

На правах рукописи

Абрамовских Алексей Андреевич

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОБМЕНА, ЗАЖИГАНИЯ И ГОРЕНИЯ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ
МАТЕРИАЛОВ И ТОРФА**

**01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы»
01.04.14 – «Теплофизика и теоретическая теплотехника»**

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Томск – 2008

Работа выполнена на кафедре физической и вычислительной механики механико - математического факультета ГОУ ВПО «Томский государственный университет»

Научный руководитель:

доктор технических наук
Голованов Александр Николаевич

Научный консультант:

доктор физико-математических наук,
профессор Кузин Александр Яковлевич

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук,
профессор Троицкий Олег Юрьевич

доктор физико-математических наук,
профессор Бубенчиков Алексей Михайлович

Ведущая организация:

Институт теплофизики СО РАН
им. С.С. Кутателадзе (г. Новосибирск)

Защита состоится 23 декабря 2008 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при Томском государственном университете по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Томского государственного университета по адресу: г. Томск, пр. Ленина, 34а.

Автореферат разослан «__»

2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета д.т.н.



Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. В настоящее время в мире происходит множество различного рода аварий и катастроф, часто связанных с гибелью людей, разрушением материальных ценностей, возникновением серьезных нарушений экологии и. т. д.

Все более актуальной становится тема чрезвычайных ситуаций природного характера, к которым относятся лесные и торфяные пожары. Российская Федерация славится своими лесами, она – один из крупнейших во всем мире экспортер древесины. Но в последнее время общая площадь лесов несоизмеримо сокращается. И одна из причин такого сокращения – лесные и торфяные пожары.

В последние годы наметилась тенденция увеличения количества лесных пожаров. Так, в России в 2000 году зарегистрировано 18,9 тысяч пожаров, в 2001 году – 20,9 тысяч пожаров, а в 2002 году - уже 34,3 тысяч пожаров. Лесные пожары охватывают площади от нескольких сотен до нескольких миллионов гектаров в год и оказывают разрушительное воздействие на древостой, вызывают повреждение органического слоя почвы и ее эрозию, загрязняют атмосферу и воду продуктами сгорания, дестабилизируют воздушное и речное сообщение, работу лесного сектора экономики, угрожают населенным пунктам. Вред, который они приносят человечеству, огромен, особенно если учитывать не только прямой, но и косвенный ущерб. В первой половине двадцатого столетия на территории России было 46 типов леса, из них до наших дней сохранилось только 25.

Горение лесных горючих материалов (ЛГМ) и торфа является сложным процессом и содержит следующие стадии: прогрев, сушку, пиролиз, зажигание, горение, образование коксового остатка и продуктов сгорания.

Для создания математических моделей этих процессов и их реализации необходима информация о теплофизических, термокинетических и гидродинамических характеристиках ЛГМ и торфа.

Объектом исследования являются ЛГМ и торф.

Предметом исследования являются процессы тепломассопереноса в ЛГМ и торфе.

Целью работы является:

1. Выяснить механизм испарения свободной и связанной влаги в ЛГМ.
2. С помощью потенциала влагопереноса А.В. Лыкова найти характеристики тепломассообмена ЛГМ и торфа и провести их сравнение с данными, полученными по классическим методикам.
3. Определить теплофизические характеристики торфа (коэффициенты теплопроводности и удельной теплоемкости) в зависимости от температуры, влагосодержания и его ботанического состава.
4. Экспериментально в лабораторных условиях исследовать процессы зажигания и горения торфа и ЛГМ.

Методы исследования. В качестве основных методов исследования использовались методы физического моделирования процессов тепломассообмена, зажигания и горения.

Задачи исследования. Исходя из указанной цели исследования, решались следующие задачи:

1. Обзор публикаций по теме исследования и создание экспериментальных установок для моделирования зажигания и горения торфа и процессов тепломассопереноса в ЛГМ в лабораторных условиях.

2. Проведение экспериментальных исследований, выбор и определение критериев подобия для ЛГМ и торфа.

3. Сравнительный анализ полученных данных.

4. Выяснение механизма зажигания и горения ЛГМ и торфа.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Впервые применен потенциал влагопереноса А.В. Лыкова для нахождения коэффициентов влагоемкости и теплопроводности ЛГМ и торфа.

2. Впервые показаны отличия в кинетике сушки свободной, связанной и капельной влаги.

3. Для капельной влаги найден новый закон испарения для крупных и мелких капель в зависимости от шероховатости поверхности и температуры.

4. Впервые для торфа найдены зависимости влагоемкости и теплопроводности от температуры и влагосодержания.

5. Найдена минимальная энергия зажигания для торфа в зависимости от ботанического состава, влагосодержания, плотности и зольности. Установлена зависимость скорости горения торфа от его плотности и влагосодержания.

6. Разработана и изготовлена модель устройства для определения пожароопасности хвойного лесного массива.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Конструкции и установки для проведения экспериментальных работ по исследованию процессов тепломассообмена, зажигания и горения торфа в лабораторных условиях.

2. Экспериментальные результаты определения характеристик теплообмена, зажигания и горения торфа на основе использования упомянутых ранее установок.

3. Экспериментальные результаты исследования процессов массообмена в ЛГМ и торфе.

Достоверность основных положений и выводов подтверждается:

1. Совпадением результатов исследований, полученным по различным методикам.

2. Сравнением полученных автором экспериментальных данных с данными Шубина Г.С., Жуковской В.И., Сеницына С.П., Абалтусова В.Е., Борисова А.А., Лободы Е.Л.

3. Сравнением полученных экспериментальных результатов с результатами, полученными по теории Лыкова А.В.

4. Применением современных методов планирования экспериментов и статистической обработкой результатов.

Практическая значимость полученных результатов. Полученные результаты вошли в базу данных для математических моделей процессов тепломассообмена, зажигания и горения ЛГМ и торфа. Разработано и изготовлено устройство для определения пожароопасности хвойного лесного массива, апробированные в натуральных условиях.

Апробация работы. Основные результаты исследований, представленных в диссертации, апробировались на международных и региональных конференциях, в том

числе на Международной конференции “Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия” (Иркутск, 2005), Международной конференции “Пятое Окуневские чтения” (Санкт-Петербург, 2006), Международной конференции “Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии” (Иркутск, 2007), Международной конференции “Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф” (Томск, 2008), International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2008 (Tomsk, Russia).

По теме диссертации опубликовано 13 работ, в том числе 3 статьи в центральной печати в журналах, рекомендованных ВАК, получен патент на полезную модель для определения пожароопасности хвойных лесных массивов.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов и списка литературы из 153 наименований на русском и иностранных языках. Работа содержит 139 страницы текста, 43 рисунка и 30 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируется актуальность работы, цель и задачи исследования, излагается краткое содержание работы. Отражена научная новизна работы и практическая значимость результатов исследований, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В разделе 1 дается краткий обзор по проблеме тепломассообмена ЛГМ и торфа, приводятся результаты исследований российских и зарубежных ученых, анализируются методы определения коэффициента влагопереноса, осуществляется выбор критериев подобия и формулируется объект исследований.

Раздел 2 посвящен описанию экспериментальных установок и методик, разработанных для моделирования процессов тепломассообмена, зажигания и горения ЛГМ и торфа.

В п. 2.1 представлен обзор и описание методик для определения потенциала влагопереноса, удельного коэффициента влагоемкости и влагопроводности ЛГМ и торфа.

Сорбция образцов ЛГМ исследовалась следующим образом. Отдельные хвоинки сосны, кедра, ели в количестве $10 \div 20$ штук помещались на подложку из полиэтилена, которая устанавливалась в кювету, заполненную водой. Глубина "посадки" ЛГМ h составляла $(3 \div 4) \cdot 10^{-3}$ м. Кроме того сорбция осуществлялась непосредственно в окружающем воздухе с предварительно высушенными при $T=100^\circ\text{C}$ образцами. По результатам взвешивания строились зависимости m/m_0 от времени t для определения влагоемкости и влагопроводности ЛГМ. Систематическая погрешность, возникающая из-за нарушения массопереноса за время взвешивания, устранялась использованием нескольких подложек с ЛГМ аналогично устранению систематической погрешности при десорбции.

Удельная влагоемкость хвои c_m определялась из уравнения $m-m_0 = c_m m (\theta_2 - \theta_1)$, где

θ_1 и θ_2 – потенциалы влагопереноса до начала влагообмена и в конце его соответственно.

Коэффициент удельной теплопроводности λ_m определялся из закона влагопереноса, записанного для изотермических условий

$$j = \lambda_m \nabla \theta, \quad (1)$$

где $j = \frac{m - m_0}{S \Delta t}$ – поток массы влаги, перенесенной через единицу площади хвоинки S за

промежуток времени Δt . Градиент потенциала влагопереноса определялся как среднеарифметический для различных элементов хвоинок по ее длине. Одновременно сорбции подвергалось 5 ÷ 20 хвоинок. В процессе проведения этих экспериментов контролировалась относительная влажность воздуха φ с помощью психрометра аспирационного М-34, атмосферное давление p – с помощью барометра анероида БАММ-1, температура окружающего воздуха T – с помощью ртутного термометра. Суммарные погрешности определения параметров не превышали $\delta m \leq 2,1 \%$; $\delta T \leq 3,8\%$; $\delta t \leq 1 \%$; $\delta P \leq 3,7 \%$; $\delta W \leq 6 \%$.

В п. 2.2 исследуются характеристики торфа различного ботанического состава.

Отбор образцов с ненарушенной и нарушенной структурой из залежи производится с помощью специального оборудования для ручного бурения и портативных пробоотборников. На физико-технические анализы (ботанический состав, степень разложения, влажность, зольность) пробы торфа нарушенной структуры из залежи отбираются обычно пробоотборником торфоразведочного бура типа ТБГ-1 конструкции ПГО Торфгеология. Бур ТБГ-1 представляет собой сборно-разъемную трубчатую металлическую конструкцию, состоящую из пробоотборника, зонда, бурильных труб и ручки. Пробы торфа отбирались, начиная от поверхности, последовательно погружая пробоотборник на глубину 0,5; 1,0; 1,5 м и т.д. На физико-технические анализы пробы отбирались послойно через 0,25 м, для чего содержимое полуметрового челнока делят на две равные части и упаковывают как две пробы в отдельные полиэтиленовые пакеты или другую герметичную тару. Масса пробы (согласно ГОСТ 17644-83. Торф. Методы отбора проб из залежей и обработки их для лабораторных испытаний) должна быть не менее 0,4 кг.

Сущность метода заключается в определении при помощи микроскопа количественного соотношения в процентах остатков растений-торфообразователей, слагающих растительное волокно в пробе, освобожденной от гумуса. По ботаническому составу при помощи «ключа» определялся тип, группа и вид торфа.

В п. 2.3 дается описание методик определения теплофизических, термокинетических и гидродинамических характеристик торфа.

Теплофизические характеристики торфа c_p и λ определялись методом динамического калориметра с помощью измерителей теплоемкости ИТ- c_p -400 и теплопроводности ИТ- λ -400. Суммарные погрешности определения теплофизических характеристик торфа не превышали $\delta c_p \leq 8,7 \%$, $\delta \lambda \leq 9,3 \%$. Доверительные интервалы рассчитывались по результатам 5 опытов с доверительной вероятностью 0,95.

Изменение массы образцов торфа с течением времени при температуре $T < 373$ К характеризует процесс испарения свободной, механически и физически связанных влаг, т.е. процесс сушки торфа, а при $T > 373$ К – процесс пиролиза торфа.

Коэффициент фильтрации K рассчитывался из закона фильтрации Дарси по формуле

$$u = -\frac{K}{\mu} \frac{dP}{dx} \quad (2)$$

Уравнение (2) справедливо для чисел Рейнольдса $Re = \frac{Gd_p}{\mu} < 1 \div 10$, где $G = \rho u$ - массовый расход газа на единицу площади среды.

В результате интегрирования уравнения (2) по длине образца получим формулу для определения отношения коэффициента проницаемости к коэффициенту динамической вязкости K/μ , выраженного через массовый расход G и разность квадратов давлений на входе P_1 и выходе P_2 из образца толщиной h

$$\frac{K}{\mu} = \frac{2R_g T G h}{(P_1^2 - P_2^2)} \quad (3)$$

Суммарные погрешности определения параметров не превышали $\delta(\rho v)_w \leq 5,2 \%$, $\delta P \leq 3,8 \%$.

В п. 2.4 рассматривается испарение свободной и связанной влаги.

Считается, что вода может взаимодействовать с материалом несколькими способами: химически (на молекулярном уровне), физико-химически (адсорбционная, осмотическая и капиллярная влага) и физико-механически (капельная и пленочная влага). Физико-механическую влагу называют также свободной, а химическую и физико-химическую — связанной. В процессе испарения участвуют все типы влаги кроме химически связанной, так как она обладает наибольшей энергией связи с материалом.

Для математического описания скорости испарения свободной воды $(\rho v)_w$ на плоской границе раздела сред используют закон Герца – Кнудсена

$$(\rho v)_w = \frac{AM(P - P_0)}{\sqrt{2\pi MRT}}, \quad P = P_0 \exp\left(-\frac{L}{RT}\right) \quad (4)$$

В п. 2.5 представлены методики определения характеристик зажигания и горения торфа. Эталонным источником зажигания, моделирующим реальные источники зажигания торфа (горящая спичка, сигарета, тлеющая веточка), является спираль тонкой намотки из нихромовой проволоки диаметром $1,5 \cdot 10^{-3}$ м. Внешний диаметр спирали $1,5 \cdot 10^{-2}$ м, электрическое сопротивление 23 Ом. Под минимальной энергией зажигания Q понимается значение тепловой энергии, выделяющейся с поверхности эталонного источника зажигания с момента его контакта с поверхностью торфа до момента начала горения t

$$Q = J \cdot \Delta U \cdot \Delta t \quad (5)$$

В экспериментах задавались сила тока J и падение напряжения на спирали ΔU , контролировались его сопротивление при рабочей температуре, время зажигания с помощью электронного секундомера типа СЭЦ и зольность $Z = m/m_z$. Варьировались влагосодержание образцов торфа $W = (m - m_0)/m_0$ и их плотность ρ .

Образцы торфа кубической формы укладывались на бетонное основание, боковые поверхности образцов окружались кирпичной кладкой, верхняя поверхность оставалась открытой. Зажигание образцов торфа осуществлялось в центре открытой поверхности образцов в точке с помощью эталонного источника. Геометрические

размеры образцов l выбирались из условия $a/l \gg v$, характеризующего малость стока тепла через боковые поверхности образцов. Здесь a – коэффициент теплопроводности торфа, v – скорость распространения фронта торфяного пожара. Размеры образцов 10 x 10 x 10 см.

В процессе проведения экспериментов контролировались температура торфа T в точках с координатами x, y, z с помощью ХА термопары с диаметром смя $2 \cdot 10^{-4}$ м, плотность теплового потока q определялась экспоненциальным методом с помощью датчика плотности теплового потока. Скорость распространения фронта пожара v находилась как отношение пути, пройденного фронтом пожара в единицу времени t . Для устранения систематической погрешности, связанной с искажением структуры образцов торфа из-за использования контактных методов определения температуры, использовалась одна термопара в электро-термоизоляционном чехле, которая устанавливалась в контролируемую точку с координатами x_1, y_1, z_1 . После достижения фронтом пожара этой точки эксперимент прекращался и брался другой образец торфа с термопарой, расположенной в точке с координатами x_2, y_2, z_2 и т.д. Суммарные погрешности не превышали: $\delta T < 4,6 \%$; $\delta q < 9,1 \%$.

В п. 2.6. представлены уравнения переноса влаги в ЛГМ. Приведено аналитическое решение уравнения влагопереноса А.В. Лыкова

$$W(\tau) = (U_2(\tau) - U_1(\tau)) \cdot \frac{1}{2} + (U_1(\tau) - U_2(\tau)) \cdot \frac{4l}{\pi^2} \cdot e^{-\left(\frac{\pi \cdot A}{l}\right)^2 \tau}, \quad (6)$$

используемое в дальнейшем для сравнения с данными экспериментов.

В разделе 3 осуществлено экспериментальное исследование процессов массообмена в ЛГМ.

В п. 3.1 представлены результаты определения потенциала влагопереноса и коэффициентов удельной влагопроводности и влагоемкости ЛГМ.

На рисунке 1 представлены типичные изотермы десорбции образцов хвой сосны при следующих начальной массе, влагосодержании и влажности: $m_0 = (1,24 \pm 0,12)$ г, $W = (138,0 \pm 0,2)\%$, $\omega = (58,6 \pm 0,2)\%$. Здесь кривые 1-4 получены при температурах $T = 369$ К, 345 К, 325 К, и 303 К соответственно.

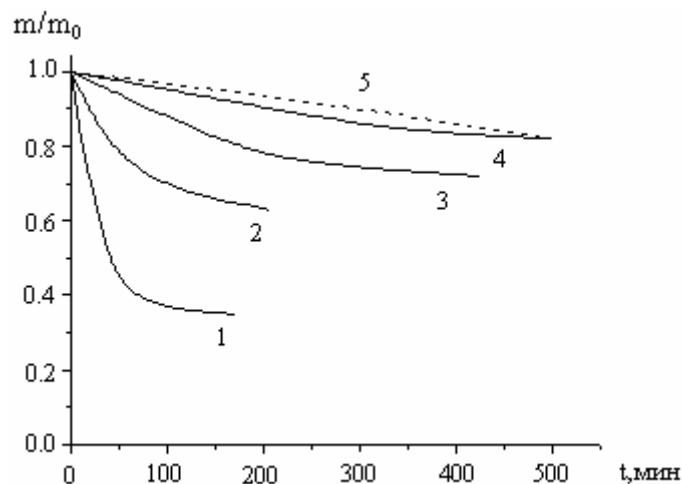


Рисунок 1 – Изотермы десорбция хвой сосны t , мин

В таблице 1 приведены значения удельной влагоемкости и влагопроводности для

различных типов ЛГМ.

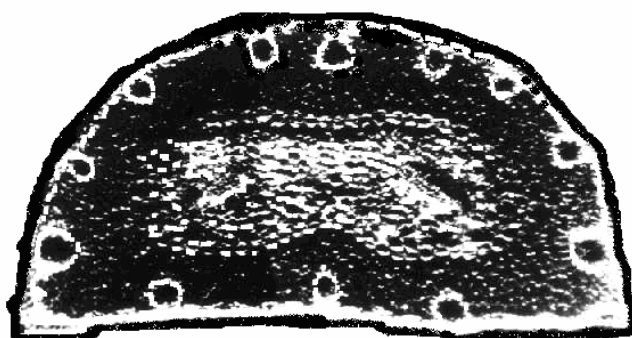
Таблица 1. Коэффициенты влагоемкости и влагопроводности для различных типов ЛГМ

Тип ЛГМ	$\lambda_m, 10^{-6}, \text{кг}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{М})$	$c_m, \text{кг}/(\text{кг}\cdot^{\circ}\text{М})$
Кедр	3,44	0,0041
	2,29	0,0044
	0,97	0,0025
Сосна	0,49	0,0031
	0,37	0,0026
	0,33	0,0023
Ель	1,08	0,0049
	0,51	0,0047
	0,26	0,0045

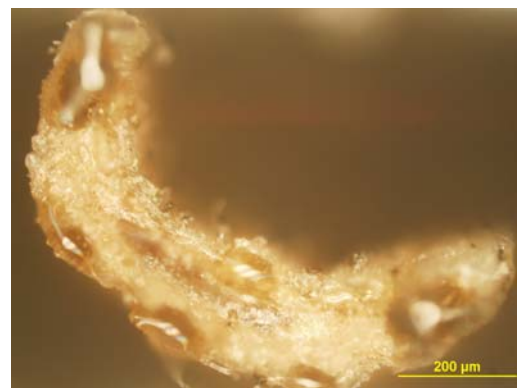
Анализ полученных результатов свидетельствует об уменьшении c_m и λ_m с ростом температуры. Наиболее сильная зависимость параметров влагообмена от температуры наблюдается для хвои кедра, что вероятно, связано с внутренней структурой ЛГМ.

Хвоя сосны, кедра и ели представляет собой биологический объект, имеющий сложную внутреннюю структуру.

На рисунке 2 представлены фотографии среза миделевого сечения живой хвои сосны (а) и абсолютно сухой хвои сосны (б).



а



б

Рисунок 2 - Срезы миделевых сечений живой хвои сосны (а) и сухой хвои сосны (б)

Микрофотографии срезов миделевых сечений хвои показывают наличие в центре хвои двух влагопроводов, по которым поступает капиллярная влага к биологическим клеткам. Расположенные по периферии среза устьица (их обычно 12) – микропоры. Через них осуществляется испарение влаги. Пространство между оболочкой, устьицами и проводящими каналами заполнено клетками, между которыми в микропорах может осуществляться адсорбционный и диффузионно-осмотический обмен влагой. Следовательно хвоя содержит в себе все типы связей влаги: адсорбционную, капиллярно-конденсационную, осмотическую и связанную в полостях клеток хвои.

Другая особенность структуры хвои - различная плотность по ее длине: у основания она меньше, чем в верхней части, в $1,2 \div 1,3$ раза. Соответственно меньше в $1,5 \div 2,0$ раза и диаметры проводящих каналов. Такая особенность структуры с

различной пористостью и плотностью приводит к тому, что процесс массопереноса носит неоднородный характер по длине хвои, а саму хвою можно рассматривать одновременно как коллоидное, так и капиллярно-пористое тело.

При десорбции и сорбции влаги структура хвои изменяется. Из рисунка 2,б видно, что для абсолютно сухой хвои сосны два проводящих канала, устьица и клетки атрофированы. Влагоперенос сопровождается усадкой при десорбции и разбуханием - при сорбции воды. Увеличение температуры приводит к снижению диаметров влагопроводов, доступ капиллярной влаги при этом становится затрудненным, что и является причиной снижения s_m и λ_m . Для хвои кедра, имеющей большие размеры, этот эффект проявляется в большей степени, чем для хвои сосны и ели. Это подтверждает предложенный механизм влияния температуры на характеристики влагопереноса.

По результатам проведенных исследований рассчитаны основные массообменные критерии подобия. В таблице 2 приведены значения этих критериев для хвои сосны.

Таблица 2. Массообменные критерии подобия для хвои сосны

Ki_m	Bi_m	Lu_m	Fo_m
0,006-0,049	0,006	30,38	65,5

Связь критериев подобия влагопереноса с характеристиками классической теории массопереноса, когда поток массы определяется уравнением

$$j = \beta \Delta C, \quad (7)$$

Информация о значениях критериев подобия позволяет рассчитать коэффициент массообмена β , необходимый для предварительной оценки пожарной опасности лесных массивов, а также для использования его в базе данных для замыкания математических моделей процессов тепломассообмена в ЛГМ. С другой стороны теория массообмена А.В. Лыкова, основанная на определении потенциала влагопереноса, также позволяет найти значения β через значения критериев подобия

$\beta = Bi_m A_m / l$, $Fo = \frac{Fo_m}{Lu}$. Так, значения величины β , рассчитанные по методике А.В.

Лыкова, составили $1,49 \cdot 10^{-2}$ кг/(м²·с) и $1,38 \cdot 10^{-2}$ кг/(м²·с) соответственно, что свидетельствует о достоверности полученных результатов.

В п. 3.2 проводится исследование массообмена ЛГМ для различных типов влаги. Исследуются закономерности испарения связанной и свободной влаги для хвои кедра, сосны и ели. Приблизненно форму каплю воды на поверхности подложки можно считать шаровым сегментом, объем которого рассчитывается по формуле

$$V = \frac{1}{6} \pi h (h^2 - 3r^2) \quad (8)$$

На рисунке 3 представлено схематическое изображение капли на поверхности.

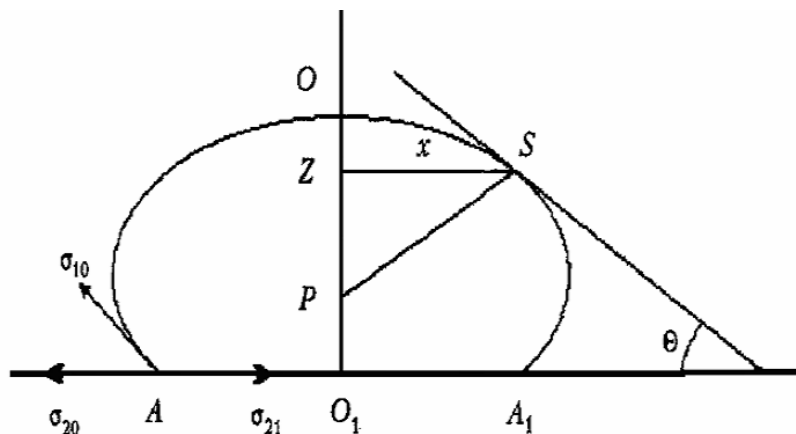


Рисунок 3 – Схематическое изображение капли на поверхности

На рисунке 4 для сравнения показаны фотографии капель на шпире для $r=4 \cdot 10^{-3}$ и $r=20 \cdot 10^{-3}$ м, подтверждающие их полусферическую форму.



Рисунок 4 - Фотография капель на шпире при $r = 4 \cdot 10^{-3}$ и $20 \cdot 10^{-3}$ м

Для несмачивающихся (гидрофобных) поверхностей такое приближение недопустимо, так как поверхность капли достаточно сложна и описывается формулой Адамса—Бешфорта

$$2 + \beta \frac{z}{b} = \left(\frac{\beta V}{\pi x^2} - \frac{2 \sin \Theta}{x/b} \right), \quad (9)$$

где $\beta = b^2 \rho_a g / \sigma$, $x = ZS$, $b = PO$, $z = O_1Z$ (рисунок 3), σ — коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и газом.

В ЛГМ может присутствовать свободная и связанная влага. В свою очередь свободная влага бывает капельной (располагается в виде капель на поверхности ЛГМ) и пленочной (пленка на внешней поверхности ЛГМ). Связанная влага в хвое состоит из капиллярной, адсорбционной и осмотической.

Испарение капель, расположенных на шероховатой поверхности, при $D_0 = (1 \div 10) \cdot 10^{-3}$ м, $R_z = (0,036 \div 3,7) \cdot 10^{-6}$ м, $T = (297 \div 303)$ К подчиняется зависимости

$$\frac{m_\tau}{m_d} = 1 - 0,273(1 - 1,08 \cdot 10^5 R_z) D_0^{-1,426} \tau, \quad (10)$$

полученной в результате аппроксимации полного двухфакторного эксперимента. Погрешность аппроксимации эмпирической формулы (10) не более 8,4 %.

В п. 3.3. проводится экспериментальное исследование сушки и пиролиза ЛГМ. На рисунке 5 показаны типичные зависимости убыли безразмерной массы от времени для хвои ели, полученные для разных температур при $W=0,75$; $m_1 = 1,7 \cdot 10^{-3}$ кг; $\varphi = 0,67$ %; $p = 753$ мм рт. ст. Считается, что ЛГМ содержит свободную и связанную влагу.

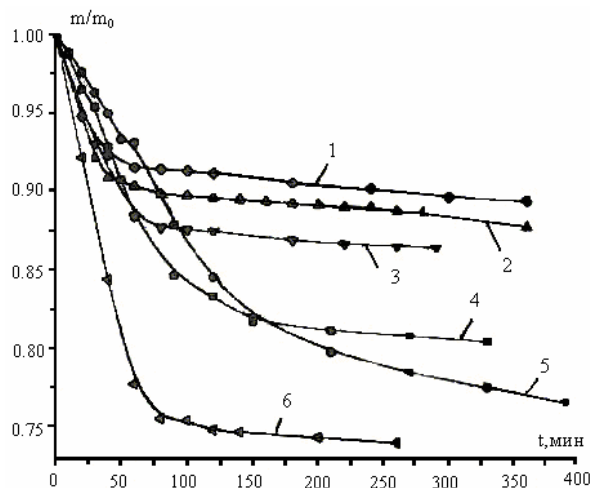


Рисунок 5 - Зависимость убыли безразмерной массы от времени для хвой ели

Кривая 1 получена для испарения связанной влаги при $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 2 – связанной и свободной влаги при $W = 100\%$ и при $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; 3 - связанной влаги при $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 4 – связанной и свободной влаги при $W = 100\%$ и при $t = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$; 5 – связанной влаги при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 6 – связанной и свободной влаги $W = 100\%$ и при $t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Для исследуемых материалов характер зависимостей следующий: в начале процесса масса исследуемого образца экспоненциально уменьшается, а затем достигает некоторой стационарной величины. При этом с увеличением температуры скорость испарения влаги из хвой увеличивается, а полное время сушки уменьшается. Анализ результатов также показывает, что при увеличении массы свободной влаги в ЛГМ скорость сушки возрастает. Увеличение температуры также увеличивает скорость сушки и уменьшает ее время. В моменты времени, когда испарение свободной влаги заканчивается, на зависимостях безразмерной массы от времени появляется точка перегиба (рисунок 5, кривые 2, 4, 6), что свидетельствует о различной кинетике сушки свободной и связанной влаги.

На рисунке 6 представлены зависимости безразмерной убыли массы хвой сосны от времени, полученные в результате численного решения задачи и лабораторных экспериментов.

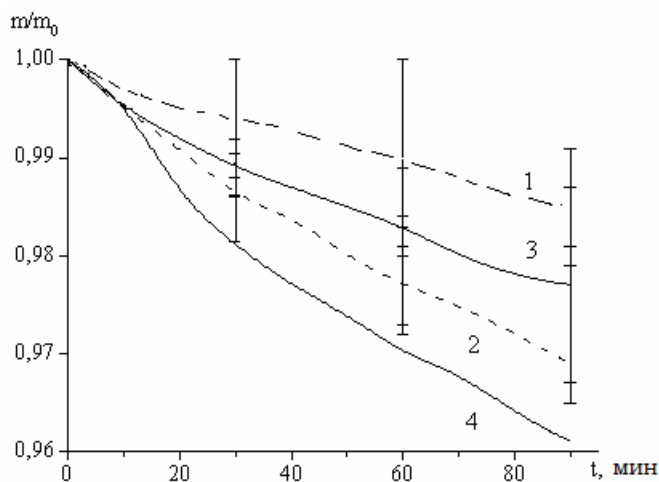


Рисунок 6 - Экспериментальные (1 2) и теоретические (3 4) зависимости убыли массы хвой сосны от времени ($\rho_s = 55,3\text{ кг/м}^3$), полученные Лободой Е.Л.

Сравнивая экспериментальные кривые с результатами численного эксперимента, можно сделать вывод, что полученные экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетными в пределах доверительного интервала.

В п. 3.4 приводится сравнительный анализ характеристик массообмена, полученных по различным методикам. Используются результаты измерения скорости убыли массы хвои $j=(\rho v)_w$ и значения разности концентраций паров влаги $\Delta C=C_k-C_n$, где C_k и C_n - конечная и начальная концентрации. По формуле (7) при условия $C_k = m/m_0$, $C_n = \varphi$ рассчитывался коэффициент массообмена β .

Скорость убыли массы рассчитывалась по формуле $(\rho v)_w = dm/dts$, где $S = \frac{\pi D l}{2} + Dh$, а D , l , h – диаметр, длина и высота хвоинки (объем хвои моделировался объемом полуцилиндра).

В качестве примера на рисунке 7 представлена зависимость влагосодержания хвои сосны от времени при температурах 20 °С, 30 °С и 40 °С соответственно.

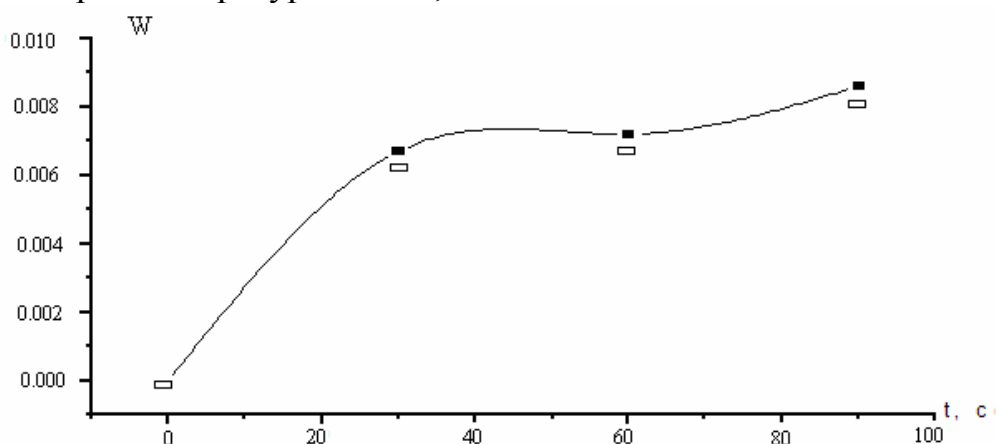


Рисунок 7 – Сравнение теоретических и экспериментальных значений влагосодержания хвои сосны

Здесь сплошная линия - это теоретические данные, рассчитываемые по формуле (6) а прямоугольники - данные эксперимента. Анализ рисунка 7 свидетельствует об удовлетворительном согласии теоретических и экспериментальных значений влагосодержания как функция времени.

В п. 3.5 рассматривается способ определения пожароопасности лесного участка по влагосодержанию образцов ЛГМ. Суть способа заключается в измерении геометрических размеров образцов хвойных пород и определении их электрического сопротивления. Пожарная опасность хвойных лесов оценивается по критическому значению влагосодержания ЛГМ W_*

$$W_* = \frac{m - m_0}{m_0}, \quad (11)$$

где m_0 – масса абсолютно сухого образца ЛГМ, m – масса влажного образца ЛГМ в пожароопасном состоянии (опытная величина).

Удельное электрическое сопротивление $\tilde{\rho}$ рассчитывается по формуле

$$\tilde{\rho} = R \frac{l}{S}, \quad (12)$$

где R – измеренное электрическое сопротивление ЛГМ, l – длина образца, $s = \beta \pi d^2/4$ – площадь его поперечного сечения, d – диаметр. Электрическое сопротивление измеряется высокоточным мегомметром, длина – линейкой, диаметр – микрометром. В формуле (9) использован коэффициент $\beta < 1$, который может быть определен заранее для данного типа растительности. Если в качестве образца ЛГМ исследуется хвоя сосны, кедра и ели (типичная растительность для регионов Сибири и Дальнего востока), то миделево сечение для них представляет собой полукруг, а коэффициент $\beta = 0,5$.

На рисунке 8 показана универсальная зависимость удельного сопротивления ρ от влагосодержания W для хвои кедра, сосны и ели.

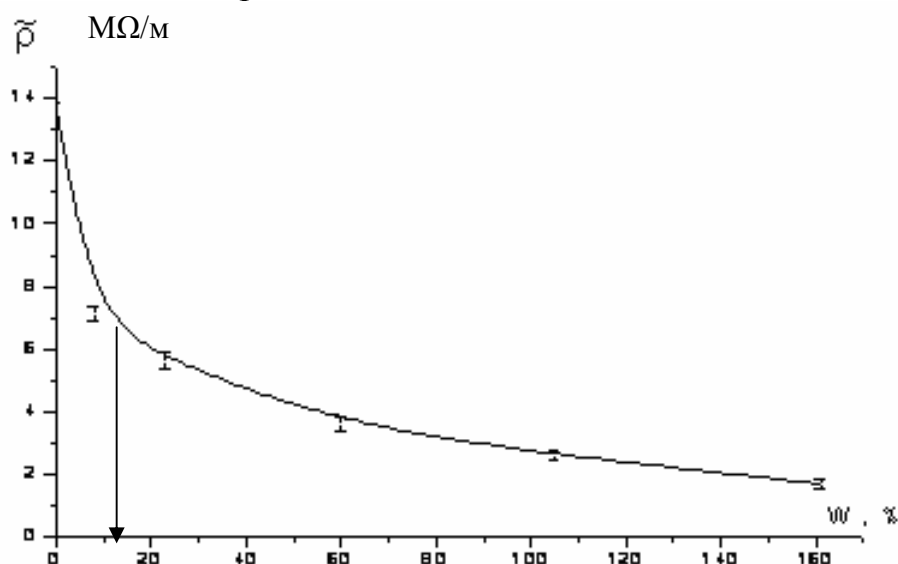


Рисунок 8 - Зависимость удельного сопротивления от влагосодержания ЛГМ

График зависимости $\rho(W)$ для контролируемого лесного участка строится предварительно в лабораторных условиях с возможно меньшим доверительным интервалом. Измерение влагосодержания W осуществляется взвешиванием на аналитических весах ВЛР–200 влажной и абсолютно сухой хвои, высушенной при температуре 100 ± 1 °С.

В разделе 4 представлено экспериментальное исследование процессов теплообмена, зажигания и горения в торфе. В п. 4.1 приводятся результаты определения потенциала влагопереноса, коэффициентов удельной влагоемкости и влагопроводности торфа. В предыдущем разделе было показано, что теория массообмена А.В. Лыкова, использующая понятие потенциала влагопереноса, может быть успешно использована для исследования процессов сушки ЛГМ. В этой связи представляет интерес применить эту теорию для изучения массообмена в торфе.

В таблице 3 представлены значения потенциала влагопереноса в зависимости от влагосодержания и ботанического состава торфа, полученные по методике, изложенной в п. 2.1.

Таблица 3. Значения потенциала влагопереноса Θ в зависимости от влагосодержания и ботанического состава образцов торфа

№ торфа	W	$\Theta, ^\circ M$	Ботанический состав
1	1,02	56,40	Сфагнум бурый 90%, корешки вересковых кустарников 10%, кора сосны ед.
2	4,33	239,46	Сфагнум балтийский 65%, сфагнум узколиственный 10%, пушица 10%, шейхцерия 10%, корешки вересковых кустарников 5%
3	6,68	369,42	Кора и древесина сосны 65%, осока сближенная 20%, осока елата 3%, осока волосистоплодная 1%, осока вздутая ед., хвощ 10%

По данным таблицы 3 определялись значения коэффициентов удельной влагоемкости c_m и влагопроводности λ_m .

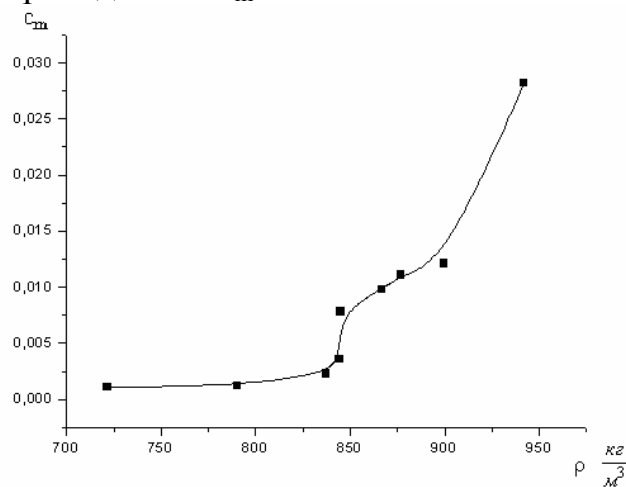


Рисунок 9 – Зависимость влагоемкости торфа от плотности

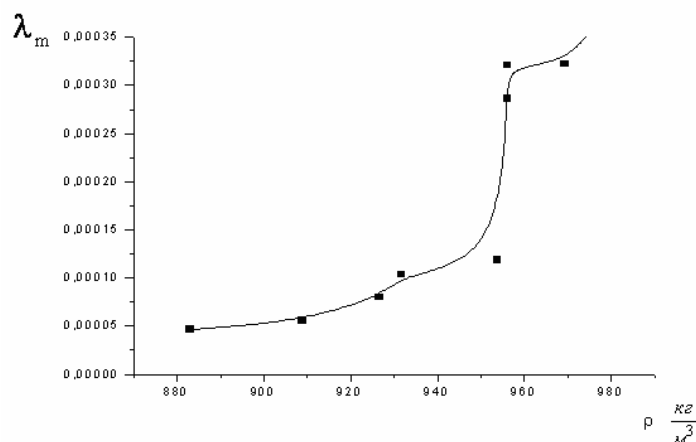


Рисунок 10 – Зависимость влагопроводности торфа от плотности

Анализ полученных результатов показывает, что с ростом плотности торфа его коэффициенты влагоемкости и влагопроводности растут. Визуализация микроструктуры образцов торфа с помощью электронного микроскопа с 1000 - кратным увеличением свидетельствует о том, что в образцах торфа большей плотности имеется больше количество пор малого диаметра, что способствует более интенсивному проникновению капиллярной влаги внутрь образцов торфа и соответственно увеличению значений c_m и λ_m .

В таблице 4 представлены результаты расчета массообменных критериев подобия для торфа различного ботанического состава.

Таблица 4. Массообменные критерии подобия для торфа различного ботанического состава

№ образца	Ki	Bi	Lu	Fo
1	33,035	324,345	13,174	0,162
2	22,298	278,711	17,894	0,311
3	17,218	115,570	49,640	0,257

Значения критериев подобия необходимы для моделирования процессов массообмена в торфе и кроме того позволяют осуществить связь с характеристиками, полученными по классической теории массопереноса, когда поток массы определяется по уравнению (7). Значения коэффициента массообмена β представлены в таблице 5.

Таблица 5. Коэффициент массообмена β для различных видов торфа

№ торфа	β , кг/(м ² · с)	№ торфа	β , кг/(м ² · с)	№ торфа	β , кг/(м ² · с)
1	1,097563	2	0,860682	3	0,842755
	1,244365		0,933002		1,161921
	1,068737		1,118867		1,097563
	1,900004		0,859376		1,244365
	1,666847		1,165168		1,068737

Сравнение полученных данных для торфа и ЛГМ свидетельствуют о большом разбросе значений β , что объясняется более сложной структурой торфа, его различной пористостью и неоднородностью ботанического состава.

В п. 4.2 определяются теплофизические, термокинетические и гидродинамические характеристики торфа различного ботанического состава.

На рисунках 11, 12 представлены зависимости теплофизических характеристик c_p и λ от температуры при различных влагосодержаниях торфа $W = (m_0 - m_k) / m_k$, где m_0 - начальная, а m_k - конечная (высушенных при температуре 100⁰С) массы образцов. Кривые 1-3 на рисунках 11, 12 соответствуют значениям влагосодержания 0; 0,05 и 0,43 соответственно. Плотности образцов составляли $\rho = (223 \div 761)$ кг/м³.

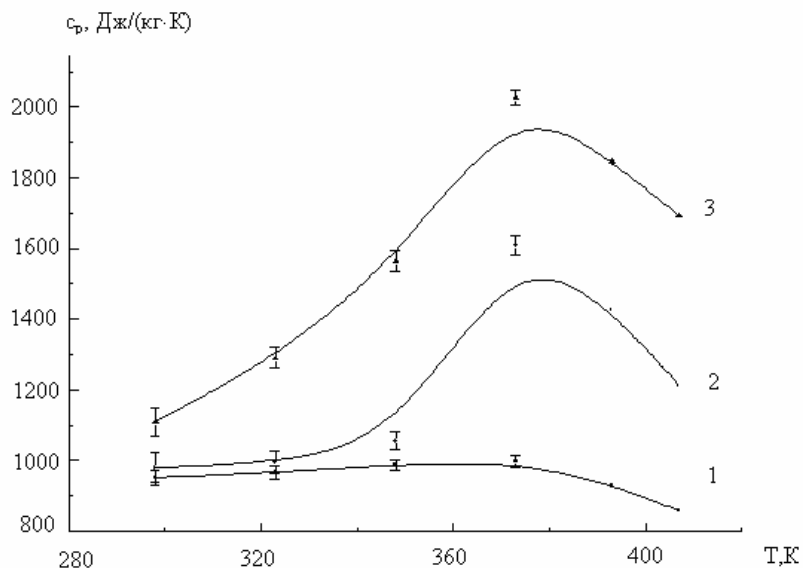


Рисунок 11 – Зависимость теплоемкости торфа от температуры

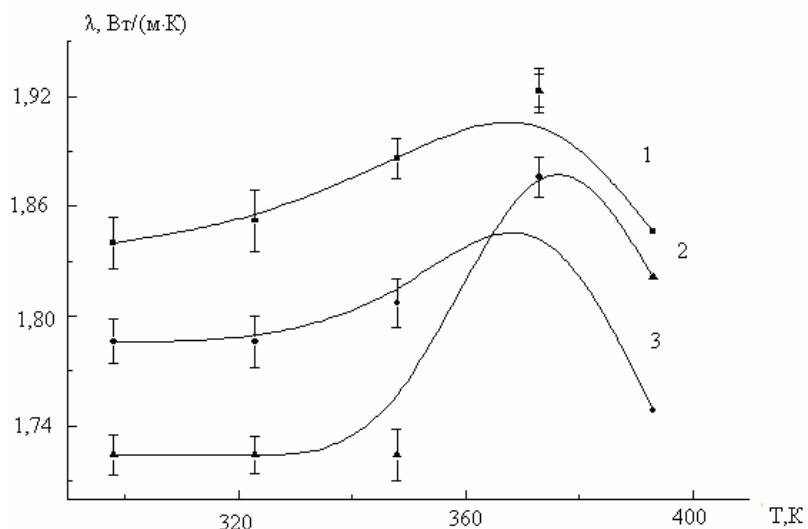


Рисунок 12 – Зависимость теплопроводности торфа от температуры

Обращает на себя внимание факт немонотонной зависимости c_p и λ от температуры. Однако условия эксплуатации приборов ИТ- λ -400 и ИТ- c_p -400 не позволяют проводить измерения образцов при их термическом разложении, поэтому результаты, полученные при температурах $t > 100$ °С, когда начинается пиролиз торфа, не заслуживают доверия.

Немонотонный характер зависимостей c_p и λ от температуры можно объяснить многокомпонентностью состава торфа и разными скоростями нагрева составных компонентов.

Суммарные коэффициенты теплоемкости и теплопроводности торфа можно представить через объемные доли его компонентов φ_i

$$c_p = \sum_{i=1}^3 c_{pi} \varphi_i, \quad \lambda = \sum_{i=1}^3 \lambda_i \varphi_i, \quad (13)$$

где ($i = 1$ соответствует сухому торфу, $i = 2$ - воде в жидкокапельном состоянии, $i = 3$ - газовой фазе). При нагревании торфа вследствие его пиролиза состав газовой фазы меняется

$$c_{p3} = \sum_{\alpha=1}^4 c_{p\alpha} c_{\alpha}, \quad \lambda_3 = \sum_{\alpha=1}^4 \lambda_{\alpha} c_{\alpha}, \quad (14)$$

где c_{α} - массовые доли газовой фазы ($\alpha = 1$ для O_2 , $\alpha = 2$ для N_2 , $\alpha = 3$ для паров NO_2 , $\alpha = 4$ для CO_2).

Немонотонный характер зависимостей теплофизических характеристик торфа λ и c_p от температуры на рисунках 11 и 12 можно объяснить снижением паров воды при температуре выше 373 К, что приводит к уменьшению суммарных значений коэффициентов λ и c_p .

При росте влагосодержания коэффициент удельной теплоемкости торфа c_p растет, а теплопроводности λ - убывает, что объясняется более высокими значениями удельной теплоемкости и теплопроводности воды по сравнению с остальными компонентами торфа $c_p = 4180$ Дж/(кг·К), $\lambda = 0,597$ Вт/(м·К).

Результаты полного двухфакторного эксперимента, в котором варьировались влагосодержание и температура, аппроксимированы при $298 \text{ К} \leq T \leq 373 \text{ К}$, $0 \leq W \leq 0,43$ формулами

$$c_p = (765,0 - 1577,8W) \exp[(0,64 \cdot 10^{-3} + 0,0175W)T], \quad (15)$$

$$\lambda = (0,585 - 0,495W + 0,987W^2) \cdot T^{0,2} \quad (16)$$

с погрешностями аппроксимации $\delta c_p \leq 9,7 \%$, $\delta \lambda \leq 0,6 \%$.

В п. 4.3 представлены результаты определения термокинетических констант сушки и пиролиза торфа. Термическое разложение торфа (пиролиз) – стадия, предшествующая зажиганию этого топлива. Для математического моделирования сушки и пиролиза торфа необходима информация о термокинетических константах этих процессов - предэкспоненциального множителя K_2 и аналога энергии активации E в предположении аррениусовской зависимости скорости сушки и пиролиза от температуры T .

На рисунке 13 показано изменение относительной массы образцов торфа для процессов сушки и пиролиза при различной плотности ρ , влагосодержании W и зольности Z торфа. Номера кривых на рисунке 13 соответствуют условиям проведения экспериментов, указанных в таблице 6.

В таблице 6 приведены термокинетические константы сушки и пиролиза торфа.

Таблица 6. Термокинетические константы сушки и пиролиза торфа

№ кривой	Процесс	Z	ρ , кг/м ³	W	L_1, L_2 , Дж/моль	$K_{01}, K_{02}, \text{с}^{-1}$
1	Сушка	0,07	0,64	0,05	47367	$1,425 \cdot 10^7$
2	Сушка	0,62	0,49 ÷ 0,64	0,15 ÷ 0,22	8642,4	$2,6 \cdot 10^6$
3	Пиролиз	0,56	0,43 ÷ 0,49	0,04	6315,6	$1,9 \cdot 10^6$

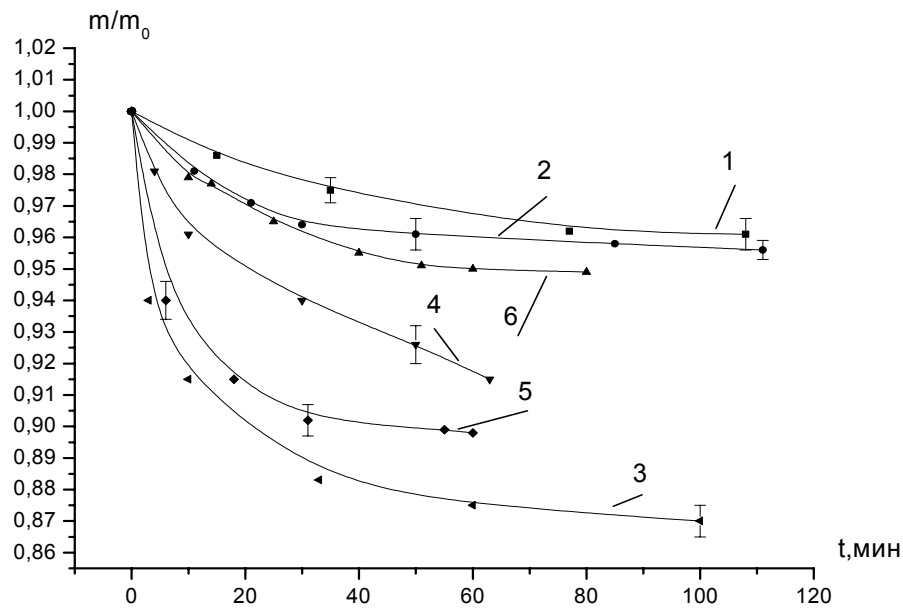


Рисунок 13 - Зависимость убыли относительной массы образцов торфа от времени

Анализ результатов, представленных на рисунке 13, свидетельствует о сильной зависимости убыли относительной массы образцов торфа от начального влагосодержания W и плотности ρ для процесса пиролиза (кривая 3), $T = 403$ К. Так, при одинаковом влагосодержании увеличение плотности торфа в 2 раза приводит к более интенсивному пиролизу (кривые 1, 2), а увеличение влагосодержания в 3 раза - к более интенсивным сушке и пиролизу (кривые 1, 3). Унос свободной и связанной влаги при сушке происходит быстрее при меньшей плотности торфа (кривые 4, 5). Однако низкая зольность торфа может существенно изменить скорость сушки (кривые 4, 6), что свидетельствует о сложности процессов массообмена в торфе, обусловленной его структурой и ботаническим составом.

Эффективные константы K_{01} , K_{02} , L_1 , L_2 определялись методом спрямления по формулам

$$\begin{aligned} \ln(m_1 - m_{10}) &= \ln(m_{1H} - m_{10}) - K_1(T)t, \\ \ln(m_2 - m_{20}) &= \ln(m_{2H} - m_{20}) - K_2(T)t. \end{aligned} \quad (17)$$

Анализ результатов, представленных в таблице 6, показывает, что на величины L_i и K_{0i} ($i = 1, 2$) в большей степени оказывает влияние зольность образцов торфа (отличие может достигать одного порядка).

В п. 4.4 представлены результаты определения гидродинамических характеристик торфа.

В таблице 7 даны результаты расчетов коэффициента фильтрации воздуха K в зависимости от плотности ρ и влагосодержания W торфа.

Таблица 7. Коэффициент фильтрации торфа в зависимости от плотности и влагосодержания

№ п/п	$K, 10^{-5}, \text{м}^2$	W	$\rho, \text{кг}/\text{м}^3$
1	3,067	0,055	745,098
2	5,381	0,063	549,019
3	6,727	0,077	693,877
4	1,901	0,156	881,67
5	0,648	0,225	396,99
6	1,843	0,933	591,836
7	0,892	0	539,29
8	2,305	1,5	637,755
9	2,690	1,67	470,588

Видно, что для сухого торфа (опыты 1, 2, 3, 7; $W = 0 \div 0,077$) увеличение плотности образцов приводит к увеличению коэффициента фильтрации K , причем эта зависимость близка к линейной. Торф большей плотности имеет меньшие диаметры пор (подтверждено визуальными наблюдениями поверхности в микроскоп типа АУ-12), с чем и связано ухудшение фильтрации воздуха через поры торфа.

Для образцов торфа примерно одинаковой плотности $\rho = (539 \div 639) \text{ кг}/\text{м}^3$ увеличение влагосодержания от 0 до 1,5 ухудшает фильтрационные процессы, коэффициент фильтрации воздуха возрастает в несколько раз (опыты 2, 3, 6, 7, 8). Визуальный осмотр влажных и сухих образцов торфа показал, что влага закупоривает мелкие поры, препятствуя прохождению через них воздуха.

В п. 4.5 даны результаты экспериментальных исследований процессов зажигания и горения торфа. Результаты определения минимальной энергии зажигания образцов торфа, взятых с глубины $(15 \div 25) \cdot 10^{-2} \text{ м}$, приведены в таблице 8. Здесь Π - пористость образца, а $Z = \frac{m_c}{m_0}$ - его зольность.

Таблица 8. Минимальная энергия зажигания торфа в зависимости от пористости, зольности и влагосодержания

№ п/п	W	$\rho, 10^3, \text{кг}/\text{м}^3$	Π	Z	Q, Дж	$\pm \delta Q$, Дж
1	0	0,43	0,67	0,43	162,5	31,5
2	0	0,48	0,63	0,41	183,0	40,1
3	0	0,52	0,60	0,42	195,0	42,3
4	0	0,53	0,59	0,29	243,8	48,7
5	0	0,38	0,71	0,12	81,25	8,2
6	0	0,58	0,56	0,09	32,5	7,1
7	0	0,78	0,40	0,09	81,25	9,1
8	0,09	0,74	0,44	0,11	81,25	7,3
9	0,16	0,59	0,55	0,11	16,25	4,3
10	0,23	0,33	0,75	0,10	16,25	4,7
11	0,44	0,57	0,57	0,13	162,5	41,2
12	0,47	0,63	0,52	0,12	243,8	51,9

Из данных таблицы 8 следует, что с возрастанием плотности торфа при $W = 0$ минимальная энергия зажигания возрастает (опыты 1-4), что связано с прогревом большей массы торфа до температуры зажигания. Зольность исследуемых образцов в

опытах 1-3 оставалась приблизительно одинаковой. Уменьшение зольности на 31% (опыты 3, 4) приводит к увеличению Q на 18% при одинаковой начальной плотности и пористости торфа, что свидетельствует о влиянии ботанического состава образцов на величину Q .

Следующая серия экспериментов проводилась с образцами торфа с низкими значениями зольности $Z = 0,03 \div 0,12$, т.е. торфа с большой полнотой сгорания (опыты 5-7) и в более широких диапазонах изменения плотности и пористости. Торф в этой серии опытов оставался сухим ($W = 0$). Видно, что увеличение плотности и пористости торфа приводит к возрастанию минимальной энергии зажигания. Так, при низком значении плотности $\rho = 0,38$ величина Q возрастает до 81,25 Дж. Наличие в порах торфа воздуха снижает эффективный коэффициент теплопроводности торфа и увеличивает время прогрева образцов торфа, что приводит к более позднему зажиганию.

Наличие влаги в торфе приводит к увеличению Q (опыты 8-12) в связи с дополнительными затратами энергии на испарение влаги. Обращает на себя внимание факт уменьшения Q при наличии небольшого количества влаги (опыты 6, 9). Поскольку в этом случае обеспечиваются более благоприятные условия для прогрева образцов торфа за счет улучшения кондуктивной передачи тепла вглубь образца.

Анализ полученных результатов позволяет сделать следующие выводы. Минимальная энергия зажигания образцов торфа зависит от ботанического состава торфа, его плотности, пористости и наличия влаги в нем. Существуют критические значения плотности ρ_* и влагосодержания W_* , когда их влияние на минимальную энергию зажигания носит немонотонный характер. Это можно объяснить различными условиями переноса тепла вглубь образцов торфа и соответственно различными значениями эффективного коэффициента теплопроводности.

В таблице 9 приведены значения минимальной энергии зажигания образцов торфа различного ботанического состава, взятых в Бакчарском лесхозе с разной глубины z .

Таблица 9. Значения минимальной энергии зажигания торфа в зависимости от его плотности, влагосодержания и глубины залегания

№ п/п	W	$\rho, 10^{-3} \text{ кг/м}^3$	$z, 10^{-2} \text{ м}$	$v, \text{ мм/мин}$	$\pm \delta v, \text{ мм/мин}$
1	0	0,38	0	0,7	0,10
2	0	0,58	0	1,2	0,15
3	0	0,78	0	1,0	0,20
4	0,15	0,59	0	1,0	0,09
5	0,23	0,58	0	0,6	0,12
6	0,42	0,57	0	0,1	0,10
7	0,42	0,38	2	0,7	0,15
8	0,42	0,38	8	0,8	0,21

Результаты опытов свидетельствуют о сильном влиянии влагосодержания и плотности торфа на его скорость горения. Влияние плотности торфа на скорость горения немонотонно (опыты 1-3). Существует значение плотности ρ_* , при котором скорость горения максимальна (опыт 2). При низкой плотности торфа скорость горения мала из-за недостатка горючего материала и низкого коэффициента теплопроводности торфа. Высокие же значения плотности ρ препятствуют

фильтрационным процессам в порах торфа, связанными с притоком окислителя и уносом продуктов сгорания (опыт 3).

Присутствие влаги в образце (опыт 4, $W = 0,15$) по сравнению с сухим образцом (опыт 1) увеличивает скорость горения на 30 %, что можно объяснить возрастанием эффективного коэффициента теплопроводности $\lambda_{эф}$. Однако дальнейшее увеличение W приводит к резкому снижению скорости горения, обусловленному затратами тепла на испарение влаги.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИИ

1. Используя понятие потенциала влагопереноса, впервые найдены значения коэффициентов теплообмена для некоторых ЛГМ (хвоя сосны, ели, кедра) и торфа. Полученные данные необходимы для математического моделирования процессов сушки и оценки пожарной опасности ЛГМ и торфа.

2. Исследованы закономерности испарения капельной, пленочной и связанной влаги в ЛГМ, показано принципиальное различие в их скоростях испарения.

3. Установлено, что для хвои сосны, ели и кедра процесс сорбции происходит только через нижнее основание и 2 внутренних капилляра, а процесс десорбции осуществляется через 12 устьиц, что свидетельствует о том, что капельная и пленочная влага не поглощаются хвоей.

4. Экспериментально определены коэффициенты удельной теплоемкости и теплопроводности торфа, а также его коэффициент фильтрации в зависимости от влагосодержания, плотности, ботанического состава и зольности. Найденные теплофизические и фильтрационные характеристики для ЛГМ и торфа вошли в базу данных для математических моделей процессов теплообмена в ЛГМ и торфе.

5. Найдены критические условия зажигания торфа с помощью эталонного источника инициирования пожара.

6. Экспериментально исследован процесс поверхностного и глубинного горения торфа в зависимости от его ботанического состава, плотности и влагосодержания.

7. Предложен способ определения критического влагосодержания ЛГМ, основанный на измерении коэффициента удельной электропроводности. Данный способ позволяет определять пожароопасность хвойных массивов.

8. Разработана и изготовлена полезная модель устройства для нахождения критического влагосодержания. Получен патент на полезную модель.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В., Абрамовских А.А. О механизме зажигания и горения торфа // Материалы 6-ой Международной конференции “Лесные и степные пожары: возникновение, распространение и экологические последствия”. - Томск, 2005. – С. 38-39.

2. Гришин А.М., Голованов А.Н., Суков Я.В., Абрамовских А.А. О пламенном и беспламенном режимах горения торфа // Материалы 6-ой Международной конференции “Лесные и степные пожары: возникновение, распространение и экологические последствия”. - Томск, 2005. - С.39 - 41.

3. Гришин А.М., Голованов А.Н., Абрамовских А.А., Загаевский А.В. Определение потенциала влагопереноса торфа // Международная конференция «Пятые Окуневские чтения». - СПб., 2006.- С. 56-57.
4. Гришин А.М., Голованов А.Н., Абрамовских А.А., Суков Я.В. Пламенное горение торфа // Международная конференция «Пятые Окуневские чтения». - СПб., 2006.- С. 60-61.
5. Голованов А.Н., Абрамовских А.А., Суков Я.В., Куприянов П.А. Теплофизические свойства торфа различного ботанического состава // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии. - Материалы Международной конференции. - Томск, 2007. – С. 7.
6. Голованов А.Н., Абрамовских А.А., Суков Я.В. Потенциал влагопереноса лесных горючих материалов // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии. - Материалы Международной конференции. – Иркутск, 2007. - С. 8-9.
7. Гришин А.М., Голованов А.Н., Абрамовских А.А., Суков Я.В. Способ определения влагосодержания лесных горючих материалов // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии. - Материалы Международной конференции. - Томск, 2007. – С. 47-48.
8. Гришин А.М., Абрамовских А.А., Суков Я.В., Голованов А.Н., Прейс Ю.И. Теплофизические свойства разных видов торфа // Математическое моделирование опасных природных явлений и катастроф. - Материалы Международной конференции - Томск, 2008. – С. 32.
9. Abramovskikh A.A., Sukov Ya.V., Preis Yu.I., Golovanov A.N. Thermal and physical properties of the peat with different botanical composition // International Conference on Environmental Observations, Modeling and Information Systems ENVIROMIS-2008, - Tomsk, Russia. P. - 25 – 26.
10. Абрамовских А.А., Голованов А.Н. Об испарении свободной и связанной влаги в лесных горючих материалах // Экологические системы и приборы. 2008. № 4. - С. 25-32.
11. Гришин А.М., Голованов А.Н., Абрамовских А.А., Суков Я.В. Экспериментальное исследование режимов зажигания и горения // ИФЖ. 2007. - Т.80, № 6. - С.86-90.
12. Гришин А.М., Голованов А.Н., Абрамовских А.А., Суков Я.В. Патент на полезную модель № 76808. Устройство для определения пожароопасности хвойного лесного массива // Заяв. 2008115323, Приоритет 18.04.2008, Зарегистрировано 10.10.2008. Бюл. № 28.
13. Голованов А.Н., Якимов А.С., Абрамовских А.А., Суков Я.В. О математическом моделировании процессов зажигания и тления торфа // Теплофизика и аэромеханика. 2008.- Т. 15, № 4. - С. 1-9.

ОСНОВНЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

λ_m – влагопроводность, кг/(м·с·°М); c_m – влагоемкость, кг/(кг·°М); Θ – потенциал влагопереноса, °М; °М - массообменный (влагообменный) градус; c_p – теплоемкость, Дж/(кг·К); λ – теплопроводность, Вт/(м·К); P – давление, Па; x – координата, м; μ – динамическая вязкость, Па·с; K – коэффициент проницаемости, м²; u – скорость фильтрации, м/с; Q – минимальная энергия зажигания, Дж; J – сила тока, А; U – напряжение, В; Z – зольность, %; ΔC – разность концентраций; β – коэффициент массообмена, кг/(м²·с); C_k – конечная концентрация; C_n – начальная концентрация; W – влагосодержание, %; R – электрическое сопротивление, кОм; ρ – плотность, кг/м³; Π – пористость, %; z – глубина залегания, м; l – длина образца, м; S – площадь поперечного сечения, мм²; d – диаметр, м; m_k – масса конечная, кг; m_0 – масса абсолютно сухого образца, кг; m – масса влажного образца, кг; m_z – масса золы, кг; K_{oi} – предэкспоненциальный множитель, с⁻¹; L – эффективная теплота испарения, Дж/моль; m_1 и m_2 – текущие массы высушиваемых и сухих образцов, кг; $m_{1н}$ и $m_{2н}$ – начальные массы образцов, кг; K_i – Критерий Кирпичева; V_i – критерий Био; F_0 – критерий Фурье; Lu – критерий Лыкова, a – коэффициент температуропроводности, м²/с; σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м; φ – относительная влажность воздуха, %; $\tilde{\rho}$ – удельное электрическое сопротивление, МОм/м.

Индексы:

* - критическое значение, к- конечное, н – начальное.