На правах рукописи

Бурасов Дмитрий Михайлович

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НИЗОВЫХ ЛЕСНЫХ И СТЕПНЫХ ПОЖАРОВ И ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОСЛЕДСТВИЙ

03.00.16 – «Экология» (физико-математические науки)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2006

Диссертация выполнена на кафедре физической и вычислительной механики механико-математического факультета Томского государственного университета.

Научный руководитель:	Заслуженный деятель науки РФ, доктор физико-математических наук, профессор Гришин Анатолий Михайлович
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Доррер Георгий Алексеевич
	доктор физико-математических наук, профессор Колесник Анатолий Григорьевич
Ведущая организация:	Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС РФ (г. Балашиха, Московской области)

Защита состоится 3 июля 2006 года в 14.00 часов 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 «26» мая 2006 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Ю.Ф. Христенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Леса и степи представляет собой национальное богатство народов нашей Родины. Площадь, покрытая лесом, составляет 1254 млн. га, или 22,5% от площади и 23,9% от запаса древесины лесов всего мира.

Лесные и степные пожары играют важную роль в формировании и поддержке лесных и степных биогеоценозов. Известно как положительное, так и отрицательное их влияние на них. Очень важно уметь предвидеть их возникновение и оценивать возможности их распространения. Наибольшее значение имеет прогноз низовых пожаров, поскольку более 80 % всех пожаров растительности - низовые, практически все верховые пожары развиваются из низовых.

В результате лесных и степных пожаров в атмосферу выбрасывается большое количество газообразных и дисперсных продуктов пиролиза и горения лесных и степных горючих материалов (ЛГМ и СГМ), что загрязняет ее. Кроме того, лесные и степные пожары способствуют увеличению содержания углекислого газа в атмосфере, что содействует глобальному потеплению.

Важность и актуальность проблемы этих природных пожаров еще более возрастает в последнее время в связи с усилением хозяйственной деятельности человека в лесах и степях. Именно вследствие роста антропогенной нагрузки каждый год наблюдается многочисленные лесные пожары на Дальнем Востоке, в Прибайкалье, Красноярском крае и Западной Сибири, а также степные пожары в Саратовской, Оренбургской, Омской областях и на территории Казахстана.

Низовые лесные пожары составляют абсолютное большинство от числа всех пожаров в лесу. Они имеют место не только в тайге, но и в лесостепях, и в тундре. Причины загораний могут быть как природные (так называемые сухие грозы), так и связанные с деятельностью людей (непотушенные спички, окурки, охотничьи пыжи из тлеющих материалов; выхлопные газы и искры от двигателей работающих машин и механизмов; тлеющий шлак, выбрасываемый из железнодорожных пассажирских вагонов; непогашенные костры и т.д.). Нередко низовые лесные пожары, как и степные, переходят в крупные лесные пожары. Как известно, лес очищает и оздоравливает атмосферу, обогащая ее кислородом. Поэтому охрана леса от пожаров, будучи частью более общей проблемы – защиты окружающей среды, в тоже время имеет важное самостоятельное значение. Поэтому математическому и физическому моделированию этих лесных пожаров уделялось и уделяется большое внимание.

Степные пожары случались и до хозяйственного освоения степей человеком (от удара молнии), а в последнее время стали обычным явлением. Сухая трава загорается, а начавшийся пожар быстро расширяет фронт горения и идет полосой в несколько десятков километров ширины со скоростью автомашины (до 25 км/ч). При этом погибает много животных, которые не успели спрятаться в норы или убежать от огня. Ширина волны фронта горения при его высоте 2 - 3 м составляет не более метра - полутора, и сразу за

прошедшим огнем остается полоса черной земли, на которой лишь кое-где догорают и тлеют дерновинки степных растений. В понижениях, на пырейных лугах среди степи огонь при таком пожаре стоит часами. При степных пожарах гибнут молодые деревца, поэтому степные пожары приостанавливают наступление леса на степь.

Очень часто степные пожары, начинаясь на территории соседних государств (Казахстан, Монголия), переходят государственную границу и продолжаются уже на территории Российской Федерации. Поэтому исследование этого природного явления должно носить международный характер, но, к сожалению, физико-математическому исследованию степных пожаров, уделяется мало внимания.

Сегодня нужен подход к проблеме массовых природных пожаров по принципу: «Предупредить пожар в 15 раз дешевле, чем ликвидировать его последствия».

Необходимо создание единой системы мониторинга и прогнозирования возникновения природных чрезвычайных ситуаций, существующей и работающей в едином информационном пространстве для обеспечения всесторонней оценки и повышения качества прогноза. Это позволит разработать возможные сценарии (модели возникновения и развития экстремальной обстановки) и обосновать наиболее эффективные способы и меры борьбы с природными пожарами что, несомненно, приведет к снижению масштабов последствий природных пожаров. Устранение данных проблем позволит эффективно снижать риск и смягчать последствия массовых природных пожаров.

Поэтому, прежде чем создать систему прогнозирования возникновения природных чрезвычайных ситуаций, необходимо исследовать основные характеристики и закономерности, и параметры этих явлений.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационной работы являются аналитические и численные решения задач об определении скорости и предельных условий распространения низовых лесных и степных пожаров, и как результат математического моделирования – создание основ физико-математической теории степных пожаров. Исходя из указанной цели исследования, решались следующие задачи:

1. Разработка физико-математических моделей для решения задач об одномерном распространении низовых лесных и степных пожаров.
2. Решение задачи определения скоростей распространения и предельных условий распространения низовых лесных и степных пожаров.
3. Исследование влияния излучения на скорости распространения низовых лесных и степных пожаров.
4. Исследование влияния учета двухтемпературности среды и излучения от факела пламени на распространение волны горения по пологу растительности.
5. Исследование закономерностей выхода на стационарный режим волны горения для низовых лесных и степных пожаров.

Объект исследования. Объектом исследования диссертационной работы является возникновение и распространение низовых лесных и степных пожаров, анализ их общих свойств и их различий на уровне постановки задач и результатов их математического моделирования.

Методы исследования и фактический материал. Методологической базой исследования послужили работы [1-10], выполненные в Томском государственном университете. В качестве основных методов использовались методы физико-математического моделирования.

Достоверность. Достоверность теоретических результатов работы доказана на основе их сравнения с известными экспериментальными данными по низовым лесным пожарам и данными наблюдений за степными пожарами, а также сравнения результатов аналитических формул для определения скорости распространения степных и низовых пожаров с численными результатами.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1 Разработаны физические модели распространения низовых лесных и степных пожаров.
2 Получены аналитические формулы распространения низовых лесных и степных пожаров, учитывающие влияние скорость ветра, запаса горючих материалов, их влагосодержания, а также тепловые потери при горении горючих материалов.
3 Определены предельные условия распространения низовых лесных и степных пожаров.
4 Исследовано влияние излучение на распространения природных пожаров.
5 Получено численное решение нестационарной задачи о возникновении и распространении низовых лесных и степных пожаров с учетом двухтемпературности среды и излучения от факела пламени.

Теоретическая значимость полученных результатов. В диссертационной работе, впервые в теории природных пожаров, была аналитически решена задача о распространении степных пожаров. Кроме того, впервые получена аналитическая формула для определения скорости распространения низового лесного и степного пожара зависимости от скорости ветра, запаса горючих материалов, их влагосодержания и тепловых потерь. Исследовано влияние излучения на скорости распространения низовых лесных и степных пожаров. Установлено, что предложенная в работе упрощенная одномерная нестационарная математическая модель позволяет оценить скорость распространения низового лесного и степного пожара с учетом излучения от факела пламени и двухтемпературности среды и определить профили параметров состояния во фронте пожара.

Значимость работы для практики состоит в том, что разработанная физико-математическая теория распространения степных пожаров может использоваться для определения скорости и предельных условий распространения степных пожаров, а уточнение теории низовых лесных пожаров позволяет точнее знать предельные условия распространения, что позволяет разрабатывать новые способы борьбы с ними. Установлено, что как

правило, скорость распространения низовых лесных пожаров при действии ветра меньше, чем скорость распространения степных пожаров, вследствие более значительного конвективного теплового потока. Кроме того, зная скорость распространения и направление степных пожаров, можно спрогнозировать конкретное место, докуда дойдет пожар и время, за которое преодолеет это расстояние.

Апробация работы. Результаты теоретических и экспериментальных исследований, представленных в диссертации обсуждались и получили признание на 18 международных и региональных конференциях, в том числе Международной конференции “Вычислительные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании” (Алматы, Казахстан, 2002 г.), Международной конференции “Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании»” (Усть-Каменогорск, Казахстан, 2003 г.), Научно-практической конференции “Аэрозоли Сибири”, (Томск, 2003 г.), Научной сессии молодых ученых научно-образовательного центра “Физика и химия высокоэнергетических систем” (Томск, 2004 г.), на XLI Международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс" (Новосибирск, 2004 г.), Международной конференции «Сопряженные задачи механики, информатики и экологии» (Горно-Алтайск, 2004 г.), V Международной конференции «Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия» (Красноярск, 2003 г.), V Минском международном форуме по тепло- и массообмену (Минск, 2004 г.), Всероссийской конференции молодых ученых “Наука. Технологии. Инновации.” (Новосибирск, 2004 г.), XIII Симпозиуме по горению и взрыву (Черноголовка, 2005 г.), Международной конференции “Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия” (Иркутск, 2005 г.), II Всероссийской конференции молодых ученых “Физика и химия высокоэнергетических систем” (Томск, 2006 г.), IX Всероссийском съезде по теоретической и прикладной механике (Нижний Новгород, 2006 г.).

Личный вклад. Все работы по теме диссертации осуществлены автором или при его основном участии.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 3 тезиса и 14 статей в журналах и сборниках избранных докладов конференций.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Физико-математические модели распространения низовых лесных и степных пожаров.
2. Аналитические решения упрощенных математических моделей распространения низовых лесных и степных пожаров и формулы для определении скорости этих пожаров.
3. Предельные условия распространения низовых лесных и степных пожаров.
4. Результаты исследования влияния излучения на скорости распространения низовых лесных и степных пожаров

5. Результаты исследования влияния учета двухтемпературности среды и излучения от факела пламени на возникновение и распространение волн горения по пологу растительности при распространении низовых и степных пожаров.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы. Общий объем работы 162 страниц, в ней содержится 37 рисунков, 17 таблиц, список литературы включает 216 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении формулируется актуальность работы, цель и задачи исследования, излагается краткое содержание работы. Обозначен вклад автора в исследования по данной теме, отражена научная новизна работы, практическая и теоретическая значимость результатов.

В главе 1 проведен обзор исследований как российских, так и зарубежных ученых по проблеме распространения природных пожаров. Установлено, что низовые лесные и степные пожары являются бедствием для всего живого. Эти пожары вызывают прежде всего изменения физических характеристик почвы – снижается содержание органического вещества, порозность почвы в результате гибели почвенных животных. Разрушаются почвенные агрегаты, увеличивается ветровая и водная эрозия. Происходит стерилизация почвы, становится менее благоприятным водный баланс. Периодические пожары препятствуют почвообразовательному процессу, разрушая структуру почвы и способствуя выносу биогенов.

Природные пожары являются предметом исследования во многих работах, в том числе ученых Томского госуниверситета, цель которых заключалась в создании общей математической модели лесных пожаров, методов и методик решения прямых и обратных задач теории лесных пожаров, в исследовании структуры фронта пожара, механизма и предельных условий возникновения и распространения лесных пожаров, а также в прогнозе экологических последствий пожаров. Эта работа проводится по единому алгоритму [1] и включает многолетние взаимосвязанные этапы [6].

Кроме того, интенсивную работу по изучению природных пожаров осуществляли и красноярские ученые, так в работе [11] проанализированы характерные особенности процесса распространения лесных пожаров, даны уравнение сохранения энтальпии и физико-математические модели этого процесса в различных диапазонах скоростей ветра, приведены полуэмпирическое соотношение для расчета скорости распространения огня в широком диапазоне изменений условий и база данных по входящим в него коэффициентам, предложен метод расчета контура пожара произвольной формы. Математическому моделированию лесных пожаров также посвящены работы [12-16], в которых изложены первые вероятностные модели распространения лесных пожаров, математические модели распространения криволинейных фронтов лесного пожара и т.д.

Все рассмотренные в главе 1 математические модели для определения скорости распространения фронта пожара разрабатывались исключительно для лесных пожаров. Проблемой степных пожаров стали заниматься относительно недавно, после того как группа французских ученых выяснили, что в результате пожаров в саваннах каждый год сгоревшей фитомассы по Африке составляет 2430 миллионов тонн для саванн, которая представляет приблизительно половину фитомассы, сгоревшей во всем мире [17].

Исследование степных пожаров в России ранее в основном осуществлялось с позиций биологии и лесной пирологии. Такой подход к изучению природных явлений является ограниченным, т.к. в рамках него невозможно разработать математические модели распространения степных пожаров, определить предельные условия их возникновения и распространения и разработать определенные меры для предотвращения и тушения степных пожаров. Надо сказать также, что основное внимание уделялось изучению лесных пожаров, а проблема возникновения и распространения степных пожаров не рассматривалась, как самостоятельная физико-математическая задача. В настоящее время известны только выполненные в Томском государственном университете работы, где разработана общая математическая модель степных пожаров.

В течение последних 50 лет за рубежом проводились интенсивные исследования возникновения и распространения природных пожаров, в результате чего появились математические модели таких ученых, как Фрадсен, Ротермел, Вильсон, Альбини и Портерье. Большинство из этих моделей являются полуэмпирическими и имеют ряд недостатков.

Основой любой математической теории являются базовые экспериментальные данные, которые позволяют создать общую физическую модель какого-либо рассматриваемого явления – совокупность причинно-следственных связей, составляющих физическую сущность этого явления [6]. В главе 1 предлагаются некоторые сведения по степным и лесным горючим материалам, на основе которых были проведены все аналитические и численные расчеты.

Глава 2 посвящена разработке физических моделей распространения низового лесного и степного пожаров.

Вводятся основные понятия и опрделения степного пожара. Степным пожаром называется явление неуправляемого многостадийного горения в открытом пространстве на покрытой растительностью площади, в рамках которого имеют место взаимосвязанные процессы конвективного и радиационного переноса энергии, нагревания, сушки и пиролиза степных горючих материалов, а также горения газообразных и догорания конденсированных продуктов пиролиза.

Предложена универсальная физическая модель низовых лесных и степных пожаров, согласно которой теплота, выделившаяся при сгорании горючих материалов за счет излучения, свободной и вынужденной конвекции, передается несгоревшим горючим материалам, в результате чего они прогреваются, высушиваются и пиролизуются. Затем газообразные и

конденсированные продукты пиролиза сгорают и процесс повторяется в указанном порядке.

Считается, что растительный покров в лесу и в степи в процессе пожара в общем случае представляет собой многофазную пористо-дисперсную среду, которая состоит из сухого органического вещества (объемная доля φ_1), воды в жидко-капельном состоянии (φ_2), связанной с этим веществом, конденсированного продукта пиролиза (коксика, φ_3), конденсированного продукта горения коксика (пепла, φ_4), газовой фазы (φ_5), дисперсных частиц сажи (φ_6) и золы (φ_7), а также капель воды (φ_8) над очагом пожара.

Третья глава посвещена математическому моделированию распространеия фронтов низового лесного и степного пожаров.

Математическая модель, предложенная в [18] для описания распространения степных пожаров, достаточно сложна, так как приходится решать уравнения, описывающие состояние, как степного травостоя, так и приземного слоя атмосферы, примыкающего к нему. Поскольку практиков в первую очередь интересует скорость распространения пожара и его энергетические характеристики (максимальная температура, суммарный и радиационный тепловые потоки из фронта пожара в окружающую среду), представляют интерес упрощенные математические модели, которые позволяют определять упомянутые выше характеристики с приемлемой для практики точностью.

Предлагается простая математическая модель, позволяющая описать формирование и распространение фронта низового лесного и степного пожаров. Модель учитывает основные физико-химические процессы (нагревание, сушку, пиролиз горючих материалов, и горение газообразных и конденсированных продуктов пиролиза). Тогда, связывая систему координат с фронтом пожара, имеем для описания распространения пожара следующую систему обыкновенных дифференциальных уравнений:

$$\rho_1\omega\frac{d\varphi_1}{d\xi}=R_1,\ \ \rho_2\omega\frac{d\varphi_2}{d\xi}=R_2,\ \ \rho_3\omega\frac{d\varphi_3}{d\xi}=\frac{M_c}{M_1}R_3-\alpha_c R_1,\quad \frac{d\varphi_4}{d\xi}=0; \qquad (1)$$

$$\frac{d}{d\xi}\left(\rho_5 D_T\frac{dc_\alpha}{d\xi}\right)-\rho_5(u-\omega)\frac{dc_\alpha}{d\xi}+R_{5\alpha}-c_\alpha Q=\frac{\alpha}{c_{p5}h}(c_\alpha-c_{\alpha\infty}),\ \ \alpha=1,2,3 \qquad (2)$$

$$\frac{d}{d\xi}\left(\lambda_T\frac{dT}{d\xi}\right)-\left[\rho_5(u-\omega)c_{p5}-\omega\sum_{i=1}^{4}\rho_i c_{pi}\varphi_i\right]\frac{dT}{d\xi}-\frac{\alpha}{h}(T-T_\infty)-q_2R_2+q_3R_3+q_5R_5=0; \qquad (3)$$

$$u=u_\infty,\qquad \sum_{\alpha=1}^{4}c_\alpha=1$$

$$\rho_5=\frac{\rho_{5\infty}T_\infty M_\infty^{-1}}{T\sum_{\alpha=1}^{4}(c_\alpha/M_\alpha)},\qquad Q=(1-\alpha_c)R_1+R_2+\frac{M_c}{M_1}R_3, \qquad (4)$$

$$R_1 = k_{01}\rho_1\varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT}\right), \quad R_2 = k_{02}\rho_2\varphi_2 T^{-1/2} \exp\left(-\frac{E_2}{RT}\right),$$

$$R_3 = k_{03}s_\sigma\rho_5 c_1\varphi_3 \exp\left(-\frac{E_3}{RT}\right), \qquad R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2}R_5,$$

$$R_{52} = (1-\alpha_c)\nu_г R_1 - R_5,$$

$$R_5 = M_2 k_{05}\left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0,25}\left(\frac{c_2 M}{M_2}\right)T^{-2,25}\exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right), \quad R_{53} = 0.$$

Здесь R_1, R_2, R_3, R_5 - массовые скорости реакции пиролиза сухого органического вещества горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза соответственно; c_{pi}, ρ_i, φ_i - теплоемкости, истинные плотности и объемные доли компонентов многофазной реагирующей среды; T, c_α - температура и массовые концентрации компонентов газовой фазы (α = 1 - O_2, 2 – горючие компоненты продуктов пиролиза, 3 – инертные компоненты воздуха, 4 – водяной пар и не реагирующие продукты реакций окисления, пиролиза и горения кокса); R_{51}, R_{52}, R_{53} - массовые скорости образования α-компонентов газовой фазы; q_2, q_3, q_5 - тепловые эффекты реакции испарения, горения кокса и окисления летучих продуктов пиролиза; $E_1, E_2, E_3, E_5, k_{01}, k_{02}, k_{03}, k_{05}$ - энергии активации и предэкспоненты; α_c, $\nu_г$ - коксовое число горючих материалов и массовая доля горючего газа в общей массе летучих продуктов; α - коэффициент теплообмена; h – высота степи; Q – массовая скорость образования газовой фазы; λ_T, D_T - эффективные коэффициенты турбулентного обмена; u_∞ - равновесная скорость ветра в степи; s_σ - удельная поверхность элемента горючих материалов; M_α, M, M_C - молекулярные веса индивидуальных компонентов, смеси в целом и углерода; индексы «*н*», «∞» относятся к начальным условиям и значениям функций на удалении от фронта пожара, а нижние индексы i = 1, 2, …, 5 и α = 1, 2, 3 используются для обозначения термодинамических параметров фаз и компонентов газовой фазы соответственно; $\xi = x - \omega t$ - декартова координата в подвижной системе отсчета, связанной с положением максимума профиля температуры, а остальные обозначения те же, что и выше

При получении аналитики использовалось диффузионное приближение, в рамках которого процесс горения лимитировался процессом переноса. Это позволило убрать кинетику горения.

В результате аналитического решения краевой задачи (1) – (4) было получена формула:

$$\overline{\omega} = \frac{\overline{q} + \sqrt{\overline{q}^2 - 4\varepsilon\overline{q}(\theta_0 - 1)(1+\pi)}}{2\overline{q}(1+\pi)}, \qquad (5)$$

где где $\varepsilon, \theta_0, \overline{\omega}$ и $\overline{q}$ - безразмерные значения коэффициента тепло- и массообмена, максимальной температуры, скорости распространения и суммарного теплового эффекта горения.

Результаты, полученные с помощью формулы (5), сравнивались с результатами других авторов [11] и было получено хорошее согласование. Анализ полученных результатов показал, что предлагаемая аналитическая формула адекватным образом реагирует на изменение входных параметров.

Затем были определены предельные условия распространения низовых лесных и степных пожаров и исследовано влияния излучения на скорость распространения этих пожаров. Результаты исследования показывают, что излучение способствует увеличению скорости распространения природных пожаров, и в зависимости от стадии развития фронта пожара излучение вносит тот или иной вклад в суммарный механизм переноса энергии от факела пламени пожара к несгоревшим горючим материалам.

Установлено, что даже при отсутствии ветра в окрестности плоского фронта низового пожара возникает течение, скорость, которого тем больше, чем больше интенсивность пожара. Возникновение и развитие этого течения обусловлены подъемом нагретых продуктом пиролиза и продуктов сгорания природных горючих материалов в неподвижной атмосфере. Благодаря этому во фронте низового лесного пожара возникает небольшое уменьшение давления, из-за которого возникает тяга и подсос воздуха из окружающей среды.

Главе 4 посвящена исследованию влияния учета двухтемпературности среды и излучения от факела пламени на возникновение и распространение волны горения по пологу растительности.

С использованием известной математической постановки задачи для распространения верховых лесных пожаров [2, 19] в диссертационной работе были разработаны математические постановки задач о распространении низовых лесных и степных пожаров.

Предложенные математические постановки с соответствующими начальными и граничными условиями для численного интегрирования были редуцированы к дискретной форме с помощью метода контрольного объема Патанкара - Сполдинга [20]. В результате дискретизации дифференциальных уравнений была получена система линейных алгебраических уравнений, для решения которых был использован метод прогонки, или, согласно [20], метод TDMA (Tree Dimensional Matrix Algorithm).

Поскольку система уравнений, описывающих процесс распространения низового лесного и степного пожаров существенно не линейна и сами коэффициенты дискретных аналогов уравнений системы нелинейным образом зависят от искомых функций, то был использован итерационный процесс при ее численном решении. Этот процесс включает следующие этапы:

1. В качестве начальных приближений для искомых функций используются их значения с предыдущего слоя по времени.

2. Производится расчет предварительных значений коэффициентов в дискретном аналоге на основе начального профиля.
3. Решается номинально линейная система алгебраических уравнений, дающих новые значения искомых функций.
4. Осуществляется возврат ко второму этапу и процесс повторяется, с использованием в качестве начального профиля вновь полученного, до тех пор, пока разница в значениях искомых функций на двух соседних итерациях не достигнет заданной точности.

Тестовая проверка модели производилась сравнением результатов ее численного решения с решением модели, предложенной в работе [2, 19], где рассматривалась одномерная математическая модель распространения верхового лесного пожара в приближении постоянной равновесной скорости ветра в пологе леса и раздельной от приземного слоя постановки, но без учета двухтемпературности среды и излучения от факела пламени.

В результате численного интегрирования системы уравнений, описывающих процесс распространения низового лесного или степного пожара в однородном массиве растительности с соответствующими начальными и граничными условиями и использования базы данных, изложенной в главе 1, были получены поля температуры газовой и твердой фазы, массовых концентраций компонент газовой фазы, объемных долей компонент твердой фазы в различные моменты времени.

На рисунке 1 представлены распределения полей безразмерной температуры газовой фазы (сплошная линия) и твердой фазы (пунктирная линия) в момент времени, соответствующий установившемуся режиму распространения фронта степного пожара со скоростью $\omega = 3{,}9 м/с$.

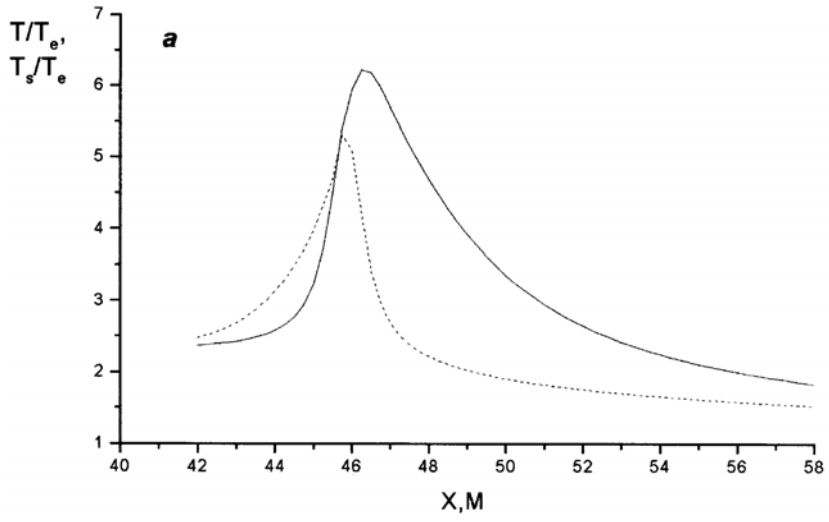

Рисунок 1 (а) – Температурные кривые во фронте степного пожара при скорости ветра $u = 6 м/с$. Сплошная кривая соответствует температуре газовой фазе, пунктирная – температуре твердой фазе

Из анализа полученных кривых следует, что максимальная разность температур газовой и конденсированной фаз: $(\Delta T)_m = (T - T_S)_m$ составляет 300° К.

Более высокая температура в газовой фазе обусловлена тем, что именно в ней выделяется основное количество теплоты газофазной реакции окисления газообразных горючих продуктов пиролиза [2].

С увеличением скорости ветра отмечено изменение концентрации кислорода вблизи фронта пожара в сторону уменьшения, а также снос горючего газообразного продукта пиролиза в сторону ветра.

Сравнивая графики температурных кривых газовой фазы, можно сделать вывод, что профили температуры представляют собой Гауссовы кривые, вытянутые в направлении ветра, причем с увеличением скорости ветра вытянутость этих кривых увеличивается.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Разработаны физические модели распространения низовых лесных и степных пожаров. Установлено, что при степном пожаре происходят те же физико-химические процессы в слое степных горючих материалов (СГМ), что и при лесных пожарах: теплота, выделившаяся при сгорании горючих материалов за счет излучения, свободной и вынужденной конвекции, передается несгоревшим СГМ, в результате чего они прогреваются, высушиваются и пиролизуются. Затем газообразные и конденсированные продукты пиролиза сгорают и процесс повторяется в указанном порядке.
2. Разработаны упрощенные математические модели распространения низовых лесных и степных пожаров, получены аналитические формулы для определении скорости этих пожаров, которые учитывают скорость ветра, запас горючих материалов, их влагосодержания и тепловые потери при горении горючих материалов.
3. Определены предельные условия распространения низовых лесных и степных пожаров. Установлено, что скорости распространения низового лесного и степного пожаров линейно растут с ростом скорости ветра. Скорость распространения этих пожаров падает с ростом влагосодержания горючих материалов φ_2 и при некотором критическом значении этой величины $\varphi_2 = \varphi_{2*}$ процесс горения и распространения прекращается.
4. Установлено, что за счет лучшей продуваемости слоя СГМ, чем слоя ЛГМ, приток кислорода в зону горения выше и конвективный перенос тепла по ветру происходит быстрее. Это приводит к тому, что скорость распространения степного пожара почти на порядок выше скорости распространения лесного низового пожара.
5. Установлено, что излучение оказывает непосредственное влияние на распространение природных пожаров. Этот результат объясняется действием ветра на факел пламени над фронтом пожара, в результате которого факел как бы прижимается к слою растительности, что ускоряет

прогрев, сушку и пиролиз горючих материалов и, в конечном счете, увеличивает скорость распространения пожаров.

6. Установлено, что даже при отсутствии ветра в окрестности фронта низового пожара возникает течение, скорость, которого тем больше, чем больше интенсивность пожара. Возникновение и развитие этого течения обусловлены подъемом нагретых продуктом пиролиза и продуктов сгорания природных горючих материалов в неподвижной атмосфере. Благодаря этому во фронте пожара возникает небольшое уменьшение давления, из-за которого возникает тяга и подсос воздуха из окружающей среды.
7. Предложены математические модели распространения низовых лесных и степных пожаров с учетом двухтемпературности среды и излучения от факела пламени. Исследованы закономерности выхода этих природных пожаров на стационарный режим горения. Установлено, что учет влияния двухтемпературности среды позволяет выявить зону догорания конденсированных продуктов пиролиза.
8. На основе метода контрольного объема Патанкара - Сполдинга разработана и проверена методика численного решения одномерной нестационарной задачи распространения низовых лесных и степных пожаров. Относительная погрешность не превышает 7 %, что является хорошим согласованием результатов аналитического и численного определения скорости распространения фронта степного пожара.
9. Результаты полученные на основе аналитических формул и на основе численного вычисления согласуются с данными наблюдения за распространением степных пожаров и с экспериментальными данными по низовым лесным пожарам.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гришин А.М. Физика лесных пожаров. - Томск: изд-во ТГУ, 1994 г. – 218 с.
2. Гришин А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними. - Новосибирск: Наука, 1992. – 408 с.
3. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф (основные определения и понятия теории катастроф и общие закономерности их возникновения и развития): Учеб. пособие. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2002. - 124 с.
4. Гришин А.М. Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложения // ФГВ. -1996. - Т. 32, № 5. - С 45 - 63.
5. Гришин А.М. Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложение для охраны и защиты лесов // Сборник избранных докладов межд. конф. «Сопряженные задачи механики и экологии». – Томск: Изд-во ТГУ, 2000. - С. 88 - 137.
6. Гришин А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров и их приложения // Успехи механики. - 2002. - Т.1. - №4. - С. 41 - 89.
7. Гришин А.М. Моделирование и прогноз экологических катастроф // Экологические системы и приборы. - 2001. - №2. - С. 12 - 21.

8. Grishin A.M. Mathematical modeling of forest fires and new methods of fighting them. - Russia, Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University, 1997. - 390p.
9. Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч.1. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2003. - 524 с.
10.Гришин А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч.2. - Кемерово: Изд-во “Практик”, 2005. - 560 с.
11.Конев Э.В. Анализ процесса распространения лесных пожаров и палов // Теплофизика лесных пожаров. - Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1984. - С. 99 - 125.
12.Воробьев О.Ю., Доррер Г.А. Вероятностная модель распространения лесного пожара // Вопросы лесной пирологии. - Красноярск, 1974. - С.118 - 134.
13.Доррер Г.А. Математические модели динамики лесных пожаров. - М.: Лесн. пром-сть, 1979. – 161 с.
14.Доррер Г.А. Модель распространения криволинейных фронтов лесного пожара // Физика горения и взрыва. - 1984. - №1. - С. 11 - 19.
15.Доррер Г.А. Модель распространения фронта лесного пожара // Теплофизика лесных пожаров. - Новосибирск, 1984. - С. 86 - 99.
16.Доррер Г.А. Математическое моделирование процессов распространения лесных пожаров и борьбы с ними // Изв. вузов Лесн. журн.- 2000. - № 2.- С. 31 - 36.
17.Andreae M.O. Biomass Burning: Its history, use, and distribution and its impact on environmental quality and global climate, in Global Biomass Burning: Atmospheric, Climate, and Biospheric Implications. (Edited by J.S. Levine). - MIT Press, Cambridge, Mass. - 1991. - P. 3 – 21.
18.Гришин А.М. Общая математическая модель степных пожаров и ее приложения // Экологические системы и приборы. – 2004. - № 12. С. 25 - 29.
19.Гришин А.М., Грузин А.Д., Зверев В.Г. Математическая теория верховых лесных пожаров. - Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984. - С. 38 - 75.
20.Патанкар С.В. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоиздат, 1984. – 152 с.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Гришин А.М., Бурасов Д.М. Об определении скорости распространения степных пожаров // Вычислительные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании (материалы международной конференции). - Алматы: Изд-во Казахского национального университета им. Аль-Фараби, 2002. - С. 208 - 215.
2. Бурасов Д.М., Гришин А.М. Параметрическое исследование аналитической формулы распространения степных пожаров // Вычислительные и информационные технологии в науке, технике и образовании (материалы международной конференции). - Усть-Каменогорск: Изд-во ВКГУ, 2003. – С. 173 – 179.

3. Бурасов Д.М., Гришин А.М. Математическое моделирование степных пожаров // Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия. Материалы 5-й международной конференции. – Томск: Изд-во Томского университета, 2003. – С. 57 - 59.
4. Бурасов Д.М., Гришин А.М. Математическое моделирование степных пожаров // Сборник избранных докладов международной конференции в г. Красноярске “Природные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия”. - Томск: Изд-во Томского университета, 2004. - С. 15 - 25.
5. Бурасов Д.М., Гришин А.М. Методика расчета выбросов дисперсных частиц от очагов степных пожаров // Аэрозоли Сибири. X рабочая группа: Тезисы докладов. - Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2003. - С. 30.
6. Бурасов Д.М. О проблеме математического моделирования степных пожаров и оценка выбросов вредных веществ в атмосферу // Материалы Научной сессии молодых ученых научно-образовательного центра “Физика и химия высокоэнергетических систем”. - Томск: ИФПМ СО РАН, 2004. - С. 32 -33.
7. Гришин А.М., Бурасов Д.М. Влияние излучения от факела пламени на распространение степных пожаров // V Минский международный форум по тепло- и массообмену: Тезисы докладов и сообщений. – Минск: Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, 2004. - С. 169 - 170.
8. Бурасов Д.М. Об одной математической модели степного пожара // Материалы XLI международной научной студенческой конференции "Студент и научно-технический прогресс": Математика / Новосиб. гос. университет. Новосибирск, 2004. - С. 138 - 139.
9. Гришин А.М., Бурасов Д.М. Математическое моделирование выбросов вредных веществ при степных пожарах // Сопряженные задачи механики, информатики и экологии. Материалы международной конференции. - Томск: Изд-во Томского университета, 2004. - С. 63 - 64.
10.Бурасов Д.М. О влиянии излучения на распространение степных пожаров // Наука. Технологии. Инновации. Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых в 6-ти частях. - Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. - Часть 1. - С. 81 - 82.
11.Бурасов Д.М. Влияние “собственного ветра” на распространение степного пожара // Физика и химия высокоэнергетических систем. Сборник материалов I Всероссийской конференции молодых ученых (26-29 апреля 2005г., Томск) – Томск: Томский гос. Университет, 2005. - С. 188 - 189.
12.Гришин А.М., Бурасов Д.М. Математическое моделирование влияния излучения на распространение степных пожаров // Экологические системы и приборы. – 2005, № 4. - С. 33 - 35.
13.Бурасов Д.М., Гришин А.М. О прогнозе степной пожарной опасности // Лесные и степные пожары: возникновение, распространение, тушение и экологические последствия. Материалы 6-й Международной конференции. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. - С. 25 - 26.
14.Бурасов Д.М., Гришин А.М., Куприянов Е.А. О кинетике сушки типичных степных и луговых трав // Лесные и степные пожары: возникновение,

распространение, тушение и экологические последствия. Материалы 6-й Международной конференции. - Томск: Изд-во Том. ун-та, 2005. - С. 26 - 27.
15.Бурасов Д.М., Гришин А.М. Определение скорости распространения и экологических последствий степного пожара // XIII Симпозиум по горению и взрыву. Тезисы докладов. - Черноголовка: Изд-во ИПХФ РАН, 2005. - С. 80 - 81.
16.Бурасов Д.М. Разработка физико-математической теории для прогноза возникновения степных пожаров // Физика и химия наноматериалов: Сборник материалов Международной школы конференции молодых ученых (13-16 декабря 2005 г.). – Томск: Томский государственный университет, 2005. - С. 316 - 319.
17.Бурасов Д.М. Математическое моделирование распространения степного пожара с учетом двухтемпературности среды // Физика и химия высокоэнергетических систем: Сборник материалов II Всероссийской конференции молодых ученых (4 - 6 мая 2006г., г. Томск). – Томск: Томский государственный университет, 2006. - С. 172 - 174.