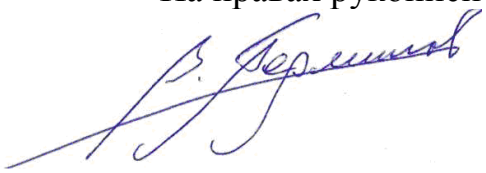
На правах рукописи



Перминов Валерий Афанасьевич

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ВЕРХОВЫХ И МАССОВЫХ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора физико-математических наук

Томск-2010

Работа выполнена на кафедре физической и вычислительной механики механико-математического факультета государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Томский государственный университет»

Научный консультант: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор физико-математических наук,
профессор Гришин Анатолий Михайлович

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,
профессор Гусаченко Лев Константинович

Доктор технических наук,
профессор Доррер Георгий Алексеевич

Доктор физико-математических наук,
профессор Якутенок Владимир Альбертович

Ведущая организация: Федеральное государственное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны» МЧС России (г. Балашиха, Московская обл.)

Защита состоится 4 марта 2011 г. в 10.30 час. в 239 ауд. НИИПММ на заседании диссертационного совета Д 212.267.13 при ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке ГОУ ВПО «Томский государственный университет» по адресу: 634050 г. Томск, пр. Ленина, 34а .

Автореферат разослан : "_19_ " января 2011 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, доктор технических наук Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Ежегодно в России возникают десятки тысяч лесных пожаров, в результате которых сгорает более 1 млн. га леса. Еще большее количество леса при этом повреждается, а затем гибнет. Например, тепловое излучение от фронта пожара непосредственно воздействует на камбиальный слой дерева, а это приводит к его гибели. Кроме того, за счет теплопередачи тепла в почву изменяется её химический состав и структура, микрофлора и фауна почвы, повреждаются поверхностные корни деревьев. Ущерб от лесных пожаров не ограничивается стоимостью уничтоженной древесины, которая не превышает 10% от стоимости всех полезных свойств леса (почвозащитных, водоохранных, кислородопроизводящих, санитарно-гигиенических и др.). Различные виды лесных пожаров (низовые, верховые, почвенные и др.) представляют собой опасные стихийные бедствия, приносящие огромный ущерб и создающие угрозу для людей и материальных ресурсов, находящихся вблизи районов их возникновения и развития.

Так, в июле и начале августа 2010 года лесные пожары в Европейской части России и на Урале охватили огромную площадь. Согласно данным Федерального агентства лесного хозяйства, общая площадь, пройденная огнем с начала года по 3 августа включительно существенно превысила миллион гектаров. По данным МЧС, представленным в Интернете от 4 августа, при лесных пожарах погибли 50 человек. Полностью или частично сгорело не менее 130 населенных пунктов. Сгорела крупная военная база в Московской области. Ущерб от пожаров примерно сравнялся с годовым финансированием всего лесного хозяйства страны. Пожар проник на территорию Федерального ядерного центра в Сарове Нижегородской области и с большим трудом был потушен. Многие крупные города и целые регионы Европейской России неделями существовали в условиях опасного для жизни людей задымления, местами видимость составляла лишь несколько десятков метров. Это вызвало частичную отмену авиасообщения и затрудняло автодорожное движение. По данным Национального аэрокосмического агентства США (NASA), облако дыма от лесных пожаров в Европейской части России по состоянию на 4 августа 2010 года достигло ширины в три тысячи километров. Дым от лесных пожаров проник в стратосферу на высоту около двенадцати километров. На такой высоте он может переноситься на очень большие расстояния.

Возникновение и распространение лесных пожаров зависят от различных условий (климатических: скорости ветра, температуры окружающей среды, состояния атмосферы и т.д.) рельефа местности и других факторов. Одной из наиболее опасных форм лесных пожаров являются верховые, на долю которых приходится 70% выгоревшей площади и наибольшие убытки.

Повышенное внимание к данной проблеме обусловлено также воздействием крупных лесных пожаров на приземный слой атмосферы, что вызывает климатические (понижение температуры среды за счет задымленности территорий приводит к гибели или более позднему вызреванию сельскохозяйственных культур) и экологические последствия. Примером может служить образование зон горения радиусом в несколько километров в результате взрывов, сопровождающихся мощными потоками светового излучения (Тунгусский взрыв 1909 года, взрывы легковоспламеняющихся жидкостей, ядерные взрывы и т.д.). При определенных условиях (метеорологических, рельеф местности и др.) могут возникнуть массовые пожары («огненный шторм», огненные смерчи), в результате которых имеет место штормовая скорость ветра, реализуются высокие температуры, а газообразные продукты горения поднимаются на большую высоту и переносятся на значительные расстояния. Экспериментальные исследования лесных пожаров являются, как правило, дорогостоящими, а в некоторых случаях просто невозможными. В связи с этим большое значение имеет математическое моделирование возникновения и развития лесных пожаров.

Цель работы состоит в постановке и теоретическом исследовании задач возникновения верховых лесных пожаров в результате перехода низовых лесных пожаров в верховые при наличии и в отсутствии ветра, распространения верховых лесных пожаров, в том числе в лесах подверженных радиоактивному загрязнению, а также возникновения крупномасштабных лесных пожаров под воздействием светового излучения на лесные массивы, возникающего вследствие природных и техногенных катастроф с учетом двухтемпературности среды.

Методика исследования. Исследование проводилось с помощью метода математического моделирования физических процессов[1)]. Он основывался на численном решении одномерных, двумерных и трехмерных уравнений Рейнольдса для турбулентного течения с учетом уравнений диффузии для химических компонентов и уравнений сохранения энергии для газовой и конденсированной фаз. Для получения дискретных аналогов использовался метод контрольного объема[2)]. Применялся метод расщепления по физическим процессам, то есть вначале рассчитывалась структура течения и распределения скалярных функций без учета химических реакций, а затем решались уравнения химической кинетики и учитывались источниковые члены в уравнениях для определения температуры и концентраций компонент. Методика решения реализована в виде комплекса программ для персональных компьютеров.

---

[1] Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука, 1992. 408 с.

[2.] Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М. : Энергоатомиздат, 1984. 152 с.

Личное участие автора в получении результатов, изложенных в диссертации. Все представленные в диссертации результаты и выводы получены автором лично. Постановки задач о переходе низового лесного пожара в в верховой с учетом и в отсутствии ветра в двумерном случае, а также возникновения крупномасштабных массовых пожаров для двухтемпературной среды, были получены автором работы лично на основе общей математической модели лесных пожаров разработанной профессором Гришиным А.М. В результате их решения в 1995 году была защищена кандидатская диссертация (научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор А.М. Гришин). Также автором диссертации, на основе метода контрольного объема, лично была разработана и протестирована численная методика решения задач возникновения верховых и массовых лесных пожаров.

Математическая модель задачи о переходе низового лесного пожара в верховой в пространственном трехмерном случае была разработана автором диссертации самостоятельно. Также осредненная по высоте полога леса, постановка задачи о распространении двумерного фронта верхового лесного пожара, в том числе в лесах, подверженных радиоактивному загрязнению, выполнена автором диссертации.

При решении задачи о возникновении лесного пожара в результате взрыва Тунгусского метеорита при разработке постановки задачи принимал участие Ефимов К.Н. (учет излучения на стадии полета Тунгусского метеорита). В результате с указанным выше ученым имеются совместные публикации.

Научная новизна работы состоит в следующем:

1) С использованием общей математической модели лесных пожаров[1)], предложена новая трехмерная нестационарная математическая модель зажигания полога леса от очага низового лесного пожара конечных размеров с учетом двухтемпературности среды и ослабления излучения в результате действия частиц дыма.

2) С использованием общей математической модели лесных пожаров[1)], дана новая постановка задачи о переходе низового лесного пожара в верховой при наличии и отсутствии ветра в пологе леса (плоский и осесимметричный случаи) с учетом двухтемпературности среды и ослабления излучения от концентрации частиц дыма.

3) В рамках указанных выше постановок задач изучен процесс перехода низового лесного пожара в верховой на стадиях инертного прогрева, сушки, пиролиза и воспламенения продуктов пиролиза напочвенного покрова и полога леса; определены условия перехода.

4) С использованием общей математической модели лесных пожаров[1)], представлена новая осредненная по высоте полога леса двумерная

[1] Grishin A.M. Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. Tomsk: Publishing House of the Tomsk University (Russia), Ed. by F.Albini, 1997. 390 p.

постановка задачи о распространении фронта верхового лесного пожара с учетом двухтемпературности среды в лесах подверженных радиоактивному загрязнению.

5) Дана новая математическая модель возникновения крупномасштабного очага зажигания лесного массива под воздействием светового излучения, выделившегося в результате техногенной катастрофы с учетом двухтемпературности среды в предположении осевой симметрии потока.

6) На основе анализа результатов, полученных с использованием двумерной осесимметричной модели зажигания лесных массивов световым излучением, разработаны более экономичные, с точки зрения затрат ресурсов компьютера, квазиодномерные постановки задачи для изучения процесса образования крупномасштабных очагов лесных пожаров в результате техногенных и природных катастроф.

7) Изучен процесс образования больших очагов лесных пожаров под воздействием светового излучения для природных и техногенных катастроф для различных энергий и высот взрыва, запаса, влагосодержания и коэффициента поглощения излучения лесных горючих материалов и особенности формирования течения на начальной стадии зажигания (Тунгусский метеорит).

8) Показано, что реализуется газофазный режим зажигания лесных горючих материалов при возникновении верховых и массовых лесных пожаров.

9) Разработаны методики численного решения задач о возникновении верховых и массовых лесных пожаров в результате техногенных и природных катастроф в трехмерной, двумерной и одномерной постановках. Созданы компьютерные программы для решения данных задач.

Практическая значимость диссертационной работы. Ценность работы для науки и практики состоит в следующем:

1) Показано, что понятия, методы и модели механики реагирующих многофазных сред могут быть успешно использованы для прогнозирования возникновения и распространения верховых и массовых лесных пожаров.

2) Предложенная в работе математическая модель перехода низового лесного пожара в верховой и результаты расчетов дают возможность оценить условия возникновения верховых лесных пожаров, что позволяет применять данную модель для противопожарного лесоустройства в хвойных лесах.

3) В результате сравнения расчетных данных с данными наблюдений показано, что с помощью, предложенной в работе математической модели возникновения массовых лесных пожаров, возможно определение размеров и контуров зон зажигания лесных массивов в результате техногенных и природных катастрофических явлений (взрывы метеоритных тел, ядерные взрывы и т.д.), сопровождающихся мощными потоками светового излучения,

а также изучение физико-химических процессов протекающих на начальной стадии данных процессов.

4) Представленная в работе математическая модель распространения фронта верхового лесного пожара позволяет осуществлять прогнозирование продвижение контура верхового лесного пожара и оценить в динамике уровень повторного радиоактивного загрязнения в лесах, подверженных радиоактивному заражению.

5) Создан комплекс прикладных программ, который может использоваться для прогнозирования чрезвычайных ситуаций, связанных с возникновением и развитием лесных пожаров. Разработанные компьютерные программы численных расчетов внедрены в Московском институте теплотехники и на кафедре физической и вычислительной механики Томского госуниверситета.

Достоверность полученных результатов. Обоснованность научных результатов и выводов, приведенных в работе, следует из адекватности разработанных математических моделей и используемых численных методов решения. Это подтверждается сравнением с данными теоретических работ других авторов и результатами расчетов с использованием известных программных продуктов. Также достоверность численных результатов, полученных в работе, подтверждается сравнением с экспериментальными данными.

На защиту выносятся следующие **основные положения**:

1) применение понятий и методов механики реагирующих многофазных сред для прогнозирования возникновения и распространения верховых и массовых лесных пожаров в результате техногенных и природных катастрофических ситуаций;

2) трехмерная нестационарная математическая модель зажигания полога леса от очага низового лесного пожара конечных размеров;

3) численное решение задач о переходе низового лесного пожара в верховой в отсутствии ветра и с учетом внешнего поля ветра;

4) исследование процессов тепло- и массообмена при переходе низовых лесных пожаров в верховые;

5) изучение процесса повторного радиоактивного загрязнения в результате действия ветра и лесных пожаров в лесах подверженных радиоактивному загрязнению;

6) изучение процессов образования больших очагов лесных пожаров под воздействием светового излучения при природных и техногенных катастрофах;

7) методики численного решения задач о возникновении верховых и массовых лесных пожаров в результате техногенных и природных катастроф в трехмерной, двумерной и одномерной постановках.

Апробация работы. Основные результаты по теме диссертационной работы докладывались на IV Всесоюзной конференции «Радиационный теплообмен в технике и технологии» (Каунас,1987), I-III Минских

международных форумах по тепломассообмену (Минск, 1988, 1992 и 1996), XI Всесоюзной школе по численным методам механики вязкой жидкости (Свердловск, 1988), Совещании по механике реагирующих сред (Красноярск,1988), IV и V Всесоюзных школах-семинарах «Современные проблемы механики жидкости и газа»(Иркутск, 1988 и 1990), Школе молодых ученых «Численные методы механики сплошной среды» (Абакан, 1989), IX Всесоюзном симпозиуме по горению и взрыву (Суздаль, 1989), III Всесоюзной школе «Математические проблемы экологии» (Чита, 1990), Всесоюзной конференции «Методы математического моделирования в задачах охраны окружающей среды и экологии» (Новосибирск, 1991), Международной конференции «Астероидная опасность» (Ленинград, 1991), Всесоюзном съезде механиков (Москва, 1991), Семинаре «Предсказание и математическое моделирование катастрофических явлений и их последствий» (Киев, 1991), международном форуме «Информатика на службе экологии и здоровья» (Тольятти, 1991), Совещаниях-семинарах по механике реагирующих сред (Междуреченск в 1986, Кемерове в 1990 и Томск в 1992-2007), Международном семинаре по некоторым проблемам горения твердого топлива и химической газодинамике (Томск, 1992), Томской областной конференции по проблемам экологии (Томск, 1992), Международной конференции: «Лесные пожары: возникновение, распространение и экологические последствия» (Томск, 1995), Международной конференция Математические модели и численные методы механики сплошных сред (Новосибирск, 1996), Втором Сибирском Конгрессе по прикладной и индустриальной математике (ИНПРИМ-96) (Новосибирск, 1996), Международной конференции «Математическое и физическое моделирование лесных пожаров и их экологических последствий» (Иркутск, 1997), XVI Международной школе-семинаре по численным методам механики вязкой жидкости (Новосибирск: ИВТ СО РАН, 1998), 3-d International Conference on Forest Fire Research (Luso-Coimbra, Португалия, 1998), Международной конференции «Математические модели и методы их исследования» (Красноярск, 1999), Международной научной конференции «Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия» (Томск, 1999), 9^{th}-12^{th} Seminar NUMDIFF on Numerical Solution of Differential and Differential-Algebraic Equations (Halle, Германия, 2000-2009), Восьмом Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001), International Congress MODSIM(Canberra, Австралия, 2001), VI Международной конференции, «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф» (Красноярск, 2001), 5-й Всероссийской научной конференции "Краевые задачи и математическое моделирование" (Новокузнецк, 2002), 2-d International Conference on Advanced Computational Methods in Engineering (Liege, Бельгия, 2002), V Всероссийского симпозиума «Математическое моделирование и компьютерные технологии» (Кисловодск, 2002), International Workshop on

efficient techniques for numerical solutions of coupled PDE's and applications to reservoir simulation (Tehran, Иран, 2003), PDE Methods in Applied Mathematics and Image Processing (Sunny Beach, Болгария, 2004), Seventh IMACS International Symposium on Iterative Methods in Scientific Computing. (Toronto, Канада, 2005), IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006), 6th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions (Halifax, Канада, 2006), 31st International Symposium on Combustion (Heidelberg, Германия, 2006), 6th European Conference on Ecological Modelling (Trieste, Италия, 2007), VII Всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии и математическое моделирование» (Томск, 2008), 10th WSEAS International Conference on Mathematical methods, Computational Techniques and Intelligent Systems(MAMECTIS) (Corfu, Греция, 2008), International Conference on mathematics and informatics (ICMI) (Becau, Румыния, 2009), International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation (Brno, Чехия, 2009), 7th International Conference on Heat and Mass Transfer(HMT'10) (Cambridge, University of Cambridge, UK, February 23-25, 2010), Всероссийской научной конференции «Математическое и физическое моделирование опасных природных явлений и техногенных катастроф» (Томск, 2010) а также на научных семинарах кафедры физической и вычислительной механики ТГУ.

Публикации. Основное содержание работы изложено в 77 научных публикациях, список которых помещен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка цитируемой литературы (235 наименований). Общий объем работы - 282 страницы машинописного текста.

Настоящая работа завершена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта:10-01-98000).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, определена цель и задачи исследования, дано краткое изложение диссертации по главам.

В первой главе приводится обзор исследований по теме диссертации. Дается характеристика изучаемого объекта, обзор экспериментальных и теоретических исследований лесных пожаров. Анализируются работы, посвященные возникновению больших лесных пожаров, переходу низовых лесных пожаров в верховые, а также распространению лесных пожаров в лесах, подверженных радиоактивному загрязнению. Проводится обзор существующих теоретических подходов и типов математических моделей лесных пожаров. Приводятся экспериментальные данные по количеству энергии, которое необходимо для зажигания лесных горючих материалов в упомянутых выше случаях, и размерам и контурам зон зажигания,

образующихся в результате воздействия светового излучения на лесные массивы.

В последнее время в связи с оценкой экологических и климатических последствий лесных пожаров возникает вопрос о воздействии этих процессов на состояние приземного слоя атмосферы. В обзорной части данной диссертации отмечается, что ранее, при рассмотрении распространения верховых лесных пожаров использовались одномерные осредненные по высоте полога леса модели для исследования динамики течения газа и однотемпературное приближение[1)] для описания состояния среды. Процесс перехода низового лесного пожара в верховой изучался на стадиях инертного прогрева и сушки в осесимметричной постановке[2)]. При этом не учитывались химические реакции в пологе леса над очагом низового пожара, что не позволяет дать однозначного ответа о возможности зажигания полога леса [2)].

Обнаружено, что в отечественной литературе отсутствуют публикации по моделированию перехода низового лесного пожара в верховой с учетом влияния внешнего поля ветра. Из зарубежных работ следует отметить математическую модель, представленную Morvan D. и соавторами [3)], которая была использована для моделирования перехода низового лесного пожара в верховой при воспламенении средиземноморских зарослей кустарников. Данная постановка задачи построена на основе общей математической модели лесных пожаров, предложенной А.М.Гришиным [4)]. Причем в ней используются термокинетические постоянные (сушка, пиролиз, горение), представленные ранее в работах А.М.Гришина и соавторов для лесных горючих материалов (ЛГМ) соснового леса. Также в обзоре указывается, что в литературе практически отсутствуют публикации по математическому моделированию зажигания лесных массивов световым излучением в результате природных и техногенных катастроф. Например, проблеме математического моделирования зажигания реагирующих веществ световым излучением от огненных шаров и возникновению больших пожаров при

---

[1] Зверев В.Г. Математическое моделирование аэродинамики и тепломассопереноса при распространении вершинных лесных пожаров : дисс. ... канд. физ.-мат.наук. Томск, 1985. 222 с.

[2] Фомин А.А. Структура течения и прогрев окружающей среды над локальным очагом лесного пожара : дисс. ... канд. физ.-мат. наук. Томск, 1989. 221 с.

[3] Morvan D., Dupuy J.L. Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using multiphase formulation. Combustion and Flame. 2004. 138. P. 199-210.

[4] Гришин А.М. Математические модели лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. Новосибирск : Наука, 1992. 408 с.

техногенных катастрофах посвящены работы Ю.А. Гостинцева[1)] с соавторами. В обзоре обращено внимание на то, что в работах вышеупомянутых авторов при численном моделировании зажигания от светового излучения ядерного взрыва химические превращения описываются некоторой одной эффективной реакцией. Поэтому такая постановка задачи не отражает реальных свойств конкретных реагирующих сред и не может адекватно описать процесс возникновения крупномасштабных лесных пожаров.

На основе представленного в работе обзора имеющихся в научной литературе публикаций посвященных математическому моделированию лесных пожаров, а также возникновению крупномасштабных источников горения в результате природных и техногенных катастроф, можно сделать вывод о необходимости построения с помощью методов механики реагирующих многофазных сред математических моделей более точно учитывающих как физико-химические свойства лесных биогеоценозов, так и приземного слоя атмосферы. Такие математические модели были построены на основе общей математической модели лесных пожаров, предложенной А.М. Гришиным.

В данной работе впервые представлена трехмерная пространственная математическая модель возникновения лесного пожара, полученная на основе общей математической модели лесных пожаров и проведено математическое моделирование. Были использованы следующие допущения: 1) течение носит развитый турбулентный характер и пренебрегаем молекулярным переносом по сравнению с турбулентным; 2) плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малых скоростей течения по сравнению со скоростью звука; 3) полог леса предполагается недеформируемой пористой средой; 4) среда над очагом низового лесного пожара считается двухтемпературной, т.к. различаются температура газовой и конденсированной фазы; 5) среда находится в локально-термодинамическом равновесии; 6) известна скорость ветра над пологом леса в невозмущенных условиях; 7) газодисперсная смесь бинарная и состоит из частиц конденсированной фазы, а также газовой фазы - компонентов кислорода, газообразных горючих и инертных компонентов.
Рассматривается так называемый продуваемый лесной массив, когда объемной долей конденсированной фазы лесных горючих материалов (ЛГМ), состоящей из сухого органического вещества, воды в жидко-капельном состоянии и золы, можно пренебречь по сравнению с объемной долей газовой фазы, включающей в себя компоненты воздуха и газообразные продукты пиролиза и горения. Для описания переноса энергии излучением

---

[1] Гостинцев Ю.А., Махвиладзе Г.М., Новожилов В.Б. Формирование большого пожара, вызванного излучением // Известие РАН, МЖГ. 1992. № 1. С. 17-25.

применяется диффузионное приближение, а для моделирования турбулентного свободно-конвективного переноса, обусловленного действием силы тяжести, используются уравнения Рейнольдса. Сформулированная выше задача сводится к решению следующей системы уравнений

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho v_j)=\dot{m},\ j=1,2,3,\ i=1,2,3; \tag{1}$$

$$\rho\frac{dv_i}{dt}=-\frac{\partial p}{\partial x_i}+\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{v_i'v_j'})-\rho s c_d v_i\,|\vec{v}\,|-\rho g_i-\dot{m}v_i; \tag{2}$$

$$\rho c_p\frac{dT}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho c_p v_j'\overline{T'})+q_5R_5-\alpha_v(T-T_s)+k_g(cU_R-4\sigma T^4); \tag{3}$$

$$\rho\frac{dc_\alpha}{dt}=\frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{v_j'c_\alpha'})+R_{5\alpha}-\dot{m}c_\alpha\ ,\ \alpha=\overline{1,5}; \tag{4}$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial x_j}\right)-kcU_R+4k_S\sigma T_S^4+4k_g\sigma T^4=0,k=k_g+k_S; \tag{5}$$

$$\sum_{i=1}^{4}\rho_i c_{pi}\varphi_i\frac{\partial T_S}{\partial t}=q_3R_3-q_2R_2+k_s(cU_R-4\sigma T_S^4)+\alpha_V(T-T_S); \tag{6}$$

$$\rho_1\frac{\partial\varphi_1}{\partial t}=-R_1,\rho_2\frac{\partial\varphi_2}{\partial t}=-R_2,\rho_3\frac{\partial\varphi_3}{\partial t}=\alpha_cR_1-\frac{M_C}{M_1}R_3,\rho_4\frac{\partial\varphi_4}{\partial t}=0; \tag{7}$$

$$\sum_{\alpha=1}^{5}c_\alpha=1,\ p_e=\rho RT\sum_{\alpha=1}^{5}\frac{c_\alpha}{M_\alpha},\vec{v}=(v_1,v_2,v_3),\vec{g}=(0,0,g),$$

$$\dot{m}=(1-\alpha_c)R_1+R_2+\frac{M_c}{M_1}R_3+R_{53}+R_{54},$$

$$R_{51}=-R_3-\frac{M_1}{2M_2}R_5,\ R_{52}=\nu(1-\alpha_c)R_1-R_5,R_{53}=\alpha_6R_1,$$

$$R_{54}=\frac{\alpha_4v_{3*}}{v_3+v_{3*}}R_3,R_{55}=0.$$

Для определения скоростей реакций пиролиза, испарения влаги, горения кокса, и летучих продуктов пиролиза используются формулы:

$$R_1=k_1\rho_1\varphi_1\exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right),R_2=k_2\rho_2\varphi_2T_s^{-0.5}\exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right),$$

$$R_3=k_3\rho\varphi_3s_\sigma c_1\exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right),R_5=k_5M_2\left(\frac{c_1M}{M_1}\right)^{0.25}\frac{c_2M}{M_2}T^{-2.25}\exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right).$$

Здесь R_1 – R_5 , $R_{5\alpha}$ - массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих

продуктов пиролиза и образования α - компонентов газодисперсной фазы; c_{pi} , ρ_i ,φ_i - удельные теплоемкости, истинные плотности и объемные доли i-ой фазы (1 - сухое органическое вещество, 2 - вода в жидко-капельном состоянии, 3 - конденсированные продукты пиролиза, 4 - зола (минеральная часть продуктов пиролиза), 5 - газовая фаза); T, T_S - температура газовой и конденсированной фаз; ρ, c_p – плотность и теплоемкость газовой фазы; c_α - массовые концентрации(α=1- кислород, 2 – газообразные летучие горючие продукты пиролиза, 3 - сажа, 4 - пепел, 5 - инертные компоненты); p - давление; U_R - плотность энергии излучения; σ- постоянная Стефана–Больцмана; k- коэффициент ослабления излучения, k_g, k_S - коэффициенты поглощения излучения в газовой и конденсированной фазах соответственно; q_i , E_i , k_i - тепловые эффекты, энергии активации и предэкспоненты реакций пиролиза, испарения, горения кокса и летучих продуктов пиролиза; S_σ - удельная поверхность элемента лесных горючих материалов; M_α , M_C , M - молекулярные веса индивидуальных компонентов газовой фазы, углерода и воздушной смеси; s, c_d - удельная поверхность фитомассы и эмпирический коэффициент сопротивления полога леса; c - скорость света; v_i - проекции компонентов скорости на оси x_i; α_c , ν - коксовое число и массовая доля горючих газов в массе летучих продуктов пиролиза; $\dot{m}$ - массовая скорость образования газодисперсной фазы; g - ускорение свободного падения; t – время. Верхний индекс «штрих» относится к пульсационной составляющей данной величины. Система уравнений (1)-(7) описывает процессы переноса в области лесного массива, который включает в себя пространство между подстилающей поверхностью (уровень шероховатости) и нижней границей полога леса, полог леса($h_1 \le z \le h_2$) и пространство над пологом леса.

Коэффициент теплообмена фаз α_V выбирался на основе данных по теплообмену между элементом лесного горючего материала (хвоинка, тонкая веточка) и окружающей средой α по формуле: $\alpha_V = \alpha S - \gamma c_p \dot{m}$, где γ - параметр, характеризующий отношение молекулярных масс газа в окружающей среде и выдуваемого в процессе теплообмена.

Компоненты тензора турбулентных напряжений, турбулентные потоки тепла и массы записываются через градиенты осредненного течения

$$
\begin{aligned}
&-\rho\overline{v_i' v_j'} = \mu_t\left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j}+\frac{\partial v_j}{\partial x_i}\right)-\frac{2}{3}K\delta_{ij},\\
&-\rho\overline{v_j\, c_p T'} = \lambda_t\frac{\partial T}{\partial x_j},\ -\rho\overline{v_j\, c_\alpha'} = \rho D_t\frac{\partial c_\alpha}{\partial x_j},\ i,j=1,2,3; \qquad (8)\\
&\lambda_t = \mu_t c_p/\mathrm{Pr}_t,\ \rho D_t = \mu_t/Sc_t,\ \mu_t = c_\mu\rho K^2/\varepsilon,
\end{aligned}
$$

где K - кинетическая энергия турбулентности, ε - скорость диссипации турбулентной кинетической энергии; v_i и v_i' - компоненты средней скорости

и пульсационной составляющей скорости в проекции на ось x_i; μ_t, λ_t, D_t - коэффициенты турбулентной динамической вязкости, турбулентной теплопроводности и диффузии; Pr_t. Sc_t- турбулентные числа Прандтля и Шмидта; δ_{ij} - символы Кронекера. Используется локально-равновесная модель турбулентности[1)].

Как правило, возгорание в лесах происходит в нижнем ярусе леса в напочвенном покрове, а затем воспламеняется полог леса, иными словами образование верхового лесного пожара происходит в результате перехода низового лесного пожара в верховой. Во второй главе в подразделе 2.1 приводится математическая постановка задачи перехода низового лесного пожара в верховой в отсутствии ветра, полученная на основе общей математической модели, предложенной А.М.Гришиным, то есть она может быть получена из системы уравнений (1)-(7).

Считалось, что очаг представляет собой круглый источник тепла и массы и течение симметрично относительно вертикальной оси, имеющей начало в центре очага горения и направленной вверх. Кроме того, предполагалось, что скорость ветра в рассматриваемой области лесного массива мала по сравнению со скоростью подъема нагретых газообразных продуктов горения и притоком в зону горения окружающего воздуха. Это позволяет рассматривать задачу в осесимметричной постановке, которая с использованием цилиндрической системы координат сводится к решению следующей системы уравнений при n=1:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(r^n\rho v)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w)=\dot{m}K; \tag{9}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho v)+\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(r^n\rho v^2)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho v w)=-\frac{\partial p}{\partial r}+\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(-r^n\rho\overline{v'^2})+\frac{\partial}{\partial z}(-\rho\overline{v'w'})- \\ -K\rho s c_d\, v\sqrt{v^2+w^2}; \tag{10}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho w)+\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(r^n\rho v w)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w^2)=-\frac{\partial p}{\partial z}+ \\ +\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(-r^n\rho\overline{v'w'})+\frac{\partial}{\partial z}(-\rho\overline{w'^2})-K\rho s c_d\, w\sqrt{v^2+w^2}\,-(\rho-\rho_e)g; \tag{11}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T)+\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(r^n\rho v c_p T)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_p T)=\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(-r^n\rho c_p\overline{v'T'})+\frac{\partial}{\partial z}(-\rho c_p\overline{w'T'})+ \\ +k_g(cU_R-4\sigma T^4)+q_5R_5+\alpha_v(T_s-T)+c_pT\dot{m}; \tag{12}$$

---

[1] Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г. Математическая теория верховых лесных пожаров // Теплофизика лесных пожаров.- Новосибирск : ИТФ СО АН СССР, 1984. С. 38-75.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_\alpha)+\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(r^n\rho v c_\alpha)+\frac{\partial}{\partial z}(\rho w c_\alpha)=\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(-r^n\rho\overline{v'c'_\alpha})+\frac{\partial}{\partial z}(-\rho\overline{w'c'_\alpha})-R_{5\alpha},\alpha=\overline{1,5}; \quad (13)$$

$$\frac{1}{r^n}\frac{\partial}{\partial r}(\frac{r^n c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial r})+\frac{\partial}{\partial z}(\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial z})-kcU_R+4\sigma(k_g T^4+k_s T_s^4)=0, k=k_g+k_S; \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^{4}\rho_i c_{pi}\varphi_i\frac{\partial T_s}{\partial t}=q_3R_3-q_2R_2+k_S(cU_R-4\sigma T_s^4)+\alpha_V(T-T_s); \quad (15)$$

$$\rho_1\frac{\partial\varphi_1}{\partial t}=-R_1,\ \rho_2\frac{\partial\varphi_2}{\partial t}=-R_2,\ \rho_3\frac{\partial\varphi_3}{\partial t}=\alpha_c R_1-\frac{M_c}{M_1}R_3,\ \rho_4\frac{\partial\varphi_4}{\partial t}=0; \quad (16)$$

$$\sum_{\alpha=1}^{5}c_\alpha=1,\ P_e=\rho RT\sum_{\alpha=1}^{5}\frac{c_\alpha}{M_\alpha}.$$

Начальные и граничные условия для системы уравнений (9)-(16) имеют следующий вид

$$t=0: v=0, w=0, T=T_e, c_\alpha=c_{\alpha e}, T_s=T_e, \varphi_i=\varphi_{ie}, \quad (17)$$

$$r=0: v=0, \frac{\partial w}{\partial r}=0, \frac{\partial T}{\partial r}=0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial r}=0, \frac{\partial U_R}{\partial r}=0, \quad (18)$$

$$r=r_e: \frac{\partial v}{\partial r}=0, \frac{\partial w}{\partial r}=0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial r}=0, \frac{\partial T}{\partial r}=0, \frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial r}+\frac{c}{2}U_R=0, \quad (19)$$

$$z=z_0,\ v=0,\ (\rho w)=h_0\overline{\dot{m}},\ -\rho D_t\frac{\partial c_\alpha}{\partial z}+\rho w c_\alpha=h_0\overline{R}_{5\alpha},$$

$$T=T_s=\begin{cases}T_e+(T_0-T_e)\dfrac{t}{t_0}\exp\{-[r/\Delta]^2\}, t\le t_0,\\ T_e+(T_0-T_e)\exp\{-[(r-r_f)/\Delta]^2\}, t>t_0,\end{cases} \quad (20)$$

$$-\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial z}=\frac{1}{\sqrt{3}}(4\sigma T_S^4 f-cU_R)\ ,\ \text{где}\ \ f=1-\exp(-k_0h_0\sqrt{3})\ ,$$

$$z=z_e: \frac{\partial v}{\partial z}=0, \frac{\partial w}{\partial z}=0, \frac{\partial T}{\partial z}=0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z}=0, \frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial z}+\frac{c}{2}U_R=0. \quad (21)$$

Здесь и выше r и z - координаты, z - отсчитывается от напочвенного покрова, а r от оси симметрии; v, w - проекции скорости на оси r и z; w_* - характерная скорость выдува из очага низового лесного пожара, h_0 – толщина напочвенного слоя подстилки, k_0 – коэффициент поглощения излучения в

слое подстилки, t_0 - время образования очага низового лесного пожара, Δ - ширина его фронта, а расстояние до центра фронта определяется по формуле $r = \omega(t-t_0)$ (ω - скорость распространения фронта низового пожара); $\overline{\dot{m}}$ - осредненная по высоте напочвенного покрова h_0 скорость массовыделения газодисперсной смеси из напочвенного покрова. Индексы "o" и "e" относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара соответственно. Система уравнений (9)-(16) описывает процессы переноса в области лесного массива, который включает в себя пространство между подстилающей поверхностью (уровень шероховатости) и нижней границей полога леса (в этой области коэффициент K=0), полог леса ($h_1 \le z \le h_2$, K=1) и пространство над пологом леса. Компоненты тензора турбулентных напряжений, турбулентные потоки тепла и массы записываются через градиенты осредненного течения (8). Используется локально-равновесная модель турбулентности.

На основе изложенной математической модели (9)-(16) проводились численные расчеты по определению картины процесса зажигания полога леса от очага низового лесного пожара. В работе приводятся временные и пространственные распределения основных функций от стадии прогрева до момента зажигания. На рис.1а)(1 - $\overline{T}$, 2 - $\overline{T}_S$), б) (1 - $\overline{c_1}$, 2 - $\overline{c_2}$) и в) (1 - $\overline{\varphi_1}$, 2 - $\overline{\varphi_2}$, 3 - $\overline{\varphi_3}$) приведено распределение основных функций на нижней границе полога леса. Здесь и ниже: $\overline{T} = T/T_e$, $\overline{c_\alpha} = c_\alpha / c_{\alpha e}$, $\overline{\varphi_i} = \varphi_i/\varphi_{ie}$, $\overline{T}_S = T_S/T_e$ и $\bar{t} = t/t_0$. В результате прогрева ЛГМ в напочвенном покрове происходит испарение влаги и разложение сухого органического вещества с выделением газообразных и конденсированных продуктов пиролиза, которые затем воспламеняются в пространстве между пологом леса и напочвенным покровом. При этом происходит прогрев ЛГМ полога леса, из которых выделяется влага, газообразные летучие продукты пиролиза. После воспламенения в очаге низового лесного пожара происходит зажигание полога леса. На рис.1 б) прослеживаются два максимума выделения газообразных продуктов пиролиза. Первый завершается воспламенением напочвенного покрова, а второй полога леса. На рис.1 в) приведено изменение объемных долей фаз полога леса в точке его зажигания.

Из приведенных результатов следует, что пламя очага низового лесного пожара касается полога леса. Данный процесс сопровождается образованием термика - объема нагретых газообразных продуктов горения, всплывающих в атмосфере. На рис.2 представлено распределение изотерм газовой фазы и векторное поле течения в момент зажигания (1 - $\overline{T}$ = 4., 2 - $\overline{T}$ = 3., 3 - $\overline{T}$ = 2., 4 - $\overline{T}$ = 1.7., 5 - $\overline{T}$ = 1.5, 6 - $\overline{T}$ = 1.1).

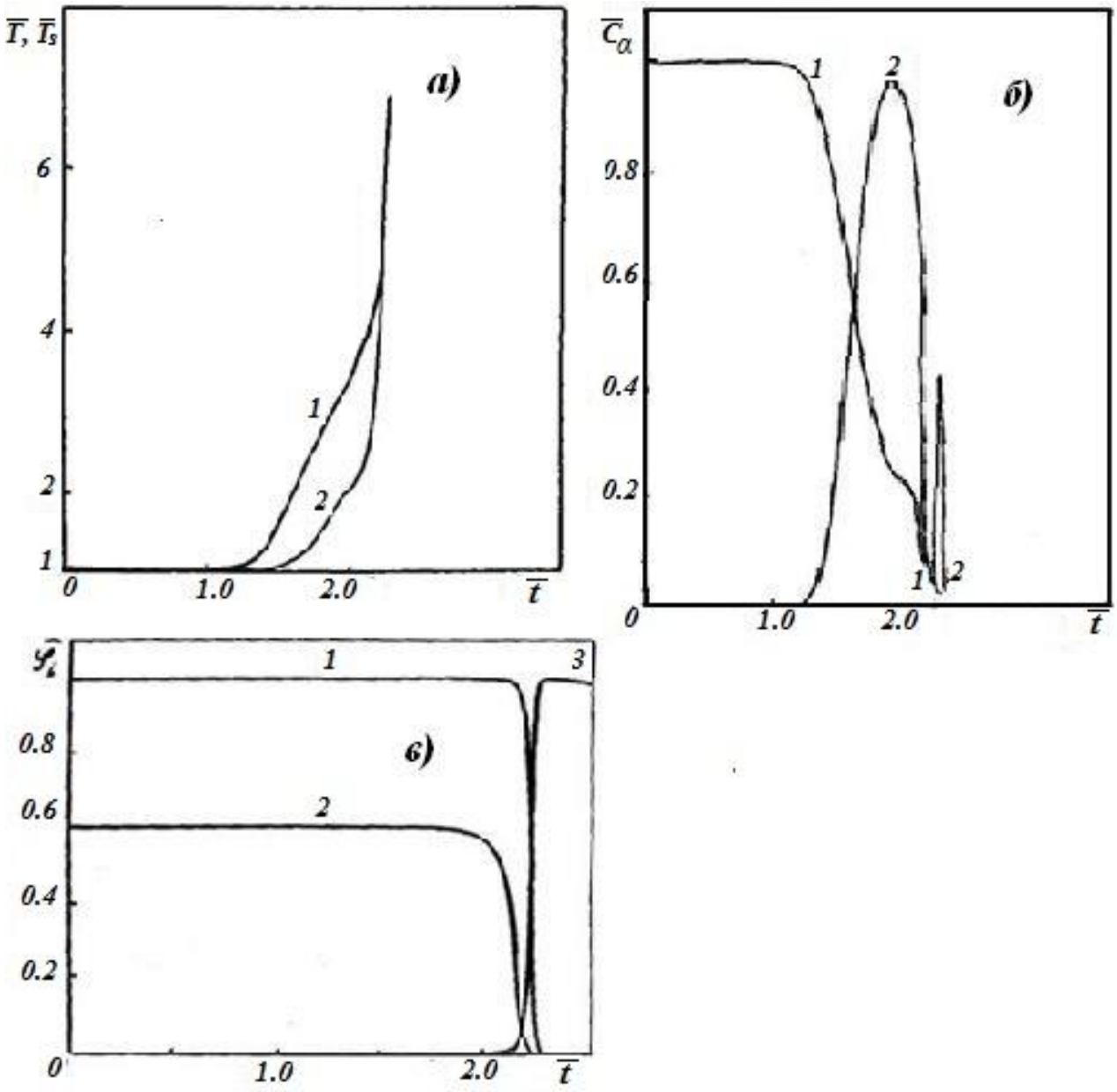


Рис. 1

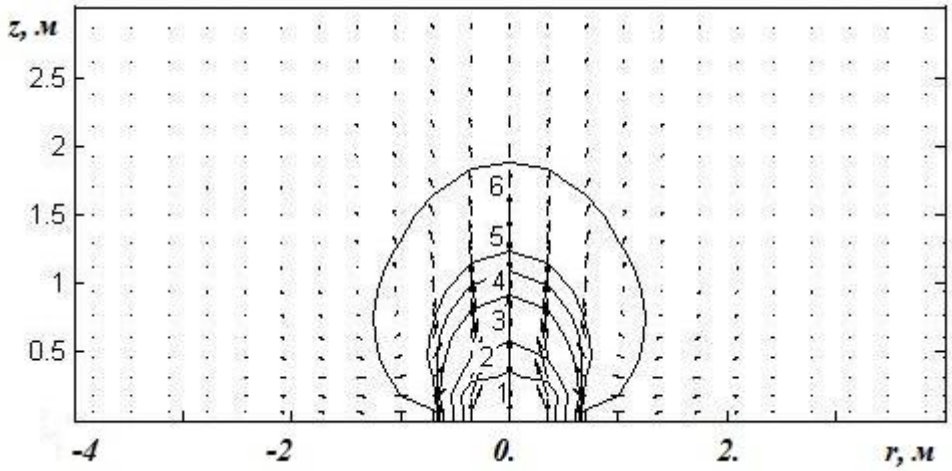


Рис.2

В процессе численных расчетов изучалось влияние различных факторов на процесс перехода низового лесного пожара в верховой (время формирования очага низового лесного пожара t_0·, запаса ЛГМ в напочвенном покрове, влагосодержания ЛГМ полога леса). Установлено, что для данных типичных параметров соснового леса существуют некоторые критические расстояния от напочвенного покрова до полога леса, на которых происходит зажигание. Кроме того, для U_R в граничных условиях (20) в расчетах использовалось граничное условие, полученное на основе метода сферических гармоник, содержащее коэффициент степени черноты очага горения. Расчеты показали, что его значение может изменяться в процессе горения от 0 до 1, что свидетельствует о необходимости использования данного соотношения. Проверка справедливости выполненных выше численных расчетов по воспламенению полога леса устанавливалась путем сравнения с экспериментальными данными зажигания хвоинок сосны в высокотемпературном воздушном потоке [1)]. На рис.3а) б) изображены расчетные зависимости времен зажигания влажной и сухой хвои соответственно. Расчет зажигания влажной хвои (влагосодержание составляло 110%) проводился для двух значений скорости потока (1 - 1 м/с и 2 - 2 м/с, рис.3 а) взятых из указанной выше работы В.Н. Моршина. Причем при численных расчетах в пологе леса, то есть для совокупности хвоинок, воспламенение происходит несколько быстрее, чем для отдельных хвоинок в экспериментальных исследованиях. Известно, что процессы прогрева, сушки и пиролиза, как отдельной хвоинки, так и их совокупности сопоставимы в силу достаточно большого расстояния между хвоинками по сравнению с толщиной теплового пограничного слоя на элементе ЛГМ. Но перед процессом воспламенения во втором случае в пологе леса образуется большее количество горючих продуктов пиролиза. Их вынос с нижней границы полога леса, где этот процесс идет наиболее интенсивно, тормозится сопротивлением элементов ЛГМ. Совпадение опытных и расчетных данных при температуре воздуха выше 900К следует считать вполне удовлетворительным, подтверждающим адекватность математического моделирования данного физического процесса.

В подразделе 2.2 приводится физико-математическая постановка задачи о перехода низового лесного пожара в верховой с учетом ветра. Предполагается, что фронт низового лесного пожара, имеет конечную ширину и достаточно большую длину, которую можно считать бесконечной. Дополнительно, к предположениям, изложенным в разделе 2.1, считается, что известна скорость ветра над пологом леса. Как и в первой задаче для описания конвективного переноса, обусловленного действием силы тяжести,

---

[1] Моршин В.Н. Воспламенение тонких влажных растительных материалов в зависимости от условий тепломассообмена и метод расчета перехода низового лесного пожара в верховой : дисс. канд. техн. наук. Ленинград, 1986. 200 с.

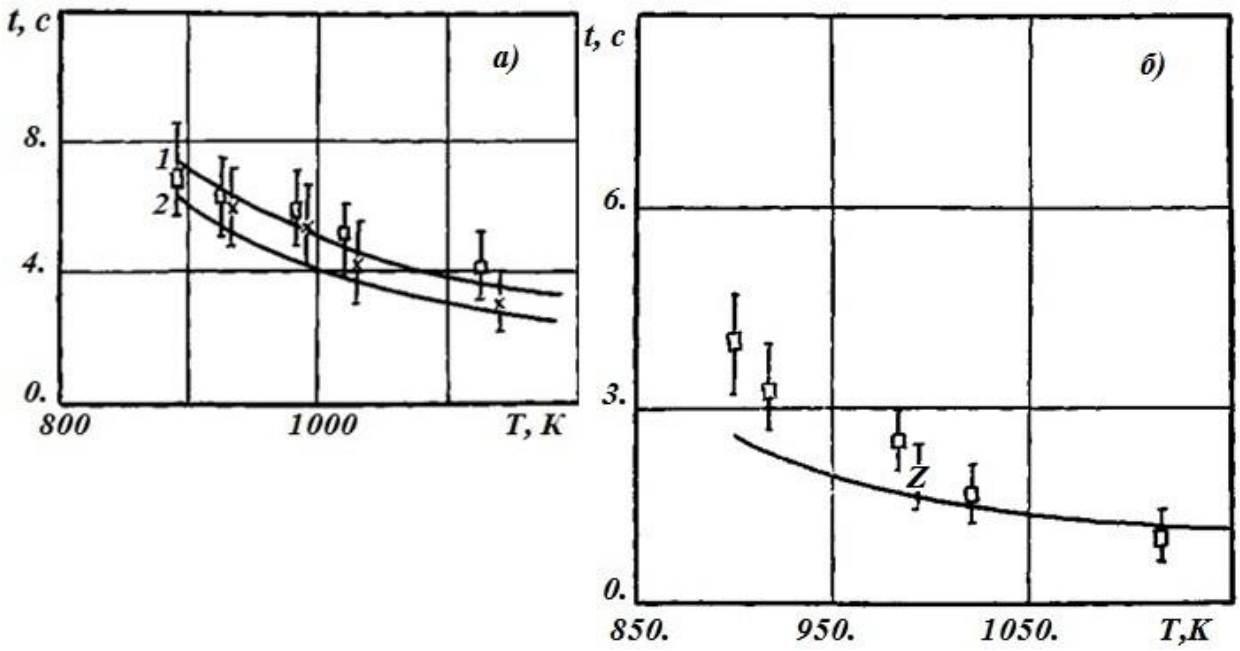


Рис. 3
Результаты численных расчетов (1- 1м/с, 2 – 2 м/с) и экспериментальные данные : □ – 1м/с, х – 2 м/с.

используются уравнения Рейнольдса, а для переноса энергии излучением - диффузионное приближение. Очаг низового лесного пожара расположен на высоте уровня шероховатости в центре рассматриваемой области. Ось x_2 - направлена вверх, а x_1 - параллельно земной поверхности. Сформулированная выше задача сводится к решению системы уравнений (9)-(16) при n=0, начальных и граничных условий (17)-(21) в случае отсутствия ветра. Координатам r, z и компонентам скорости v,w - соответствуют декартовы координаты x_1 ,x_2· и компоненты скорости v_1 ,v_2 . Компоненты тензора турбулентных напряжений, турбулентные потоки тепла и массы определяются по формулам (8). Используется локально-равновесная модель турбулентности. При наличии ветра картина процесса не симметрична относительно плоскости, проходящей через середину очага низового лесного пожара и поэтому необходимо дополнительно рассматривать в горизонтальном направлении область, включающую в себя пространство слева с наветренной стороны от очага горения. Значение скорости ветра на открытой местности V_e·задавалась на фиксированной высоте над пологом леса. Вместо условий (18) задаются граничные условия:

$$x_1 = -x_{1e} : v_1 = V_e, v_2 = 0,\ T = T_e,\ c_\alpha = c_{\alpha e}, -\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial x_1} + cU_R / 2 = 0. \qquad (22)$$

На основе изложенной выше физико-математической модели проводились численные расчеты по определению развития процесса от момента инициирования горения до зажигания полога леса. В этом случае происходит взаимодействие поля ветра с газоструйным препятствием, образующимся от

очага низового лесного пожара и загоревшейся нижней границей полога леса. За зоной тепломассовыделения образуется рециркуляционное течение, а с наветренной стороны происходит ускорение движения воздуха, обтекающего область зажигания (см. рис.4) (1 - $\overline{T}$ = 4., 2 - $\overline{T}$ = 3., 3 - $\overline{T}$ = 2., 4 - $\overline{T}$ = 1.7., 5 - $\overline{T}$ = 1.5, 6 - $\overline{T}$ = 1.1). Под влиянием ветра деформируется

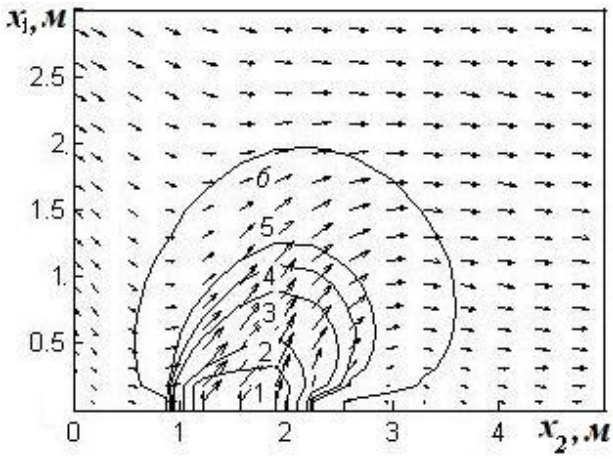


Рис. 4

распределение изотерм газовой фазы. Анализ процесса зажигания полога леса от очага низового лесного пожара показывает, что с увеличением скорости ветра уменьшается расстояние от напочвенного до полога леса, на котором происходит переход. Это связано с тем, что под влиянием ветра увеличивается угол отклонения пламени очага низового пожара от вертикальной оси. В результате этого наиболее интенсивному прогреву факелом пламени подвергаются точки полога леса, смещенные по направлению ветра от центра очага низового лесного пожара. Полученные в расчетах значения углов наклона пламени достаточно хорошо согласуются со значениями, которые описываются с помощью аналитической формулы F.Albini[1)], полученной в результате обработки данных экспериментальных исследований. Таким образом, уменьшается максимальная высота нижней границы полога леса, на которой пламя может его касаться и, следовательно, и зажигать.

В главе 3 приводится постановка задачи о возникновении верхового лесного пожара в пространственном (трехмерном) случае (раздел 3.1), полученная на основе общей математической модели пожаров. В предыдущем разделе рассматривались двумерные постановки, описывающие возникновения верховых лесных пожаров в осесимметричном (отсутствие внешнего поля ветра) и плоском (бесконечная длина фронта низового лесного пожара) случаях. Данные подходы накладывают существенные ограничения на возможность изучать переход низового лесного пожара в

[1] Albini F. Physical model for fire spread in brush // 11 Int. Symposium on Combustion. Pittsburgh, 1967. P. 553-560.

верховой. В реальных условиях фронт низового лесного пожара имеет конечные размеры и в силу неоднородности распределения лесных горючих материалов, он не располагается вдоль прямой линии бесконечной длины. Все эти и другие ограничения могут быть сняты, если рассмотреть задачу перехода низового лесного пожара в пространственной трехмерной постановке. Кроме того, в рамках пространственные математические модели возможен учет рельефа местности.

Предполагается, что очаг низового пожара имеет конечные размеры и над пологом леса задана скорость ветра. Ось $0x_3$ направлена вверх, а оси $0x_1$ и $0x_2$ - параллельно поверхности земли (ось x_1 совпадает с направлением ветра). Схема данного процесса представлена на рис. 5. Предполагается, что: 1) течение носит развитый турбулентный характер и молекулярным переносом пренебрегаем по сравнению с турбулентным, 2) плотность газовой фазы не зависит от давления из-за малости скорости течения по сравнению со скоростью звука, 3) среда находится в локально-термодинамическом равновесии, 4) известна скорость ветра над пологом леса в невозмущенных условиях, 5) газодисперсная смесь бинарна и состоит из частиц конденсированной фазы, а также газовой фазы - компонентов кислорода, газообразных горючих и инертных компонентов.

Сформулированная выше задача сводится к решению системы уравнений (1)-(8).

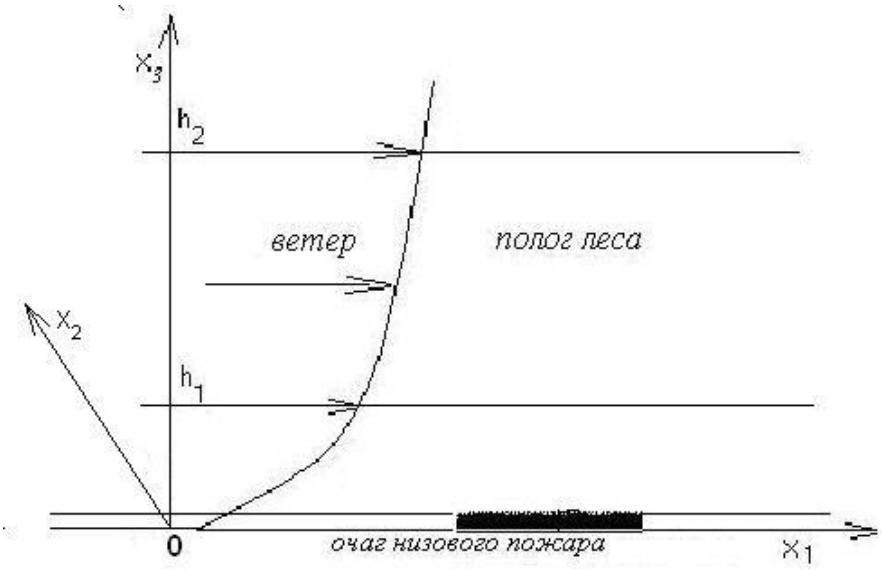


Рис.5.

В разделе 3.2. представлены начальные и граничные условия для рассматриваемой задачи. Предполагается, что очаг низового пожара имеет конечные размеры и над пологом леса задана скорость ветра. Затем в разделе 3.3. приводятся выражения, используемые в данной постановке для компонентов тензора турбулентных напряжений, а также турбулентные

потоки тепла и массы, записанные через градиенты осредненного течения, а также коэффициент турбулентной динамической вязкости. Выражение для коэффициента турбулентной вязкости в трехмерном пространственном случае получено в предположении, что в уравнении для кинетической энергии турбулентности можно пренебречь нестационарным и конвективными и диффузионными членами. Основные детали применения численной методики расчета по трехмерной математической модели и результаты расчетов приведены в разделе 3.4 и Главе 6. В разделе 3.4.также приводятся результаты численных расчетов по описанной выше трехмерной постановке. Скорость ветра задавалась на левой границе расчетной области по направлению оси Ox_1 . Численные расчеты проводились как для случая, когда очаг низового лесного пожара находился целиком внутри расчетной области, так и для области, симметричной относительно вертикальной плоскости Ox_1x_3 , проходящей через центр очага низового пожара, служащего источником зажигания. В качестве примера полученных численных результатов на рис.6-8 представлены пространственные распределения в различные моменты времени (а) t=3 сек. и б) t=5 сек.) полей скорости, а также изоповерхности (поверхности равных уровней) для температуры (рис.6 , 1-$\overline{T}$ =1.1, 2 - $\overline{T}$ =1.5, 3-$\overline{T}$ =2., 4-$\overline{T}$ =3), массовых концентраций кислорода (рис.7, 1-$\overline{C}_1$ =0,9 , 2-0.5, 3-0.2.) и летучих горючих продуктов пиролиза (рис. 8, 1-$\overline{C}_2$ =0.3, 2-0.5, 3-1.) от прогрева полога леса до момента зажигания на нижней границе полога леса.

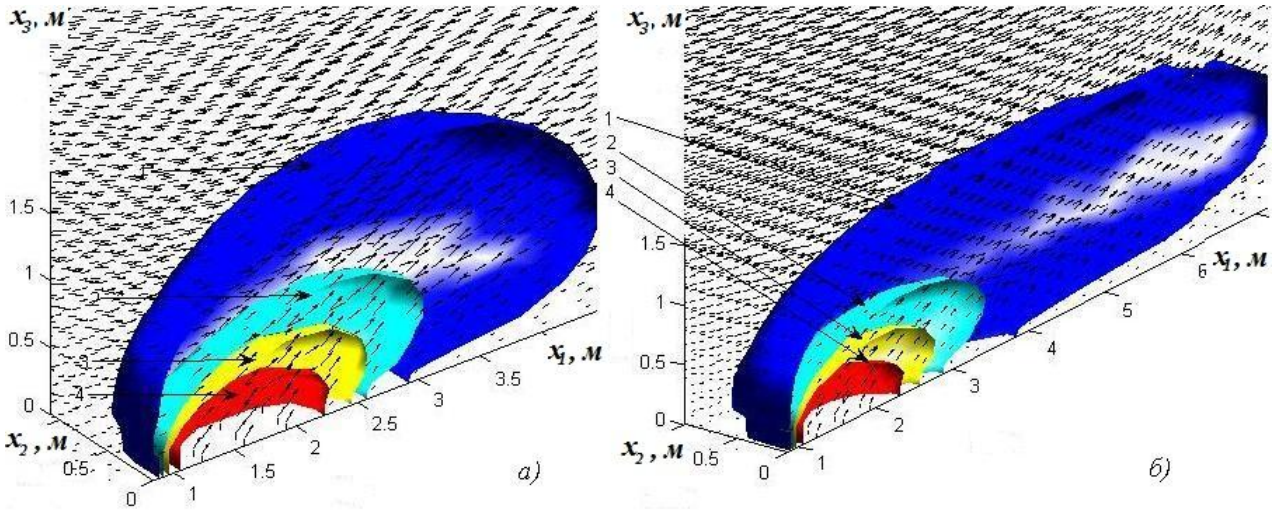


Рис. 6

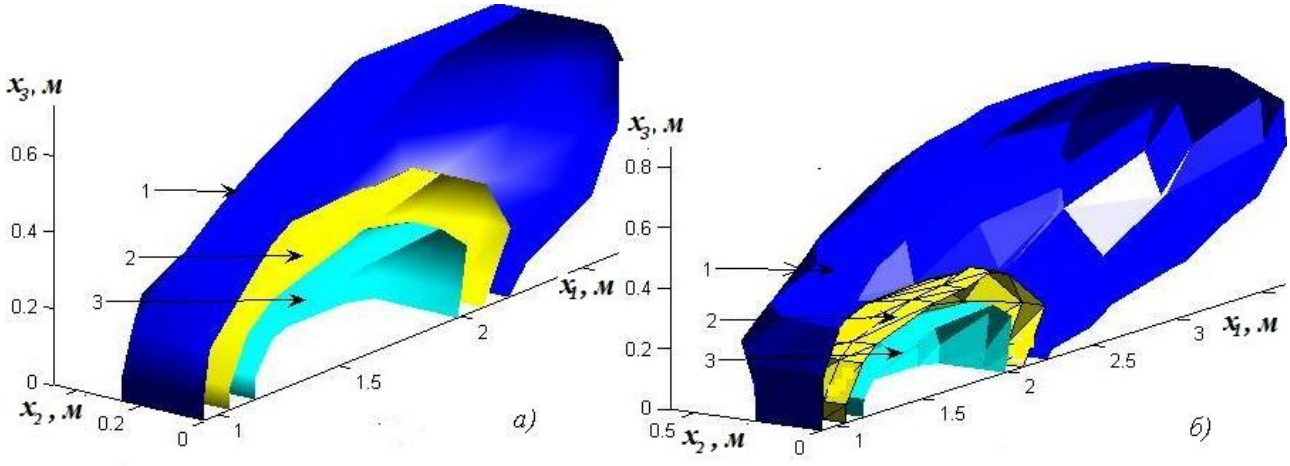


Рис. 7

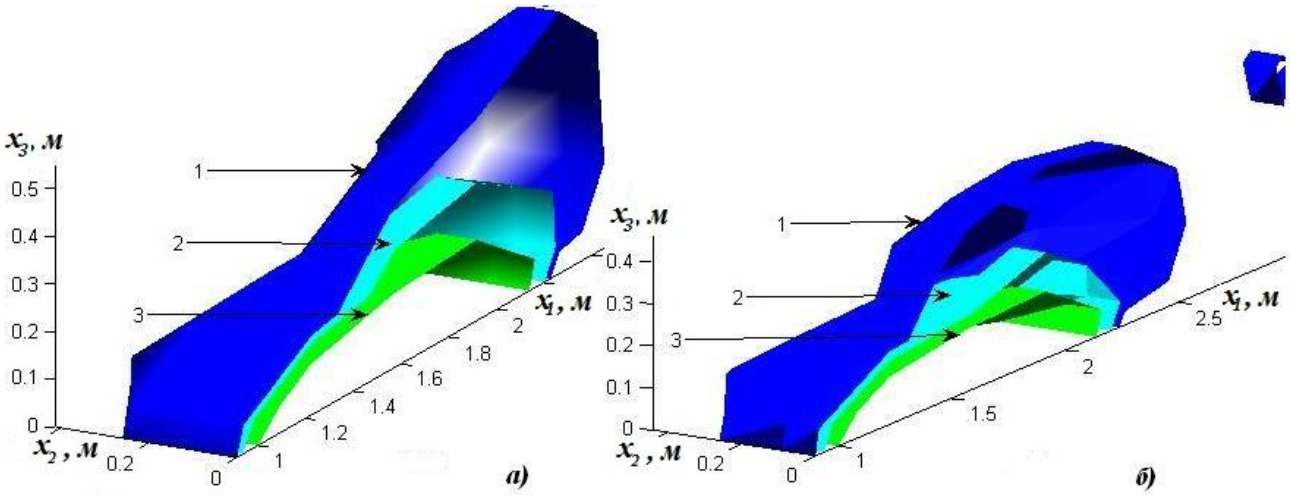


Рис. 8

В разделе 3.4. представлены распределения по времени основных функций на нижней границе полога леса в точке над очагом горения с момента начала действия очага низового лесного пожара. Анализ изменения с течением времени температур газовой и конденсированной фаз, массовых концентраций кислорода и летучих продуктов пиролиза и объемных долей конденсированных фаз показывает, что процесс зажигания с учетом трехмерности происходит по такой же схеме, как и в двумерном случае (рис.1) и зажигание носит газофазный характер. Причем расстояния от напочвенного покрова до нижней границы полога леса, на которой происходит зажигание полога леса для аналогичных приближений (отсутствие ветра, приближение бесконечной длины фронта низового пожара), совпадают.

В главе 4 приводятся результаты математического моделирования возникновения и распространения верхового лесного пожара по осредненной постановке, полученной на основе трехмерной математической модели лесных пожаров (1)-(8), представленной в главе 3. Для ее вывода используется метод осреднения по высоте полога леса. То есть, на основании

того, что горизонтальные размеры лесного массива превышают вертикальные (высоту полога леса) система уравнений (1)-(8) может быть проинтегрирована по вертикальной координате x_3. Осреднение исходных характеристик по высоте полога леса произведено с целью упрощения постановки задачи. Исходная система дифференциальных уравнений, приведенная к дивергентному виду, интегрируется по высоте от напочвенного покрова до уровня верхней границы полога леса. Таким образом, получена математическая постановка, представляющая двумерную нестационарную систему дифференциальных уравнений в частных производных. Затем в разделе 4.2. представлены соответствующие начальные и граничные условия. Процедура численного решения и обсуждение полученных результатов излагаются в разделе 4.3. Представлены в динамике распределения в различные моменты времени векторных полей скорости, изотермы (контуры) и линии равных уровней для концентраций компонент газовой фазы в плане. Также подробно описывается процесс зажигания ЛГМ и представлено поведение основных функций в процессе прогрева, сушки, пиролиза и газофазного воспламенения.

Из анализа обзора работ по последствиям природных и техногенных катастроф и катастрофическим атмосферным явлениям, приведенном в разделе 1.3, следует, что наиболее интенсивный и самый значительный перенос радионуклидов на лесной территории имеет место в результате совместного действия ветра и лесных пожаров. В разделе 4.4 представлена математическая модель распространения радионуклидов в результате действия ветра и лесных пожаров. Математическая постановка данной задачи получена из трехмерной математической модели (1)-(8), по методике осреднения упомянутой выше и изложенной в разделе 4.1. Она позволяет учесть седиментацию-оседание частиц под действием силы тяжести, которые и являются здесь радиоактивно загрязненными. В разделе 4.5 представлены результаты решения задачи о распространении радионуклидов в горизонтальной плоскости в результате действия ветра и лесного пожара. Кроме распределений температур, массовых концентраций кислорода, летучих продуктов пиролиза и объемных долей конденсированных фаз получены распределения дополнительного радиоактивного загрязнения в зоне распространения верхового лесного пожара в различные моменты времени в зависимости от скорости ветра и запаса лесных горючих материалов. Например, из-за увеличения запаса ЛГМ происходит расширение фронта верхового лесного пожара и соответственно происходит увеличения площади горящего лесного массива, с которой происходит выброс радионуклидов.

В пятой главе представлены результаты математического моделирования возникновения лесных пожаров под воздействием светового излучения. Рассматривается задача о начальном этапе воздействия высотного источника лучистой энергии на подстилающую поверхность, покрытую лесной растительностью. Целью данного исследования является

определение размеров зон зажигания и изучение физико-химических процессов, протекающих там. Кроме того, на основе известных из литературы результатов воздействия на лесные массивы взрыва небесного тела, получившего название Тунгусского метеорита, оценивается его мощность. Плотность потока лучистой энергии $q_R(r,t)$ аппроксимирована по литературным данным[1)].

Поступление лучистой энергии в растительный покров вызывает нагрев лесных горючих материалов, испарение влаги и последующее термическое разложение твердого материала с выделением летучих продуктов пиролиза. Затем последние сгорают в атмосфере, взаимодействуя с кислородом воздуха. Под действием силы тяжести, нагретые газообразные продукты начинают всплывать, поэтому процессы зажигания лесной растительности оказываются, в общем случае, связаны с гидродинамикой течения. Таким образом, под действием источника излучения формируется зона зажигания радиусом r_{*}. В рамках настоящего исследования считалось, что скорость ветра в атмосфере мало влияет на процесс зажигания, так как тепловая энергия в основном переносится излучением. Это позволило рассматривать задачу в осесимметричной постановке. Описание процесса зажигания лесного массива проводилось на различных уровнях сложности постановки задачи.

Сформулированная задача в цилиндрической системе координат сводится к решению уравнений (9)-(16). На нижней и верхней границе расчетной области, вместо (20)-(21) используются граничные условия в виде:

$$z = z_0: \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, -\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2}U_R = 0; \qquad (23)$$

$$z = z_e: \frac{\partial v}{\partial z} = 0, \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \frac{\partial T}{\partial z} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial z} = 0, \frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial z} + \frac{c}{2}U_R = 2q_R(r,z). \qquad (24)$$

Результаты расчетов, приведенные в разделе 5.1, показали, что максимальный прогрев наблюдается в центральной части (см.рис.9). Здесь происходит всплытие масс нагретых газов за счет действия архимедовой силы. Следует отметить, что скорость воздуха обусловлена подсосом и направлена с периферии к центру области зажигания. Эта скорость на момент воспламенения не велика и для рассматриваемых времен не превышает 0.5 м/с (w_0 = 20 кт). Неразрывно связано с процессом зажигания распределение массовых концентраций кислорода и горючих летучих продуктов пиролиза. Наиболее представительным из них является оксид углерода (см.рис.10), которые расходуются в процессе горения. В центральной части рассматриваемой области происходит выгорание CO и

[1] Действие ядерного оружия/пер. с англ. под ред. П.С.Дмитриева.- М. : Воениздат, 1965. 679 с.

связанное с этим уменьшение количества кислорода. Любопытная картина наблюдается на границе зоны зажигания (см. рис.10), где имеется немонотонность в распределении *CO*.

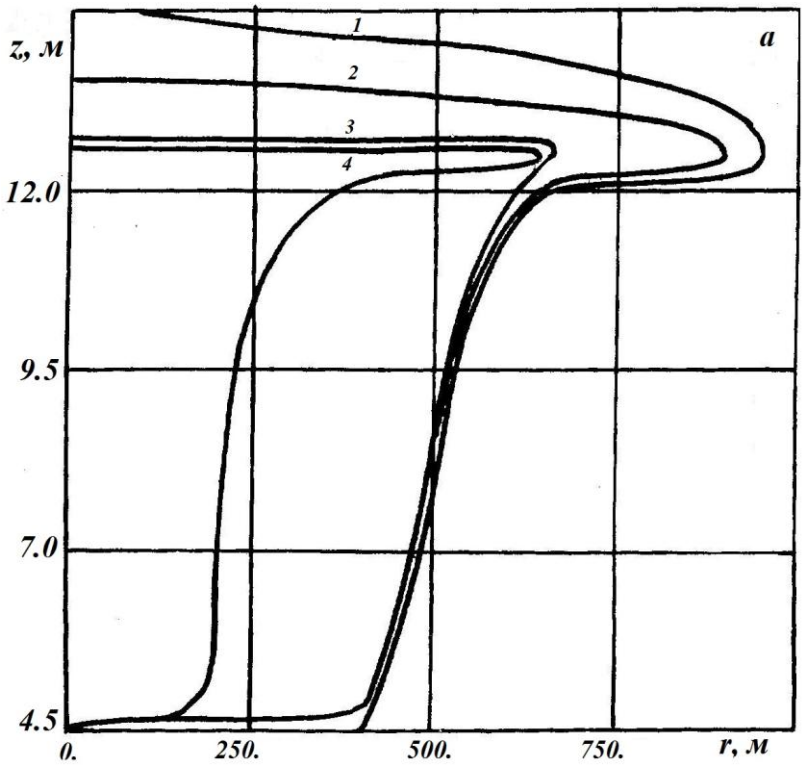


Рис. 9

Распределение изотерм $\overline{T}$: $1-\overline{T}=2.6, 2-\overline{T}=3.5, 3-\overline{T}=7., 4-\overline{T}=10.$

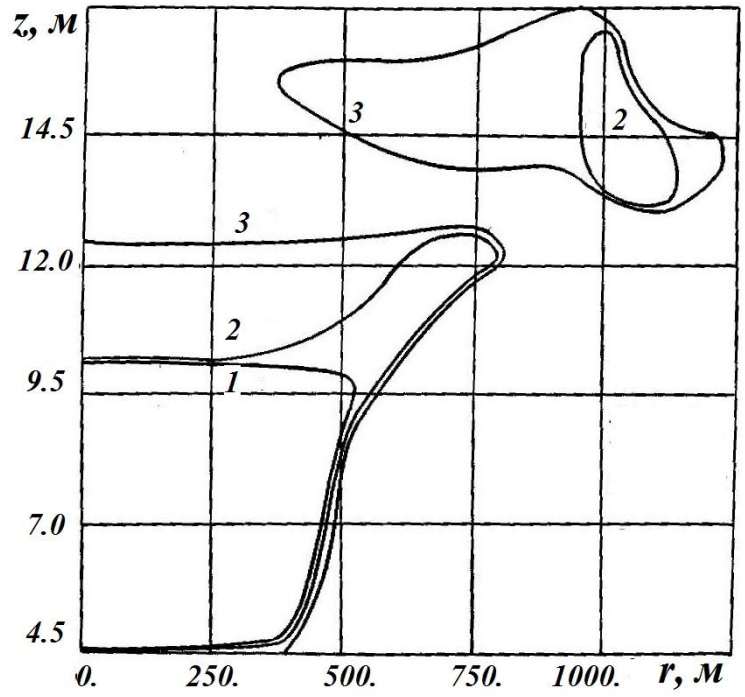


Рис. 10

Распределение массовой концентрации летучих горючих продуктов пиролиза: $1-\overline{c}_2=1., 2-\overline{c}_2=0.01, 3-\overline{c}_2=0.001.$

Это объясняется тем, что в данный момент времени на данном расстоянии расположен фронт зажигания, который перемещается от эпицентра. Следует отметить, что процесс зажигания, как и в случае перехода низового лесного пожара в верховой, носит газофазный характер.

В подразделе 5.2 предполагается, что горизонтальная составляющая скорости ветра в пологе леса мало влияет на процесс зажигания. Это допущение справедливо, так как лучистый тепловой поток значительно больше конвективного. По этой причине считаем процесс квазиодномерным, то есть, предполагаем, что все параметры зависят от времени t и вертикальной координаты z. Результаты численного моделирования показывают, что отличие размеров зон зажигания по обеим постановкам не превышает 5%. Поэтому, с точки зрения экономии затрат времени компьютера, более целесообразно использовать упрощенную математическую постановку для определения размеров зон зажигания (см. рис.11).

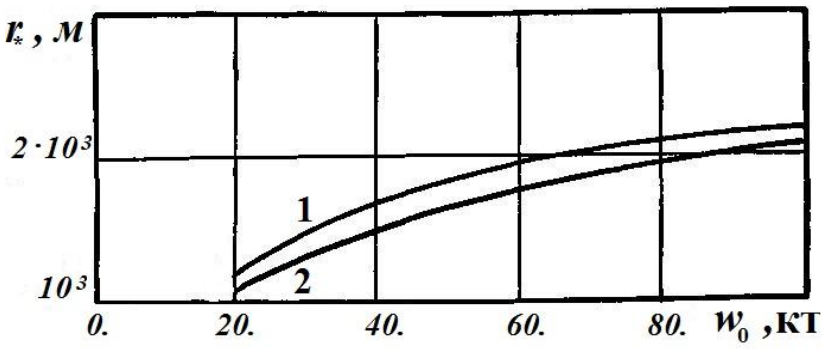


Рис. 11

Результаты расчета максимальных размеров зон зажигания:
1 - расчет по квазиодномерной постановке, 2 - расчет по двумерной осесимметричной постановке; H=260 м, ρ_o=0.2 кг/м^2, W=0.6, T_e=300К.

В 5.2.2. приведены результаты расчетов, проведенных для зажигания лесных массивов световым излучением, выделившимся при взрыве тела, получившего название Тунгусского метеорита. Как указано выше, в расчетах для описания величины $q_R(r,t)$ использовались литературные данные. Однако согласно экспериментальным исследованиям, в отличии от действия ядерного взрыва, при Тунгусском взрыве на долю световой энергии приходится не 30%, а лишь 10% [1)]. В 5.2.2 приведены результаты математического моделирования в квазиодномерном приближении. Расчеты показали, что максимальный размер зоны зажигания, согласно литературным данным, достигается при энергии взрыва w_0 = 25 Мт. В 5.2.3 приведены результаты расчетов по однотемпературной модели, которая получается из системы уравнений (1)-(9) при $\alpha_V \to \infty$. Сравнение результатов полученных по

[1] Бронштэн В.А. Физика метеорных явлений. М. : Наука, 1981. 300 с.

этим двум моделям показали, что отличие размеров зон зажигания превышают 10%. Если ввести понятие ожога деревьев как степень пиролиза (~20 % от начальной объемной доли ЛГМ), то численные расчеты по двухтемпературной модели показали, что данное явление имеет место на расстоянии около 16 км. Там происходит прогрев, испарение влаги и процесс пиролиза ЛГМ без их воспламенения, что согласуется с экспериментальными данными [1)].

Таким образом, двухтемпературная модель, в отличие от однотемпературной, позволяет изучать такое явление как ожог деревьев. В рамках данной постановки удается получить максимальный радиус зоны зажигания. В то время как из результатов экспериментальных исследований Тунгусского метеорита следует, что форма контура зоны зажигания напоминает эллипс, вытянутый по направлению проекции траектории движения данного небесного тела. Очевидно, это обусловлено воздействием потока теплового излучения на подстилающую поверхность при полете данного объекта до момента его взрыва.

В разделе 5.3 текста диссертации приведены результаты численных расчетов воздействия потока светового излучения на полог леса на стадии полета и взрыва Тунгусского метеорита (рис. 12). Плотность лучистого теплового потока на стадии полета определялась согласно литературным данным [1)]. Параметрический анализ показал, что наилучшее согласование расчетных и экспериментальных результатов по форме и размерам зон зажигания имеет место при энергии взрыва составляющей 10% от полной (кинетической и тепловой) энергии данного небесного тела. На рис.12 приведены результаты расчетов максимальных размеров контуров зажигания для различных пород деревьев (*а*) – лиственница, б) – береза, *в*) - сосна, и *г*) данные[1)] экспериментальных исследований по воздействию светового излучения от Тунгусского метеорита на лесные массивы. Полностью заштрихованный кружок – сильный ожог, частично заштрихованный – средний и кружок – слабый ожог. Из рис. 12 следует, что полученные в работе численные результаты достаточно хорошо согласуются с экспериментальными данными[1)]. Численные расчеты проводились по зажиганию наиболее представительных в районе падения Тунгусского метеорита пород деревьев. Из полученных результатов следует, что минимальные размеры зоны зажигания имеют место для лиственных деревьев, типичным представителем которых является береза (рис. 12б), а максимальный размер зона зажигания реализуется для сосновых деревьев (рис. 12в). В этом случае расстояние от эпицентра взрыва, на котором произошло воспламенение (ожог) сосновых деревьев достигало, со стороны прилета метеорита (ось Ox_1), десяти километров, а с противоположной

---

[1] Коробейников В.П., Чушкин П.И., Шуршалов Л.В. Комплексное моделирование полета и взрыв в атмосфере метеорного тела // Астрономический вестник. 1991. Т.25, № 3. С.327-343.

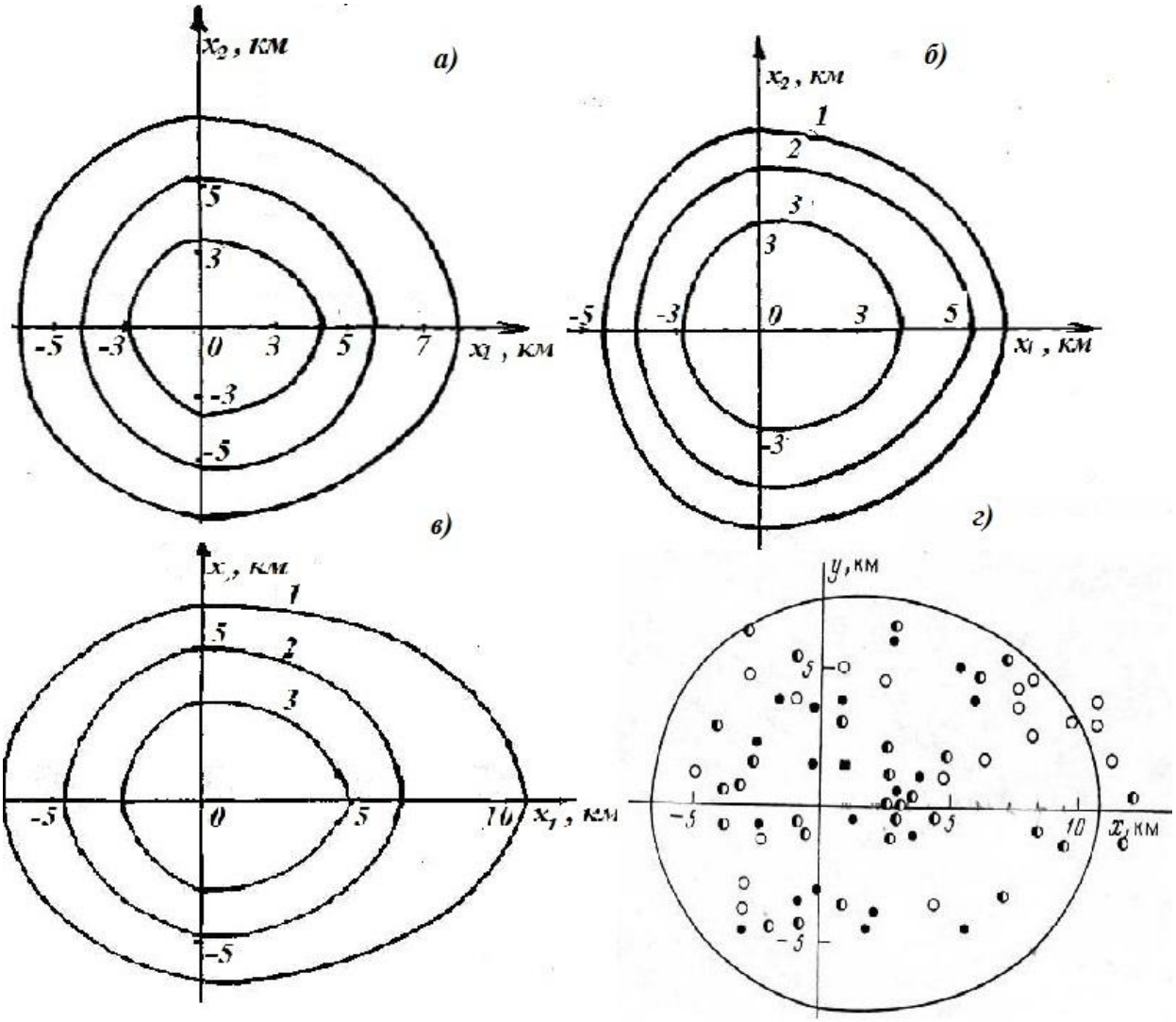


Рис. 12

стороны и по оси Ox_2 - порядка шести километров. Экспериментальные данные, представленные на рис. 12, подтверждают правильность полученных численных расчетов.

Шестой раздел работы посвящен вопросам численного решения задач, изложенных в разделах 2-5. В подразделе 6.1 приведен способ получения дискретного аналога для типичного нелинейного нестационарного двумерного дифференциального уравнения в частных производных параболического типа с граничными условиями третьего рода на основе метода контрольного объема [1)]. Его основная идея поддается прямой физической интерпретации. Расчетная область разбивается на некоторое число непересекающихся контрольных объемов так, что каждая узловая точка содержится в одном контрольном объеме. Дифференциальные уравнения интегрируются по каждому контрольному объему. Для

[1] Патанкар С.В. Численное решение задач теплопроводности и конвективного теплообмена при течениях в каналах. М. : Изд-во МЭИ, 2003. 312 с.

вычисления интегралов используются кусочно-гладкие профили, которые описывают изменение Φ между узловыми точками. Полученный таким образом дискретный аналог выражает закон сохранения Φ для конечного контрольного объема точно так же, как дифференциальное уравнение выражает закон сохранения для бесконечно малого контрольного объема. В связи с тем, что при расчете поля давления возникают трудности, обусловленные наличием первых производных, входящих в конвективные члены и градиента давления, используются шахматные сетки для компонент скорости. Аналогичным образом, с помощью метода контрольного объема, получены дискретные аналоги для трехмерных уравнений. Для того чтобы поле скорости удовлетворяло уравнению неразрывности, использовался алгоритм SIMPLE, предложенный в работе Патанкара С.В.

В результате дискретизации дифференциальной задачи получаются системы сеточных уравнений для каждого дифференциального уравнения. Матрица каждой из систем является семидиагональной для трехмерного случая (пятидиагональной – для двумерного и трехдиагональная для одномерного случаев). Для разрешения полученных систем алгебраических уравнений используется метод SIP[1].

При численном решении задач рассмотренных в диссертации применялся метод расщепления по физическим процессам, то есть вначале рассчитывалась газодинамические характеристики, а затем решались уравнения химической кинетики и учитывались источники, возникающие вследствие химических реакций, для скалярных функций (c_α,T).

Для проверки правильности работы программы для решения двумерных задач в качестве тестовой решалась задача о ламинарном течении вязкой тепловыделяющей жидкости в прямоугольном колене. Расчетная область представляла собой прямоугольник, у которого левая вертикальная и нижняя горизонтальная стенки непротекаемые, а жидкость втекает через верхнюю горизонтальную границу и вытекает через правую вертикальную границу. Особенностью данной задачи является наличие точного аналитического решения, что позволяет оценить полученное численное решение. В результате расчетов по описанной выше методике получены поля температур и векторные поля скорости, которые представлены в виде таблиц. Из анализа полученных данных следует, что отличие аналитического и численного результатов составляют менее 1%. Кроме того, для оценки точности дискретных аналогов и проверки программы использовался метод априори задаваемых аналитических решений. Точность восстановления решений составляла не менее 0.5%.

Для проверки правильности работы программы расчета в трехмерном случае были проведены тестовые расчеты, которые затем сравнивались с

---

[1] Stone H.L. Iterative solution of implicit approximation of multidimensional partial differential equations // SIAM J.Numer. Anal. 1968. 5. P. 530-558.

результатами, приведенными в работе [1)]. С помощью составленной программы решалась задача о расчете свободно-конвективного течения в области, представляющей куб, у которого нагреты до различных температур две противоположные грани. Получены численные распределения поля скорости и температуры. В результате сравнения полученных результатов с данными, приведенными в упомянутой выше работе, получено качественное согласование полей скорости и температуры.

В Ы В О Д Ы

1. На основе общей математической модели теории лесных пожаров разработаны новые математические модели задач перехода низового лесного пожара в верховой в трехмерном (пространственном) случае, в двумерных постановках без учета (осесимметричный случай) и с учетом (плоский случай) внешнего поля ветра и зажигания лесных массивов от светового излучения в результате техногенных и столкновительных катастроф с небесными телами типа Тунгусского метеорита. Учитывается турбулентность течения, двухтемпературность среды и основные физико-химические процессы (сушка и пиролиз лесных горючих материалов, химические реакции горения газообразных и догорания конденсированных продуктов пиролиза).

2. На основе метода контрольного объема разработана методика численного решения одномерных, двумерных и трехмерных нестационарных уравнений теории лесных пожаров.

3. Анализ результатов численного решения задачи о переходе низового лесного пожара в верховой показал, что имеют место следующие стадии этого процесса: прогрев напочвенного покрова и полога леса, образование газообразных продуктов пиролиза напочвенного покрова, их воспламенение, образование газообразных продуктов пиролиза полога леса и их зажигание.

4. С помощью двумерных и трехмерных нестационарных уравнений Рейнольдса изучено взаимодействие внешнего поля течения с очагом горения при переходе низового лесного пожара в верховой. Установлено, что с ростом скорости ветра увеличивается угол наклона факела пламени и зажигание полога леса осуществляется на меньших расстояниях от напочвенного покрова.

5. Установлено, что при воздействии очага низового лесного пожара на полог леса переход низового лесного пожара в верховой имеет место до определенной критической высоты нижней границы крон деревьев. Количество энергии, сообщенное при этом пологу леса не превышает 5000 кДж/м^2, что подтверждается экспериментальными данными. Причем

---

[1] Fusegi T., Hyun J.M., Kuvahara K., Farouk B. A numerical study of 3^d natural convection in a differentially heated cubical enclosure // Simulation and numerical methods in heat transfer. 1990. 157. P. 49-54.

преобладающим является конвективный перенос энергии. Для наиболее характерных данных, описывающих реакционные и теплофизические свойства сосновых фитоценозов, получены конкретные значения времен и предельные высоты зажигания полога леса.

6. Показано, что математическое моделирование перехода низового лесного пожара в верховой без учета двухтемпературности среды приводит к уменьшению высоты полога леса, на которой возможно его воспламенение до 40%.

7. Установлено, что при численном решении задачи о переходе низового лесного пожара в верховой в двумерной и трехмерной постановках для аналогичных случаев, значения интегральных характеристик (количество энергии необходимое для осуществления перехода, высота полога леса, для которой имеет место переход и др.) сохраняются.

8. В результате численных расчетов показано, что при переходе низового лесного пожара в верховой и воспламенении лесных массивов под воздействием светового излучения зажигание лесных горючих материалов носит газофазный характер.

9. Даны новые физико-математические постановки задач зажигания лесных массивов в результате техногенных и природных (столкновительных) катастроф, учитывающие воздействие светового излучение небесного тела на полог леса при его полете в атмосфере.

10. Осуществлено математическое моделирование процесса зажигания лесных массивов под воздействием светового излучения, которое показало, что в зависимости от расстояния между источником энергии и пологом леса реализуются три режима зажигания: вырожденный, нормальный и невоспламенение.

11. Для определения максимальных размеров зоны зажигания лесных массивов от светового излучения предложена упрощенная квазиодномерная двухтемпературная постановка. При этом учитывалось, что лучистый тепловой поток значительно превышает конвективный. Результаты расчетов размеров зон зажигания с точностью до 5% хорошо согласуются с результатами, полученными по более точной двумерной осесимметричной постановке.

12. В результате численных экспериментов установлено, что на форму контура зоны зажигания существенное влияние оказывает траектория полета небесного тела и доля кинетической энергии набегающего потока, превращающейся в световое излучение $C_{\text{Н}}$, а площадь зоны зажигания зависит от полной энергии небесного тела E, $C_{\text{Н}}$ и от отношения энергии взрыва к полной энергии ε_0. В частности показано, что форму зоны зажигания для Тунгусского метеорита можно представить в виде овала, вытянутого вдоль проекции траектории прилета небесного тела на подстилающую поверхность.

13. Показано, что в рамках предложенной математической модели удается получить не только качественное, но и количественное согласование

формы и размеров контура с известными данными наблюдений при $E= 10^{16}$ Дж, $E_o=10^{15}$Дж и $C_H=0.1$.

14. В результате математического моделирования установлено, что для различных древостоев размеры зон зажигания, при прочих равных условиях, в порядке убывания располагаются следующим образом: сосновый, лиственничный и березовый лес. Минимальное время зажигания реализуется для сосновых, а максимальное для березовых древостоев.

15. На основе результатов численных расчетов физико-химических процессов в зоне зажигания от Тунгусского метеорита произведена оценка усиления действия ударной волны на лесной массив. Установлено, что до 20% регистрируемой энергии взрыва может обеспечиваться в результате детонации летучих горючих продуктов пиролиза, которые образуются в пологе леса к моменту прихода ударной волны. Таким образом, при оценке общей энергии взрыва Тунгусского метеорита по действию ударной волны на лесной массив необходимо также учитывать ее взаимодействие с газообразными продуктами пиролиза ЛГМ.

Результаты, представленные в диссертации, полностью опубликованы в следующих работах:

1. Гришин А.М., Перминов В.А. Переход низового лесного пожара в верховой // Физика горения и взрыва. 1990. Т.26, № 6. С. 27-35.
2. Гришин А.М., Перминов В.А. О зажигании лесных массивов в результате взрыва Тунгусского метеорита // Физика горения и взрыва. 1993. Т.29, № 6. С.8-14.
3. Гришин А.М., Перминов В.А. Зажигание полога леса от очага низового лесного пожара // Химическая физика. 1994. Т.13, №8-9. С. 202-209.
4. Гришин А.М., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии // Физика горения и взрыва. 1996. Т.32, № 5. С. 107-115.
5. Гришин А.М., Ефимов К.Н., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов в результате космических и техногенных катастроф // Физика горения и взрыва. 1996. Т.32, № 2. С. 18-30.
6. Гришин А.М., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов под действием высотного источника лучистой энергии // Вычислительные технологии. 1997. Т.2, № 2. С. 33-43.
7. Гришин А.М., Перминов В.А. Математическое моделирование зажигания крон деревьев // Физика горения и взрыва. 1998. Т.34, № 4. С. 13-22.
8. Перминов В.А. Математическое моделирование распространение плоского фронта верхового лесного пожара // Вычислительные технологии. 2006. Т.11. С. 108-115.

9. Гришин А.М., Перминов В.А. Математическое моделирование зажигания полога леса от Тунгусского метеорита // Известия СО РАН, Сибирский физико-технический журнал. 1992. № 6. С. 112-117.
10. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения верхового лесного пожара в трехмерной постановке // Вестник Томского государственного университета. 2006. № 19. С. 105-109.
11. Перминов В.А. Математическое моделирование зажигания полога леса от очага низового лесного пожара // Вычислительные технологии. 2008. Т.13, №5. С.99-105.
12. Перминов В.А. Численное решение задачи о возникновении верхового лесного пожара в трехмерной постановке // Вестник Томского государственного университета. 2009. Т.6, № 1. С. 41-48.
13. Перминов В.А. Математическое моделирование зажигания полога леса от очага низового лесного пожара в трехмерной постановке// Известия высших учебных заведений // Физика. 2009. № 2/2. С. 144-148.
14. Grishin A.M., Perminov V.A. The radiation and conjugation heat exchange and the upset and propagation crown forest fire // Heat Transfer Research. 1993. V.25, № 5. P. 679-684.
15. Grishin A.M., Perminov V.A. Ignition of forest crowns from a ground-fire source // International Journal of Multiphase Flow. 1996. V.22. P.115.
16. Grishin A.M., Perminov V.A. Mathematical modeling of the state of forest phytocenoses under natural and man-made disasters // Computational mathematics and modeling. 1996. V.7, № 1. P. 12-26.
17. Perminov V. Numerical Solution of Reynolds equations for Forest Fire Spread // Lecture Notes in Computer Science. 2002. V.2329. P.823-832.
18. Perminov V. Mathematical modeling of crown forest fire initiation // Lecture Notes in Computer Science. 2003. V.2667. P. 549-557.
19. Perminov V. Mathematical model of environmental pollution by motorcar in an urban area. // Lecture Notes in Computer Science. 2005. V.3516. P. 139-142.
20. Перминов В.А. Методика численного решения двумерных задач: Методические указания. Белово : БИФ КемГУ, 2004. 30 с.
21. Гришин А.М., Перминов В.А. Радиационный и сложный теплообмен при возникновении и распространении верховых лесных пожаров //Тепломассообмен. Радиационный и комбинированный теплообмен (Материалы докладов и Минского международного форума).- Минск: АНК «ИТМО им. Лыкова» АНБ, 1992. С. 82-88.
22. Гришин А.М., Ефимов К.Н., Перминов В.А. Радиационно-конвективный теплообмен в условиях столкновительных и техногенных катастроф // Тепломассообмен-96. Труды III Минского международного форума. Радиационный и конвективный теплообмен. Минск, 1996. С. 116-120.

23. Perminov V.A. Mathematical modeling of crown forest fire initiation // III international conference of forest fire research and 14th conference on fire and forest meteorology, Luso, Portugal (Ed. D.X. Vegas), 1998. P.419-431.
24. Perminov V. Numerical modeling forest fire spread initiation // 9th Seminar NUMDIFF on Numerical Solution of Differential and Differential-Algebraic Equations 4 – 8 September 2000, Halle (Germany). P. 45-46.
25. Perminov V. Mathematical modeling forest fire spread initiation // Proceedings of International Congress MODSIM – 2001(Australia), Canberra, 2001. P. 977–982.
26. Perminov V. Mathematical modeling of large forest fire initiation // 5th Symposium on Fire and Forest Meteorology, 16 – 20 November, Colorado Spring Resort in Orlando (Florida, USA), 2003, 5p.
27. Perminov V. Mathematical modeling of forest fire initiation with the allowance for the radiative–convective heat and mass transfer and two temperatures of medium // International Workshop on efficient techniques for numerical solutions of coupled PDE's and applications to reservoir simulation, Tehran (Iran), 2003, 25 p.
28. Perminov V. A numerical study of forest fire initiation // 10th Seminar on Numerical Solution of Differential – Algebraic Equations, September 8-11 2003, Galle, 2003. P. 36-37.
29. Perminov V. Mathematical modeling of environmental pollution by the action of motor transport // Advances in Scientific computing and Application, Being/New York, Science Press, 2004. P. 341-346.
30. Perminov V. A numerical solution of cojugate problem of forest fire initiation // Numerical treatment of differential equations, International Seminar (NUMDIFF-1), Halle (Germany). September 4-8, 2006. P. 46-47.
31. Perminov V. Mathematical modeling of crown forest fire initiation // 31st International Symposium on Combustion, August 6-11 2006, University of Heidelberg (Germany), 2006. P. 168.
32. Perminov V. A numerical study of forest fire initiation and spread // European Conference on Computational Fluid Dynamics ECCOMAS CFD 2006, V.Wesseling, E. Onate, J.Periaux(Eds), TU Delft (The Netherlands), 2006. P. 268-277.
33. Perminov V. Mathematical modeling of crown forest fire initiation and spread // Proceedings of 6th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions, Vol. III (Sessions 19-22), August 27-September 1, 2006, Halifax(Canada). P. 837-847.
34. Perminov V. Mathematical Modeling of Forest Fire Initiation in Three Dimensional Setting // USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-46CD, Rocky Mountain Research Station, Destin, Florida (USA), 2007. P.241-248.
35. Perminov V. Mathematical modeling of large forest fire initiation // The 6th European Conference on Ecological Modelling, Conference proceedings, November 27-30, 2007, Trieste (Italy), 2007. P. 409-410.

36. Perminov V.A. Numerical solution of the problem of large forest fires initiation // 13th International Symposium on Scientific computing computer arithmetic and verified numerical computation, El Paso, Texas (USA). September 29-October 3, 2008. P. 97-98.
37. Perminov V. Mathematical modeling of crown forest fire initiation // Proceedings of the 12th WSEAS International Conference; New aspects of engineering mechanics, structures, engineering geology, Heraclion (Crete Island, Greece). July 22-25, 2008. P. 259-265.
38. Perminov V. Mathematical modeling of forest fire initiation // Proceedings of the 10th WSEAS International Conference on Mathematical methods, Computational Techniques and Intelligent Systems(MAMECTIS), Corfu (Greece). October 26-28, 2008. P. 143-148.
39. Perminov V.A. Mathematical Modeling of Crown Forest Fire Initiation and Spread // Proceedings of the 2009 International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation, Brno (Czech Republic). September 07-September 09, 2009. P. 115-119.
40. Perminov V. Mathematical Modeling of Large Forest Fire Initiation // Proceedings of the 6th WSEAS International Conference on Fluid Mechanics(Fluids'09), Recent Advances in Fluid mechanics, Ningbo (China). January 10-12, 2009. P. 69-73.
41. Valeriy Perminov, Mathematical modeling of large forest fire initiation // Proceedings of "Georghe Vranceanu" International Conference on mathematics and informatics (ICMI), Becau (Romania), September 8-10, 2009. V. 19, №2. P. 365-374.
42. Perminov V.A. Two dimensional averaged mathematical model of forest fire spread // Continuum Mechanics, Fluids, Heat, Proceedings of the 7th International Conference on Heat and Mass Transfer(HMT'10), Cambridge, University of Cambridge, UK, February 23-25, 2010. P. 167-172.
43. Perminov V.A. Conjugate problem of forest fire initiation and spread in three dimensional setting // V European conference on computational fluid dynamics ECCOMAS CFD-2010 J. C. F. Pereira and A. Sequeira (eds) Lisbon (Portugal). 14–17 June 2010. 11 P.
44. Valeriy A. Perminov, Numerical modeling of forest fire initiation and spread // Proceedings of the 4th WSEAS International Conference on Applied Mathematics, Simulation, Modelling, Corfu Island (Greece). July 22-25, 2010. P. 242-248.
45. Гришин А.М., Зверев В.Г., Ковалев Ю.М, Перминов В.А. Исследование эффективности действия взрыва на тушение лесных пожаров // Томск, ТГУ. Деп. ВИНИТИ , № 8667-В86 от 17.12.86. 17 с.
46. Гришин А.М., Алексеев Н.А., Байдин Н.П., Перминов В.А. и др. Экспериментальное исследование механизма распространения лесных пожаров и новых способов борьбы с ними,- Томск, Томский ун.-т, Деп. ВИНИТИ № 226-в87 от 09.01.87. 54 с.

47. Гришин А.М., Алексеев Н.А., Грузин А.Д., Перминов В.А. и др. Физическое моделирование распространения лесных пожаров и взаимодействия ударных волн с фронтом пожара.- Томск, Томский ун.-т, Деп. ВИНИТИ № 2883-в89 от 04.05.89. 59 с.
48. Гришин А.М., Зятнин В.И., Перминов В.А. Экспериментальное исследование перехода низового лесного пожара в верховой.- Томск. Томский ун.-т, Деп. ВИНИТИ № 982-91 от 06.03.91. 22 с.
49. Перминов В.А., Федорова О.П., Шипулина О.В. Методика численного решения задач теории лесных пожаров и охраны окружающей среды // Томск, ТГУ. Деп. ВИНИТИ, № 7-В95 от 10.01.95. 70 с.
50. Гришин А.М., Перминов В.А. Влияние сложного радиационно - конвективного теплообмена на переход низового лесного пожара в верховой // Тепломассообмен - Международный форум. Радиационный и комбинированный теплообмен.- Минск: ИТМО, 1988. С. 47-49.
51. Гришин А.М., Перминов В.А. Математическое моделирование перехода низового пожара в верховой // Сб. статей: "Современные проблемы механики жидкости и газа"(Тезисы докладов IV Всесоюзной научной конференции) Иркутск, ВЦ СО АН СССР, 1988. С. 135-136.
52. Гришин А.М., Перминов В.А. О переходе низового лесного пожара в верховой // Химическая физика процессов горения и взрыва (Материалы IX Всесоюзного симпозиума по горению и взрыву). - Черноголовка: ИХФ, 1989. С. 104-107.
53. Перминов В.А. О зажигании полога леса от очага низового лесного пожара // Физическое и математическое моделирование тепловых и гидродинамических процессов. Томск : Изд.-во ТПИ, 1990. С. 98-104.
54. Перминов В.А., Шипулина О.В. 0 численном решении некоторых задач математической теории лесных пожаров // Физическая газодинамика реагирующих сред. Новосибирск : Наука, 1990. С.158-169.
55. Перминов В.А. О зажигании полога леса от очага низового лесного пожара // Теплофизика и гидродинамика технологических процессов. Томск: ТПИ, 1990. С. 98-104.
56. Grishin A.M., Perminov V.A. Application of modified algebraic turbulent model for numerical solution of some problem of forest fire//International workshop on selected problems of solid propellant combustion and chemical gasodynamics. Tomsk : TSU, 1992. P. 18-19.
57. Гришин А.М., Перминов В.А. Математическое моделирование состояния лесных фитоценозов в условиях природных и антропогеннных катастроф // Математическое моделирование. М. : Изд.-во МГУ, 1993. С. 167-185.
58. Гришин А.М., Перминов В.А. Математическая модель и математическое моделирование распространения аэрозолей при лесных пожарах. В сб.: "Вычислительные технологии". 1994. Т.3, № 8, Изд-во ИВТ СО РАН, Новосибирск. С. 72-86.

59. Гришин А.М., Катаева Л.Ю., Перминов В.А. Математическое моделирование повторного радиоактивного заражения в результате лесных пожаров // Материалы международной конференции: "Лесные пожары: возникновение, распространение и экологические последствия", Томск, 1995. С.44-45.
60. Гришин А.М., Ефимов К.Н., Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения массовых лесных пожаров // Материалы международной конференции : "Лесные пожары: возникновение, распространение и экологические последствия", Томск, 1995. С. 43-44.
61. Гришин А.М., Перминов В.А. Зажигание лесных массивов лучистой энергией в результате ядерных взрывов // Материалы международной конференции: "Лесные пожары: возникновение, распространение и экологические последствия", Томск, 1995. С. 49-51.
62. Гришин А.М., Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения верховых лесных пожаров // Материалы международной конференции: "Лесные пожары: возникновение, распространение и экологические последствия", Томск, 1995. С. 52-53.
63. Гришин А.М., Перминов В.А. Математическое моделирование зажигания лесных массивов в результате столкновительных и техногенных катастроф в квазиодномерном приближении // В сб.: Вычислительные технологии. Новосибирск : ИВТ СО РАН, 1995, Т.4, № 13. С. 156-176.
64. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения массовых и верховых лесных пожаров с учетом радиационно-конвективного тепломассопереноса и двухтемпературности среды : дисс. ... канд. физ.-мат.наук. Томск : ТГУ, 1995. 188 с.
65. Гришин А.М., Мерзляков А.Л., Катаева Л.Ю., Перминов В.А., Щелканова Л.И. Численная методика расчета процессов тепломассопереноса при распространении лесных пожаров // Сопряженные задачи механики и экологии. Материалы международной конференции, Томск : Изд-во ТГУ, 1998. С. 83-84.
66. Перминов В.А. Математическое моделирование экологических последствий массовых лесных пожаров // Материалы международной научной конференции, – Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия, 10.07 - 15.07. – Томск: Изд.– во ТГУ, 1999. С. 56–58.
67. Перминов В.А. Математическое моделирование повторного радиоактивного загрязнения // Взаимодействие научно-образовательных, промышленных, предпринимательских и административных структур. Правовые и экономические аспекты. Материалы конференции, Новокузнецк, 1999. С. 97–99.
68. Перминов В.А. Математическое моделирование повторного радиоактивного загрязнения лесных массивов в результате пожаров //

Математические модели и методы их исследования, Международная конференция. 18-24 августа 1999 г., Красноярск, 1999. С. 168–169.

69. Перминов В.А. Численный расчет повторного радиоактивного загрязнения // Материалы международной конференции «Сопряженные задачи механики и экологии», Томск : Изд-во Томского университета, 2000. С. 44-45.
70. Перминов В.А. Математическое моделирование природных и антропогенных катастрофических явлений // Тезисы докладов второй научно-практической конференции «Наука и образование», Белово : БФ КемГУ, 2001. С.314-316.
71. Голованов О.В., Перминов В.А. Визуализация распространения плоского фронта верхового лесного пожара // Информационные недра Кузбасса. Труды конференции. Часть 2, Кемерово : Изд.-во Полиграф, 2001. С.264–271.
72. Гришин А.М., Перминов В.А., Шипулина О.В., Porterie B. (Франция). Общая математическая модель и некоторые результаты математического моделирования // VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, 23 – 29 августа 2001, Пермь. С. 633.
73. Перминов В.А. Математическое моделирование загрязнения окружающей среды радионуклидами в результате лесных пожаров // «Современные методы математического моделирования природных и антропогенных катастроф», VI Международная конференция, Красноярск, 2001. С. 95-97.
74. Перминов В.А. Математическое моделирование возникновения и распространения лесных пожаров // Материалы Всероссийской конференции «Наука и образование», 20-21 февраля 2003, Белово, 2003. С. 505-507.
75. Перминов В.А. О возникновении и распространении лесных пожаров // Информационные технологии и математическое моделирование: Материалы V Международной научно-практической конференции. Ч.2. Томск : Изд-во Томского госуниверситета, 2006. С. 45-47.
76. Перминов В.А. О численном решении задачи зажигания полога леса от очага низового лесного пожара в трехмерной постановке // Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии: Избранные доклады 7-й Международной научной конференции. Томск : Изд-во Томского ун-та, 2007. С. 172-179.
77. Мартыновская А.Ю., Перминов В.А. Математическая модель распространения двумерного фронта верхового лесного пожара в осредненной постановке // Наука и образование : Материалы 7-ой международной конференции. Белово, 2008. С. 199-207.