коррозионная стойкость: Свойство материалов противостоять разрушающему действию жидких и газообразных агрессивных сред. Химическую стойкость оценивают специальным коэффициентом, который рассчитывают по отношению прочности (массы) материала после коррозионных испытаний (в случае кислот и щелочей образцы в течение двух часов кипятят соответственно в концентрированном растворе кислоты или щелочи) к прочности (массе) до испытаний. При коэффициенте 0,90 – 0,95 материал признается химически стойким по отношению к исследуемой среде. Органические материалы – древесина, битумы, пластмассы – при обычных температурах относительно стойки к действию кислот и щелочей слабой и средней концентрации. Свойства неорганических материалов зависят от их состава.

4 Обозначения и сокращения

z: Толщина морозоустойчивого слоя дорожной одежды.

ρ: *П*лотность, $кг/м^3$.

λ: *К*оэффициент теплопроводности, Вт/(м·К).

С: Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К).

сρ: Объемная теплоемкость, Дж/(м3·К) (ρ- плотность вещества, $кг/м^3$).

k: Коэффициенттемпературопроводности$k=\lambda/с\rho$, $м^2/с$.

W: Влажность,% или д.е.

$\mathbf{D_{sal}}$: Засоленность, %.

N: Пористость ,д.е.

G: Степень влажности,д.е.

qwf: Интенсивность миграционного потока влаги.

vf: Скорости промерзания.

$\mathbf{vf_{опт}}$: Оптимальная скорость промерзания.

T_{bf}: Температура начала замерзания грунта, °С.

$\mathbf{e_M}$: Коэффициент пористости мерзлого грунта, доли ед.

$\rho_{CK,M}$: Плотность грунта в сухом виде.

ρ_S : Плотность частиц грунта.

Sr: Степень заполнения пор влагой.

$\mathbf{C_{th}}$: Объемная теплоемкость талого грунта.

$\mathbf{C_f}$: Объемная теплоемкость мерзлого грунта.

l_{th}: Теплопроводность талого и грунта.

l_f: Теплопроводность мерзлого грунта.

5 Общие положения

5.1 Оценка степени промерзания дорожных одежд и грунтов земляного полотна является важной задачей, так как результаты такой оценки учитываются при проектировании автомобильных дорог на большой территории Российской Федерации. При этом нормативные методы расчета глубин промерзания до настоящего времени базируются на полуэмпирических подходах, разработанных до начала активного использования ЭВМ в инженерной практике.

5.2 В настоящее время существуют вычислительные комплексы и отдельные программы, позволяющие решать задачи промерзания дорожных одежд и грунтов земляного полотна с точностью, удовлетворяющей

современным требованиям автоматизированного проектирования строительства и ремонта автомобильных дорог. Для обеспечения высокой точности результатов необходим соответствующий уровень адекватности в задании исходных данных. Основное место здесь отводится теплофизическим характеристикам дорожно-строительных материалов и грунтов.

5.3 В современных подходах к решению теплотехнических задач по промерзанию дорожных конструкций полностью используется годовой цикл изменения температуры воздуха с учетом радиационного баланса на свободной поверхности. В зимне-весенний период происходит основной процесс – промерзание дорожной одежды и грунтов земляного полотна, а в летне-осенний период осуществляется аккумуляция тепла в толще земляного полотна, оказывающая серьезное влияние на процесс его промерзания. Поэтому важно иметь данные о теплофизических свойствах дорожно-строительных материалов и грунтов в реальном интервале изменения температур. В особой степени это относится к водонасыщенным грунтам, свойства которых меняются в зависимости от процентного содержания в них замерзшей воды, которое является функцией температуры.

5.4 Термину «теплофизические характеристики» обычно придается широкий смысл, под которым имеется в виду комплекс параметров, характеризующих одновременно реакцию материала на процессы тепло- и массообмена. К последним относят в первую очередь:

а) термические характеристики:

1) коэффициент теплопроводности λ,;
2) коэффициент температуропроводностиk;
3) объемную теплоемкостьC;
4) теплоусвояемость$b = \sqrt{\lambda C}$;

б) массообменные характеристики:

1) коэффициент влагопроводностиK;

2) коэффициент термовлагопроводности$\delta_т$;

3) коэффициент массоемкости$\delta_м$и др.

В данных методических рекомендациях основной упор сделан на всестороннее изучение лишь комплекса термических характеристик, т.е величин λ, k, C и b. Для оценки тепловых свойств дисперсных материалов и для понимания основных термических процессов, протекающих в них при самых различных режимах и условиях, необходимо и достаточно знание этих четырех параметров, понимаемых как эффективные характеристики всей совокупности теплообменных и массообменных процессов в материале.

Теплопередача внутри твердого сплошного тела ограничивается лишь одним процессом – теплопроводностью. Основной задачей в области теплообмена внутри твердых тел является задача нахождения температурного поля в них. Температурным полем называется совокупность мгновенных значений температуры во всех точках исследуемого объекта или распределение температуры во времени и в объеме. Задача нахождения температурного поля в теле состоит в определении температуры T в любой точке тела $M(x,y,z)$ в любой момент времени t, т.е в раскрытии функции (1)

$$T = f(x, y, z, t). \quad (1)$$

Стационарное поле представляет собой распределение температуры от одной точки поля к другой независимо от времени, нестационарное поле – распределение температуры по координатам x,y,z и во времени t.

Для решения исключительно важных вопросов о переносе тепла через тело, о теплоотводе в окружающую среду, о тепловых потерях, о теплоаккумуляции – во всех случаях, когда требуется знание потоков тепла через тело, мы должны обращаться к решению той же проблемы температурного поля. Иными словами речь идет об отыскании решений уравнения (1) в каждом конкретном случае, являющихся частными решениями основного дифференциального уравнения теплопроводности (2)

$$\lambda = \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) = C \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (2)$$

В уравнение (2), помимо коэффициента теплопроводности, входит вторая физическая характеристика материала – объемная теплоемкость C. Третья характеристика объекта – коэффициент температуропроводностиk есть производная из двух первых λ и C(3):

$$K = \frac{\lambda}{C} \quad (3)$$

Весьма распространенной и нужной является четвертая физическая характеристика – коэффициент теплоусвояемости, представляющая собой производную тех же основных величин λ, k, иC(4):

. (4)

Совокупность величин λ, k, C и b названа теплофизическими характеристиками.

Физический смысл этих величин следующий. Коэффициент теплопроводности численно равен количеству тепла, проходящему в стационарном состоянии в единицу времени через две противоположные грани единицы объема материала, на которых поддерживается разность температур в 1°С. Таким образом, эта величина характеризует степень проводимости тепла веществом. Размерность этой величины в физической и технической системе единиц соответственно *кал/см*сек*град* и *ккал/м*час*град*. Объемная теплоемкость численно равна количеству тепла, необходимому на нагревание или охлаждение единицы объема на 1°С.Следовательно, эта величина характеризует интенсивность изменения температуры тела при его нагревании или охлаждении. Размерность этой величины в физической и технической системе единиц соответственно *кал/см*^{3} и *ккал/м*^{3}. Другие две теплофизические характеристики материала оценивают его с точки зрения быстроты выравнивания температуры и степени теплоаккумуляции. Такими величинами являются коэффициенты температуропроводности и теплоусвояемости. Размерности этих величин в

физической и технической системе единиц соответственно следующие: [*k*] – *см*^{2}/*сек* и *м*^{2}/*час*, [*b*]- *кал/см*^{2}**сек*$^{1/2}$**град*$^{1/2}$ и *ккал/м*^{2}**час*$^{1/2}$**град*$^{1/2}$.

Рассмотрим изменяющееся во времени температурное поле внутри образца материала, вырезанного по изотермической поверхности. Повышение температуры в таком образце в данный момент времени связано с накоплением проводимого к нему тепла и будет тем больше, чем меньше теплоемкость единицы объема образца. Поэтому скорость прогрева материала, мерой которой является его коэффициент температуропроводности, должна быть обратно пропорциональна *C*.

С другой стороны, она обусловлена интенсивностью передачи тепла при данной разности температур от соседнего слоя к рассматриваемому. Следовательно, коэффициент температуропроводности*k* должен быть прямо пропорционален коэффициенту теплопроводности λ. Поэтому справедливо следующее равенство:

$$k = D_0 \frac{\lambda}{C},$$

где D_0 – коэффициент, численная величина которого зависит от выбора единиц для λ, *k*, и *C*.

Полагая D_0=1, имеем

$$K = \frac{\lambda}{C}.$$

Если ρ – плотность материала, а *c* – его удельная теплоемкость, то

$C = c\rho$ (5)

$$K = \frac{\lambda}{c\rho}. \qquad (5)$$

Это уравнение связывает воедино физические параметры материала – его теплофизические характеристики. Именно эти характеристики (λ, *k*, и *C)*порознь, в совокупности и в различных комбинациях (в частности, в виде

$b = \sqrt{\lambda C}$) входят в расчетные формулы температурного поля, тепловых потоков, теплоаккумуляции и тепловых потерь.

Вследствие огромного разнообразия неметаллических материалов удобно сгруппировать их в несколько типов, каждый из которых будет объединять материалы, сходные по природе, по геометрическим особенностям или по способу их исследования.

1) Твердые капиллярно-пористые материалы (связанные). Этот тип объединяет большое количество изоляционно-строительных материалов по тому признаку, что они достаточно тверды и поэтому требуют специального методического подхода при исследовании тепловых свойств. К этому типу веществ относятся, например, мрамор, алебастровые плиты, кирпич, разного качества и обработки гипсы, известняк, бетоны, гранит, пробковая доска, целлулоид.

2) Насыпные материалы (зернистые). К этому типу веществ относятся изоляционные засыпки, мел, уголь, шлак, инфузорная земля, глины, зола, зернистый клинкер, пылевидный кокс, порошкообразная магнезия, накипь, опилки, сажа, пылевидный диатомит, гипс в порошке. Сюда же нужно причислить курортную грязь, почвы.

3) Волокнистые материалы. Методика исследования этих материалов должна отличаться от соответствующей методики для зернистых веществ. В данном случае, когда речь идет о волокнистой, чешуйчатой, пластинчатой структуре вещества, важно иметь представление о различных тепловых свойствах вдоль и поперек волокон. К материалам данного типа следует отнести льняное волокно, асбестовый войлок, волокнистый асбест, хлопок, дерево вдоль и поперек волокон и т.п.

4) Материалы в виде тонких слоев. Резиновые листы, слои мастики, всевозможные пленки и т.д. – все эти материалы можно объединить между собой, так как геометрическое сходство (малая толщина) требует специфических методов исследования теплофизических характеристик.

5) Почвогрунты, шахтно-рудные и закладочные материалы. Все эти вещества требуют специального подхода при определении теплофизических характеристик, так как их исследование должно производиться в полевых условиях, при наличии солнечного облучения, без нарушения структуры и без взятия пробы, при естественном сложении.

6) Замороженные материалы. Имеются ввиду такие вещества, как лед, снег, мерзлые грунты и т.п. При исследовании их тепловых свойств возникают специальные задачи, связанные с недопустимостью подтаивания вещества, а также с недопустимостью миграции влаги и водяных паров. Особое значение имеют исследования теплофизических характеристик этих материалов при весьма низких температурах и выяснение их зависимости от температуры в этой области.

5.5 Целью работы является обеспечение достоверности значений теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов, применяемых в расчетах при проектировании автомобильных дорог.

6 Процессы водно-теплового режим земляного полотна и основания дорожной одежды

6.1 Водно-тепловой режимхарактеризует закономерные изменения во времени влажности и температуры в разных местах земляного полотна и дорожной одежды.В течение года влажность, температура грунтов и материалов изменяются в зависимости от сезонных колебаний температуры воздуха, количества и характера атмосферных осадков.

Поскольку уровни годовых осадков и температурные изменения различны для разных климатических зон, характер водно-теплового режима в них тоже различен. В одной климатической зоне влажность грунтов земляного полотна и материалов дорожной одежды зависит от многих факторов: солнечной радиации, цвета покрытий, вида и характера грунтов, слагающих земляное полотно и находящихся под ним, степени их уплотнения, глубины уровня грунтовых вод, поперечных профилей (насыпь,

выемка и т.д.), отметок полотна, обеспеченности отвода поверхностных и грунтовых вод и т.д.

6.2 Водяной пар в грунтах,находящийся в насыщенном состоянии, в процессе перемещения конденсируется и переходит в жидкое состояние. Вода же в результате внутрипорогового испарения может переходить из жидкого в парообразное состояние иперемещается под действием давления, возникающего в пленках.

С увеличением влажности грунта водная пленка становится толще, поверхностное натяжение уменьшается, радиус кривизны пленки увеличивается. В результате этого давление паровоздушной смеси, сжимаемой жидкой влагой, повышается.

6.3 Механические свойства грунтов земляного полотна и материалов дорожной одежды с повышением влажности снижаются, особенно в I и II климатических зонах. Заметно изменяются свойства также у песков в дренирующих и морозоустойчивых слоях. С течением времени при поднятии капиллярной воды происходит оглеение песков. При потере дренирующих свойств песками в дополнительных слоях оснований снижается прочность дорожной одежды.

6.4В зимний период промерзание грунта вызывает в нем интенсивное перемещение влаги. К верхним слоям земляного полотна поднимается водяной пар. Поднимающаяся от уровня грунтовых вод капиллярная вода перемещает вверх пленочную рыхлосвязанную воду, находящуюся в свободном состоянии. Чем меньше скорость промерзания, тем больше в замерзающем грунте накапливается влаги, переувлажняющей верхнюю часть земляного полотна.При скорости промерзания менее 2 см/сут в центральных районах России обычно происходит значительное морозное пучение. Скорость промерзания земляного полотна зависит не только от погодно-климатических условий, но и от его поперечного профиля. В выемке скорость промерзания меньше, чем в насыпях. Наибольшее влияние на скорость промерзания оказывают погодно-климатические условия. В течение

года изменение температурного режима земляного полотна практически носит синусоидальный характер.

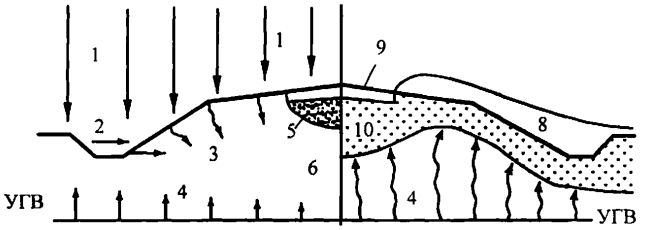
6.5 Чем больше в грунте пылеватых и особенно глинистых частиц, тем больше в нем содержится незамерзающей воды, которая влияет на величину морозного пучения.

6.6С уменьшением глубины залегания грунтовых вод морозное пучение увеличивается и на участках дорог третьего типа увлажнения (сырые места), оно достигает наибольшей величины. На этих участках дорожную одежду нужно рассчитывать из условий допустимого морозного пучения и она должна иметь большую прочность.

Теоретическую зависимость между величиной морозного пучения и толщиной морозоустойчивого слоя дорожной одежды Z\для различных грунтов при третьем типе увлажнения выражают в виде номограммы. С ее помощью можно рассчитать все необходимые параметры, используя контрольные скважины. Зная толщину дорожной одежды, можно предвидеть ее поведение в весенний период и определить коэффициент морозного пучения.

6.7 Водно-тепловой режим его в значительной степени зависит от вида и мощности источников увлажнения(рис. 1). На поперечном профиле дороги показаны: слева – виды увлажнения при положительной температуре года, справа – при отрицательной.

А **Б**



-m

1 - атмосферные осадки (жидкие); 2 - поверхностная вода; 3-вода, проникающая в земляное полотно; *4* - капиллярная вода; 5—парообразная вода; пленочная вода; 7 - грунтовые воды; *8* - снег; 9 - лед; *10* - замерзший грунт

Рисунок 1 – Виды увлажнения грунтов земляного полотна (слева — при положительной температуре, справа - при отрицательной)

6.8В теплый период грунт увлажняется за счет выпадения дождя, от стока поверхностных вод и проникания их в земляное полотно через откосы полотна и обочины.При высоком уровне грунтовых вод (менее 1 м от низа дорожной одежды) грунт может увлажняться капиллярной водой, поднимающейся от уровня грунтовых вод. В земляном полотне грунт под водонепроницаемой одеждой заполнен парообразной водой. Между частицами грунта может оказаться свободная вода, и тогда каждая частица грунта будет окружена пленочной водой. В зависимости от местных условий может преобладать и оказывать наибольшее влияние на грунт тот или другой вид увлажнения.

6.9В осенний период влажность грунтов земляного полотна повышается от большего количества атмосферных осадков, поверхностных вод и уменьшения испарения воды (холодная погода, воздух переувлажнен и т.п.). Во время похолодания и первых морозов водяные пары перемещаются от более теплых нижних слоев к более холодным поверхностным слоям земляного полотна. Начало зимнего периода характеризуется выпадением снега и замерзанием материалов дорожной одежды и грунтов. В целях обеспечения движения автомобилей в первую очередь удаляют снег с

проезжей части. Вследствие большей теплопроводности материалов дорожной одежды, чем покрытого снегом грунта, он замерзает сначала под дорожной одеждой (рис. 1).

6.10У границы промерзания конденсируется водяной пар, все поры грунта заполняются водой, вытесняющей воздух в нижние слои. Это происходит в зоне междуфазового перехода, в которой грунт имеет отрицательную температуру, а вода в его порах находится еще в жидком состоянии (рис. 2). Пленочная вода замерзает при минус 3°С и ниже, а капиллярная вода – при более низкой температуре, в зависимости от тонкости капилляров. Поэтому в зоне междуфазового перехода при температуре грунта ниже 0°С вода может находиться в жидком состоянии, и к ней поднимаются новые частицы водяного пара; конденсирующаяся вода заполняет все пустоты между частицами грунта, вытесняя воздух. По мере понижения температуры глубина промерзания увеличивается, и большая часть воды переходит в лед.

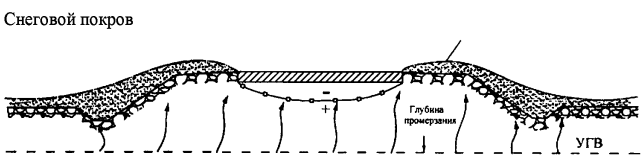
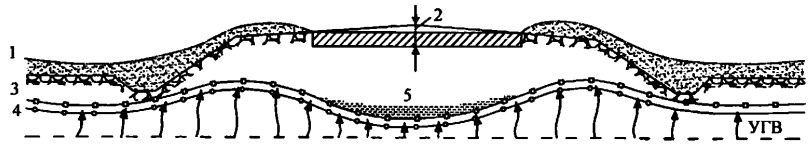


Рисунок 2– Начальный зимний период и промерзание грунтов земляного полотна, в первую очередь под дорожной одеждой

6.11. Если процесс промерзания происходит медленно и вода успевает заполнить все пустоты между частицами грунта, то при переходе в твердое состояние (лед) увеличивает объем замерзшей части земляного полотна ипроисходит пучинообразование. При этом осуществляется теплообмен за счет теплопроводности грунтов и фазовых превращений влаги. В зоне конденсации водяного пара тепло освобождается, а в зоне образования льда – поглощается (рисунок 3).

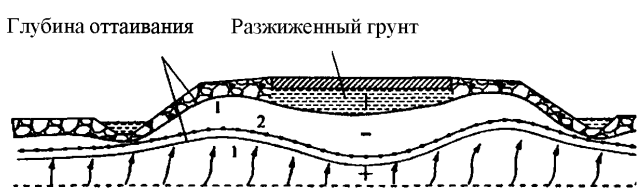


1 — высота снежного покрова; *2* — поднятие поверхности дорожной одежды в результате пучинообразования; *3* — глубина промерзания грунтов земляного полотна; *4* — глубина проникания отрицательной температуры; *3—4* — зона междуфазового перехода; 5 — линзы и прослойки льда

Рисунок 3– Земляное полотно в разгар зимнего периода

6.12. Возможность пучинообразования и его размеры зависят от пористости и степени влажности грунта. Если объем льдообразования вследствие морозного накопления влаги превзойдет объем воздуха в порах грунта, то объём грунта увеличится вследствие пучинообразования. Так как физико-механические свойства грунта земляного полотна неоднородны и поры заполняются водой и льдом неравномерно, то и промерзание будет неравномерным.

6.13. Весной грунт оттаивает в первую очередь под дорожной одеждой (рис. 4). В это время может прекратиться дальнейшее промерзание грунта, а затем постепенно начнется оттаивание его повсеместно. Оттаивание происходит как сверху, так и снизу промерзшего грунта. В тот период, когда грунт под дорожной одеждой оттаял на некоторую глубину, из-за переувлажнения модуль упругости его наименьший.

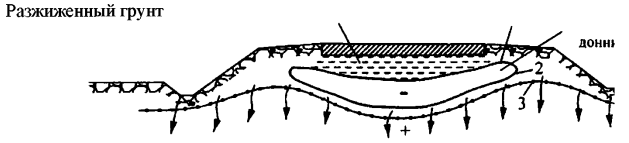


1-уровень оттаивания грунта; 2- глубина промерзания грунта

Рисунок 4–Начало оттаивания грунтов земляного полотна в весенний период

6.14. При повсеместном оттаивании грунта в центре земляного полотна остается на некоторое время неоттаявший блюдцеобразной формы массив

замерзшего грунта, называемый донником (рис. 5). Донник образуется за счет большей глубины промерзания земляного полотна под дорожной одеждой.



1 — линия оттаивания; *2* — наибольшая глубина промерзания; *3* — границы

Рисунок 5– Земляное полотно после повсеместного оттаивания грунтов с неоттаявшим донником

Тот период, в который грунт донника еще не оттаял, для автомобильного движения наиболее опасен, так как дорожная одежда оказывается расположенной на разжиженном грунте. После полного оттаивания донника грунт начинает высыхать.

Таким образом, использование закономерностей и представлений об основных схемах движения воды в верхней части земляного полотна под действием внешнего давления позволяет точнее определить объем воды, поступающей в дренирующий слой и назначить физически обоснованные конструктивные параметры.

7 Факторы, влияющие на теплофизические характеристики грунтов

Согласно принятым нормам СНиП [1], по особенностям физико-механических свойств среди вечномерзлых грунтов выделены сильнольдистые, засоленные и биогенные (заторфованные) грунты, твердомерзлые, пластичномерзлые и сыпучемерзлые грунты.

Необходимые для расчета оснований и фундаментов физические и деформационно-прочностные характеристики вечномерзлых грунтов

определяются, как правило, на основании их полевых или лабораторных испытаний. Характеристики грунта следует устанавливать для выделенных при изысканиях инженерно-геологических элементов на основании статистической обработки результатов экспериментальных определений в соответствии с учетом предусмотренного проектом состояния и температуры грунтов основания.

Согласно общим строительным нормам для оснований зданий и сооружений [2] основания должны рассчитываться по двум группам предельных состояний – по несущей способности и деформациям грунтов. Основными параметрами механических свойств грунтов, определяющими несущую способность оснований и их деформации, являются прочностные и деформационные характеристики грунтов (угол внутреннего трения j, удельное сцепление с, модуль деформации грунтов Е, предел прочности на одноосное сжатие скальных грунтов Rc и т.п.).

Для расчета вечномерзлых оснований помимо физических и механических характеристик грунтов, предусмотренных в строительных нормах [2], должны дополнительно входить:

а) физические и теплофизические характеристики мерзлых грунтов:

1) суммарная влажность мерзлого грунта и влажность мерзлого грунта между включениями льда;

2) суммарная льдистость мерзлого грунта и льдистость мерзлого грунта за счет включений льда;

3) степень заполнения объема пор мерзлого грунта льдом и незамерзшей водой;

4) влажность мерзлого грунта за счет незамерзшей воды;

5) температура начала замерзания грунта;

6) теплофизические характеристики грунта (теплопроводность и объемная теплоемкость);

7) теплота таяния (замерзания) грунта;

б) деформационные и прочностные характеристики грунтов для расчета мерзлых оснований по деформациям и несущей способности:

1) коэффициент сжимаемости мерзлого грунта;

2) расчетное давление и сопротивление мерзлого грунта или грунтового раствора сдвигу по поверхности смерзания;

в) деформационные характеристики грунтов для расчета оттаивающего основания по деформациям:

1) коэффициент оттаивания и сжимаемости оттаивающего грунта;

2) относительная осадка оттаивающего грунта;

г) характеристики грунтов слоя сезонного промерзания-оттаивания для расчета оснований и фундаментов на воздействие сил морозного пучения грунтов, а также характеристики мерзлых грунтов для расчета оснований на горизонтальные статические и сейсмические воздействия.

При необходимости следует определять и другие характеристики мерзлых грунтов, характеризующие особенности их состояния или взаимодействия с фундаментами:

-вид криогенной текстуры;

-коэффициент вязкости;

-эквивалентное сцепление;

-скорость вязко-пластического течения льда;

-негативное трение оттаивающего грунта

и другие.

Часть характеристик для различных грунтов можно определить по таблицам согласно СниП [1]. При этом можно выделить дополнительно следующие характеристики грунта:

а) степень засоленности грунта;

б) плотность сухого грунта (скелета грунта);

в) плотность талого и мерзлого грунта;

г) вязкость льда, определяемую из испытаний образцов льда на одноосное сжатие;

д)плотностьгрунта;

е) плотность мерзлого грунта;

ж) плотность частиц грунта;

и) коэффициент пористости мерзлого грунта;

При расчетах характеристик различных грунтов согласно СниП [1] также требуются:

а) расчетная среднегодовая температура вечномерзлого грунта;

б) средняя высота снегового покрова, м, принимаемая по метеоданным;

в) средняя плотность снегового покрова, т/м, принимаемая по метеоданным;

г) средняя скорость ветра в зимний период;

д) нормативные глубины сезонного оттаивания и промерзания;

е) средняя по многолетним данным температура воздуха за период отрицательных температур, °С, и продолжительность этого периода, ч;

ж) природное (бытовое) давление в грунте на уровне подошвы фундамента от веса вышележащих слоев грунтов (до отметки природного рельефа), кПа (кгс/см);

и) дополнительное (к природному) вертикальное давление на грунт под подошвойфундамента, кПа (кгс/см);

к) среднее давление на грунт под подошвой фундамента от постоянных и длительных долей временных нагрузок, кПа (кгс/см);

л) расчетный срок эксплуатации сооружения;

м) тепловое влияние сооружения.

7.1 Тепловое влияние сооружения

В работе [3] предложены типовые решения по основаниям и фундаментам для зданий при использовании вертикальных трубчатых сезоннодействующих охлаждающих систем малого диаметра.

На рис. 6 приведены среднезимние и среднелетние температуры воздуха в зоне трассы магистрального газопровода, который пересекает в

меридиональном направлении криолитозону Ямала, Полярного Урала и севера Республики Коми и проходит по многолетнемёрзлым породам (ММП) всех известных типов (ММП со сливающейся кровлей, высокотемпературная ММП, ММП с заглублённой кровлей, массивноостровная, островная и редко островная ММП). На рис. 7 представлены результаты расчета температур в грунте с использованием нестационарных уравнений теплопроводности.

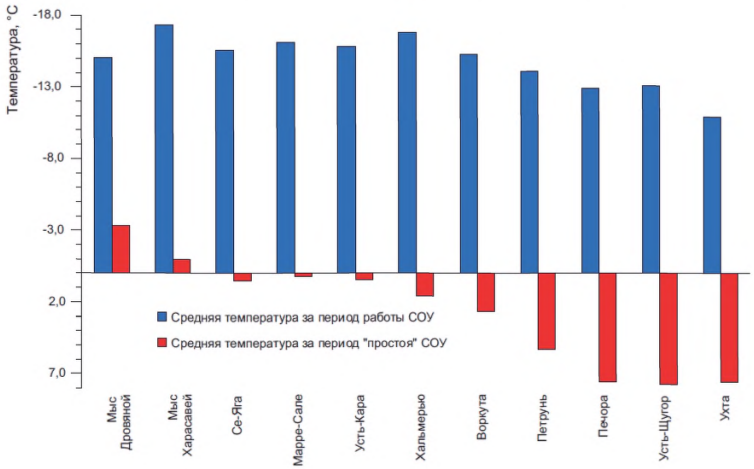


Рисунок 6 – Среднезимние и среднелетние температуры воздуха по данным метеостанций вдоль трассы системы магистральных газопроводов Бованенково-Ухта [3]

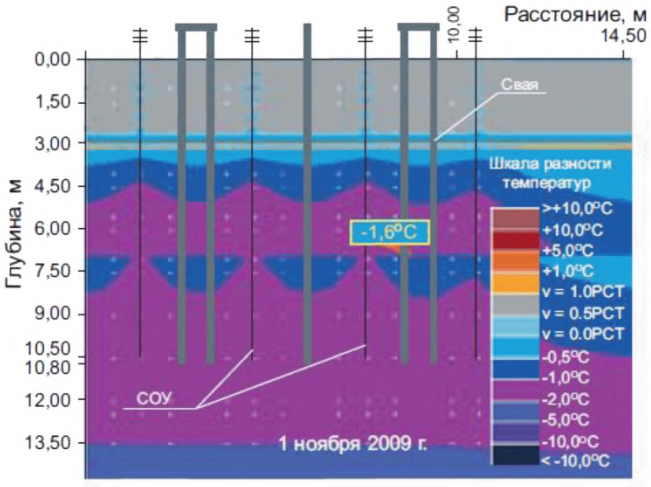
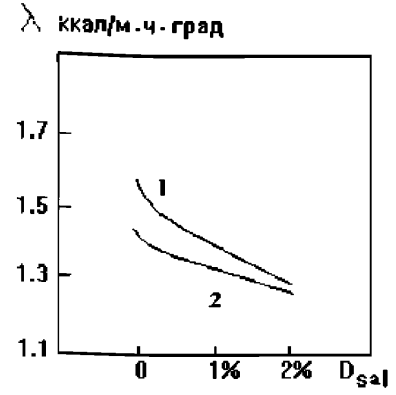


Рисунок 7 – Расчетное поле температур в грунте с применением сезонно охлаждающих устройств [3]

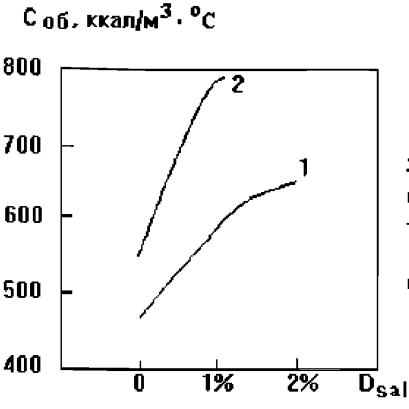
Численные модели дают достаточно слабую зависимость от теплофизических характеристик грунтов естественного основания, типа ММП и среднегодовой температуры окружающего воздуха и определяются в основном мощностью искусственного источника холода, плотностью установки вертикальных парожидкостных трубчатых систем и среднезимней температурой.

7.2 Влияние степени засоленности грунта

Влияние засоления на теплофизические свойства засоленных многолетнемерзлых пород неоднозначно. Это обусловлено совместным влиянием соотношения льда и незамерзшей воды, изменением теплопроводности порового раствора в зависимости от концентрации, температуры и других факторов [4]. По данным [4] коэффициент теплопроводности соответственно уменьшается с увеличением засоленности, а коэффициент теплоемкости увеличивается в указанном диапазоне концентраций (рисунок8).



Зависимость коэффициента теплопроводности λ от засоленности при - 3°С : 1 - мерзлый песок при W =0.2; 2-мерзлый суглинок при W =0.35.



Зависимость обьемной теплоемкости С об от засоленности при - 3°С : 1 - мерзлый песок при W = 0.2 ; 2 - мерзлый суглинок при W = 0.35.

Рисунок 8 – Некоторые теплофизические свойства засоленных многолетних грунтов [4]

При расчетах температурного состояния сооружений некоторых классов и их оснований, а также при выполнении предварительных теплотехнических расчетов расчетные значения теплофизических характеристик талых и мерзлых песков, супесей, суглинков, глин, заторфованных грунтов и торфа при наличии засоленности допускается принимать значения из таблиц по СНиП [5]. В табл. 1 приведены некоторые значения теплопроводности и теплоемкости искусственных насыпных грунтов в зависимости от концентрации при одинаковой суммарной влажности.

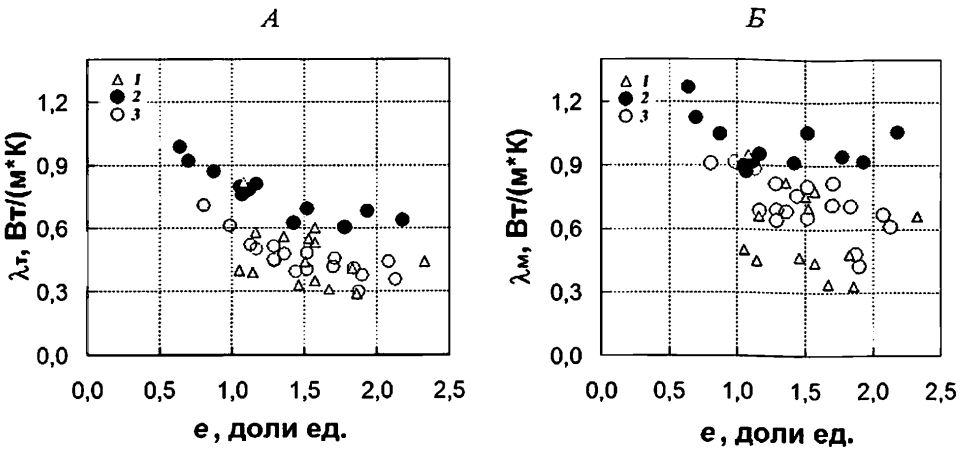
Таблица 1 –Значения теплопроводности и теплоемкости искусственных насыпных грунтов в зависимости от концентрации при одинаковой суммарной влажности

Концентрация порового раствора, т/м^3	Плотность сухого грунта, т/м^3	Суммарная влажность грунта, доли единицы	Теплопроводность грунта, Вт/(м×°С) [ккал/(м×ч×°С)]	Объемная теплоемкость грунта Дж/(м^3×°С)10^{-6} [ккал/(м^3×°С)]
			l_{th}	l_f
Засоление хлоридами Na				
0,04	1,80	0,13	0,99(0,85)	0,86(0,74)
0,16	1,80	0,13	1,14(0,98)	1,04(0,89)
0,26	1,80	0,13	1,08(0,93)	0,92(0,80)
Примечание – l_{th}; l_f – теплопроводность соответственно талого и мерзлого грунтов; C_{th}; C_f – объемная теплоемкость соответственно талого и мерзлого грунтов.				

7.3 Влияние пористости грунтов на теплопроводность

Влияние пористости грунтов на теплопроводность можно продемонстрировать на примере мерзлых пород в районе вулканов Камчатки на высотах от 1000 до 1500 м [5].

Влияние пористости представлено на рисунке9. При увеличении пористости теплопроводность понижается как в талом, так и в мерзлом состоянии. При этом четко прослеживается зависимость коэффициента теплопроводности от степени заполнения пор влагой Sr. При Sr>0,8 значения коэффициента теплопроводности выше, а при Sr = 0,4-0,6 – ниже. Самые низкие значения коэффициента теплопроводности получены для шлаков при Sr = 0,2-0,4.



Зависимости коэффициента теплопроводности от пористости (e) для исследуемых вулканических пород: 1 - шлаков, 2 и 3 - пеплов (2 - при S_r>0,8, 3 - при S_r = 0,4-0,6) в талом (А) и мерзлом (Б) состоянии [5]

Рисунок 9 – Зависимости коэффициента теплопроводности от пористости

7.4 Влияние глубины сезонных оттаивания и промерзания на пористость грунта

Коэффициент пористости мерзлого грунта e_M, доли ед., тесно связан с плотностью грунта в сухом виде $\rho_{СК,М}$ и плотностью частиц грунта ρ_S и его изменение при сезонном оттаивании-промерзании оказывает сильное влияние на теплопроводность и теплоемкость(6) [6]

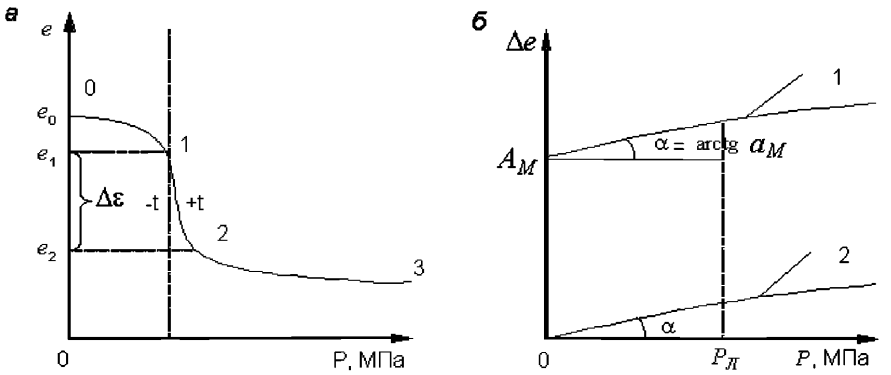
$$e_M = \frac{\rho_S - \rho_{СК,М}}{\rho_{СК,М}}; \quad (6)$$

В вертикальном разрезе многолетнемерзлых толщ выделяются слой суточных колебаний температур, слой годовых колебаний температур, зона вековых и зона эпохальных колебаний температур. При оттаивании мерзлых грунтов, с переходом льда в воду, резко снижается их прочность и увеличивается сжимаемость [7]. Происходит это в основном за счет значительного уменьшения сцепления оттаивающих грунтов, величина

которого определяется экспериментально методом шариковой пробы. Теплофизические параметры для талых и мерзлых грунтов отличаются [6].

При оттаивании мерзлых грунтов в них возникает два противоположных процесса: уплотнение, т.е. уменьшение пористости при отжатии талой воды, и набухание агрегатов, которое может обусловить при незначительной нагрузке на грунт увеличение его пористости. Однако наиболее характерным явлением, почти всегда имеющим место в реальных условиях, будет увеличение пористости при промерзании-оттаивании [7]. В этом случае происходит набухание агрегатов, ведущее за собой изменение, в том числе и теплофизических характеристик (рисунок 10).

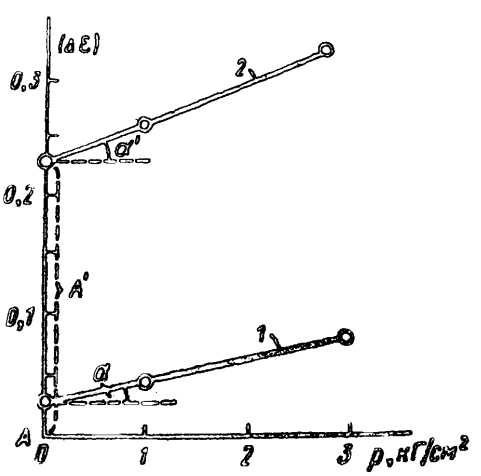
В случае уплотнения деформации, возникающие при оттаивании мерзлых грунтов, носят характер осадок или просадок. Осадки происходят в результате уплотнения оттаявшего грунта под нагрузкой, а просадки вызываются оттаиванием ледяных включений – сегрегационного льда. В последующем происходит доуплотнение грунта, обусловленное в основном ползучестью минерального скелета оттаявшего грунта. На компрессионной кривой (рисунок 10а) соответственно выделяются три характерных участка: 0–1 – уплотнение грунта в мерзлом состоянии; 1–2 – резкое изменение структуры грунта в момент просадки; 2–3 – доуплотнение грунта под нагрузкой. Скачкообразное уменьшение коэффициента пористости на участке 1–2, как показали экспериментальные работы [7], описывается зависимостью, которая при небольших давлениях имеет линейный характер.



а – компрессионная кривая мерзлого грунта при оттаивании; б – зависимость относительного сжатия от давления (1 – для оттаивающих и 2 – немерзлых грунтов)[7]

Рисунок 10 – Деформации оттаивающих грунтов под нагрузкой

Зависимость изменения пористости $\Delta\varepsilon$ оттаивающих грунтов от давления до 3 кг/см^2 строго линейна (рисунок 11).



1-песок 2- глина

Рисунок 11– Зависимость изменения пористости мерзлых грунтов при оттаивании от внешнего давления [7]

7.5 Влияние температуры начала замерзания грунта

Присутствие в мерзлых грунтах того или иного количества незамерзшей воды обусловливает зависимость их свойств от температуры. Tbf °С, характеризует температуру перехода грунта из талого в мерзлое состояние. Для незасоленных песчаных и крупнообломочных грунтов значение Tbf принимается по ГОСТ равным 0 °С. Температуру начала замерзания пылевато-глинистых, засоленных и биогенных (заторфованных) грунтов Tbf следует устанавливать опытным путем. Для предварительных расчетов мерзлых оснований значение Tbf допускается принимать по таблице 2 [1] в зависимости от вида грунта и концентрации порового раствора cps, доли единицы.

Таблица 2 – Температура начала замерзания грунта Tbf

Грунты	Температура начала замерзания грунта T_{bf}, °Спри концентрации порового раствора c_{ps}, доли единицы					
	0	0,005	0,01	0,02	0,03	0,04
Песчаные	0	-0,6	-0,8	-1,6	-2,2	-2,8
Пылевато-глинистые:						
супеси	-0,1	-0,6	-0,9	-1,7	-2,3	-2,9
суглинки и глины	-0,2	-0,6	-1,1	-1,8	-2,5	-3,2

7.6 Влияние миграции влаги вследствие неравномерности промерзания грунта

Исследования показывают, что важным процессом в промерзающих грунтах является перераспределение в них влажности вследствие миграции воды при промерзании.

Зависимость интенсивности миграционного потока влаги qwf к фронту промерзания от скорости промерзания vf для широкого диапазона представлена в работах [8; 9], где показано, что для каждого грунта имеется

своя оптимальная скорость промерзания vfопт , соответствующая максимуму qwf (рисунок 12).

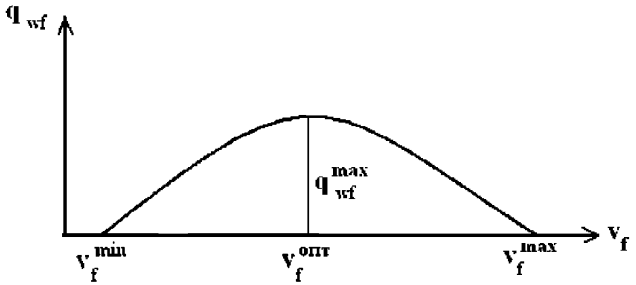


Рисунок 12– Зависимость миграционного потока воды от скорости промерзания грунта при минимальном расстоянии от уровня подземных вод Z = 0,1 м [9]

С увеличением или уменьшением vfотносительно vfопт значение qwf уменьшается. Диапазон оптимальной скорости составляет vfопт ≈0,6...1.0 мм/ч, ниже минимальной скорости промерзания, равной vfmin ≈0,02...0,04 мм/ч, процесса миграции нет, а выше максимальной скорости, равной vfmax ≈8...15 мм/ч пучение также отсутствует [9].

В работе [10] проведено численное исследование изменения влажности в промерзающих грунтах в зависимости от скорости промерзания основания за годичный цикл. При увеличении скорости промерзания с 0,03 до 0,07 м/сутки влажность у фронта промерзания увеличивается почти на 50 % (рисунок 13).

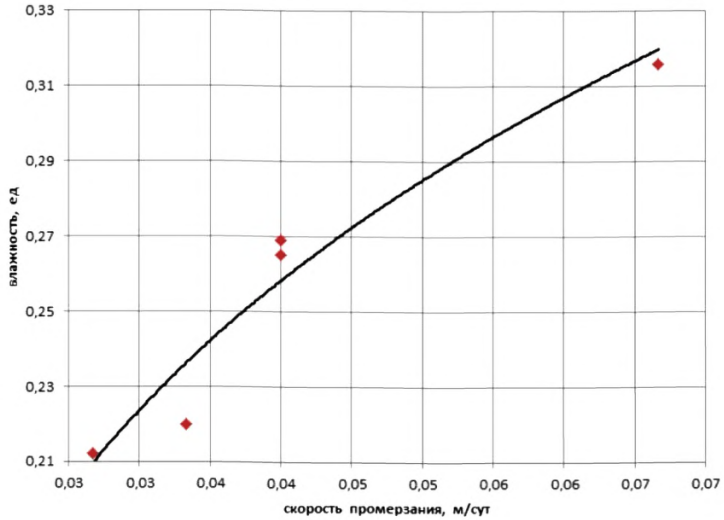
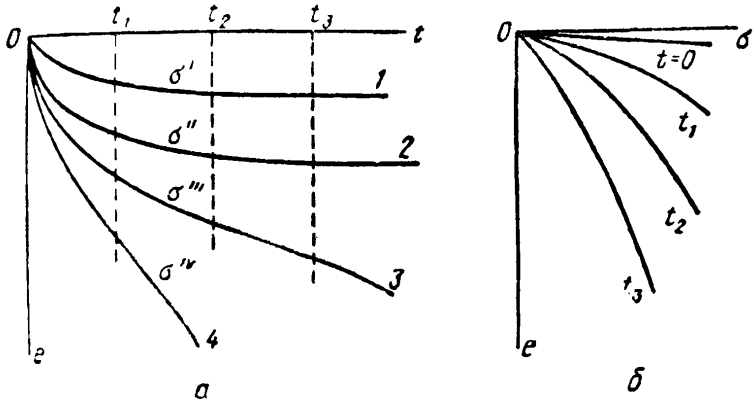


Рисунок 13 – Зависимость влажности грунта у фронта промерзания от скорости промерзания грунта [10]

7.7 Влияние среднего давления на пористость грунта

Мерзлые и вечномерзлые грунты являются телами, в которых напряжения и деформации, возникнув под действием внешней нагрузки, не остаются постоянными, а с течением времени меняются, обуславливая процессы релаксации и ползучести [7]. Следует рассматривать два класса ползучести: 1 – затухающую ползучесть и 2 – незатухающую ползучесть (рисунок 14).

В случае затухающей ползучести мерзлых грунтов преобладает процесс закрытия микротрещин, уменьшения свободных пустот и необратимые сдвиги частиц относительно друг друга. В результате пластично-мерзлые грунты под нагрузкой уплотняются. Это объясняется уменьшением пористости грунта в результате отжатия незамерзшей воды и воздуха.



а) кривые ползучести (1,2 –затухающей; 3,4 –незатухающей); зависимость между напряжением и относительной деформацией (е)

Рисунок 14 – Реологические зависимости для мерзлых грунтов при ступенчатомнагружении

Общая относительная деформация (рисунок 14е) приводит к изменению плотности и пористости среды. В работе [5] были проведены компрессионные испытания (давление 1,2 кг/см^2) образцов мерзлого суглинка с односторонним промораживанием при засоленности 1 % и температуре минус 2 °С (таблица 3). Изменение пористости и влажности при этом составляет до 30%.

Таблица3– Результаты компрессионных испытаний образцов мерзлого суглинка

№ образца	Время определения	Влажность W, д.е.	Плотность ρ, г/см^3	Засоленность D_{sal}, %	Пористость n, д.е.	Степень влажности G, д.е.
1	До опыта	0,48	1,43	1,0	0,64	0,74
	После опыта	0,31	1,90	0,28	0,46	0,97
2	До опыта	0,48	1,43	1,0	0,64	0,74
	После опыта	0,36	1,74	0,35	0,53	0,88
3	До опыта	0,48	1,50	1,0	0,62	0,77
	После опыта	0,37	1,80	0,31	0,51	0,95

Мерзлым грунтам под нагрузкой присуще также свойство релаксации (ослабление плотности), возникающее вследствие течения льда и снижающее прочность грунтов во времени [7].

8 Факторы, влияющие на теплофизические характеристики дисперсных материалов

Вообще изменение теплофизических характеристик системы происходит в основном в результате варьирования состояния системы, определяемого тремя факторами: пористостью, температурой и влажностью. Иными словами, когда избрана данная система с заданной структурой и химико-минералогической основой, имеется возможность крайне резким и существенным образом повлиять на величины ее теплофизических характеристик:

а) уплотнением или рыхлением системы;

б) нагреванием или охлаждением ее;

в) увлажнением или сушкой.

Не рассматривается влияние на теплофизические характеристики материалов структурно-механических факторов: размера, формы зерен и способов контактирования.

Эти факторы, определяющие состояние системы (плотная, рыхлая, влажная, сухая, горячая, холодная), могут быть заданы и широко варьироваться экспериментатором. Как при этом изменяются теплофизические характеристики, мы и попытаемся рассмотреть в данном разделе. Как и ранее, в качестве объекта будет избрана наиболее сложная из неметаллических материалов – дисперсная система.

Следует подчеркнуть, что, говоря о резкой зависимости теплофизических характеристик от факторов состояния системы, мы вовсе не отрицаем возможности рационального регулирования структурно-механических и химико-минералогических факторов. Такое регулирование вполне возможно, например, за счет примешивания к скелету системы

различных фракций частиц или цементирующих, балластных или иных связок. Но необходимо иметь в виду, что при этом меняется пористость системы и фактически создается новая система. Для данной же системы лишь пористость, температура и влажность – три фактора, способные привести на практике к желательным значениям теплофизических характеристик.

8.1 Влияние пористости дисперсного материала на его теплофизические свойства

Чудновский А.Ф. [63] предлагает следующие эмпирические формулы типа $\lambda = f(\gamma)$ для следующей классификации дисперсных материалов.

1) Неорганические сыпучие материалы зернистого строения (минимальный размер зерен 0-15 мм) (формула (7)

$$\lambda = 0{,}13\gamma + 0{,}016\gamma^2 + 0{,}022. \quad (7)$$

Формула (7) справедлива для материалов самой различной плотности 400-1800кг/м3 при средней температуре 25°С.

2) Неорганические связанные материалы ячеистого строения (8)

$$\lambda = 0{,}11\gamma^{1{,}1}1{,}68\gamma + 0{,}22. \quad (8)$$

Формула справедлива для обширного класса мелкопористых материалов (размер пор 0,5-2мм) в широком интервале плотностей 800-1800кг/м^3.

3) Неорганические связанные материалы смешанного строения (9)

$$\lambda = 0{,}0935\sqrt{\gamma}2{,}28^{\gamma}+0{,}025. \quad (9)$$

Формула (9) описывает зависимость $\lambda = f(\gamma)$ для бетонов.

Формула справедлива для материалов с плотностью 900-1800 кг/м^3 при комнатной температуре.

4) Неорганические рыхлые материалы волокнистого строения. Основным материалом, с которым проведено наибольшее число экспериментов, является минеральная и стеклянная вата.

Формула, предложенная для вычисления коэффициента теплопроводности ваты, учитывает лишь рост кривой $\lambda=f(\gamma)$и имеет следующий вид (10)

$$\lambda = 0{,}047 + 0{,}055(\gamma - 0{,}15) + 0{,}00015(\mathrm{M} - 10) + 0{,}0005(d - 3), \quad (10)$$

для стеклянной ваты имеет вид (11)

$$\lambda = 0{,}043 + 0{,}06(\gamma - 0{,}15) + 0{,}00025(d - 3), \quad (11)$$

где γ– объемный вес ваты в сухом состоянии в т/м^3;

M– содержание включений в процентах по весу;

d– средняя толщина волокон в микронах.

5) Неорганические рыхлые материалы волокнистого строения. Для области λ= 125-350 кг/м3 справедлива следующая формула (12)

$$\lambda = 0{,}804\gamma^2 - 0{,}618\gamma^3 - 0{,}0128\gamma + 0{,}025. \quad (12)$$

6) Органические связанные материалы волокнистого строения. Для них справедлива следующая формула (13):

$$\lambda = 0{,}136\gamma^2 - 0{,}072\gamma^3 - 0{,}097\gamma + 0{,}022 + A\gamma^n. \quad (13)$$

Эта формула пригодна для материалов грубоволокнистой (A=0,052; n=0,55), средневолокнистой (A=0,027; n=0,7), тонковолокнистой (A=0,0073; n=0,8) структур и для древесины поперек волокон (A=0). В этом случае сходимость опытных данных разных авторов хорошая, средняя кривая $\lambda = f(\gamma)$ из их данных отражает характер формулы.

8.2 Влияние влагосодержания дисперсного материала на его теплофизические характеристики

Учет влажности дисперсного материала при количественной оценке его теплофизических характеристик представляет собой сложную задачу, поскольку требуется рассмотрение процесса теплопередачи уже в трехфазной (вместо двухфазной) системе. Попытки теоретического рассмотрения вопроса реализованы на основе тех же модельных схем, о которых говорилось выше. В первую очередь следует назвать теорию электротепловой аналогии, которая распространяется на смешанное тело, состоящее из твердых зерен, воздушных пор и окружающей их водной среды. При этом возможны три варианта вычислений.

1) Доля пор относительно велика по сравнению с зернами основного костяка системы. В этом случае влага + зерна рассматриваются как некоторая общая среда по отношению к порам. Среднее значение коэффициента теплопроводности подобной системы может быть вычислено по формуле Эйкена (14)

$$\lambda = \lambda_2 \frac{2p_{3,1}\left(1-\frac{\lambda_2}{\lambda_{3,1}}\right)}{2\frac{\lambda_2}{\lambda_{3,1}}+1} : \left[1-\frac{p_{3,1}\left(1-\frac{\lambda_2}{\lambda_{3,1}}\right)}{2\frac{\lambda_2}{\lambda_{3,1}}+1}\right]. \quad (14)$$

Индексы 1, 2, 3 относятся к зернам, порам и влаге, а значок «3,1» относится к общей массе влага+зерна.

2) Доля пор и зерен почти одинакова в системе. При этом справедлива формула (15)

$$\lambda = \lambda_3 \frac{1+2p_1\left(1-\frac{\lambda_3}{\lambda_1}\right)}{2\frac{\lambda_3}{\lambda_1}+1} - p_2 : \left[\frac{1-p_1\frac{1-\lambda_3}{\lambda_1}}{2\frac{\lambda_3}{\lambda_1}+1+\frac{p_3}{2}}\right]. \quad (15)$$

3) Доля зерен относительно велика, по сравнению с порами, влага+поры образуют относительно скелета квазиоднородную среду. Соответственно этому следует применить формулу (16)

$$\lambda = \lambda_1 \frac{(1-p_{3,2})}{1+\frac{p_{3,2}}{2}}, \quad (16)$$

где $p_{3,2}$ – относительный объем, приходящийся на общую среду влага+поры.

Кроме того утверждается, что при малом влагосодержании коэффициент теплопроводности воды мало влияет на теплопроводность всей системы. По существу, задача сводится к рассмотрению двухфазной системы: зерна-влага, причем у точек контакта образуется водяное кольцо радиуса r, а сферическая поверхность частицы (радиуса R) заменяется поверхностью, охватывающей данную сферу в виде параболоида вращения, ось которого проходит через центр частицы. Все упрощения позволяют дать следующую формулу (17) для влажности материала

$$\omega_в = \frac{9}{8} * \frac{p_3}{p_1} \left(\frac{r}{R}\right)^4. \quad (17)$$

Здесь p_3 и p_1 – соответственно плотность влаги и материала зерен. Формула, используемая для расчетов коэффициента теплопроводности, имеет следующий вид (18)

$$\lambda = \lambda_1 \sqrt{\frac{\pi^2 p_1}{16 p_3} * \omega_в}. \quad (18)$$

Соотношение (18) справедливо при условии $\frac{r}{R} \leq 1$. Однако имеются основания считать, что при малой степени увлажнения материала имеет место более сильная зависимость$\lambda = f(\omega)$, чем та, которая дается формулой (18).

Зависимость величины δ_ω от объемного веса представлена в виде формулы (19)

$$\delta_\omega = 8{,}0 \left(\frac{1}{\gamma^{0,3} * 5{,}7^\gamma} + 1\right). \quad (19)$$

Формула (19) справедлива для группы ячеистых мелкопористых материалов в интервале γ =0,4-1,2 т/м³.

Влияние размеров зерен на ход функции$\delta_\omega = f(\gamma)$вполне закономерно и для тех же материалов можно написать формулу (20)

$$\delta_\omega = 8{,}0\left(\frac{1}{\gamma^{0{,}3}*5{,}7\gamma}+1\right)+7{,}12(d-0{,}14)^{0{,}8}*0{,}05^{\gamma} \qquad (20)$$

Для ячеистых материалов в пределах указанной плотности, вплоть до 15 %-20 % объемной влажности и с содержанием частиц диаметром 0,45-1,87 мм, можно рекомендовать формулу (21) для расчета коэффициента теплопроводности:

$$\lambda_\omega = \lambda_c\left(1+\frac{\omega\delta_\omega}{100}\right). \qquad (21)$$

где λ_c – коэффициент теплопроводности сухого мелкопористого материала, определяемый по формуле (7).

Величина δ_ω находится по формуле (20).

Формула (22) для вычисления теплопроводности дерева, как функции влажности, в виде:

$$\lambda'' = \lambda'[1+0{,}01(\omega_в'' - \omega_в')], \qquad (22)$$

где λ'' и λ' – коэффициенты теплопроводности дерева при весовой влажности $\omega_в''$ и $\omega_в'$.

Конечно, нельзя предложить общей формулы для всех типов почв в силу их большого разнообразия. Однако для некоторых типов расчетные зависимости$\lambda = f(\omega)$могут быть предложены. Так для болотистых почв предлагается соотношение (23)

$$\lambda = \lambda_{6^oC} + N(\omega - 10), \qquad (23)$$

где λ_{6^oC} – коэффициент теплопроводности почвы при температуре 6 °С, а N=$(1:7)*10^{-5}$.

Б.Н.Кауфман получает семейство кривых $\delta_\omega = f(\omega)$, на основании которых делает следующий вывод о характере изменения $\delta_\omega = \frac{\partial\lambda}{\partial\omega}$: :

1) δ_ω тем больше, чем больше объемный вес материала;

2) δ_ω не изменяется до той степени влагосодержания, которая соответствует переходу влаги из внутрезерновых в междузерновые поры; при последующем увлажнении коэффициент теплопроводности резко уменьшается;

3) линейность в ходе кривой$\lambda = f(\omega)$простирается для зерновых материалов до влажности 15 %-20 %, которая в строительном деле редко имеет место; общий характер зависимости $k = f(\omega)$ таков: с увеличением влажности коэффициент температуропроводности сначала растет, достигает максимума, затем падает, стремясь в некоторых случаях к постоянному значению.

Чем выше влажность почвы, тем больше ее удельная теплоемкость и температуропроводность. Кроме того, с увеличением влажности при некотором значении последней, характерном для данного типа почв, происходит уменьшение удельного объема. Таким образом, в известном интервале влажности вполне вероятно постоянство$k = f(\omega)$, ибо теплопроводность растет с увеличением плотности и удельной теплоемкости. Дальнейшее понижение температуропроводности с увеличением влажности может быть объяснено тем, что теплопроводность материала при этом будет иметь затухающее значение, приближающееся к значению теплопроводности воды. С увеличением влажности почвы появившиеся вначале тонкие, а потом все более утолщающиеся водные пленки начинают играть роль водяных мостов, по которым тепло быстро распространяется от одной частицы к другой, а, следовательно, значения λ и kначинают расти.

На характер зависимости$\lambda = f(\omega)$влияет ряд факторов:

а) плотность или пористость;

б) крупность зерен;

в) природа материала.

Чем материал мелкодисперсней, тем его теплопроводность ниже. Следовательно, имеют смысл только лишь те величины λ и k, для которых указаны влажность, пористость, механический состав или дисперсность. При одинаковых влажностях и пористостях существенное значение имеет дисперсность материала, обуславливающая специфическую для материала степень связности скелета с влагой.

Общие выводы относительно характера зависимости$\lambda = f(\omega)$.

Выводы, полученные для почвенного материала, имеют большое значение и могут быть распространены на все другие порошкообразные и зернистые материалы.

1) В зависимости от крупности зерен все дисперсные материалы могут быть разделены на три группы: крупно-, средне-, и мелкодисперсные. С увеличением влажности теплопроводность этих групп материалов увеличивается в линейной зависимости, причемтемп этого возрастания тем больше, чем зерна вещества крупнее.

2) При дальнейшем увлажнении материала, начиная с определенной степени увлажнения его, рост теплопроводности либо затухает (крупнозернистые вещества), либо, наоборот, становится сильно выраженным (мелкозернистые вещества), либо, наконец, продолжает подчиняться линейной зависимости (среднедисперсные вещества).

3) Наблюдается на опыте многих строительных и изоляционных материалов линейное изменение теплопроводности с изменением влажности, что вполне закономерно, с точки приводимого здесь объяснения, поскольку речь идет о невысоких влажностях и о материалах среднедисперсной структуры.

4) В пределах каждой из трех групп материалов в довольно широких пределах изменения степени зернистости характер зависимости коэффициента теплопроводности от влажности сохраняется одинаковым.

Обработкой большого числа экспериментальных данных Б.Н. Кауфман получил формулы (объемный вес выражен в г/см^3 или, что то же самое, в т/м^3), пригодные для ряда важных материалов.

Для неорганических связанных материалов ячеистого строения (24)

$$\delta_\omega = 8{,}0\left(\frac{1}{\gamma^{0{,}3}5{,}7^\gamma}+1\right)+7{,}12(d-0{,}14)^{0{,}8}*0{,}05^\gamma. \quad (24)$$

Для неорганических связанных материалов зернистого строения (25)

$$\delta_\omega = 5{,}8\left(\frac{1{,}78}{\gamma^{0{,}3}13^\gamma}+1\right)+1{,}48(d-0{,}06)^{0{,}9} \quad (25)$$

в интервале $\omega_{об}$ = 0÷ 15 – 20 % и для зерен некристаллической структуры.

Для неорганических связанных материалов смешанного строения (26)

$$\delta_\omega = A\,\gamma^2 - B\,\gamma + C \quad (26)$$

для трамбованных бетонов А=1,15; В=6,05; С=14,3, а также для естественных каменных материалов, песчаника, вулканического туфа и силикатного кирпича при $\omega_{об}$ =10 – 15%; для штыкованных бетонов А=1,1; В=7,3; С=18,3.

Для неорганических рыхлых материалов волокнистого строения (27)

$$\delta_\omega = \frac{1}{\gamma} \quad (27)$$

(для стеклянной и минеральной ваты до δ_ω = 10%).

Для органических рыхлых материалов волокнистого строения (28)

$$\delta_\omega = 96\gamma^{1{,}5} - 100\gamma + 20 \quad (28)$$

(крошка торфяная, сечка соломенная, опилки древесные, шелуха рисовая, костра льняная, лузга подсолнечная при$\omega_{об}$до 15 %-20 %).

Для органических связанных материалов волокнистого строения (29)

$$\delta_\omega = \frac{5{,}1}{\gamma^{0{,}3}4{,}25^\gamma}+\frac{B}{\gamma}, \quad (29)$$

где В=1,5 для материалов грубоволокнистой структуры (соломит, фибролит);

В=1,05 для материалов средневолокнистой структуры;

В=0,35 для материалов тонковолокнистой структуры (целотекс, древесноволокнистая плита и т. п.);

В=0 для древесины поперек волокон.

В случае сложных многофазных систем у обеих компонент системы коэффициент теплопроводности растет с увеличением температуры.

Теплопроводность в кристаллах понижается с увеличением примесей. Теплопроводность тел в твердом состоянии больше, чем в жидком.В жидком состоянии теплопроводность выше, чем в газообразном. Иными словами, теплопроводность в значительной степени зависит от структуры материала. Структурно более организованные материалы обнаруживают большую теплопроводность.

На основе большого экспериментального материала Б.Н.Кауфман предлагает эмпирические формулы, учитывающие влияние обоих факторов (размера зерен и объемного веса) на теплопроводность трех основных типов материалов:

-зернистых (30):

$$\delta_{\text{Т}} = 0{,}0065(2{,}45^{\gamma} + 1) + 0{,}095(d - 0{,}66)^{1{,}1}, \quad (30)$$

-ячеистых (31):

$$\delta_{\text{Т}} = 0{,}0065(1{,}7\gamma^2 + 1) + 0{,}0105(d - 0{,}14)^{0.9} * 0{,}55^{\gamma}, \quad (31)$$

-волокнистых (32):

$$\delta_{\text{Т}} = 0{,}085\left[2{,}55\gamma^2 + 1{,}6\gamma + 0{,}0325(d - 3)^{0.8} * \frac{0.325}{\gamma}\right] + 1 \quad (32)$$

Все формулы пригодны для интервала температур 25°С -300°С и охватывают лишь комплекс неорганических материалов.

9 Определение теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов

9.1 Обоснование выбора приборов, обеспечивающих достоверные результаты измерения теплофизических характеристик материалов дорожных одежд и глинистых грунтов земляного полотна

В настоящее время к теплофизическим свойствам и характеристикам веществ относят порядка 70 физических величин. Для оценки

эксплуатационных показателей материалов дорожных одежд и глинистых грунтов земляного полотна рассматриваются такие характеристики, как:

-удельная теплоемкость с, Дж/(кг·К);

-объемная теплоемкость сρ, Дж/($м^3$·К) (ρ- плотность вещества, кг/$м^3$);

-теплопроводность λ, Вт/(м·К);

-коэффициент температуропроводности а=λ/сρ, $м^2$/с.

9.1.1 Удельная (объемная) теплоемкость

9.1.1.1 Измерение удельной теплоемкости дорожно-строительных материалов регулируется ГОСТ 23250-78 «Материалы строительные. Метод определения удельной теплоемкости». Стандарт распространяется на строительные материалы и устанавливает метод определения их удельной теплоемкости в диапазоне температур от плюс 20 °С до 100°С. Метод определения удельной теплоемкости основан на измерении количества теплоты, отданной калориметру образцом известной массы, нагретым до заданной температуры.

Данный метод является определяющим в следующем действующем нормативном документе – СТО 218.3.001-2006 [12].

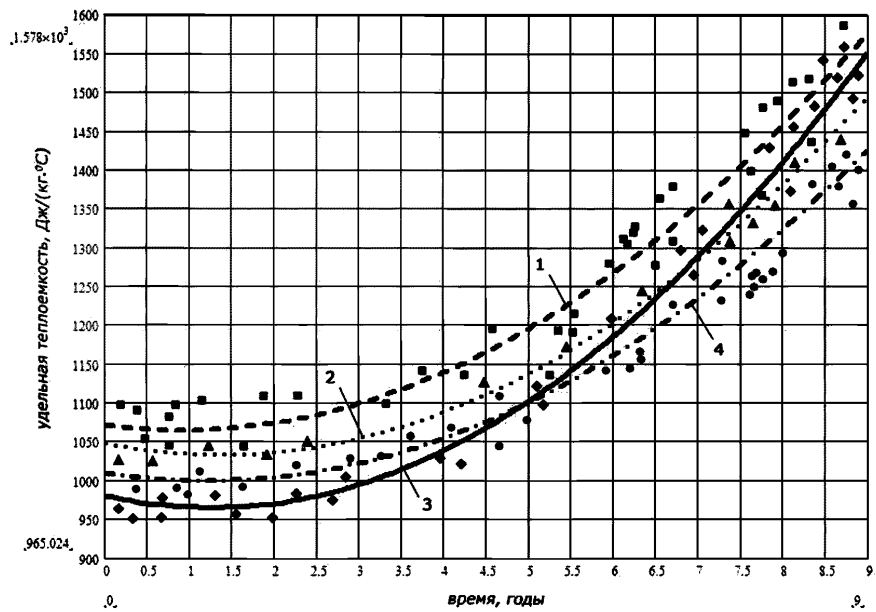
9.1.1.2 Метод является лабораторным. Применим как для сплошных, так и сыпучих веществ. Сплошные вещества перед измерением должны быть измельчены; измельченное вещество засыпается и утрамбовывается в специальную измерительную капсулу. Методика требует высушить исследуемое вещество перед измерением. Требование сухости связано с необходимостью утрамбовывать образец в капсуле, а также малой допустимой массой исследуемого вещества (порядка 5 г).

9.1.1.3 Относительная погрешность определения удельной теплоемкости по данной методике не превышает 5 %. Данная погрешность является минимальной для всех табличных значений удельной теплоемкости, приведенных в строительных справочниках.

В работе Завьялова [13] приведены результаты экспериментального определения значений удельной теплоемкости материала дорожного

асфальтобетонного покрытия в течение его жизненного цикла. Пределы удельной теплоемкости от времени принимают значения от 975 до 1578 Дж/(кг·°С), в зависимости от условий эксплуатации дорожного покрытия и типа асфальтобетона.

9.1.1.4 Величина удельной теплоемкости может являться феноменологическим параметром для определения обоснованных сроков ремонтных мероприятий. Зависимость теплоемкости от времени очень сильная (за 5 лет на 15 %) и легко может быть диагностирована (рис. 15).

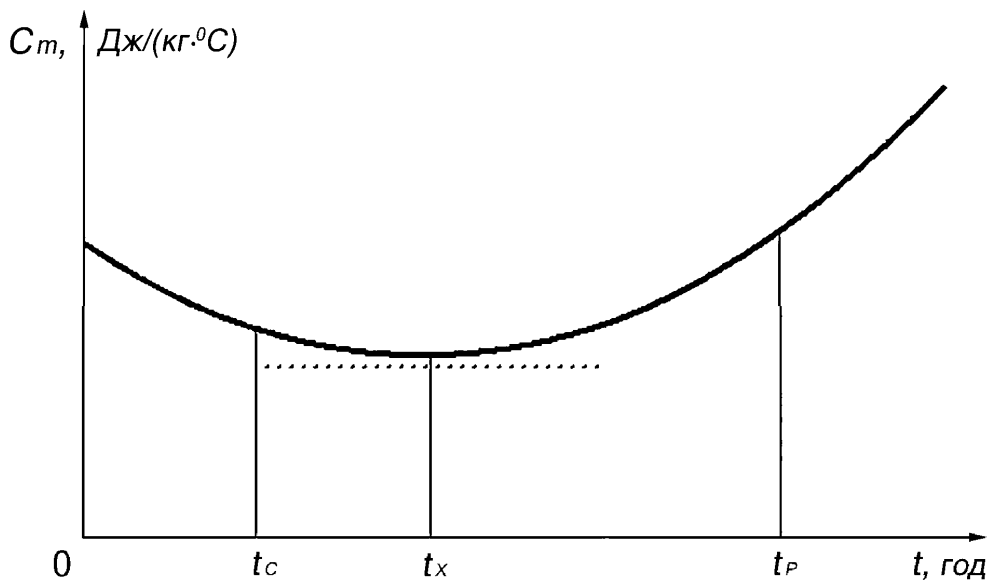


1 – крупнозернистый пористый асфальтобетон марки II (категория дороги I-Б, интенсивность движения 7-10 тыс. авт./сутки); 2 – мелкозернистый плотный асфальтобетон типа А, марки I (категория дороги I-Б, интенсивность движения 15-20 тыс. авт./сутки); 3 – мелкозернистый плотный асфальтобетон типа Б, марки I (категория дороги I-А, интенсивность движения >20 тыс. авт./сутки); 4 – мелкозернистый плотный асфальтобетон типа Б, марки I (категория дороги II, интенсивность движения 5-7 тыс. авт./сутки)

Рисунок 15 – Зависимость удельной теплоемкости от времени эксплуатации дорожного покрытия [13]

9.1.1.5 Исследование характера полученных зависимостей и сопоставление их с экспериментальными данными и визуальными наблюдениями позволили автору работы [13] сделать следующее

заключение: время начала выполнения ремонтных работ tp дорожного асфальтобетонного покрытия определяется моментом утраты квазилинейности графиками функции удельной теплоемкости от времени эксплуатации покрытия (рисунок 16). При этом в начальный период эксплуатации дорожного асфальтобетонного покрытия вследствие продолжающихся процессов формирования структуры асфальтобетона происходит увеличение плотности асфальтобетона в покрытии и удельная теплоемкость убывает (рисунок 16).



Пунктирной линией обозначена продолжительность этапа завершения строительства и начального периода эксплуатации; tc – момент времени завершения строительства; tx – момент времени неравновесного стационарного состояния материала асфальтобетона, при котором величина удельной теплоемкости достигает минимума; tp – время начала ремонта дорожного покрытия

Рисунок 16 – Характер зависимости удельной теплоемкости асфальтобетона Cm от времени t жизненного цикла дорожного покрытия

9.1.1.6 Зависимость теплофизических характеристик дорожного полотна от времени можно использовать для создания мобильного

контроллера, который фиксирует изменение поверхностнойтемпературопроводности дорожного асфальтобетонного покрытия [14]. Работа [14] защищена патентом [15] (рисунок 17).

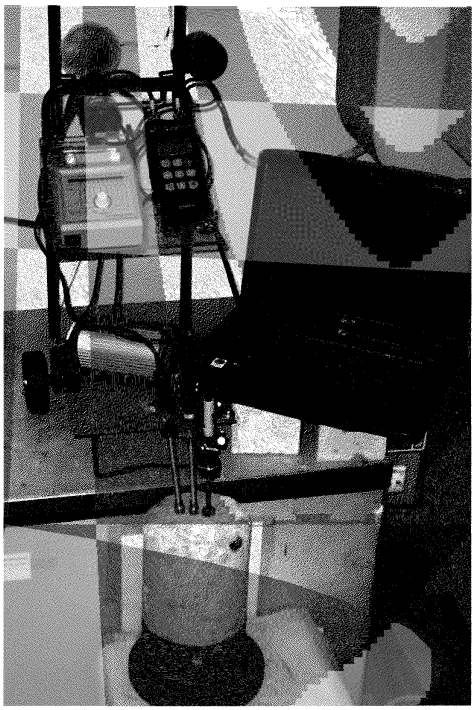


Рисунок 17 – Общий вид прибора: мобильного контроллера

9.1.1.7 Значения удельной теплоемкости необходимы также для проведения расчетов в задачах прогнозирования теплофизических режимов технологии дорожного строительства [16]. Данные расчеты становятся все более актуальными, так как качество большинства технологических процессов принципиально определяется их теплофизическим режимом. В условиях неопределенности теплофизического режима возникает риск утраты требуемого качества или простоя, что приводит к существенному повышению себестоимости работ. Так, например, из-за температурной

неоднородности асфальтобетонных смесей при укладке недоуплотняется около 10 % площади слоя. Согласно данным СибЦНИИСа, по результатам прогнозирования влажностного режима грунтовых резервов на стадии разработки проекта производства работ, удается повысить выработку до 50 % и снизить себестоимость работ более чем на 20 %.

9.1.1.8 Оценка влияния погрешности определения теплофизических свойств грунта на распределение температуры в его массиве определена в работе [17]. Было проведено моделирование теплового режима в системе фундамент-грунт при различных значениях теплофизических свойств. Показана сильная зависимость определения возможной зоны промерзания от принятых значений теплофизических свойств грунта (в частности, теплоемкости).

9.1.1.9Таким образом, можно констатировать, что современное дорожное строительство все больше отходит от типовых схем, требуя непосредственной оценки свойств материалов и грунта на месте строительства. При этом учитываются особенности состава и фактуры материалов, применяемых и используемых на данном конкретном объекте.

9.2 Теплопроводность

9.2.1 Стандартные методы измерения теплопроводности дорожно-строительных материалов и грунтов

В настоящее время в дорожной отрасли действуют следующие стандартные методы измерения теплопроводности дорожно-строительных материалов [18].

9.2.1.1 Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом

Регламентируется ГОСТ 30256-94 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом». Стандарт распространяется на строительные материалы и изделия теплопроводностью от 0,01 до 2 Вт/(м К) и устанавливает метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом при нестационарном тепловом

режиме в диапазоне температуры 90-573 К, основанный на зависимости температуры внедренного в материал нагреваемого тела (цилиндрического зонда) от теплопроводности окружающего зонд материала.

Данный метод является определяющим в следующем действующем нормативном документе [20].

Погрешность метода определения теплопроводности при доверительной вероятности 0,9 составляет 7 %.

Метод применим как в лабораторных, так и полевых условиях (передвижные лаборатории). Недостаток метода – «разрушение» целостности образца, необходимое для установки зонда. Основная методическая погрешность связана с проблемой обеспечения хорошего теплового контакта материала образца и зонда.

9.2.1.2 Импульсный метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем

Регламентирующий документ ГОСТ 30290-94 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем». Стандарт распространяется на строительные материалы и изделия теплопроводностью от 0,02 до 1 Вт/(м·К) и устанавливает метод неразрушающего ускоренного определения теплопроводности в интервале температур 278-313 К (5 °С - 40 °С). Метод заключается в создании одностороннего кратковременного теплового импульса на поверхности изделия и регистрации изменения температуры на этой поверхности. Стандарт не распространяется на многослойные изделия.

Метод применим как в лабораторных, так и полевых условиях (передвижные лаборатории). Особенности метода: изделия должны иметь плоскую поверхность для размещения первичного преобразователя и обеспечения теплового контакта между ними. Допускается определять теплопроводность на изделиях правильной и неправильной формы. Количество изделий, отбираемых для испытания, устанавливают в нормативных документах на эти изделия, но не менее трех. Измерения

проводят не менее чем на пяти участках поверхности исследуемого изделия, в том числе на участках с неоднородными по теплопроводности включениями. Погрешность определения теплопроводности данным методом составляет не более 7 .

9.2.1.3 Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме

Регламентируется ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме». Стандарт распространяется на строительные материалы и изделия для определения их эффективной теплопроводности и термического сопротивления при средней температуре образца от минус 40 °С до плюс 200 °С. Стандарт не распространяется на материалы и изделия с теплопроводностью более 1,5 Вт/(м·К).

Стандарт устанавливает метод определения термического сопротивления и эффективной теплопроводности с помощью прибора, оснащенного тепломером. Сущность метода заключается в создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины и направленного перпендикулярно к лицевым (наибольшим) граням образца, измерении плотности этого теплового потока, температуры противоположных лицевых граней и толщины образца.

В настоящем стандарте установлены требования к образцам, прибору и его градуировке, приняты две основные схемы испытания: асимметричная (с одним тепломером) и симметричная (с двумя тепломерами).

Данный метод является определяющим в следующих действующих нормативных документах [27]-[33].

Особенности метода:

-эффективную теплопроводность или термическое сопротивление определяют в среднем на пяти образцах;

-жесткие образцы, имеющие разнотолщинность и отклонения от плоскостности, шлифуют;

-измеряют теплопроводность высушенного материала;

-допускается испытание влажного образца при температуре холодной лицевой грани более 273 К и перепаде температуры не более 2 К на 1 см толщины образца.

Средний размер включений (гранулы заполнителя, крупные поры и т.п.), отличных по своим теплофизическим показателям от основного образца, должен составлять не более 0,1 толщины образца.

Допускается испытание образца, имеющего неоднородные включения, средний размер которых превышает 0,1 его толщины. Метод позволяет измерять теплопроводность сыпучих веществ. Толщина образца насыпного материала должна быть не менее чем в 10 раз больше среднего размера гранул, зерен и чешуек, из которых состоит этот материал. В протоколе испытания должен быть указан средний размер включений.

Максимальное избыточное давление, создаваемое на испытываемый образец, должно быть не более 2,5 кПа, минимальное – 0,5 кПа.

Относительная погрешность определения эффективной теплопроводности и термического сопротивления по данному методу не превышает ±3 %, если испытание проведено в полном соответствии с требованиями настоящего стандарта.

Метод является лабораторным, требует высокой квалификации персонала и наиболее приспособлен для измерения теплопроводности теплоизоляции.

Основные характеристики стандартных методов приведены в табл. 4.

Таблица 4 – Основные характеристики стандартных методов измерения теплопроводности

	ГОСТ 30256-94	ГОСТ 30290-94	ГОСТ 7076-99
Ключевые слова	Нестационарный тепловой режим. Нагреваемый цилиндрический зонд	Импульсный тепловой поток. Поверхностный преобразователь	Стационарный тепловой поток. Тепломер

Диапазон теплопровод-ности материала	от 0,01 до 2 Вт/(мК)	от 0,02 до 1 Вт/(м К)	не более 1,5 Вт/(м К)

Окончание таблицы 4

Диапазон температур	90-573 К (-183 ÷ 200 °С)	278 - 313 К (+5 ÷ 40 °С)	233 – 293 К (-40 ÷ 200°С)
Требование сухости образца	Нет	Нет	Да
Сыпучие образцы	Да	Да	Да
Разрушение целостности образца	Да	Нет	Нет
Погрешность метода, %	Более 7	Не более 7	Не превышает 3, при строгом соблюдении условий
Полевые условия (передвижная лаборатория)	Да	Да	Да

Как видно из таблицы 4, измерение влажных материалов в широком диапазоне температур может быть выполнено преимущественно методом цилиндрического зонда с разрушением целостности образца. Погрешность метода высока – порядка 7 %.

Следует отметить довольно узкий диапазон допустимых значений теплопроводности: до 2 Вт/(м·К). Если рассмотреть диапазон изменения теплопроводности материалов, используемых в дорожном строительстве (например, согласно справочным данным, приведенным в ОДН 218.046-01, Таблица 2.1), можно заметить, что предел в 2 Вт/(м·К) является недостаточным (Таблица 5).

Таблица 5 –Теплофизические характеристики конструктивных слоев из различных дорожно-строительных материалов

Материал, грунт	Плотность ρ, кг/м^3	Коэффициент теплопроводности λ, Вт/(м·К)
Асфальтобетон горячий плотный	2400	1,40

То же, пористый	2300	1,25
То же, высокопористый, в том числебитумопесчаная смесь (ТУ 218 РСФСР)	2200-1900	1,10-1,00

Продолжение таблицы 5

Аглопоритовый щебень, обработанный вязкий битумом	800	0,23
Керамзитовый гравий, обработанный вязким битумом	1100	0,64
Гравий (щебень) с легкими заполнителями, обработанные вязким битумом	2000	0,52
Супесь, укрепленная 10 %-ной эмульсией	1700-1900	1,456
Цементобетон	2400	1,74
Песок разномерный, укрепленный 6 %-10 % цемента	2100	1,86
Песок мелкий, одномерный, укрепленный 10 % цемента	2100	1,62
Цементогрунт с керамзитом: песок - 75 % (массы), керамзит - 25 %, цемент - 5 %	1500-1600	
Цементогрунт с гранулами полистирола: песок 97 % -98 %, гранулы полистирола 3 %-2 %, цемент 7 %-6 %	1300-1500	0,41-0,58
Битумоцементогрунт с перлитом, состава: перлитовый щебень 25 %-20 %, песок 75 %-80 %, цемент 3 %-4 %, битум 12 %-10 % (от массы песка, перлита и цемента)	1400	0,52-0,58
Цементогрунт с аглопоритом, состава: супесь или песок 70 %-80 % - аглопорит 30 %-20 % - цемент 6 %	1700-1800	0,64-0,75
Шлакобетон	1600	0,58
Керамзитобетон	1400	0,75
Стиропорбетон	1000-1100	0,23
Слабопрочные известняки, укрепленные известью	2000	1,16
Суглинок, укрепленный 6 %-12 % цемента	1750-1900	1,45
Суглинок, укрепленный 2 %-5 % цемента и 6 %-2 % известью	1800-1900	1,33
Супесь, укрепленная 8 %-10 % цемента	1700-1900	1,51
Пенопласт	38,5-60	0,03-0,052
Пеноплэкс	38,5-50	0,03-0,032

Каменноугольнаязолошлаковая, укрепленная 6 %-8 % цемента	1600	0,7
Шлак топочный	800	0,46
Щебень из гранита	1800	1,86

Окончание таблицы 5

Щебень из известняка	1600	1,39
Гравий	1800	1,86
Песок крупный талый	2000	1,74
То же, мерзлый	2000	2,32
Песок средней крупности талый	1950	1,91
То же, мерзлый	1950	2,44
Песок мелкий талый	1850	1,91
То же, мерзлый	1850	2,32
Песок пылеватый талый	1750	1,80
То же, мерзлый	1750	2,20
Супесь талая	2100	1,80
То же, мерзлая	2100	2,03
Суглинок и глина талые	2000	1,62
То же, мерзлые	2000	1,97
Лессы талые	1500	1,51
То же, мерзлые	1500	2,09
Одномерный гранитный щебень, обработанный вязким битумом	1850	1,28
Гравийно-песчаная смесь	2000	2,10
Гравийно-песчаная смесь, укрепленная 10 % цемента	2000	2,02

9.2.2 Современные направления развития методов определения теплопроводности дорожно-строительных материалов и грунтов

9.2.2.1 Определение коэффициента температуропроводности

В монографии В.М. Фокина [35] представлена методика для комплексного определения теплофизических характеристик строительных материалов и изделий методом неразрушающего контроля. Приводится аппаратное обеспечение для экспериментального определения коэффициента температуропроводности, объемной теплоемкости, теплопроводности строительных материалов и изделий, а также даны методические указания по созданию экспериментальных установок и проведению опытов.

Авторы использовали данный метод для экспериментального определения теплофизических характеристик оргстекла, фторопласта, бетона, красного и силикатного кирпича при различных условиях нагрева и

охлаждения. Однако данный метод может быть использован и для определения теплофизических свойств дорожно-строительных материалов.

Метод Фокина-Чернышова основан на контактном измерении температуры на поверхности исследуемого образца в виде призмы квадратного сечения. Измерения проводятся в двух точках – на ребре и середине грани призмы. Определяемая характеристика – коэффициент температуропроводности материала.

Метод относится к неразрушающим методам, так как основан на измерениях температур на поверхности без нарушения целостности образца.

Особенности проведения эксперимента:

-жесткие условия на форму образца: призма квадратного сечения, длина грани призмы во много раз (в 6 и более) превышает ширину;

-необходимо тщательное крепление спаев термопар к образцу;

-требуется печь для нагрева образца (рисунок 18).



Рисунок 18 – Определение температуропроводности красного кирпича контактным методом Чернышова-Фокина

Предлагаемая методика выгодно отличается от известных методов быстродействием, небольшой погрешностью (порядка нескольких процентов), обладает новизной и оригинальностью.

Недостатки метода:

-не применим к сыпучим материалам;

-проводится измерение коэффициента температуропроводности, следовательно, коэффициент теплопроводности или значение теплоемкости могут быть найдены только в результате пересчета (методика пересчета приведена в монографии);

-погрешность измерений неоднородна: для материалов неоднородной структуры (жаропрочный бетон) погрешность измерения температуропроводности достигает 7 %; погрешность пересчета теплопроводности и теплоемкости составляет отмеченные ранее 5 %-7 %.

Метод защищен патентами и авторскими свидетельствами [59]-[62].

9.2.2.2 Бесконтактные методы определения теплофизических характеристик (методы инфракрасной диагностики)

Данные методы активно внедряются в сферу дорожно-строительной промышленности для теплового контроля структуры укладываемого асфальта и идентификации мест возможного разрушения дорожного покрытия. В работе Ищук И.Н. и др. [36] рассмотрено уменьшение методической погрешности измерения теплофизических свойств и снижение вычислительных затрат на обработку кубоида ИК-изображений.

Для проведения измерений теплофизических свойств авторами работы была создана роботизированная установка на подвижной платформе (рисунок 19).

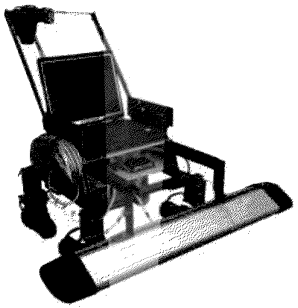


Рисунок 19 – Внешний вид роботизированной установки

Техническая реализация установки для дистанционного измерения теплофизических свойств опирается на использование принципа активной тепловой локации малозаметных объектов и включает следующие компоненты:

-платформу;

-колесную базу;

-блок управления, осуществляющий управление инфракрасным излучателем, тепловизионным приемником, шаговыми двигателями, производящий предварительную обработку данных измерений температурных полей, а также программную реализацию нелинейного преобразования динамических термограмм в пространственное распределение теплофизических параметров;

-инфракрасный источник нагрева, осуществляющий радиационный нагрев исследуемой поверхности в соответствии с заданными пространственно-энергетическими и временными характеристиками воздействия;

-тепловизионный приемник, осуществляющий мониторинг пространственного распределения абсолютных значений температур на исследуемой поверхности в течение заданного интервала времени.

Измерение теплофизических свойств осуществляется за счет нагрева инфракрасным излучателем исследуемой поверхности и мониторинга процесса нагрева и остывания при помощи тепловизионного приемника. Программное обеспечение, являющееся составной частью блока управления, производит анализ и обработку кубоида ИК-изображения, поступающего с тепловизионного приемника, на основе решения коэффициентной обратной задачи теплопроводности с использованием неявных разностных схем. После этого за счет полученных значений избыточных температур в каждой точке пространства на каждом временном интервале, с помощью разработанного программного обеспечения получают пространственное распределение теплофизических свойств.

Созданная роботизированная установка для исследования процесса поиска малозаметных объектов, по мнению авторов, позволяет более точно реализовать метод дистанционного измерения оптико-теплофизических свойств малозаметных объектов, а в совокупности с современной вычислительной аппаратурой – производить мгновенные вычислительные операции.

К сожалению, авторы работы не привели оценку возможной погрешности данного метода. Можно предположить, что данная погрешность, при самых оптимистичных ожиданиях, составляет порядка 15 %-20 % .

Достоинство метода:

а) непосредственный контроль процесса прямо на объекте;

б) не происходит разрушения исследуемого объекта.

9.2.2.3 Методы линейного источника и оптического сканирования

Данные методы определения теплофизических свойств материалов пришли в дорожное строительство сравнительно недавно. Методы линейного источника и оптического сканирования известны давно и широко используются в геологической разведке и нефтедобыче для определения свойств твердых горных пород, добытых в керне. Методы являются

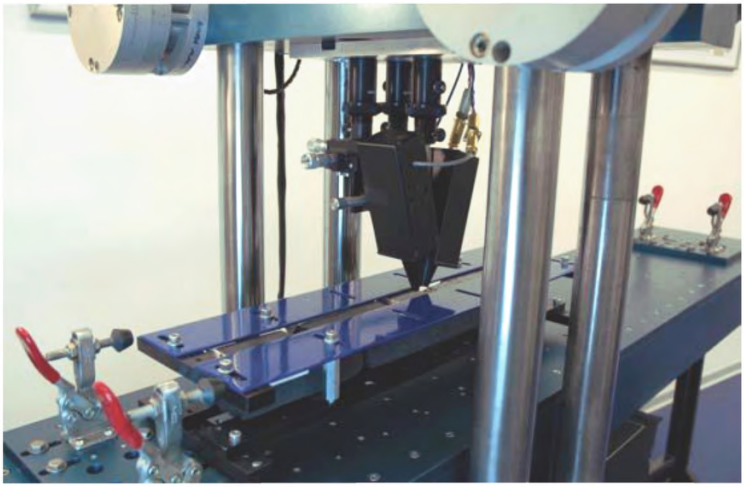
комплексными и позволяют определить сразу три основных теплофизических характеристики материала: теплопроводность, температуропроводность и теплоемкость. Достоинство методов: возможность обнаружить и выделить анизотропию свойств в объеме образца. Точность методов довольно высока и не уступает традиционно известным и стандартизированным методам стационарного теплового потока (например, отраженным в ГОСТ 25820-2000).

Метод линейного источника, более известный как метод нагретой нити, относится к методам нестационарного теплового потока и требует внедрения датчика – нагретой нити в образец. Нить является одновременно и источником теплового потока и прибором температурных измерений. Возможности метода связаны прежде всего с возможностью записи сигнала нити и последующей программно-вычислительной обработкой полученных данных.

Метод оптического сканирования представляет собой метод измерения расплывания теплового пятна, созданного точечным источником излучения (например, лазерным лучом). Возможности метода зависят от возможности градуировки измерительной системы по образцам с заранее известными свойствами. Именно поэтому метод оптического сканирования всегда рассматривают «в связке» с другим методом определения свойств, в частности, методом линейного источника. Точность метода оптического сканирования хорошо иллюстрирует рисунок 20.

Применение методов линейного источника и оптического сканирования позволяют существенно расширить диапазон измерения теплопроводности (до 6 Вт/(м·К) при сохранении высокой точности измерений.

Адаптация метода линейного источника для измерения теплофизических свойств дисперсных систем (грунтов) отражена в научных работах последнего времени – например, в работах [17; 41].



Параметр	Значение
Диапазон теплопроводности	0,2—6,0 Вт/(м К)
Диапазон температуропроводности	(0,1—2,5) × 10^{-6} м²/с
Точность определения теплопроводности	4%
Точность определения температуропроводности	5%
Пространственное разрешение при профилировании	Лучше 0,4 мм
Скорость сканирования	3,0 мм/с

Рисунок 20 –Оптический сканер высокого разрешения в Центре инноваций компании «Schlumberger» (Солт-Лейк-Сити, штат Юта, США) и его основные параметры [39]

Адаптация методов линейного источника и оптического сканирования применительно к задачам определения теплофизических свойств дисперсных пород на примере глинистых грунтов Подмосковья выполнена в работе [17]. Автором получена целостная картина теплофизических свойств грунтов целого региона путем сканирования и обобщения более 300 образцов пород, полученных в керне. Можно отметить, что методы позволяют работать как с сухими, так и влагонасыщеными образцами.

Главный недостаток методов как линейного источника, так и оптического сканирования – их большая наукоемкость. Методы требуют

высокой квалификации обслуживающего персонала, и, судя по всему, так и останутся методами научно-исследовательских центров и лабораторий.

9.3 Современный уровень определения теплофизических свойств теплоизоляционных материалов, применяемых в дорожном строительстве

Анализ существующих научно-исследовательских работ, проводимых как в нашей стране, так и за рубежом, позволяет отметить высокий уровень исследования теплофизических свойств теплоизоляционных материалов, применяемых в дорожном строительстве [42]. В работе приведены результаты исследования внутренней микроструктуры пенопластов, отмечено, что полученные значения теплопроводности основаны на обработке большого массива опытных значений (теплопроводность пенопластов характеризуется эффективным коэффициентом теплопроводности для 45 марок различных производителей примерно 0,032-0,035 Вт/(м·К).

Многолетние исследования показывают, что пенополистирол является достаточно стойким по отношению к действию влаги. За счёт наличия закрытопористого строения водопоглощениепенополистирола составляет менее 0,2 % в объёме. Такое ничтожное водопоглощение обеспечивает пренебрежимо малое изменение теплопроводности во влажных условиях, которое составляет по данным различных исследований не более 0,001-0,002 Вт/(м·К). Это позволяет применять экструзионныйпенополистирол без применения дополнительной гидроизоляции. Также пренебрежимо мал коэффициент паропроницаемости (в зависимости от плотности материала – менее 0,02 мг/(м·ч·Па).Проведенные научные исследования показывают, что с увеличением кажущейся плотности и при повышенных температурах проницаемость водяных паров в пенополистироле снижается.

Пенопласты подробно исследованы на морозостойкость. Даже после 1000 циклов замораживания-оттаивания, как показывают экспериментальные исследования, изменение термического сопротивления материала не превышает 5 %.

Результаты исследования теплофизических свойств пенопластов в зависимости от времени показывают, что за 20 лет эксплуатации теплопроводность образцов практически не изменилась.

Исследовалось влияние агрессивных сред (противогололедные реагенты) на теплофизические свойства пенопластов. Показано, что постоянство коэффициента теплопроводности при воздействии погодно-климатических факторов и агрессивных сред указывает на сохранение макроструктуры материала в процессе эксплуатации.

Не менее подробно и всесторонне исследованы механические характеристики пенопластов: их зависимость от вида, цикличности нагрузки, продолжительности воздействия в условиях неблагоприятных внешних факторов и т.д.

Столь высокие современные требования к исследованию поведения материалов в условиях эксплуатации подчеркивают важность точного определения и задания теплофизических свойств материалов дорожных одежд и подстилающего грунта.

Таким образом,в настоящее время существуют хорошо разработанные методы экспериментального определения теплофизических свойств дорожных материалов и подстилающих грунтов. Погрешность данных методов определяется как трудностью проведения эксперимента, так и сложностью обработки экспериментальных данных. Значительного повышения точности, несмотря на большие усилия и затраты, достичь так и не удалось: теплопроводность строительных материалов в настоящее время определяется не точнее 3 %, теплоемкость – не точнее 5 %.

Значительно сократилось время проведения эксперимента, увеличилась отдача (как экономическая, так и технологическая) от проведенных исследований.

Основной недостаток всех современных методов измерения теплофизических свойств – их большаянаукоемкость, требующая высокой квалификации обслуживающего персонала. Современное дорожное строительство требует нового подхода к кадрам, от которых зависит качество и уровень внедряемых технологий.

Дополнительно методики измерений теплофизических характеристик приведены в работе Чудновского А.Ф. (глава 10) в зависимости от применяемого материала и используемого прибора [63]. Рассмотрено подробно влияние факторов по видам материала, приведены некоторые эмпирические значения теплофизических характеристик материалов.

Представлены методы и приборы для определения теплофизических характеристик дисперсных материалов:

а) методы определения теплоемкости дисперсных материалов:

1) балансный метод (прибор – калориметр);

2) метод адиабатического калориметра (прибор – калориметр с непрерывным вводом);

б) стационарные методы определения коэффициента теплопроводности дисперсных материалов:

1) абсолютные стационарные методы (прибор для определения коэффициента теплопроводности методом пластины;

2) сферический метод определения теплопроводности образца;

3)прибор для определения теплопроводности методом цилиндрического слоя);

в) методы, основанные на регулярном тепловом режиме:

1) методы акалориметров и ламбдакалориметров (и соответсвующие приборы);

2) методы двух и многих точек (установка для определения теплофизических характеристик по методу двух точек/ многих точек);

3) методы бикалориметров (приборы – шаровыйбикалориметр со слабо развитым ядром/ сильно развитым ядром; простой бикалориметр; цилиндрический бикалориметр);

г) квазистационарные методы определения теплофизических характеристик дисперсных материалов (приведены установки);

д) нестационарные методы определения теплофизических характеристик:

1) схема установки Плотникова;

2) изотермический плоский зонд;

3) изотермический цилиндрический зонд;

4) мгновенный плоский зонд;

5)плоский зонд с мгновенным импульсом тепла;

6) цилиндрический зонд постоянной мощности;

7) шаровый зонд постоянной мощности

и др.

Приложение А

Теплофизическая характеристика – теплопроводность

Теплопроводность – способность материала пропускать тепловой поток при условии разных температур поверхности. Степень теплопроводности материалов характеризует коэффициент, который равен количеству тепла, проходящего через стену из испытуемого материала толщиной 1 м площадью 1 м^2 за 1 ч при разности температур противоположных поверхностей стены 1 К.

Теплопроводность материала зависит от вещественного состава, строения и характера пористости, температуры и влажности материала. Особенности структуры оказывают значительное влияние на теплопроводность. Например, если материал имеет волокнистое строение, то тепло вдоль волокон передается быстрее, чем поперек. Так, теплопроводность древесины вдоль волокон равна 0,30, а поперек – 0,15 Вт/(м×К). Мелкопористые материалы менее теплопроводны, чем крупнопористые; материалы с замкнутыми порами имеют меньшую теплопроводность, чем материалы с сообщающимися порами. Это объясняется тем, что в крупных и сообщающихся порах возникает движение воздуха, облегчающее перенос тепла. Наличие воды в порах материала повышает его теплопроводность, так как вода имеет коэффициент 0,50 Вт/(м×К), а воздух – 0,02 Вт/(м×К). При замерзании влажных материалов коэффициент теплопроводности еще более повышается, потому что коэффициент теплопроводности льда равен 2, т.е. в 100 раз больше, чем у воздуха.

Таблица А.1 – Коэффициенты теплопроводности основных строительных материалов в размерности Вт/(м^{0}К)=Вт/(м^{0}С) и плотность

Материал	Плотность (для сыпучих – насыпная плотность), кг/м^3	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м^{0}К)
Асбест	600	0,151
Асфальтобетон	2100	1,05
Бетон (см. также железобетон)	2300-2400	1,28-1,51
Битум	1400	0,27
Вода при температурах выше 0 °С	~1000	~0,6
Гранит	2800	3,49
Железобетон	2500	1,69
Керамзит	200	0,1
Керамзит	800	0,18
Керамзитобетон	1800	0,66
Окончание таблицы А.1		
Керамзитобетон	500	0,14

Кирпич керамический пустотелый (брутто1000)	1200	0,35
Кирпич керамический пустотелый (брутто1400)	1600	0,41
Кирпич красный глиняный	1800	0,56
Кирпич силикатный	1800	0,7
Лед при температурах ниже 0 ^{o}C	920	2,33
Мрамор	2800	2,91
Пенобетон	1000	0,29
Пенобетон	300	0,08
Пенополистирол	40	0,038
Пенополистиролэкструдированый	33	0,031
Пеностекло	200	0,07
Песок сухой	1600	0,35
Песок влажный	1900	0,814
Полиуретановая мастика	1400	0,25
Полиэтилен	1500	0,3
Сталь	7850	58
Сталь нержавеющая	7900	17,5

Приложение Б

Теплофизическая характеристика – теплоемкость

Теплоемкость – свойство материала поглощать при нагревании определенное количество тепла. При охлаждении материалы выделяют тепло, причем тем больше, чем выше их теплоемкость. Коэффициент теплоемкости равен количеству тепла (Дж), необходимого для нагревания 1 кг материала на 1 К

Теплоемкость неорганических строительных материалов (бетон, кирпич, природные каменные материалы) изменяется в пределах 0,75 – 0,92 кДж/(кг×К), древесины – 0,7 кДж/(кг×К), вода имеет наибольшую теплоемкость –4 кДж/(кг×К). Поэтому с повышением влажности материалов их теплоемкость возрастает. Этот показатель имеет большое значение при проверке теплоотдачи стен и перекрытий, расчете подогрева материалов для зимних работ.

На значение удельной теплоёмкости влияет температура вещества и другие термодинамические параметры. К примеру, измерение удельной теплоёмкости воды даст разные результаты при 20 °C и 60 °C. Кроме того, удельная теплоёмкость зависит от того, каким образом позволено изменяться термодинамическим параметрам вещества (давлению, объёму и т. д.); например, удельная теплоёмкость при постоянном давлении (C_P) и при постоянном объёме (C_V), вообще говоря, различны.

Формула (Б.1) расчёта удельной теплоёмкости:

$$C = Q\, m\, \Delta T, \quad (Б.1)$$

где c – удельная теплоёмкость;

Q – количество теплоты, полученное веществом при нагреве (или выделившееся при охлаждении);

m – масса нагреваемого (охлаждающегося) вещества;

ΔT – разность конечной и начальной температур вещества.

Таблица Б.1–Значения удельной теплоёмкости некоторых веществ

Вещество	Агрегатное состояние	Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·К)
Воздух (сухой)	Газ	1,005
Воздух (100 % влажность)	Газ	1,0301
Железо	Твёрдое тело	0,444
Чугун	Твёрдое тело	0,540
Кислород	Газ	0,920
Вода 373 К (100 °C)	Газ	2,020
Вода	Жидкость	4,187
Лёд	Твёрдое тело	2,060

Таблица Б.2 – Значения удельной теплоёмкости для некоторых строительных материалов

Вещество	Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·К)
Асфальт	0,92
Полнотелый кирпич	0,84
Силикатный кирпич	1,00
Бетон	0,88
Кронглас (стекло)	0,67
Гранит	0,790
Талькохлорит	0,98
Гипс	1,09
Мрамор, слюда	0,880
Песок	0,835
Сталь	0,47
Почва	0,80
Древесина	1,7

Библиография

[1] СНиП 2.02.04-88. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах

[2] СНиП 2.02.01-83. ОСНОВАНИЯ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

[3] Попов А.П., Милованов В.И., Жмулин В.В., Рябов В.А., Мережной М.А. К вопросу о типовых технических решениях по основаниям и фундаментам для криолитозоны/ Инженерная геология криолитозоны. N3. 2008 г.

[4]Брушков А.В. Засоленные многолетнемерзлые породы арктического побережья, их происхождение и свойства. Диссертация. МГУ. Москва. 1998

[5] Теплофизические свойства и фазовый состав влаги мерзлых вулканических шлаков и пеплов Камчатки:Автореферат диссертации кандидата геолого-минералогических наук: 25.00.08 / Кузнецова Е.П.; МГУ Москва, 2011.- 191 с.: ил. РГБ ОД, 61 12-4/14

[6] СНиП 2.06.05-84 ПЛОТИНЫ ИЗ ГРУНТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

[7] Механика мерзлых грунтов / Н.А. Цытович. – М.: Изд-во АН СССР, 2013. – 448 с.

[8] Влияние миграционной влаги на процесс морозного пучения сезоннопромерзающих грунтов С.А. Кудрявцев– Реконструкция городов и геотехническое строительство, Санкт-Петербург No7/200 , с 223-240

[9] Фельдман Г. М. Передвижение влаги в талых и промерзающих грунтах. Новосибирск: Наука, 1988. 258 с.

[10] Численное моделирование процесса миграции влаги в зависимости от скорости промерзания грунтов С.А. Кудрявцев; А.В. Кажарский. Инженерно строительный журнал, No 4, 2012

[11] ГОСТ 23250-78 «Материалы строительные. Метод определения удельной теплоемкости»

[12] СТО 218.3.001-2006 Проектирование и устройство теплоизолирующих слоев из экструдированногопенополистирола "STYROFOAM" на автомобильных дорогах России

[13] Завьялов М.А. Анализ теплофизических свойств асфальтобетона // Вестник СибАДИ, 2009, выпуск 3 (13), с. 36-40

[14] Завьялов М.А., Завьялов А.М.Аналитические методы определения сроков ремонтных работ дорожного асфальтобетонного покрытия // Наука и техника в дорожной отрасли, 2012, № 3, с. 35-38

[15]Пат. № 100273 РФ, МПК G01N25/18. Устройство для измерения температуропроводности отдельных слоев искусственного сооружения / Завьялов М.А., Завьялов А.М., Бедрин Е.А., Ефименко В.Е. – № 2010123566/28, Заявл. 09.06.2010; Опубл. 10.12.2010. –Бюл. № 34

[16] Шестаков В.Н. Основы прогнозирования теплофизического режима в технологии дорожного строительства: Автореф. дис. док.техн. наук/ СибАДИ. Омск, 1997. - 36 с.

[17] Горобцов Д.Н. Научно-методические основы исследования теплофизических свойств дисперсных грунтов: дисс. ... кандидата геолого-минералогических наук.- Москва, 2011.- 198 с.

[18] Информационно-поисковfz системf нормативно-технической документации NormaCS- интернет ресурс gost.e-ecolog.ru

[19] ГОСТ 30256-94 "Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности цилиндрическим зондом"

[20] ГОСТ 16136-2003. Плиты перлитобитумные теплоизоляционные. Технические условия

[21] Методические рекомендации. Методические рекомендации по проектированию и устройству теплоизоляционных слоев дорожной одежды из пенополистирольных плит "Пеноплэкс"

[22] СТО НОСТРОЙ 2.25.28-2011 Автомобильные дороги. Строительство земляного полотна автомобильных дорог. Часть 6. Возведение земляного полотна в зоне вечной мерзлоты

[23] ГОСТ 30290-94 "Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности поверхностным преобразователем"

[24] Руководство по применению полимерных материалов (пенопластов, геотекстилей, георешеток, полимерных дренажных труб) для усиления земляного полотна при ремонтах пути. МПС России. Москва 2002

[25] Рекомендации по комплексному определению теплофизических характеристик строительных материалов

[26] ГОСТ 7076-99 «Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме»

[27] ГОСТ 10832-2009 «Песок и щебень перлитовые вспученные. Технические условия»

[28] ГОСТ 22263-76 «Щебень и песок из пористых горных пород. Технические условия»

[29] ГОСТ 25820-2000 «Бетоны легкие. Технические условия»

[30] ГОСТ Р 51263-2012 «Полистиролбетон. Технические условия»

[31] ГОСТ Р 54854-2011 «Бетоны легкие на органических заполнителях растительного происхождения. Технические условия»

[32] СТО 218.3.001-2006 «Проектирование и устройство теплоизоляционных слоев из экструдированногопенополистирола "STYROFOAM" на автомобильных дорогах России»

[33] Постановление Госстроя России от 24.12.99 № 89 О введении в действие межгосударственного стандарта “Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме”

[34] ОДН 218.046-01. Отраслевые дорожные нормы. ПРОЕКТИРОВАНИЕ НЕЖЕСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД. ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА ДОРОЖНОГО ХОЗЯЙСТВА МИНИСТЕРСТВА ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ, МОСКВА 2001

[35] Фокин В.М., ЧернышовВ.Н.Неразрушающий контроль теплофизических характеристик строительных материалов. М.: Издательство Машиностроение-1, 2004. - 212 с.

[36]Ищук И.Н., Душкин А.В., Парфирьев А.В. Информационно-техническое обеспечение роботизированной установки для дистанционного измерения теплофизических свойств объектов // ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ИНСТИТУТА МВД РОССИИ, 2013. № 1

[37]Ищук И.Н., Фесенко А.И., Громов Ю.Ю. Идентификация свойств скрытых подповерхностных объектов в инфракрасном диапазоне волн. — М.: Машиностроение, 2008. — 184 с.

[38]Ищук И.Н., Фесенко А.И. Задача теплопроводности с граничными условиями сопряжения: математическое моделирование и эксперимент // Теплофизические измерения при контроле и управлении качеством, Материалы школы, Часть 1, Тамбов: Тамбовский гос. тех. универ., 2004. – 169 с.

[39] Теплофизические свойства пород-коллекторов // Нефтегазовое обозрение,2012. Том 24. №3. С. 1-22

[40] When Rocks Get Hot: Thermal Properties of Reservoir Rocks // Oilfield Review Winter 2011/2012: 23, no. 4. Copyright © 2012 Schlumberger

[41]Подледнева Н.А., Краснов В.А., Магомадов Р.С. Определение коэффициентов теплопроводности итемпературопроводности за один опыт методом линейного источника теплоты постоянной мощности // Вестник АГТУ . 2013. №2 (56). С.50-55

[42]Иванов Д.В. Прогнозирование работоспособности утеплителя (на примере пенополистирола) в дорожных одеждах с оптимальным водно-тепловым режимом: диссертация ... кандидата технических наук.- Тамбов, 2012.- 210 с.

[43] Временная инструкция по проведению проверок качества строительства автомобильных дорог и искусственных сооружений. Статус:

действует. Утвержден: Федеральный дорожный департамент Минтранса РФ, 01.01.1996

[44] ГОСТ 12801-84 «Смеси асфальтобетонные дорожные и аэродромные, дегтебетонные дорожные, асфальтобетон и дегтебетон. Методыиспытаний»

[55] Geiger S., Emanuel S. Non-Fourier thermal transport in fractured geological media// “Water Resources Research”. Vol. 46 (2010). W070504

[56] Bing-Yang Cao, Zeng-Yuan Guo Equation of motion of a phonon gas and non-Fourier heat conduction// “Journal of Applied Physics”. Vol. 102 (2007). 053503

[57] Xu Yunsheng, GuoYingkui, GuoZengyuan Experimental research on transient heat transfer in sand// “ActaMechanicaSinica”. Vol. 12 (1996).№1. P. 39–46

[58]Roetzel W., Putra N., Das S.K. Experiment and analysis for non-Fourier conduction in materials with non-homogeneous inner structure// “International Journal of Thermal Sciences”. Vol. 42 (2003).P. 541–552

[59]Пат. РФ 2084879. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик материалов / В.Н. Чернышев и др. Заявл. 24.04.94; Опубл. 11.04.96, Бюл. № 20. 18 с.

[60]А.с. 1385787 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических характеристик и устройство для его осуществления / Т.И. Чернышова, В.Н. Чернышов. № 3856534/25; Заявл. 2.01.85; Опубл. 1.12.87. 8 с.

[61]А.с. 1377695 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающего контроля теплофизических свойств материалов / Т.И. Чернышова, В.Н. Чернышов, В.А. Попов. № 4055693/31−25; Заявл. 14.04.86; Опубл. 29.02.88, Бюл. № 8. 6 с.

[62]А.с. 1402892 СССР, МКИ G 01 N 25/18. Способ неразрушающето контроля теплофизических характеристик материалов и устройство для его

осуществления / Т.И. Чернышова, В.Н. Чернышов. № 4129719/31−25; Заявл. 26.06.86; Опубл. 15.06.88, Бюл. № 22. 12 с.

[63]Чудновский А.Ф. Теплофизические характеристики дисперсных материалов//Государственное издательство физико-математической литературы, Москва 1962 г.

[64] Киреева Ю.Н.Строительные материалы и изделия. Новополоцк: ПГУ, 2003.-364с.

ОКС _____

Ключевые слова: теплофизические свойства, объемная теплоемкость, коэффициент теплопроводности, коэффициент температуропроводности, теплоусвояемость, дисперсные материалы, грунты

Руководитель организации-разработчика

ФГБУ «РОСДОРНИИ»
Генеральный директор _____ О.Н. Ярош

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ДОРОЖНОЕ АГЕНТСТВО

(РОСАВТОДОР)

РАСПОРЯЖЕНИЕ

18.01.2016 Москва № 85-р

Об издании и применении ОДМ 218.2.061-2015 «Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов»

В целях реализации в дорожном хозяйстве основных положений Федерального закона от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании» и обеспечения дорожных организаций рекомендациями по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов:

1. Структурным подразделениям центрального аппарата Росавтодора, федеральным управлениям автомобильных дорог, управлениям автомобильных магистралей, межрегиональным дирекциям по строительству автомобильных дорог федерального значения, территориальным органам управления дорожным хозяйством субъектов Российской Федерации рекомендовать к применению с даты утверждения настоящего распоряжения ОДМ 218.2.061-2015 «Рекомендации по определению теплофизических свойств дорожно-строительных материалов и грунтов» (далее – ОДМ 218.2.061-2015).

2. Управлению научно-технических исследований и информационного обеспечения (А.В. Бухтояров) в установленном порядке обеспечить издание ОДМ 218.2.061-2015 и направить его в подразделения и организации, указанные в пункте 1 настоящего распоряжения.

3. Контроль за исполнением настоящего распоряжения возложить на заместителя руководителя А.А. Костюка.

Руководитель Р.В. Старовойт

gost.e-ecolog.ru

О.В. Каширина
(495) 687-88-23 доб. 50-271