

УДК 553.97

В. Р. Соболев¹⁾, П. Н. Гоман²⁾, И. В. Дедюля¹⁾, А. Г. Бровка³⁾, О. Н. Мазуренко⁴⁾**ТЕПЛОВЫЕ СВОЙСТВА НАПОЧВЕННОГО МАТЕРИАЛА ЛЕСА
ПРИ ХАРАКТЕРНОМ СОДЕРЖАНИИ ВЛАГИ**

Методами заданного стационарного теплового потока и калориметрии исследованы теплопроводность и удельная теплоемкость типичных напочвенных материалов хвойного леса, таких как опад хвои сосны, мох, лишайник. Образцы исследованных материалов различались по величине насыпной плотности и содержанию влаги, которые варьировались в диапазонах, характерных для природных условий географических широт Беларуси. Выявленные закономерности изменения тепловых характеристик указанных материалов исследовались с использованием обобщенных моделей переноса тепла в гетерофазных средах и самосогласованного расчета слоистой среды с перколяцией в направлении, параллельном переносу тепловой энергии.

Ключевые слова: теплопроводность, теплоемкость, градиент температуры, абсолютная влажность, лесной напочвенный материал.

Введение. Основным источником лесных пожаров является обычное тепловое горение, которое способно самоускоряться за счет накопления тепла в горючей смеси. Способность к возгоранию веществ, входящих в состав горючих смесей, в парковых и лесных зонах определяется в основном количеством влаги, содержащейся в объеме этих веществ и на их поверхности. Поскольку древесина и родственные ей растительные материалы являются пористо-капиллярными средами, включающими в основном гидрофильные компоненты, содержание в них влаги обусловлено изначальной организацией их структуры. В такой гетерогенной системе количество влаги, необходимое для обеспечения жизни и развития системы и определяющее ее устойчивость по отношению к возникновению пожара, изменяется в зависимости от времени года, состояния материала и климатических условий от десятков до нескольких сотен процентов. Указанный диапазон изменения содержания влаги в растительном и напочвенном материале лесов в значительной степени определяет весь комплекс возможных сценариев развития и распространения лесного пожара.

Как известно, главной причиной распространения огня в лесу являются низовые пожары. При этом количество влаги в напочвенном материале, определяющее его тепловые характеристики, существенно влияет на формирование и распространение огня в нижнем ярусе леса. В связи с этим в данной работе исследовалось влияние влажности напочвенного материала хвойного леса — мха, лишайника и опада хвои — на его теплопроводность и теплоемкость.

Исследуемые образцы были отобраны из регионов Беларуси, находящихся на широте города Минска, включая Государственные лесохозяйственные учреждения — "Березинский лесхоз" (Высокогорское лесничество), "Минский лесхоз" (Дзержинское лесничество), "Пуховичский лесхоз" (Блужское лесничество).

1. Приборы и техника эксперимента. Методика измерений определялась особенностями исследуемого вещества, включающего несколько макроскопических компонентов — твердый остаток хвоинок, стебельков мха и лишайника; поры и капилляры в них, заполненные влагой и воздухом; непосредственно сами частицы хвои, мха и лишайника как конгломераты из перечисленных компонентов и воздушные пустотные промежутки между ними, также содержащие выделившуюся из объема влагу. Довольно сложно найти аналитическое решение задачи распространения переменного температурного поля в такой неоднородной среде. Кроме того, с точки зрения обеспечения прецизионности измерений создание кратковременных тепловых импульсов, способных перенести информацию о температурном поле через значительный объем исследуемого образца, требует сильных локальных разогревов образца, которые спровоцируют проявление его нелинейных свойств за счет некон-

1)Белорусский государственный педагогический университет им. М. Танка. 220050, г. Минск, ул. Советская, 18; э-почта: vrsobol@mail.ru; 2)Государственное учреждение образования "Командно-инженерный институт" МЧС Республики Беларусь. 220118, г. Минск, ул. Машиностроителей, 25; э-почта: g_pn83@mail.ru; 3)Государственное научное учреждение "Институт природопользования НАН Беларуси". 220114, ул. Ф. Скорины, 10; э-почта: andrew_brovka@rambler.ru; 4)Белорусский республиканский фонд фундаментальных исследований. 220072, г. Минск, просп. Независимости, 66; э-почта: mazurenko.olga@mail.ru.

тролируемого изменения количества влаги при испарении, конвекции и т. д. Кроме того, существует проблема обеспечения хорошего кратковременного теплового контакта образца с тепловым источником, приемником излучения и датчиками температуры.

Вследствие этого в работе применен не столько скоростной, сколько надежный стационарный метод измерения в режиме заданного теплового потока, базирующийся на регистрации создаваемого температурного градиента. Измерительная установка, нечувствительная к внешним тепловым возмущениям, особенно при комнатных температурах, позволяла варьировать тепловой поток достаточно малой плотности, проходящий через образец, и фиксировать перепад температуры на его входной и выходной гранях. В этом случае для плоскопараллельного образца, для которого соблюдены геометрические условия малости квадрата толщины слоя по сравнению с площадью, легко определить, отслеживая временную динамику изменения температуры его выходной грани, коэффициент теплопроводности в приближении одномерной задачи в момент выхода температуры на режим насыщения.

Используемый измерительный комплекс содержит оригинальные датчики теплового потока, вмонтированные в металлические корпуса нижнего и верхнего теплообменников, что дает возможность усреднять температурное поле в плоскостях измерений и защищать датчики теплового потока и температуры от внешних воздействий (рис. 1).

Для исследования теплоемкости использовалась калориметрическая установка (рис. 2), разработанная по принципу создания адиабатических условий, включая контролируемый теплообмен калориметрического стакана с образцом исследуемого материала. Характерной особенностью данной установки является сравнительно большой размер калориметрической ячейки, позволяющий тестировать представительные объемы образцов и обеспечивать требования по поддержанию необходимых параметров среды по плотности и влажности в большом объеме, что адекватно количественному и качественному составу вещества в реальных слоях напочвенного материала в лесу. Действие системы традиционно основано на принципе прецизионной регистрации количества энергии, приращения температуры, количества исследуемого вещества в весовом эквиваленте. Процесс измерения осуществляется в автоматическом режиме с выводом информации в систему первоначального накопления в соответствующей базе данных.

Перечисленные измерительные комплексы спроектированы и использованы в качестве действующих метрологических центров при проведении исследовательской работы в лаборатории физико-химической механики природных дисперсных систем ГНУ "Институт природопользования НАН Беларуси" [1, 2].

При экспериментальном изучении физических параметров пористых сред на макроскопических объемных образцах результат измерений, несомненно, отягчен как систематическими ошибками, связанными с погрешностями измерительных приборов, задействованных в установке, так и случайными ошибками, обусловленными не абсолютной идентичностью пробных образцов, подготавливаемых для различных серий измерений. При

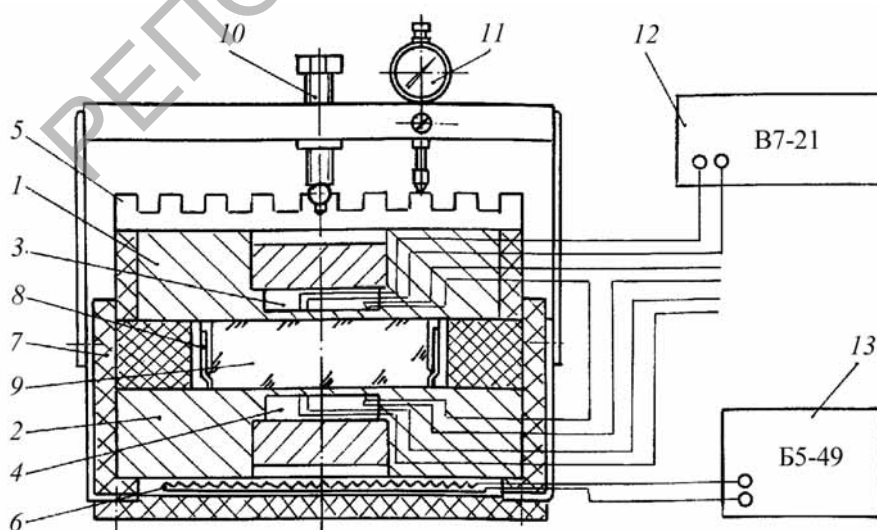


Рис. 1. Принципиальная схема измерительного комплекса для определения коэффициентов теплопроводности: 1, 2 — теплообменники; 3, 4 — датчики теплового потока; 5 — радиатор; 6 — нагревательный элемент; 7 — теплоизоляция; 8 — кассета; 9 — образец исследуемого материала; 10 — прижимной винт; 11 — индикатор часового типа; 12 — вольтметр цифровой; 13 — источник постоянного тока

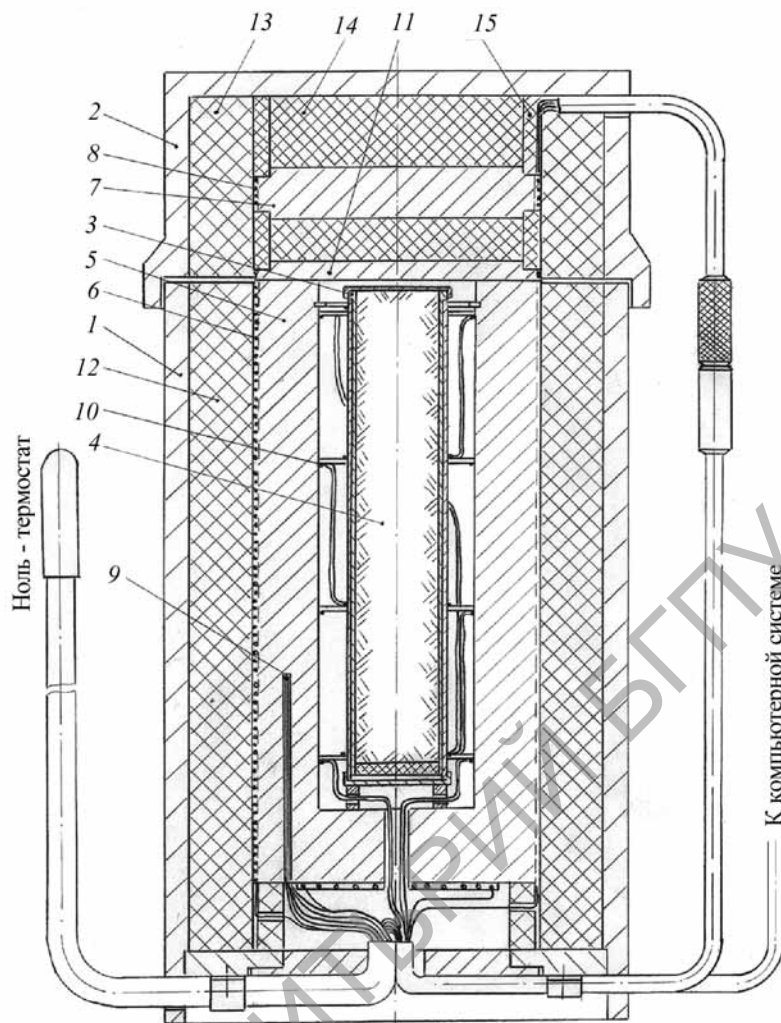


Рис. 2. Схема рабочей камеры калориметра: 1 — корпус калориметра; 2 — крышка; 3 — стакан калориметрический в сборе; 4 — гильза с образцом; 5 — стакан охранный; 6, 8 — нагреватель охранный; 7 — крышка стакана охранный; 9 — датчик температуры калориметра; 10 — датчик разности температур калориметрического и охранный стаканов; 11 — диск экранирующий; 12–14 — теплоизоляция; 15 — кольцо опорное

одинаковой интегральной плотности исходного материала трудно добиться, чтобы образцы были абсолютно идентичными с точки зрения распределения значений локальной плотности и влажности во всех точках по объему. Для повышения достоверности измерений требовалось минимизировать случайную ошибку и набирать определенную статистику, проводя измерения на нескольких сериях образцов. По определению масштаб случайной ошибки не должен превышать систематическую ошибку и должен выбираться исходя из трудоемкости подготовки и проведения многократных измерений. Пробное измерение на выборочной партии из двадцати пяти образцов выявило относительную среднюю квадратичную ошибку порядка 6.65% для теплопроводности и порядка 1.5% для теплоемкости. Систематическая ошибка для этих характеристик равняется 6.5 и 1.5% соответственно. Надежность измерений не хуже 0.95 при указанных коэффициентах вариации с доверительным интервалом, равным половине систематической ошибки для теплопроводности и порядка систематической ошибки для теплоемкости, можно обеспечить, если для теплопроводности использовать измерения на восемнадцати, а для теплоемкости на восьми идентичных образцах [3–6].

2. Приготовление образцов и их экспериментальное исследование. Образцы тестируемых веществ изготавливались из собранных в хвойном лесу компонентов горючего материала и соответствовали по составу, структуре, консистенции, влажности и плотности материалу напочвенного слоя леса. Абсолютное содержание влаги в образце определяли как отношение веса химически несвязанного количества влаги в нем к весу условно сухого материала после длительного выдерживания его при температуре несколько выше 100 °C [7].

Одной из целей наших экспериментов было выявление тепловых характеристик материалов, способных к горению в температурных условиях, отвечающих летним засушливым месяцам средних и южных широт страны, для чего температура материала в ходе измерений поддерживалась на уровне 25–30 °С. Нелинейные температурные эффекты при теплопереносе постулировались как малозначащие с точки зрения воздействия на состояние и свойства системы. При измерениях тепловые характеристики образцов напочвенного материала — теплопроводность, теплоемкость — исследовались в зависимости от их плотности при фиксированном содержании влаги. Как известно, в естественных условиях плотность мха, лишайника, опада сосновой хвои зависит от высоты их слоя, длительности его накопления, места расположения, внешнего воздействия факторов погоды — дождевых осадков, толщины снежного покрова, возможности его уплотнения. Соответственно при измерении был выбран диапазон значений плотности, который отвечает характерным величинам, реализуемым в естественных условиях.

Для регулирования количества влаги в тестируемых образцах они помещались в сушильный шкаф; при этом контролировалась масса материала в начальном состоянии, после промежуточного подсушивания и после длительного выдерживания в шкафу.

На второй стадии экспериментов образцы известного по влажности материала располагались в фиксированном объеме (в чувствительных ячейках установки), позволяющем по измерениям веса рассчитать плотность. Для обеспечения надежности измерений в рамках заданного доверительного интервала исследовались не менее десяти семейств одинаковых по влажности и различающихся по плотности образцов. Каждое из семейств подвергали двум и трем измерениям при определении его теплоемкости и теплопроводности соответственно. Графические зависимости математических ожиданий, полученные на основе результатов измерений каждого семейства, являются фактически совпадающими.

3. Результаты эксперимента. Экспериментальные исследования показали, что теплопроводность всех исследованных объектов, имеющих определенную плотность и влажность, находится в диапазоне 0.05–0.2 Вт/(м·К) и незначительно различается для разных материалов, что, по сути, отражает их общую органическую природу, близкую к древесине. К примеру, древесина в воздушно-сухом виде с содержанием воды не выше 15% по весу, обладает теплопроводностью такого же уровня: для дуба коэффициент теплопроводности (поперек волокон) равен 0.21 Вт/(м·К), для ели поперек и вдоль волокон — 0.093 и 0.17 Вт/(м·К) соответственно, для сосновых опилок — 0.045 [8, 9] Вт/(м·К). Исследованные материалы как продукты жизнедеятельности древесных, кустарниковых и травянистых растений леса по способности передавать тепло близки скорее к классу плохих проводников тепла, чем хороших. Возможно, что тепловые параметры смешанных составов рассматриваемых материалов, существующих в том или ином виде в природе, будут располагаться в этом диапазоне. Отклонения от указанного диапазона, вызванные мелкими веточками и сучками, присутствующими в лесном покрове из мха, хвои и лишайника, будут значительными только при большой доле сильно увлажненных древесных продуктов.

Существенно, что теплопередача исследованных материалов весьма слабо изменяется в зависимости от их плотности (рис. 3–6). Однако, как показывает рис. 3, при некоторых характерных значениях абсолютной влажности мха его коэффициент теплопроводности довольно восприимчив к изменению удельного веса образца. При увеличении плотности измеряемых образцов мха в 5 раз их коэффициент теплопроводности возрастал в

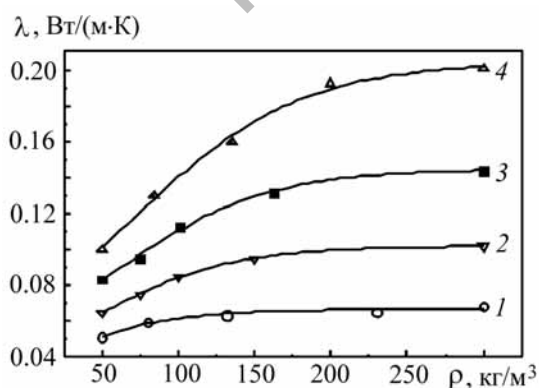


Рис. 3. Зависимость теплопроводности образцов мха от его плотности при различных значениях абсолютной влажности: 1 — 10%; 2 — 40; 3 — 150; 4 — 300

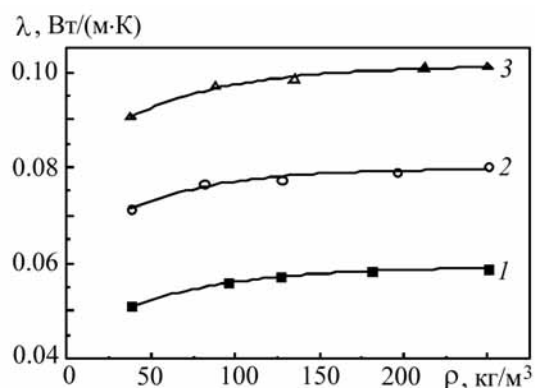


Рис. 4. Типичное поведение теплопроводности образцов хвои в зависимости от их плотности при различных значениях влажности: 1 — 10%; 2 — 40; 3 — 150

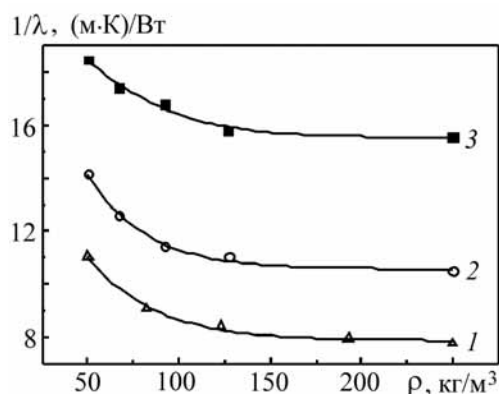


Рис. 5. Тепловое сопротивление лишайника в зависимости от его плотности при различных значениях влажности: 1 — 150%; 2 — 40; 3 — 10

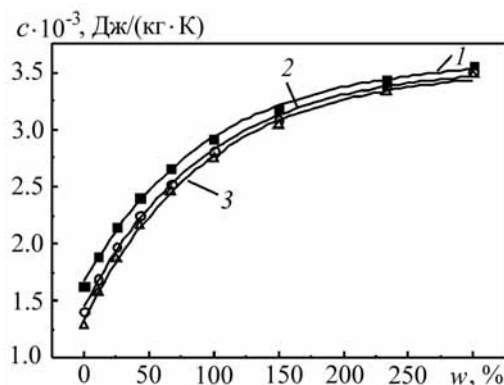


Рис. 6. Удельная теплоемкость образцов характерных напочвенных материалов соснового леса в зависимости от их абсолютной влажности: 1 — мох; 2 — лишайник; 3 — хвоя

зависимости от влажности материала от 20 до 100%. Для хвой приращение коэффициента теплопроводности почти не зависело от влажности материала и составляло 10–15% при пятикратном изменении плотности (рис. 4).

Зависимости теплового сопротивления лишайника от его плотности качественно схожи с зависимостями теплопроводности хвой и мха; при этом численные изменения, полученные для лишайника, лежат между аналогичными значениями, полученными для хвой и мха. При увеличении плотности лишайника теплопроводность его образца с низким содержанием влаги увеличивается на 30%, а теплопроводность образца с максимальной влажностью порядка 150% увеличивается на 40%. Характерно, что, как и для материалов древесного происхождения, присутствие воды в перечисленных образцах стимулирует передачу тепла. Содержание влаги в образце сказывается на его способности передавать тепло тем сильнее, чем больше ее находится в веществе. Например, теплопроводность мха увеличивается на 230 и 100% при максимальном и минимальном значениях его плотности соответственно. Для лишайника диапазон изменения теплопроводности более узкий и составляет 80 и 90% для менее и более плотных образцов соответственно. Для хвой приращение теплопроводности с возрастанием влажности от 10 до 150% почти не зависит от плотности материала и имеет значение около 80% для всего диапазона изменения плотности.

4. Обсуждение результатов. Количественные различия в изменении скорости передачи тепла в объеме рассматриваемых материалов при увеличении их влажности можно объяснить особенностями их структуры. Ухудшение теплоизолирующих качеств мха, хвой, лишайника при замещении в образце воздушного компонента водой коррелирует в целом с поведением древесины. У древесины твердая субстанция сама по себе в полтора раза тяжелее воды, хотя и составляет около одной третьей части объема. Средняя плотность у подавляющей массы древесных сухих материалов меньше воды, поскольку остальные две трети объема материала как пористой капиллярной структуры заполнены влагой и воздухом. По всей видимости, для рассматриваемого здесь случая хвой, лишайника и мха объемная концентрация твердого остатка может быть выбрана в тех же пределах. Вследствие этого вода, присутствующая внутри пор, способствует образованию каналов перколяции и в определенной степени формирует свойства по переносу тепла. Следует отметить, что и в увлажненном, и тем более в подсушенном состоянии доля объема, занимаемая жидкостью, не очень велика, хотя и изменяется в несколько раз. Например, для мха с плотностью 300 кг/м^3 объемная концентрация воды при влажности 300 и 10% равна соответственно 0.225 и 0.0272, т. е. тридцатикратное изменение влажности отвечает восьмикратному увеличению объемной доли влаги в среде. Если оценить вклад влаги в теплопередачу, умножив теплопроводность воды, равную 0.58 Вт/(м·К) , на объемную часть воды, равную 0.225 для случая влажности мха 300%, то получаем значение порядка 0.13 Вт/(м·К) , что составляет две трети от всей величины регистрируемой теплопроводности. Для нижнего предела влажности (10%) с объемной плотностью воды 0.0272 аналогичное перемножение дает вклад порядка 0.016 Вт/(м·К) . Это свидетельствует о сравнительной малости эффективного вклада в перенос тепла от компонента, связанного с твердой структурой и воздушным компонентом.

Рыхлые материалы, к которым относятся рассматриваемые здесь образцы, как упоминалось выше, кроме пор и капилляров в самих хвоинках и стебельках мха и лишайника имеют пустоты — воздушные полости между частицами материала. Пустотность образцов можно вычислить, зная объемную плотность хвоинок, стебельков

мха, лишайника как единого целого и их так называемую насыпную плотность, которая и варьируется в ходе эксперимента. В связи с этим указанные материалы целесообразно классифицировать как волокнистую пористо-капиллярную среду, для которой волокнами являются непосредственно сами фрагменты мха, хвощов, лишайника. Расположение указанных волокон в образцах материала, как и в естественном состоянии, является неупорядоченным, хаотическим. Сами же по себе указанные волокна, как упомянуто ранее, содержат большое количество пор и капилляров, частично заполненных влагой. Между волокнами в зависимости от степени рыхлости также собирается влага из окружающей среды за счет конденсации и хорошей смачиваемости. Таким образом, материал содержит поры двух уровней — капилляры внутри самих стеблей растений (волокон) и пустоты между волокнами. Гигроскопичность подобной среды зависит как от структуры растений (лишайник, мох, хвощинки сосны), так и от плотности упаковки волокон-стеблей в самом материале.

Для численного сопоставления полученных данных и обобщения результатов в виде некоторых интерполяционных соотношений рассмотрим исходные образцы как гетерогенную многофазную среду, состоящую из большого количества компонентов, содержащих твердую субстанцию, пронизанную порами и капиллярами. Компоненты неоднородной среды в соответствии с условиями приготовления и контроля параметров образцов в ходе эксперимента имеет смысл свести к трем различным фазам, в число которых входят вода, воздух, твердый остаток. Фазы обладают различными удельными тепловыми сопротивлениями и соответственно способностью переносить тепло. Их теплопроводности обозначим как λ_1 (вода), λ_2 (воздух), λ_3 (твердый остаток). К настоящему времени разработан ряд подходов для описания закономерностей переноса заряда, тепла, массы через гетерогенные среды, различающиеся по фазовому составу компонентов, их агрегатному состоянию, форме и размерам сочетающихся в среде фаз, их физическим и химическим свойствам. В настоящем случае, когда среда является как минимум тернарной, удобно использовать метод самосогласованного расчета трехфазной системы в предположении слоистого распределения компонентов среды и наличия перколяции в направлении, параллельном тепловому потоку.

Существенно, что в приближении эффективной среды выражение для обобщенной теплопроводности трехфазной системы незначительно зависит от структуры распределения элементов по объему, что привлекательно, и обобщенную теплопроводность можно представить в следующем виде:

$$\sum_{i=1}^n \frac{\lambda_i - \lambda}{\lambda_i + 2\lambda} m_i = 0. \quad (1)$$

В общем случае эта формула плохо удовлетворяет условиям предельного перехода, что, однако, допустимо ввиду сложности предмета анализа. В ней искомая величина теплопроводности является корнем кубического уравнения. Для обеспечения ее адекватности реальным условиям необходимо, чтобы коэффициенты уравнения находились в определенном количественном соотношении друг с другом. Тогда, следуя правилу Кардана для нахождения корней, только один из корней будет действительным, либо два из трех корней будут совпадать при нулевом третьем. Принимая во внимание сказанное выше общность выражения (1) не совсем достаточна, чтобы получить замкнутое выражение для эффективной теплопроводности с возможностью ее экстраполяции в область предельного перехода. Иными словами соотношение (1) не подходит для рассматриваемого случая, поскольку параметры гетерогенной системы определены не четко и желательно, чтобы результат расчета не сильно зависел от организации структуры системы.

Другой подход для многофазной системы, у которой проводимости компонентов не слишком сильно отличаются друг от друга, позволяет представить обобщенную проводимость в виде соотношения нечувствительного к структуре системы:

$$\lambda^{1/3} = \sum_{i=1}^3 m_i \lambda_i^{1/3}. \quad (2)$$

Моделирование теплопроводности с помощью выражения (2) приводит к заниженным значениям в области малых плотностей образцов, а именно при влажности мха 300% и его плотности 50 кг/м³ оценочная величина теплопроводности равняется 0.07 Вт/(м·К) против экспериментального значения 0.1 Вт/(м·К).

Более удобным является подход в рамках самосогласованного метода расчета, когда многокомпонентная система поэтапно рассматривается как бинарная. Вначале выделяется один из компонентов, например n -й, а все остальные компоненты от $n - 1$ до 1 представляются другой обобщенной средой, имеющей эффективную проводимость, определяемую путем усреднения свойств всех содержащихся в ней фаз. Далее эффективная проводимость объединенной фазы-компонента также рассматривается как результат действия бинарной системы. Эта система состоит из $(n - 1)$ -го единичного компонента и обобщенной среды из всех оставшихся компонентов от

$n - 2$ до 1. Проводя такую процедуру, можно прийти до последней бинарной системы, состоящей из 2-го и 1-го компонентов. В таком подходе обобщенная проводимость многокомпонентной среды для частного случая трех различных фаз может быть найдена из выражений

$$\lambda = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \frac{\lambda'_i - \bar{\lambda}_{ni}}{\lambda_i - \bar{\lambda}_{ni}}, \quad (3)$$

$$\bar{\lambda}_{ni} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^2 m'_j \lambda_j, \quad (4)$$

$$m'_j = \frac{m_j}{\sum_{j=1}^2 m_j}, \quad (5)$$

$$\lambda'_i = \bar{\lambda}_{ni} + (\lambda_i - \bar{\lambda}_{ni}) m_i \psi_i. \quad (6)$$

В выражении (6) коэффициент ψ_i определяется структурой неоднородной среды. Для рассматриваемой здесь системы, сочетающей в себе всего три выделенных компонента, $\bar{\lambda}_{ni}$ — средняя проводимость для одного из компонентов условной бинарной системы, у которой две из трех фаз объединены в одну. Индексом n обозначается проводимость объединенного компонента как результат суммирования по двум индексам, составленным поочередно из пар 1, 2; 1, 3 и 2, 3. Индекс i обозначает оставшийся неиспользуемый третий компонент. Символ λ'_i — проводимость бинарной среды, состоящей из i -той компоненты, где индекс i по очереди пробегает все значения и оставшиеся два как одно целое. В случае, если трудно установить структуру двухкомпонентной системы, она принимается простейшей, т. е. слоистой со слоями, параллельными потоку тепла. При расчете проводимости двухкомпонентной системы (λ'_i), состоящей из i -го компонента с проводимостью λ_i и второго компонента с проводимостью $\bar{\lambda}_{ni}$, следует учитывать структуру среды, т. е. ориентацию компонента i по отношению ко всей остальной эффективной среде.

При рассмотрении трехфазной системы λ'_i на втором этапе определяется в соответствии с типом структуры — либо слоистой со слоями, параллельными тепловому потоку, либо также слоистой, но со слоями, перпендикулярными тепловому потоку. Возможно взаимное проникновение компонентов или присутствие изолированных вкраплений, у которых теплопроводность выше или меньше теплопроводности окружающей среды. Как показали оценки, применение на втором этапе для определения λ'_i модели среды с изолированными вкраплениями при малой влажности и малой плотности не позволяет соотнести результаты оценок с данными эксперимента — рассчитанные значения многократно превышают результаты эксперимента.

Для рассматриваемого случая постулируем в первом приближении, что для второго этапа расчета также выполняется условие слоистости с параллельностью слоев потоку тепла. Высказанное предположение основывается на том, что с результатами эксперимента гораздо ближе сочетаются данные расчета, в которых λ'_i оценивается в соответствии с выражением (6) при равенстве единице коэффициента ψ_i . Такой подход означает, что, по сути, используется параллельная модель соединения элементов-фаз, которая сочетается с методами теории протекания и эффективной среды. Понятие эффективной среды здесь привлекается для того, чтобы хаотичное распределение волокон-частиц горючего материала заменить более упорядоченным, слоистым распределением с преимущественной ориентацией слоев параллельно потоку тепла. Анализ полученных результатов показал, что допустимо рассмотрение пористо-капиллярных элементов, вытянутых в одном направлении, пусть и хаотично расположенных в образце, параллельно которым протекает тепло через большую совокупность фрагментов. С использованием таких допущений можно постулировать, что три обобщенные фазы материала образца, обладающие различным тепловым сопротивлением, включены параллельно. Из существующих трех каналов передачи тепла два взаимно трансформируются друг в друга. Если каждый из каналов представить в виде прямого цилиндра с эффективным постоянным сечением вдоль длины образца, то изменение теплопроводящих свойств материала будет определяться возрастанием либо уменьшением сечения цилиндра с условной газовой фазой. Тепловое сопротивление любой из трех фаз будет обратно пропорционально ее эффективной площади и будет выражаться через долю фазы в объеме образца:

$$\lambda = m_1 \lambda_1 + m_2 \lambda_2 + m_3 \lambda_3. \quad (7)$$

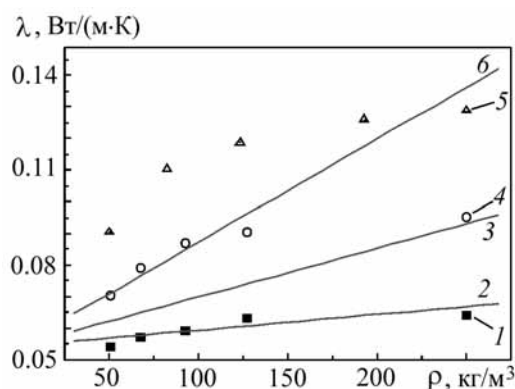


Рис. 7. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений теплопроводности лишайника в зависимости от его плотности при различных значениях влажности: 1, 2 — 10%; 3, 4 — 40%; 5, 6 — 150; точки — эксперимент, линии — расчет ($\lambda_1 = 0.58$, $\lambda_2 = 0.03$, $\lambda_3 = 0.15$, $m_3 = 0.2$)

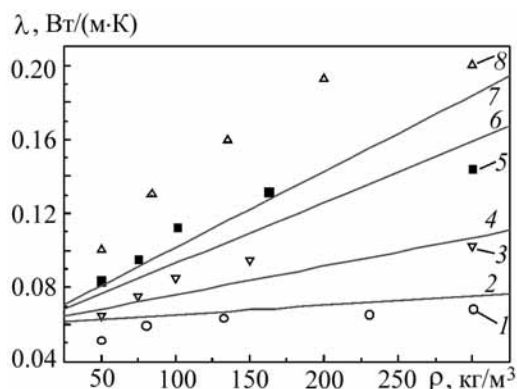


Рис. 8. Сопоставление экспериментальных и расчетных значений теплопроводности мха в зависимости от его плотности при различных значениях влажности: 1, 2 — 10%; 3, 4 — 40%; 5, 6 — 150; 7, 8 — 300; точки — эксперимент, линии — расчет ($\lambda_1 = 0.58$, $\lambda_2 = 0.03$, $\lambda_3 = 0.13$, $m_3 = 0.3$)

Высказанные предположения подтверждаются результатами, представленными на рис. 7 и 8, где сравниваются данные эксперимента по лишайнику и мху с результатами самосогласованного расчета неоднородной среды со слоями, параллельными потоку тепла. Отметим, что при верхних значениях плотности образца в рамках принятых допущений оценка на основе выражения (7) довольно близка к экспериментальным данным, в том числе и при низших значениях влажности материала. Оценки нижнего диапазона значений влажности рассматриваемого материала, который представляет наибольший интерес в смысле чувствительности материала к воздействию тепла в условиях пожара, вполне коррелируют с экспериментальными данными во всем диапазоне изменения плотности материала. К сожалению, используемая модель не отображает тенденции обобщенной теплопроводности к насыщению с ростом плотности материала, поскольку при высоких уровнях влажности поведение теплопроводности скорее удовлетворяет двум кусочно-линейным функциям. Формально это означает, что при большой плотности теплопроводность газовой фазы и твердого остатка сравниваются и трансформирование одной фазы в другую при уплотнении материала сравнительно слабо воздействует на его общую способность к переносу тепла.

Расхождение результатов модельного расчета с экспериментом можно объяснить тем, что при малых плотностях сильно увлажненных образцов самосогласованный расчет при параллельном соединении элементов не полностью удовлетворяет наличествующим условиям из-за нарушения непрерывности какой-либо из фаз. Ввиду этого сценарий расчета эффективной проводимости на втором этапе, когда определяется проводимость бинарной среды λ'_b , является более сложным по сравнению с привлеченными здесь подходами.

В целом применение самосогласованного метода позволяет оценить численные значения обобщенной теплопроводности рассматриваемых образцов в рабочем диапазоне изменения параметров среды. Сравнение оценок, полученных методом самосогласования действия компонентов среды и простого перколяционного процесса при изменении доли высокопроводящей фазы, показывает, что для верхних значений плотности материала модель обычной перколяции вполне отвечает эксперименту во всем диапазоне значений влажности. При малых плотностях материала в условиях повышенной влажности результаты расчета хуже коррелируют с экспериментом из-за частичного нарушения эффекта перколяции по каналам, которые не обладают достаточной сплошностью при значительном количестве газовой фазы. При нижних значениях уровня влажности материала модель самосогласованного расчета слоистой среды вполне адекватна результатам эксперимента для всего диапазона изменения плотности материала.

Выводы

1. Тепловые свойства опада хвои, мха и лишайника становятся нелинейными при возрастании количества влаги в объеме этих материалов и увеличении их плотности.

2. При низкой влажности теплопроводность напочвенного покрова хвойного леса на 100% и более ниже, чем способность дерева проводить тепло, что объясняется большой долей пустотного компонента этой гетерофазной дисперсной среды.

3. Изменение обобщенной теплопроводности напочвенных материалов в зависимости от их плотности удовлетворительно интерпретируется в приближении самосогласованного расчета трехфазной системы в предположении действия перколяционных механизмов и слоистого распределения компонентов среды параллельно потоку тепла.

4. При повышенных значениях абсолютной влажности лишайника и мха модель самосогласованного расчета параллельного распространения тепла в слоистой системе дает значения теплопроводности этих материалов, соответствующие экспериментальным данным с точностью 10–15%, только при верхнем пределе их насыпной плотности, составляющем 250–300 кг/м³.

5. При промежуточных значениях плотности мха, лишайника, опада хвои и повышенном уровне их влажности обобщенная теплопроводность этих материалов стремится к насыщению с ростом плотности материала.

6. Теплоемкость напочвенного материала хвойного леса стремится к насыщению с увеличением доли воды в материале.

Работа выполнена в рамках Государственной программы научных исследований "Научное обеспечение безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций. Снижение рисков чрезвычайных ситуаций".

Обозначения

c — удельная теплоемкость материала, Дж/(кг·К); m_j (m_1, m_2, m_3) — объемная концентрация одной из фаз (воды, воздуха и твердого остатка); m_j' — эффективная объемная концентрация одной из фаз при объединении двух фаз в одну; w — влажность материала, %; λ — коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м·К); λ_i — коэффициент теплопроводности одной из фаз гетерогенной системы, Вт/(м·К); λ_i' — обобщенная теплопроводность бинарной системы в виде единичной обособленной фазы и обобщенной теплопроводности двух объединенных оставшихся фаз, Вт/(м·К); ρ — плотность материала, кг/м³. Индексы: i — номер фазы; 1, 2, 3 — фазы воды, воздуха и твердого остатка.

Литература

1. Бровка Г. П. Тепломассоперенос в природных дисперсных системах при промерзании. Минск: Навука і тэхніка, 1991.
2. Бровка А. Г., Романенко И. И. Приборы и методы исследования теплофизических характеристик и фазового состава воды горных пород при отрицательных температурах//Горная механика. 2009. № 1. С. 71–79.
3. Зайдель А. Н. Ошибки измерений физических величин. Л.: Наука. 1974.
4. Боровков А. А. Математическая статистика. М.: Лань, 2010.
5. Герасимович А. И., Матвеева Я. И. Математическая статистика. Минск: Вышэйшая школа, 1978.
6. Гутер Р. С., Овчинский Б. В. Элементы численного анализа и математической обработки результатов опыта. М.: Наука, 1970.
7. Берлинер М. А. Измерения влажности. М.: Энергия, 1973.
8. Васильев Л. Л., Танаева С. А. Теплофизические свойства пористых материалов. Минск: Наука и техника, 1971.
9. Дмитриевич А. Д. Определение теплофизических свойств строительных материалов. М.: Высшая школа, 1968.