

Введение

Лес является национальным богатством нашей страны. Площадь, покрытая лесом, составляет 45% от площади страны и 1/5 от запаса древесины всего мира [1]. Лес является хранителем генетического разнообразия биосферы, обогащает кислородом атмосферу, является главным источником формирования климата, сохраняет и повышает плодородие почвы, регулирует и очищает водное пространство, основной элемент из реакционного потенциала, лес – это среда для жизни людей, является сырьевыми базами лесных и лесоперерабатывающих промышленности. Для этого охрана леса от пожаров является не только проблемой защиты окружающей среды, но и имеет огромное самостоятельное значение.

Ущерб от пожаров является катастрофическим для человечества, биосферы и атмосферы, и эта проблема является актуальной, так как человек постоянно сталкивается с пожарами. Так же страдает экономика от лесных пожаров, ущербы могут доходить до миллиардов рублей в год. Это стихия приводит к гибели людей, уничтожению жилья, и оказывает негативное влияние на здоровье людей.

Целью работы явилось определение безопасных размеров противопожарных разрывов в зависимости от метеорологических условий и параметров лесного массива в различные моменты времени с помощью численного решения, что позволит исследовать процесс возникновения и распространения верхового лесного пожара в зависимости от скорости ветра и параметров лесного массива (создание математической модели возникновения и развития верхового лесного пожара).

Основные задачи работы – разработка физической и математической постановки задачи о возникновении и распространении верховых лесных пожаров, разработка методики численного решения задачи, исследование условия возникновения и распространения верховых лесных пожаров, в том

числе с учетом противопожарных разрывов, проанализировать полученные результаты.

Исследование основывается на численном решении двумерных уравнений Рейнольдса для того, чтобы описать турбулентное течение учитывая уравнения диффузии для химических компонентов и уравнений сохранения энергии для газовой и конденсированной фаз [4]. В самом начале при расчете по физическим процессам рассматривалась гидродинамическая картина течения и распределения искомых скалярных функций, а затем решались уравнения химической кинетики для объемных долей фаз и учитывались химические источники для скалярных функций. Чтобы получить дискретные аналоги пользуемся методом контрольных объёмов. Методика решения реализована в виде комплекса программ для персонального компьютера [4].

Используется общая постановка математической модели лесных пожаров, которая представляется с помощью новой математической постановкой задачи возникновения и распространения лесного пожара – это и является научной значимостью работы.

Решение проблем повышения пожароустойчивости лесов и снижения ущерба от пожаров невозможно без создания основ теории управления таким нетрадиционным объектом, как лесной пожар.

Так как экспериментально изучить лесной пожар невозможно, потому что это дорогостояще, и нельзя провести полное физическое моделирование этого явления, то рассматриваются другие возможные пути исследования, а именно теоритические методы исследований. На помощь приходит математическое моделирование, которое описывает положение в котором находится биогеоценоз и приземный слой атмосферы [4].

Проблеме лесных пожаров отведено много статей и литературы. Исследования лесных пожаров ведутся учёными довольно давно. В настоящее время сформировано самостоятельное научное направление – лесная пирология. Это наука о природе лесных пожаров, их влиянии на лесную среду, наносимом ущербе, разработке мер по их предупреждению и борьбе с лесными пожарами, использовании положительной роли огня в лесном хозяйстве.

На самом деле лесные пожары приносят не только вред лесному фитоценозу. В некоторых работах [7] говорится о повышении плодородия почвы после пожара и говорится, что пожар повышает разнообразие видов в экосистемах.

В работе [7] упоминается о том, что несмотря на воздействия огня биогеоценоз приспособился к постоянно действующему фактору и поэтому огонь пожар не является чем-то разрушительным, его считают как некоторое воздействие на среду. Это наука о лесных пожарах и вызываемых ими изменениях в лесу. За последние десятилетия достигнут немалый прогресс в этом вопросе, но горимость лесов в ряде районов страны остается все еще высокой [20]. Для успешного решения проблемы требуется дальнейшее совершенствование методов борьбы с лесными пожарами. Усилиями отечественных и зарубежных учёных, таких как И.С.Мелехов, Н.П.Курбатский, Г.И.Коровин, В.Г.Нестеров, Г.А.Амосов и другие, накоплен большой фактический материал о природе лесных пожаров [15]. В последние годы появились исследования, посвящённые детальному выяснению физических закономерностей процесса горения.

Значительный вклад в математическое моделирование лесных пожаров произошёл с появлением цикла работ в Томском государственном университете, выполненных под научным руководством А.М. Гришина. Предложенная А.М. Гришиным общая математическая модель лесных пожаров [2], учитывающая законы сохранения массы, импульса, энергии, а также физико-химические процессы, описывает процессы возникновения и развития горения во всех ярусах леса. Сформулировал новую концепцию борьбы с лесными пожарами путём относительно малых энергетических воздействий на фронт пожара. Изучение условий возникновения верховых лесных пожаров в результате зажигания крон деревьев от низовых лесных пожаров является также актуальным вопросом, и в связи с такой практической значимостью данная тематика активно развивалась. Так математическому моделированию возникновения верховых лесных пожаров посвящены работы Wan Wagner, R.C. Rothermel и M.E. Alexander [15]. Эти модели строятся на основах пользования

физических параметров и экспериментальных данных во время изучения условий возникновения зажиганий на нижних полах леса от очагов низовых лесных пожаров, и также распространении верховых лесных пожаров [4].

Объект исследования – верховой лесной пожар, физико-химические закономерности процессов горения, системные связи и закономерности возникновения, развития и прекращения пожара; предмет исследования – математическое моделирование верхового лесного пожара.

Практическая значимость результатов ВКР – исследование может стать основой для разработки новых способов борьбы с лесными пожарами, будет способствовать разработке новых методик по профилактике и борьбе с данным явлением.

1 Обзор литературы по изучению лесных пожаров

1.1 Основные понятия и определения

Лес - природный комплекс древесных, кустарниковых, травянистых и других растений, а также животных и микроорганизмов, биологически взаимосвязанных в своем развитии и влияющих друг на друга и на внешнюю среду. Лес образует более или менее сомкнутый древостой. Лес занимает примерно треть площади суши, площадь леса на Земле составляет 38 млн км². Лес — это не только деревья и кустарники так же и трава, мох, грибы, лес – это экосистема или сложное сообщество из элементов, которые тесно связаны между собой, такие элементы как живые организмы и неживые абиотические компоненты – воздух, почва, вода [5].

На территории России произрастает 1/5 часть лесов планеты. Это не только национальное достояние России, но и важнейший фактор обеспечения условий жизни и устойчивого развития современной цивилизации. Леса выполняют средостабилизирующие, средообразующие и ресурсные функции. Они поглощают углекислый газ и выделяют кислород, регулируют поверхностный и подземный сток, обладают почвозащитными и климаторегулирующими свойствами, обогащают воздух фитонцидами, служат местом обитания многих животных. Как природный ресурс, леса являются источником удовлетворения потребностей общества в древесном сырье и иной продукции (грибах, ягодах, лекарственных растениях и др.).

Лесные пожары изменяют функционирование и состав лесов. Чтобы восстановить небольшую часть леса нежен не один десяток лет и не одно поколение лесничих. Урон от пожара увеличивается, если рядом с лесом находится какой-либо промышленный объект. Но самой большой опасностью является тот случай, когда пожар подходит к населённым пунктам, он может стать причиной гибели людей. Причины пожара разные, например, природные стихии: грозовые разряды и молнии, большинство лесных пожаров на нашей планете возникает всё же в результате человеческой деятельности. Иногда их

вызывают преднамеренно – и тогда они редко выходят из-под контроля (например, для борьбы с вредными насекомыми или болезнями деревьев). Также нередки лесные пожары из-за халатности (случайно брошенный окурок или не до конца дотушенный костёр), но самые масштабные пожары возникают из-за умышленных поджогов леса для дальнейшей вырубки (характерная ситуация для приграничных с Китаем регионов России).

Лесной пожар - это стихийное, неуправляемое распространение огня по лесной территории. Объектами горения при растительных пожарах обычно бывают растительный покров и верхний горизонт почвы (подстилка). При экстремальных условиях объектом горения становится иногда весь почвенный слой до минерального грунта включительно. В зависимости от того, где распространяется огонь, пожары делятся на низовые, верховые и подземные.

В отличие от классификации [2] верховые лесные пожары отнесены к разряду сложных лесных пожаров, и в этот разряд включены так называемые пятнистые пожары. Пятнистыми называются высокоинтенсивные лесные пожары, над которыми возникают мощные конвекционные потоки нагретого воздуха и продуктов сгорания. Эти потоки поднимают вверх и рассеивают перед кромкой пожара горящие частицы, вызывающие дополнительные загорания напочвенного покрова. Чтобы успешно бороться с крупными высокоинтенсивными пожарами, надо знать: как формируются конвекционные потоки над пожаром; как они влияют на его распространение, на возможность преодоления пожаром препятствий; каковы условия работы летательных аппаратов в зоне пожара.

Первый признак, по которому в предложенной классификации делятся лесные пожары, - их ландшафтная однородность. Если пожар распространяется по территории, относящейся к одному типу ландшафта, то он называется ландшафтно-однородным. В противном случае принято говорить о втором, или смешанном, типе лесного пожара [2].

Как правило, площадь горения и мощность смешанных лесных пожаров больше, чем однородных. Ландшафтно-однородные пожары делятся на четыре типа в соответствии с типом повреждённого пожаром биогеоценоза. В свою

очередь лесные пожары можно подразделить на простые и сложные. Под простым понимается лесной пожар, тип которого не меняется во все время процесса горения ЛГМ. В том случае, если тип пожара меняется в процессе его развития, пожар считается сложным. По степени вовлечения фитомассы лесного биогеоценоза пожары подразделяются на низовые, верховые и почвенные.

При почвенных лесных пожарах сгорают ЛГМ в первом слое нижнего яруса леса, т.е. подстилка(подстилочные пожары) или торф (торфяные пожары).

Если при низовых лесных пожарах сгорают второй, третий и четвёртый слои нижнего яруса, то это так называемые напочвенные пожары; если слой кустарников и подлесок – подлесно-кустарниковые; если валежник – валежные.

Верховой (беглый и устойчивый) - лесной пожар, распространяющийся по пологу леса (кронам деревьев). Древостой, как правило, гибнет полностью или большей частью, в зависимости от интенсивности пожара и типа леса. При беглом верховом пожаре огонь быстро распространяется по кронам деревьев в направлении ветра, а при устойчивом (повальном) – огонь распространяется по всему древоостою: от подстилки до крон.

Выделяют три вида верховых пожаров [1] – повальные (когда напочвенный покров и полог древостоя сгорают одновременно), вершинные (когда огонь распространяется по кронам, опережая его движение по напочвенному покрову) и пятнистые (когда создаются условия для массового разброса горящих частиц - веточек, кусочков коры и т.д. перед фронтом пожара). В последнем случае очаги низового пожара возникают впереди верхового, создавая предпосылки для его ускорения.

Горючие материалы при верховых пожарах, как и при низовых, подразделяются на проводники горения (тонкие части деревьев – хвоя, листья, веточки), на компоненты, поддерживающие горение (напочвенный покров, ветки и сучья толще 7 мм в диаметре, подлесок и подрост) и задерживающие горение, например кроны деревьев пожароустойчивых пород [1].

Рельефно – ландшафтные, растительные, погодные и другие факторы оказывают разное влияние на возникновение, распространение и развитие

лесного пожара. Для того, что обеспечить эффективную организацию тушения пожара следует учитывать все эти факторы. Необходимо знать факторы, которые влияют на поведение пожара, факторы, которые обуславливают процесс горения, интенсивность, быстроту распространения фронта. К ним относятся ветер, влажность, температура, горючие материалы и рельеф. В эксперименте [2] описано, что тепло в зоне пожара идет на нагревание, просушивание и процесс пиролиза. Дальше все продукты пиролиза сгорают и при этом выделяют энергию, затем процесс повторяется. Перенос энергии из зоны лесного пожара осуществляется путем кондукции, конвекции, излучения и переносом частиц из фронта пожара.

Пиролизом ЛГМ в работе [2] принимают расщепление при высокой температуре на простые органические продукты более сложных органических соединений. В итоге получают конденсированные простые продукты, а именно: коксик, состоящий из чистого углерода, газообразные негорючие и горючие продукты CH_4 , H_2 , CO и H_2O .

Горение растительного покрова отличается большим разнообразием не только условий горения, но и физико-химических явлений при этом. К основным из них можно отнести такие процессы, как возникновение очага горения, распространение фронта горения по покрову растительности, сгорание охваченного пламенем горючего материала и потухание фронта горения. Каждый из них – сложное многостадийное явление, причём стадии протекают неодинаково для каждой из разновидностей растительного пожара, т.е. зависят от объекта и условий горения [2].

Горение поддерживается за счет высокой температуры, постоянного поступления кислорода и наличием достаточного количества горючих материалов. В лесу имеются в изобилии горючие материалы и кислород воздуха. Источником пожара может стать костер, который остался без присмотра, окурок или спичка, искра из выхлопной трубы разных механизмов, выжигание остатков прошлогодней растительности и горючего мусора, а так же другие источник огня, которые могут появиться в процессе жизнедеятельности

человека. Если пожар всё-таки начался, то он является источником тепла и поддерживает горение самостоятельно [5].

Процесс горения начинается не сразу, а последовательно проходит следующие фазы:

1. Предварительный инертный нагрев и подсушивание с выделением водяных паров (120°C); высыхание, выделение летучих горючих продуктов пиролиза, газофазное горение с выделением водяных паров, горючих веществ (кислот, смол) - 260°C .
2. Воспламенение газов ($315\text{-}425^{\circ}\text{C}$). Пламенное горение с выделением дыма, углекислого газа, водяных паров и негоревших газов ($650\text{-}1095^{\circ}\text{C}$).
3. Обугливание и горение углей до полного сгорания горючих веществ.

В процессе горения выделяется большое количество тепла, которое передается окружающей среде путем конвекции, излучения, проводимости.

1. Конвекция - это распространение высоких температур путем подъема массы горячего воздуха над местом горения в виде конвекционной колонки.
2. Излучение - распространение высоких температур в виде лучевой энергии по радиусу во всех направлениях от источника горения.
3. Теплопроводность - распространение высоких температур по горючим материалам от очага горения.

Горение лесных горючих материалов различают по типам — пламенное горение и беспламенное . Каждый тип горения может переходить из одного в другой и имеет обе стадии — пламенную и беспламенную (горение углей). В зависимости от типа горения одна из них является преобладающей.

Выделение большого количества тепла и его распространение создают условия для возникновения новых очагов лесных пожаров. Излучение тепловой энергии вызывает нагревание окружающего древостоя, что способствует усилению горения. Способность лесных материалов к тепловой проводимости обеспечивает распространение горения по валежникам, корням и другим частям древесных растений и образование подземных (торфяных) и гумусных лесных пожаров. Следует заметить, что если материал сухой, то на испарение влаги и, следовательно, на подготовку его к воспламенению требуется меньше

тепла, чем при влажном материале. Поэтому сухие древесные материалы легче загораются и горение быстрее распространяется по их поверхности. Чем больше влажность, тем медленнее распространяется горение. При определенной ее величине тепла, попадающего на соседние с горящими участки, окажется недостаточно для их подсушки и подогрева до нужной температуры. Тогда горение распространяться не будет.

Количество верховых пожаров и пройденная ими площадь сильно варьируют в зависимости от синоптической ситуации года. В среднем по количеству случаев верховые пожары составляют около 1,5-2 %, а пройденная ими площадь – около 10-12 % от площади всех лесных пожаров. Различают две формы верховых пожаров – устойчивый, или повальный, и беглый. При устойчивом пожаре горение происходит по всем ярусам растительности одновременно. Сгорает подстилка, живой напочвенный покров, валежник, сухостой, подрост, подлесок, кроны деревьев и обгорают стволы. После такого пожара насаждение гибнет полностью, остаются только обгоревшие или обугленные стволы деревьев. Скорость продвижения устойчивого верхового пожара составляет в среднем 300-600 м/ч, достигая в отдельных случаях 4-5 км/ч.

Верховые пожары, поглощая значительное количество биомассы, образуют длинные шлейфы дыма темного цвета. Во время скачка огня по кронам образуется дымовой столб более темного цвета, чем дымовой шлейф. При проведении космических наблюдений признаком верхового пожара может служить огонь, наблюдающийся во время скачка по кронам, и дымовой импульс в головной части дымового шлейфа.

Распределение числа лесных пожаров по месяцам за многолетний период позволяет определить типы пожарной опасности и спланировать работу служб тушения лесных пожаров. В умеренных широтах можно выделить ранневесенние, летние и осенние пожары. В зимний период в исключительно редких случаях могут иметь место торфяные пожары. Степень влияния на рост древостоев ранневесенних, летних и осенних пожаров весьма различна. Так, если ранневесенние пожары создают опасность заражения поврежденных огнем

древостоев вторичными вредителями уже в тот же вегетационный период, то летние и осенние отодвигают эту опасность на следующий год.

Классификации, посвященные распределению лесных пожаров по причинам возникновения, в большинстве своем весьма обширны. Примером может служить классификация, предложенная [23]:

1. Причины установлены.

1.1. От естественных источников огня:

1.1.1. от молний;

1.1.2. от самовозгорания обнажений каменного угля или торфа;

1.1.3. от зимующих (подземных) пожаров;

1.1.4. прочие причины (например, от метеоритов и вулканов).

1.2. В результате пребывания человека в лесу.

1.2.1. Нарушение правил пожарной безопасности организациями:

1.2.1.1. нарушение действующих инструкций по технологии работ;

1.2.1.2. неисправность механизмов;

1.2.1.3. необеспеченность механизмов, в том числе транспортных средств, искрогасителями;

1.2.1.4. деятельность экспедиций;

1.2.1.5. прочие причины.

1.2.2. Нарушение правил пожарной безопасности отдельными гражданами:

1.2.2.1. отдыхающими, сборщиками грибов, ягод, цветов, лесных орехов;

1.2.2.2. сборщиками кедровых орехов;

1.2.2.3. рыболовами и охотниками;

1.2.2.4. туристами на трассах маршрутов;

1.2.2.5. работниками предприятий, работающих в лесах;

1.2.2.6. местным населением при пользовании лесом (пастьба скота, сенокошение и др.).

1.2.3. Умышленный поджог.

1.2.4. Прочие установленные причины.

2. Причины не установлены.

Официальная статистика в нашей стране использует следующие категории причин лесных пожаров: лесозаготовки, экспедиции, сельхозпалы, по вине других организаций, по вине населения, невыясненные.

Огромное влияние на распространения пожара оказывают погодные условия. Например, дождь и высокая влажность ограничат и прекратят распространение пожара, а сильный ветер наоборот разгоняет горение, если говорить о тихой погоде и о понижении температуры воздуха в ночное время, то это стабилизирует горение. Самой благоприятной для распространения фронта пожара является сухая, солнечная погода.

Если рассматривать рельеф местности, то он тоже оказывает определённое воздействие. Крутизна склонов напрямую влияет на развитие пожара, чем выше склон, тем больше скорость распространения. Когда огонь распространяется по склону вверх, но он находится очень близко к нижним частям крон деревьев. Это способствует к их подогреву, подсушиванию и быстрому воспламенению. Это зависит от того, что тёплый воздух поднимается дальше по склону и вызывает «тягу».

Скорость восходящих над пожарами потоков может достигать 35 м/с. Известны случаи [6], когда самолеты, летящие на высоте 1800 м, опрокидывались. В условиях Красноярского края отмечались колонки, достигающие высоты более 5 км, которые заканчивались мощным кучевым облаком. При этом диаметр колонки составлял 800 и более метров [23]. Такие потоки изменяют метеорологическую обстановку в пограничном слое атмосферы до высоты 1,5 км и оказывают существенное влияние на безопасность полетов при тушении пожаров с воздуха.

Профилактика лесного пожара может состоять из определённых мер, которые минимизируют вероятность возникновения пожаров и уменьшают территорию огневых вспышек. Для этого должна проводиться обязательная санитарная вырубка леса. Она проводится по мере старения деревьев и поражения их короедами, очистка лесных территорий, особенно тех, которые расположены поблизости с населенными пунктами, от всевозможного мусора, сюда же входят и упавшие деревья. Создаются минерализованные полосы,

расстояние между которыми должно достигать шестидесяти метров. Слой надпочвенного покрова между полосами выжигается. Здесь нужно осуществлять чередование между лиственными деревьями и хвойными деревьями. Если благоустроить места для отдыха людей, то тоже вероятность возникновения пожара снижается во много раз.

Профилактика лесных пожаров заключается и в организации наблюдения и быстрого тушения загорания в зоне активной охраны, которая охватывает 2/3 общей площади лесного фонда Российской Федерации.

В Европейской части страны осуществляется активная охрана лесов, сюда же можно добавить Сибирь и Дальний Восток. Помогает бороться с огнем на этих территориях авиация. Авиация широко используется при обнаружении и ликвидации пожара. С давних времён в нашей стране существует система регистрации пожара с помощью пожарных вышек, к которым можно было увидеть начинающийся пожар, таким образом осуществлялся мониторинг территорий. В последние годы активно входит в пользование космического мониторинга для регистрации пожара на территориях Сибири и Дальнего Востока, где население незначительно. Особую значимую роль так же занимают профилактические и воспитательные работы с населением, которые могут ограничивать те или иные действия.

Безусловно, задача сохранения лесных покровов Земли, как регуляторов необходимых для жизни балансных соотношений газов и влаги в атмосфере, является сегодня как никогда актуальной.

1.2 Экспериментальные исследования возникновения и развития лесных пожаров

Общая математическая модель лесных природных пожаров — своеобразный эталон точности физико-математического описания разных типовых лесных пожаров, который позволяет оценить полноту и точность более простых и удобных для практических целей моделей. С ее помощью

можно получить критерии подобия и понять влияние различных физико-химических факторов на характеристики и энергетику лесных пожаров. Используя современные ПК, современные численные методы, удастся определить поля скорости, температур, концентрация компонентов, плотности, тепловых потоков и дать прогноз развития лесного пожара в заданном районе с учетом сезонных изменений свойств ЛГМ. Поскольку из-за требований экологической безопасности крупномасштабные эксперименты в натуральных условиях невозможны, математическое моделирование лесных пожаров является единственным способом изучения природы, предельных условий распространения, структуры фронта пожара и его энергетики [2].

Часто задачи осуществления полноценных экспериментальных исследований распространения лесных пожаров в натуральную величину невозможны, так как имеет место быть плохая воспроизводимость результатов измерений, так же большая зависимость характеристик горения от внешних факторов, такие как влажность воздуха и влагосодержание лесного древостоя, температура и атмосферное давление воздуха, неоднородности надпочвенного покрова и древостоя. С другой стороны полноценно в условиях лаборатории нельзя произвести моделирование лесного пожара, так как разные определяющие критерии подобия обусловлены неравновесным физико-химическими процессами такие как сушка и пиролиз ЛГМ, а так же горением газообразных и конденсированных продуктов пиролиза [9].

Исследования верховых пожаров немногочисленны из-за сложности эксперимента. Наиболее широко представлены в литературе экспериментальные исследования процесса горения и распространения огня в условиях лесного низового пожара. Так, например, в [10] авторами проведено экспериментально-аналитическое изучение закономерностей формирования и распространения очага низового пожара в лесу сосновой формации. В работе отражено выявление скорости нарастания фронта пламени, высоты огня для определенного запаса напочвенного слоя, распределения температуры по высоте фронта пламени. Оценены значения экспозиционной плотности лучистого потока энергии по пространству вблизи фронта горения,

установлены уровни достигаемой температуры в напочвенном слое в области непосредственной близости к огню. В дополнение к этому выявлен диапазон значений скорости перемещения фронта низового пожара на горизонтальном участке леса с напочвенным покровом, состоящим преимущественно из опада хвой, а также степень влияния на мобильность фронта влажности горючего материала.

Регламентирующие документы предписывали обеспечить в ходе эксперимента соответствующие условия – скорость ветра не выше 3 м/с, температура окружающей среды в пределах 20 ± 5 °С, влажность лесного горючего материала не более 30 %. Во время эксперимента комплексный погодный показатель горимости составил 4310, что отвечает IV классу пожарной опасности в лесу (высокая горимость) при скорости ветра в диапазоне 0-1 м/с, температуре воздуха 21 °С и влажности горючего материала около 20 %. Напочвенный слой, состоящий из опада хвой (80 %), мелких веточек, сучков, травы и листьев, приготавливался так, чтобы охватить по толщине достаточно широкий диапазон от пяти сантиметров при созданном запасе 5 кг/м^2 и плотности 100 кг/м^3 до одного сантиметра при естественном запасе 2 кг/м^2 и плотности 200 кг/м^3 . Испытания считались завершенными после полного выгорания всей массы горючего в пределах испытательной



Рисунок 1 - Экспериментальное исследование возникновения и развития верхового пожара

Надо сказать, что любой реальный пожар развивается от простого низового пожара к сложному. Первоначально простая форма пожара переходит в более сложную [2]. В частности, известно, что верховой лесной пожар возникает при поджигании крон деревьев от низового лесного пожара, который продолжает распространяться почти с той же скоростью, что и повальный верховой лесной пожар. В случае вершинных пожаров роль низового пожара сводится к подогреву, сушке, пиролизу и зажиганию продуктов пиролиза в кронах деревьев, после чего в результате действия сильного ветра следует быстрое распространение фронта по кронам деревьев, которое спустя некоторое время по тем или иным причинам прекращается. Вершинный верховой пожар может вновь возникнуть при переходе фронта низового пожара к месту остановки фронта вершинного пожара и процесс может многократно повторяться в указанном порядке[24,25]. Иными словами, самостоятельное существование вершинного верхового пожара невозможно, что послужило основанием для перенесения этого вида пожара в разряд сложных [2].

На рис. 2 представлены результаты обобщения данных эксперимента в сериях натурных наблюдений по скорости распространения фронта пламени и увеличению охватываемой пожаром площади. Числовая аппроксимация процесса распространения фронта представляет семейство кривых, построенных на основании результатов измерений. При проведении экспериментальных исследований трудно смоделировать все возможные состояния по влажности среды, но численные подходы позволяют преодолеть эти трудности. Точность прогноза тем выше, чем ближе моделируемое состояние к экспериментально установленному. В этом смысле вызывает сомнения корректность прогноза для состояния по влажности 5 %, которое в природе едва ли достижимо, но близлежащие к эксперименту состояния (15 %, 25 % влажности) можно рассматривать как реальные оценки. При влажности напочвенного покрова 25 % с течением времени площадь пожара перестает существенно изменяться. Можно предположить, что дальнейшее увеличение влажности материала приведет к полному прекращению горения даже при длительном воздействии на него тепловой энергии.

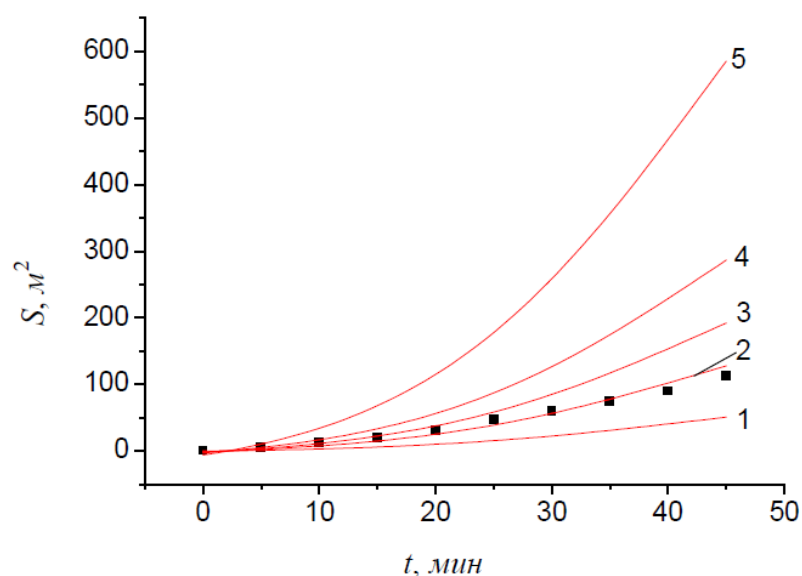


Рисунок 2 - Зависимость площади пожара от времени горения при температуре окружающей среды 21 °С, скорости ветра 1 м/с, запасе ЛГМ 1,4 кг/м² для уровней влажности ЛГМ, %: 25 (1), 20 (2), 15 (3), 10 (4), 5 (5)

В работах [11-14] описываются экспериментальные исследования переходов низовых лесных пожаров в верховые. Эти процессы изучались на специально подготовленных искусственных полосах, были подготовлены вкопанные сосна, высота которых составляла 4-5 метров, а мох и сухая хвоя были равномерно распределены по всему участку [4]. По результатам экспериментов получена зависимость температуры и теплового потока на нижних границах полога леса и на подстилающей поверхности. Вследствие исследования получены формулы, которые связывали геометрические параметры распространяющегося низового пожара и массовые скорости горения ЛГМ низового пожара [11].

В работе [9] для исследования распространения фронта лесного пожара использовались искусственно созданные лесные полосы, а для воспроизведения атмосферной турбулентности – натурный приземный слой атмосферы. В экспериментах контролировались температура в зоне горения, плотность суммарного теплового потока, скорость высокотемпературного гетерогенного потока в зоне горения, скорость ветра, влажность воздуха, атмосферное давление, температура воздуха, высота пламени, линейная скорость распространения фронта пожара, влагосодержание ЛГМ.

Экспериментальное моделирование пожаров на местности позволяет выявить закономерности развития пламени.

1.3 Возникновение математических моделей лесных пожаров

В связи с тем, что экспериментальные исследования верховых лесных пожаров являются очень трудоёмкими и дорогостоящими, представляет интерес использование методов математического моделирования [4]. Методы, безусловно, являются перспективным направлением в изучении данного явления. Математические модели лесного пожара, в первую очередь, требуются для предсказания его поведения, которое, в свою очередь, необходимо для эффективной борьбы с пожарами. Возможно количественное описание процессов горения при лесных пожарах.

Под математической моделью некоторой системы понимается совокупность соотношений, дающая в формализованном виде связь между входными и выходными параметрами этой системы. Процесс создания и использования математических моделей называется математическим моделированием и состоит из нескольких этапов. Это описание процессов, происходящих в системе – построение её математической модели; создание расчётных методов и алгоритмов для нахождения численных значений выходных параметров по заданным входным; установление соответствия модели реальной изучаемой системе; подготовка информационного обеспечения; непосредственное использование модели в рамках некоторой управляющей информационной системы.

Исходя из представления о лесном пожаре как о динамической системе, мы под его математической моделью будем понимать совокупность соотношений, выражающих в формализованном виде связь между входными и выходными параметрами этой системы [3].

Объектом моделирования на фундаментальном уровне является горение, которое распространяется отдельными частицами по слою однородных горючих материалов (хвоинок, листьев), и других горючих материалов, расположенных на поверхности минеральной части почвы в виде их природных комплексов со специфической структурой. Входными параметрами являются физико-химические характеристики горючих материалов, характеристики состояния среды, в которой протекает процесс. Выходными параметрами, характеризующими процесс, могут быть распределения интенсивностей тепловых и массовых потоков, полнота сгорания горючего, размеры пламени, скорость его продвижения по объекту и другие. Важнейшие выходные характеристики пожара: вид пожара, скорость продвижения кромки, интенсивность горения, высота пламени, глубина кромки. Модель должна представлять собой алгоритмы, которые дают возможность прогнозировать контур и площадь, охваченную горением, рассчитывать ожидаемую длину периметра пожара, описывать части кромки и отдельные их участки, резко выделяющиеся своими характеристиками.

Математические модели лесных пожаров строятся на основе имеющихся экспериментальных исследований, законов механики реагирующих сред и понятий биологии. В состав большинства моделей поведения лесных пожаров входят модель прогнозирования динамики пожара, а также модель отображения пространственной информации о местности и форме пожара.

Считается, что первая работа по моделированию пожара посвящена экспериментальному изучению процесса его распространения, и относится она к 1919 г. [15]. Затем появились первые теоретические оценки основных факторов, влияющих на горение в лесу [15], а также работы, посвящённые анализу закономерностей возникновения лесных пожаров [16].

Митчел в 1937 г. опубликовал работу, в которой приведена оценка изменения фронта пожара. В качестве приближённой оценки увеличения периметра пожара предложена зависимость между диаметром круга и длиной окружности. Этот метод слишком упрощённый и может быть использован для моделирования пожара наиболее простой конфигурации [15].

Экспериментальные модели можно условно разделить на две группы: экспериментально-аналитические и экспериментально-статистические. Все эти модели предназначены для вычисления скорости движения и конфигурации фронта пожара в лесных биогеоценозах под влиянием факторов погоды и инфраструктуры местности. В экспериментально-аналитических моделях используется смешанный подход к описанию лесного пожара. Обычно авторы исходят из уравнения теплового баланса в горящей кромке, а все остальные зависимости либо игнорируются, либо описываются простейшими моделями. С помощью этих моделей невозможно объяснить все аспекты развития пожара, поскольку в них включают некоторые параметры (константы), определяемые из эксперимента. В этих моделях используется комбинация физической теории со статистическими методами для вывода формул, описывающих поведение пожара[22].

Предполагается, что первые экспериментально-аналитические исследования лесных пожаров появились в 1940-х годах. Это исследования Карри и Фонса, проведённые на сосняках-мертвопокровниках и на

искусственных слоях из сосновых веточек и хвоинок [15]. В 1946 г. Фонс опубликовал математическую модель прогнозирования скорости распространения пожара [15]. Теоретической предпосылкой модели Фонса послужило представление о горении как о серии последовательных поджиганий частиц горючего и полученное на этой основе уравнение теплового баланса. Исследования эти послужили предпосылкой для создания в Северной Америке двух школ, которые разрабатывали модели распространения лесных пожаров, ставшие стандартами в Канаде и США. В США в качестве такого стандарта используются модели, разработанные Ротермеллом в 1972 году [15], а в Канаде – модели, основанные на уравнении интенсивности пожара, разработанные Байрамом в 1956 году [15].

Конец 40-х и 50-е годы явились периодом дальнейшего накопления сведений о свойствах растительных материалов (Амосов Г.А., Байрам Дж.), об их связи с окружающими условиями (Мелехов И.С., Нестеров В.Г.) и с характеристиками горения (Мелехов И.С., Нестеров В.Г., Анцышкин С.П., Вонский С.М., Амосов Г.А.). Особое внимание уделялось вопросу о способе передачи тепла от горящих частиц к частицам, подготавливаемым к горению. Охарактеризованы пламенное и беспламенное горение в лесу, приведены данные о теплотворной способности растительных материалов, теплоте их газификации, оценены доли различных видов теплопередачи в процессе их сгорания [15].

Существует ряд работ, связанных с прогнозированием конфигурации контуров пожаров. Приводятся аналитические выражения для описания контуров небольших пожаров (Н.П.Курбатский, Г.Н.Коровин и др.).

Изучению механизмов теплообмена некоторых растительных материалов и созданию на этой основе математической модели скорости распространения огня посвящены работы Э.В.Конева [1] и А.И.Сухинина [15]. На основе уравнений сохранения энергии и теплового баланса с учётом среднестатистических величин (расстояние между частицами, угол направленности, время зажигания и сгорания) они предложили уравнение

скорости распространения горения по слоям из лишайника, сосновой хвои и травяной ветоши [1].

В СССР в 60-е и 70-е годы была проделана большая работа по изучению природы лесных пожаров с учётом их биологических особенностей, по экспериментальному изучению влияния различных факторов на процесс горения низового пожара в полевых условиях и на модельных установках [15].

Значительный вклад в математическое моделирование лесных пожаров, в том числе и низовых, распространяющихся по напочвенному покрову, произошёл с появлением цикла работ в Томском госуниверситете, выполненных под научным руководством А.М. Гришина. Предложенная А.М. Гришиным общая математическая модель лесных пожаров [2], учитывающая законы сохранения массы, импульса, энергии, а также физико-химические процессы, описывает процессы возникновения и развития горения во всех ярусах леса. Тепло из фронта пожара в несгоревшую зону передается конвекцией, турбулентной теплопроводностью и излучением. Лес рассматривается как многокомпонентная, реакционная недеформируемая пористая многоярусная среда. Математическая модель учитывает взаимное влияние процессов в приземном слое атмосферы, пологом леса и подстилающей поверхности. Идеи, заложенные при построении данной модели, успешно используются не только в нашей стране, но и за рубежом. Это одна из наиболее полных физико-математических моделей горения леса.

Как отмечается в [1,2], верховые лесные пожары возникают в результате воспламенения нижней границы крон деревьев от очагов низовых лесных пожаров или в результате зажигания крон деревьев от молнии. В связи с этим представляет интерес изучение условий возникновения верховых лесных пожаров в результате зажигания крон деревьев от низовых лесных пожаров. В связи с такой практической значимостью данная тематика активно развивалась.

Э.В. Конев внес важный вклад в понимание механизма распространения процесса горения среди лесных горючих материалов. Однако, его модели [1] сложны в реализации, так как он рассматривает распространение огня в твердой фазе от частицы к частице. Кроме того, Э.В. Конев не рассматривает

динамику газовой фазы при пожаре. Математическая модель Г. А. Доррера [3] описывает процесс распространения лесного пожара как бегущую волну в неоднородной и анизотропной среде. На основе методов гамильтоновой механики разработана геометрическая теория движения плоских фронтов природных пожаров, даны формулы для расчета контуров пожаров, их периметров и площадей, разработаны численные алгоритмы построения фронтов пожаров, как имитационного типа, так и основанные на методе подвижных сеток. Введены понятия индикатрис и фигуротрис процессов распространения. По сути, это целая сложная система моделирования процессов распространения и локализации природных пожаров, включающая ряд вспомогательных математических моделей, например, модели пространственной структуры слоев лесного горючего, динамики его влагосодержания и т. д.[22].

Зарубежные работы [17-19] этого же времени посвящены исследованиям возникновению и развитию верхового лесного пожара. В работе [19] описывается процессы возникновения верхового лесного пожара при имеющимся влагосодержании и запасе ЛГМ.

Что касается России, то здесь данная модель строится на основе общих математических моделей лесных пожаров[2]. Распространение лесного пожара моделируется нестационарными уравнениями, полученными с помощью метода осреднения уравнений по высоте полога леса. С помощью численного интегрирования осредненных по высоте полога леса уравнений тепло - и массопереноса получены поля температур и концентраций компонентов, а также контуры лесного пожара в различные моменты времени.

Согласно [15] математические модели, описывающие пожар, с точки зрения методологии моделирования условно разделяют на три различные группы:

- модели, построенные «из первых принципов»;
- модели «чёрного ящика»;
- феноменологические.

Модели первой группы базируются на физике горения и описывают физические механизмы составляющих пожар процессов для получения изучаемых параметров пожара, не используя при этом экспериментальные данные (все необходимые константы могут быть вычислены на основе исходной теории). Эти модели учитывают три вида передачи тепла: теплопроводность, конвекция и радиация.

Вторая группа включает интерполяционные модели, в которых пожар рассматривается как «чёрный ящик» без учёта физической или иной его природы. Они используют экспериментальные данные, полученные в результате наблюдения за реальными пожарами, для определения статистических зависимостей между входными и выходными характеристиками модели пожара. Поскольку эти модели не основаны на физических процессах, успешность их применения при описании поведения пожара ограничена условиями, подобными тем, в которых происходили реальные пожары.

В моделях третьей группы используется смешанный подход: экспериментально-аналитический. С помощью этих моделей невозможно объяснить аналитически все аспекты развития пожара и поэтому в них включают неизвестные параметры (константы), определяемые из эксперимента. В этих моделях используется комбинация физической теории со статистическими методами для вывода формул, описывающих поведение пожара.

В зависимости от способа отображения результатов модели распространения пожара подразделяются на две категории: пространственные и непространственные. Пространственные модели позволяют пользователю видеть визуальное представление процесса распространения пожара по лесной территории. Непространственные модели вместо визуального представления предоставляют выходную информацию в виде графов и диаграмм [15].

В зависимости от того, учитывается ли неопределённость в модели, они делятся на детерминированные и стохастические (вероятностные). Детерминированные модели реализуют принцип: одинаковые причины

вызывают одинаковые последствия. Стохастические модели позволяют описывать факты, где причинно-следственные связи жёстко не заданы [15].

Модель должна быть достаточно простой и удобной для численных расчётов, чтобы её можно было использовать в оперативных целях.

Моделирование на различных уровнях необходимо для изучения природы пожаров в лесном фонде, для поиска средств и способов тушения, для разработок схем обезвреживания пожаров, для проектирования противопожарных устройств леса, для планировки превентивных мер и устранения вспыхнувшего пожара. Модели с помощью имитационных алгоритмов могут использоваться для проектирования структуры и размещения противопожарных сил и средств наземной и авиационной охраны лесов, а также для маневрирования ресурсами авиалесоохраны [3].

2 Математическое моделирование возникновения и развития верховых лесных пожаров

Самым опасным из видов лесных пожаров является верховой пожар. На их долю приходится большая часть выгоревшей площади (до 70%). Верховые пожары наблюдаются, как правило, при сильном ветре. Чтобы прекратить распространения такого пожара нужны большие затраты и средства. В большинстве случаев очень сложно справиться с разбушевавшейся стихией, а изучение механизма возникновения и распространения лесного пожара весьма актуально и может являться хорошим помощником для разработок новых способов в борьбе с пожарами [4].

На основе разработанной постановки и полученных результатов расчетов возникновения и распространения лесного пожара складывается общая математическая модель пожара [2].

2.1 Физическая постановка задачи

С точки зрения биологии, лес является системой живых и неживых компонентов. В его состав входят разные группы и виды лесных растений; а также неживые компоненты: отмершие ветки, хвоинки, сухая трава; приземный слой атмосферы.

Лес, как правило, имеет многоярусную структуру. Нижний ярус леса – это подстилка, мхи, лишайники, а также трава и кустарники, высотой не более двух метров. Верхний ярус леса, представляющий собой совокупность крон деревьев, называют пологом древостоя.

При горении в лесу тепло из зоны горения передаётся новой порции органической массы и расходуется на её нагрев, сушку, пиролиз. Затем летучие и конденсированные продукты пиролиза сгорают, выделяется дополнительное количество энергии, и процесс повторяется в указанном выше порядке. При этом перенос энергии из фронта горения к не горящему топливу в общем случае осуществляется путём конвекции, излучения, а также в результате конвективного переноса горящих частиц из фронта пожара [21].

Огромную роль при распространении лесных пожаров играет пиролиз – разложение лесных горючих материалов в результате их нагревания [26-28].

Согласно [28], при пожарах за счет горения летучих продуктов пиролиза выделяется 90% тепла, а при беспламенном догорании угольного остатка – 6%. Горение газообразных продуктов пиролиза происходит в диффузионном режиме и, следовательно, лимитируется поступлением продуктов пиролиза и окислителя в зону горения. Следует подчеркнуть, что горение летучих веществ превалирует на первом этапе процесса, а горение конденсированного продукта пиролиза – на втором, завершающем. Поэтому для корректного математического описания лесных пожаров надо знать как скорость образования летучих веществ, так и скорость образования конденсированных продуктов пиролиза (коксыка)[2].

Пиролиз древесины. Наибольшее число работ посвящено пиролизу древесины [2, 29-36]. В результате пиролиза возникают газообразные и конденсированные продукты. К первым относятся H_2 , CO , CO_2 , CH_4 и C_2H_6 . К конденсированным продуктам пиролиза относятся твердый пористый коксовый

остаток (древесный уголь), который состоит из почти чистого углерода, и жидкие продукты (жижка), в которые входят вода, смола, спиртовые продукты кислоты и различные органические соединения[2].

Следует заметить, что для правильного описания распространения верхового лесного пожара необходимо знание о взаимодействии различных ярусов леса в ходе этого процесса. Очаги низового пожара, возникающие при рассеивании горящих частиц перед фронтом пожара, и догорание лесных горючих материалов за фронтом, обеспечивают дополнительное тепловыделение и способствуют стабильности распространения верхового пожара. Поэтому необходимо учитывать перенос горящих частиц из фронта верхового пожара и возникновение локальных очагов тепловыделения вследствие зажигания и горения лесных горючих материалов в нижнем ярусе леса и наоборот. Верховой лесной пожар в реальных условиях стимулирует возникновение и развитие низового пожара [21].

При распространении верховых лесных пожаров в естественных условиях давление в окрестности очага пожара слабо отличается от давления в невозмущённых условиях. Это объясняется тем, что горение при лесном пожаре происходит в неограниченном объёме, то есть в термодинамически открытой системе, и, кроме того, скорости газовых потоков, реализующиеся при этом, являются при этом, являются существенно дозвуковыми [21].

При математическом моделировании процесса распространения верховых лесных пожаров необходимо учитывать все отмеченные особенности тепло - и массообмена фронта верхового пожара с окружающей средой [21].

2.2 Математическая постановка задачи

Предполагается, что очаг верхового пожара имеет конечные размеры и над пологом леса задана скорость ветра. Ось Ox_3 направлена вверх, а оси Ox_1 и Ox_2 - параллельно поверхности земли (ось Ox_1 совпадает с направлением ветра). Схема данного процесса представлена на рис.3.

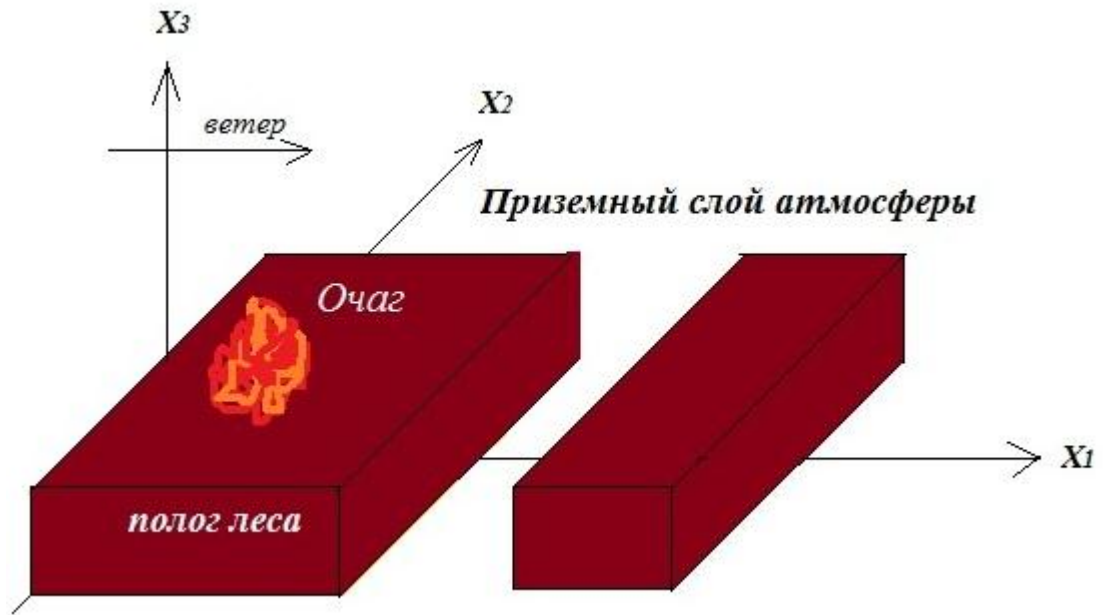


Рисунок 3 - Схема расчётной области

Предполагается, что: 1) течение считается турбулентным и пренебрегаем молекулярным переносом, 2) из-за низкой скорости течения плотность газовой фазы не зависит от давления, 3) считается, что среда находится в локально-термодинамическом равновесии, 4) задана скорость течения над лесным массивом, 5) считаем, что среда бинарная, в которой находятся частицы конденсированной и газовой фазы (кислород, газообразные горючие продукты пиролиза и инертные компоненты). Рассматриваемая задача сводится к решению следующей системы уравнений:

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

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

$$\rho c_p \frac{dT}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho c_p v'_j \overline{T'}) + q_5 R_5 - \alpha_v (T - T_s) + k_g (c U_R - 4 \sigma T^4); \quad (3)$$

$$\rho \frac{dc_\alpha}{dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{v'_j c'_\alpha}) + R_{5\alpha} - \dot{m} c_\alpha, \quad \alpha = \overline{1, 3}; \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_j} \right) - k c U_R + 4 k_s \sigma T_s^4 + 4 k_g \sigma T^4 = 0, \quad k = k_g + k_s; \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \varphi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (cU_R - 4\sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s); \quad (6)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad (7)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_{\alpha} = 1, P_e = \rho_5 RT \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_{\alpha}}{M_{\alpha}}, \vec{v} = (v_1, v_2), \vec{g} = (0, g);$$

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

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

$$R_{55} = 0.$$

В представленной выше постановке задачи используются следующие обозначения: $R_1 - R_5$, $R_{5\alpha}$ - массовые скорости пиролиза лесных горючих материалов, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза, образования α - компонентов газодисперсной фазы; объемные доли i - ой фазы (1 - кислород, 2 - летучие горючие продукты пиролиза (в основном это CO), 3 - инертные компоненты (азот, CO_2 , водяной пар и т.д), p - давление; U_R - плотность энергии излучения; σ - постоянная Стефана-Больцмана; k - коэффициент ослабления излучения; k_g, k_s - коэффициенты поглощения для газодисперсной и конденсированной фаз; α_v - коэффициент обмена фаз, 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 полого леса; c - скорость света; v_i - проекции 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; v_{3*} - характерная скорость вдува из очага лесного пожара; α_4, α_6 - эмпирические константы; g - ускорение свободного падения. Индексы "0" и "e" относятся к значениям функций в очаге горения и на большом расстоянии от зоны пожара

соответственно. Верхний индекс " ' " относится к пульсационной составляющей данной величины.

В области высотой h , расположенной выше подстилающей поверхности и ниже верхней границы полога леса, имеем осредненную по высоте полога леса систему уравнений, выражающую законы сохранения для многофазной многокомпонентной реагирующей сплошной среды, которая получена из системы уравнений (1)-(7) интегрированием по высоте полога леса.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_1}(\rho V_1) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho V_2) = m - \frac{c^- - c^+}{h}, \quad j = 1, 2, i = 1, 2, 3; \quad (8)$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_1}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_1}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_1}{\partial x_2} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial x_1}(-\rho V_1' V_1') + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho V_1' V_2') - m v_1 + \frac{\tau_1^- - \tau_1^+}{h};$$

$$\rho \left(\frac{\partial V_2}{\partial t} + V_1 \frac{\partial V_2}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial V_2}{\partial x_2} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial x_1}(-\rho V_1' V_2') + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho V_2' V_2') - m v_2 + \frac{\tau_2^- - \tau_2^+}{h}; \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V_1 \frac{\partial T}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial T}{\partial x_2} \right) &= \frac{\partial}{\partial x_1}(-\rho c_p \overline{V_1' T'}) + \frac{\partial}{\partial x_2}(\rho c_p \overline{V_2' T'}) + q_5 R_5 - \\ &- \alpha_v (T - T_s) + (q_T^- - q_T^+) / h + k_g (c U_R - 4 \sigma T^4) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\rho \left(\frac{\partial c_\alpha}{\partial t} + V_1 \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} + V_2 \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} \right) = \frac{\partial}{\partial x_1}(-\rho \overline{V_1' C_2'}) + \frac{\partial}{\partial x_2}(-\rho \overline{V_2' C_2'}) + R_{5\alpha} - \dot{m} c_\alpha; \quad \alpha = 1, 2 \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_2} \right) -$$

$$- k c U_R + 4 k_s \sigma T_s^4 + 4 k_g \sigma T^4 + (q_R^- - q_R^+) / h = 0, k = k_g + k_s; \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^4 \rho_i c_{pi} \varphi_i \frac{\partial T_s}{\partial t} = q_3 R_3 - q_2 R_2 + k_s (c U_R - 4 \sigma T_s^4) + \alpha_v (T - T_s); \quad (13)$$

$$\rho_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial t} = -R_1, \rho_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial t} = -R_2, \rho_3 \frac{\partial \varphi_3}{\partial t} = \alpha_c R_1 - \frac{M_c}{M_1} R_3, \rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = 0; \quad (14)$$

$$\sum_{\alpha=1}^3 c_\alpha = 1, P_e = \rho_s R T \sum_{\alpha=1}^3 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}, \vec{v} = (v_1, v_2), \vec{g} = (0, g).$$

Соотношения для скоростей реакций пиролиза, испарения влаги, горения кокса, и летучих продуктов пиролиза определяются следующим образом:

$$\begin{aligned}
R_1 &= k_1 \rho_1 \varphi_1 \exp\left(-\frac{E_1}{RT_s}\right), R_2 = k_2 \rho_2 \varphi_2 T_s^{-0.5} \exp\left(-\frac{E_2}{RT_s}\right), \\
R_3 &= k_3 \rho_3 s_\sigma c_1 \exp\left(-\frac{E_3}{RT_s}\right), R_5 = k_5 M_2 \left(\frac{c_1 M}{M_1}\right)^{0.25} \frac{c_2 M}{M_2} T^{-2.25} \exp\left(-\frac{E_5}{RT}\right).
\end{aligned} \tag{15}$$

где x_i – координаты (рис.3); v_i - проекции скорости на оси x_i . Система уравнений (8) - (14) описывает процессы переноса в области лесного массива. В численных расчетах используются данные, которые соответствуют ЛГМ соснового леса.

При решении задач о возникновении лесных пожаров необходимо задать начальные и граничные условия. Считаем, что в начальный момент времени параметры состояния среды совпадают с невозмущенными значениями:

$$t = 0 : v_1 = 0, v_2 = 0, T = T_e, c_\alpha = c_{\alpha e}, T_s = T_e, \varphi_i = \varphi_{ie}; \tag{16}$$

Начальные значения для объемных долей фаз задавались по формулам:

$$\varphi_{1e} = \frac{d(1-v_0)}{\rho_1}, \varphi_{2e} = \frac{dW}{\rho_2}, \varphi_{3e} = 0; \tag{17}$$

где W - влагосодержание ЛГМ, а d и v_0 - запас и зольность лесных горючих материалов.

Граничное условие для уравнения переноса энергии излучения на нижней границе области на напочвенном покрове имеет вид:

$$-\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_3} = \frac{\varepsilon}{2(2-\varepsilon)} (4\sigma T_s^4 - cU_R); \tag{18}$$

Очаг верхового лесного пожара в пологе леса задавался с помощью повышенной температуры.

$$T = T_s = \begin{cases} T_e + (T_0 - T_e) \exp(-((x_1 - x_{10})/\Delta_x)^2) t/t_0, & t \leq t_0 \\ T_e + (T_0 - T_e) \exp(-(((x_1 - x_{10}) - x_f)/\Delta_x)^2), & t > t_0 \end{cases}, \quad \Delta_y = \Delta, \tag{19}$$

где t_0 - время образования очага низового лесного пожара, Δ_x, Δ_y – ширина и длина его фронта, а расстояние до центра фронта определяется по формуле

$$r_f = (t - t_0)\omega \quad (\omega - \text{скорость распространения фронта пожара}).$$

Значение массовой скорости выдува из очага низового лесного пожара определялось из соотношения:

$$(\rho v_3) = h_0 \bar{m}; \quad (20)$$

где h - высота полога леса, $\bar{m}$ - скорость массовыделения газодисперсной смеси из очага пожара. Для массовых концентраций компонентов газовой фазы использовали следующие соотношения

$$-\rho D_t \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_3} + \rho v_3 c_\alpha = h_0 \bar{R}_{5\alpha}; \quad (21)$$

где $\bar{R}_{5\alpha}$ - осредненная по высоте полога леса массовая скорость образования α -компонент газодисперсной фазы.

Граничное условие для U_R на левой границе расчетной области запишется аналогично предыдущему соотношению. Таким образом граничные условия запишутся в виде:

$$x_1 = -x_{1e}: v_1 = V_e(x_3), v_2 = 0, v_3 = 0, \quad T = T_e, \quad c_\alpha = c_{\alpha e}, \quad -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + c U_R / 2 = 0; \quad (22)$$

На правой границе расчетной области $x_1 = x_{1e}$ граничное условие для уравнения переноса излучения будет иметь вид:

$$\frac{c}{2} U_R + \frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} = 0; \quad (23)$$

Для остальных искомых функций на выходных границах запишем так называемые мягкие граничные условия. Относительно их постановки следует отметить, что использовались так называемые условия "сноса" (равенство нулю первой производной от искомой функции). Такой произвол в постановке граничных условий вызван отсутствием информации о поведении искомых функций на этой границе. Аналогичный подход был использован в работах для расчета течения над очагом массового пожара. Тогда граничные условия на правой границе расчетной области можно записать в виде:

$$x_1 = x_{1e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_1} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial x_1} = 0, \quad \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_1} = 0, \quad -\frac{c}{3k} \frac{\partial U_R}{\partial x_1} + c U_R / 2 = 0; \quad (24)$$

Подобным образом выводятся граничные условия на входе в рассматриваемую область и выходе по направлению оси Ox_2 , перпендикулярном распространению горения. Граничные условия для U_R можно записать соответственно:

$$-\frac{c}{2}U_R + \frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial x_2} = 0; \quad (25)$$

$$\frac{c}{2}U_R + \frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial x_2} = 0; \quad (26)$$

Таким образом, на входе и выходе в рассматриваемую область по данному направлению граничные условия можно записать соответственно:

$$x_2 = 0: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, -\frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial x_2} + cU_R/2 = 0; \quad (27)$$

$$x_2 = x_{2e}: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_2}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{c}{3k}\frac{\partial U_R}{\partial x_2} + cU_R/2 = 0; \quad (28)$$

В случае, если на левой границе задано поле скорости ветра параллельно поверхности земли и очаг низового пожара поместить в начале системы координат, то процесс будет протекать симметрично относительно координатной оси Ox_1 и можно рассматривать расчетную область как полупространство. Тогда для проведения более экономичных расчетов граничные условия необходимо заменить на условия симметрии:

$$x_2 = 0: \frac{\partial v_1}{\partial x_2} = 0, v_2 = 0, \frac{\partial v_3}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial T}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial c_\alpha}{\partial x_2} = 0, \frac{\partial U_R}{\partial x_2} = 0; \quad (29)$$

Это допущение может быть легко изменено.

В данных уравнениях содержатся члены, связанные с турбулентной конвекцией, диффузией и теплопроводностью и нуждаются в замыкании. Компоненты тензора турбулентных напряжений $\overline{\rho v'_i v'_j}$, а также турбулентные потоки тепла и массы $\overline{\rho v'_j c_p T'}$, $\overline{\rho v'_j c'_\alpha}$ записываются с помощью следующих выражений:

$$-\overline{\rho v_i' v_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} K \delta_{ij}; \quad (30)$$

$$\lambda_t = \mu_t c_p / Pr_t, \quad \rho D_t = \mu_t / Sc_t, \quad \mu_t = c_\mu \rho K^2 / \varepsilon; \quad (31)$$

$$-\overline{\rho v_j c_p T'} = \lambda_t \frac{\partial T}{\partial x_j}, \quad -\overline{\rho v_j c_a'} = \rho D_t \frac{\partial c_a}{\partial x_j}, \quad i, j = 1, 2, 3; \quad (32)$$

где K - кинетическая энергия турбулентности, v_i и v_i' - компоненты средней скорости и пульсационной составляющих 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.

Согласно $\mu_t = c_\mu \rho K^2 / \varepsilon$, где ε - скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, c_μ - константа. В данной постановке задачи будем использовать приближенный способ замыкания, основанный на гипотезе пути смешения Прандтля. Это фактически означает равновесное приближение (баланс генерации и диссипации) для уравнения кинетической энергии турбулентности. В окончательном виде будем иметь коэффициент турбулентной динамической вязкости:

$$\mu_t = \rho \left(\frac{c_\mu}{c_1} \right)^{3/2} l^2 \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_1}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_2}{\partial x_2} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_3}{\partial x_3} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_1}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_1} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_3}{\partial x_1} + \frac{\partial v_1}{\partial x_3} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_3}{\partial x_2} + \frac{\partial v_2}{\partial x_3} \right)^2 - \frac{g}{T Pr_t} \frac{\partial \theta}{\partial x_3} \right\}^{1/2} \quad (33)$$

Здесь считалось, что длина пути смешения внутри растительного массива определялась по формуле:

$$l = x_3 k_t / (1 + 2.5 x_3 \sqrt{c_d s / h}) \quad (34)$$

где $k_t = 0.4$ - постоянная Кармана, h - размер полога леса, C_μ , C_1 - константы.

Приведенная выше формула для μ_t соответствует локально равновесной модели турбулентности.

2.3. Результаты расчетов и их анализ

На основе изложенной математической модели проводились численные расчеты по определению картины процесса возникновения верхового лесного пожара в результате зажигания полога леса от заданного очага горения. В результате численного интегрирования получены поля массовых концентраций компонент газовой фазы, температур, объемных долей компонентов твердой фазы.

Были проведены численные расчеты для различных скоростей ветра от 3 м/с до 7 м/с с шагом 1 м/с, исследована зависимость скорости распространения верхового лесного пожара от запаса лесных горючих материалов (рис.4). При этом влагосодержание ЛГМ остаётся неизменной $WL = 0.6$.

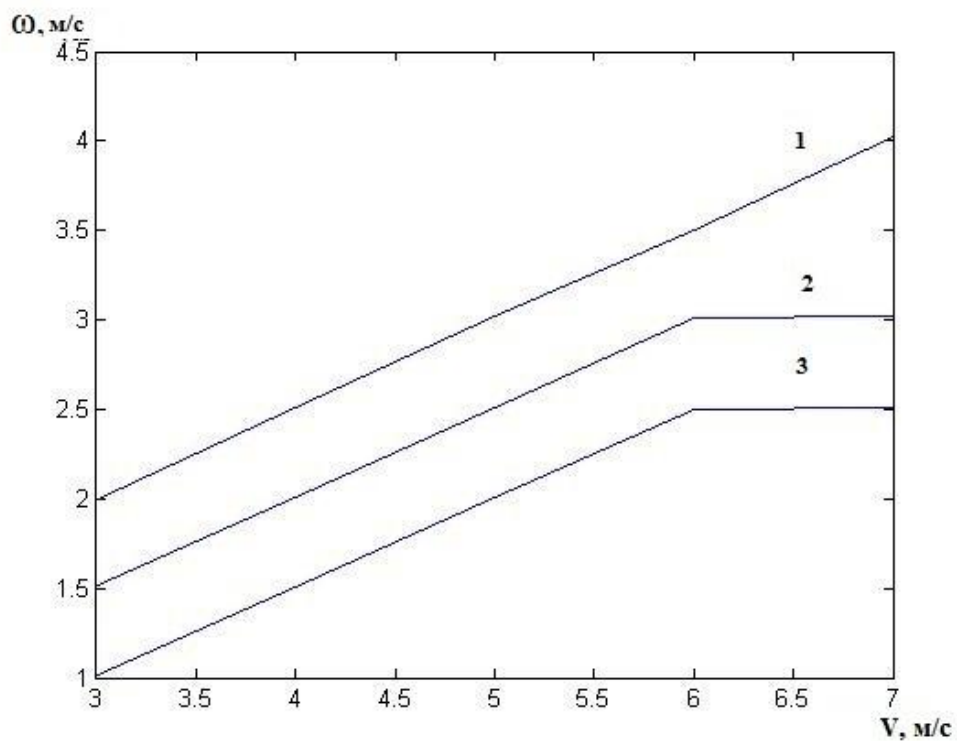


Рисунок 4 - Зависимость скорости распространения верхового лесного пожара от скорости ветра и запаса ЛГМ: 1 – 0.2, 2 – 0.4, 3 – 0.6 кг/м³.

На основе полученных результатов можно сделать вывод, что с увеличением запаса лесных горючих материалов скорость распространения

лесного пожара уменьшается, а с увеличением скорости ветра - увеличивается. Следует отметить, что при скорости ветра 3 м/с и запасе ЛГМ 0.2 кг/м^3 горение не прекратится, но будет очень слабым, а при запасе 0.4 кг/м^3 и более скорость распространения пожара увеличивается. Лесной пожар продолжает распространяться по кронам деревьев.

Далее повторяем эксперимент, но теперь постоянным значением является запас ЛГМ, $Z = 0.2 \text{ кг/м}^3$, скорости ветра от 3 м/с до 7 м/с с шагом 1 м/с (рис.5).

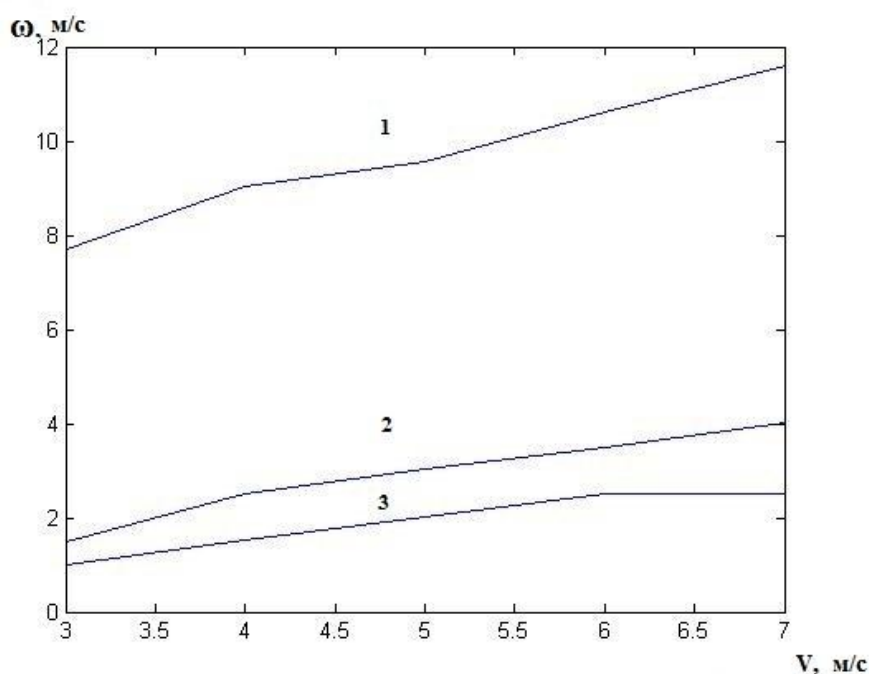


Рисунок 5 - Зависимость скорости распространения верхового лесного пожара от скорости ветра и влагосодержания ЛГМ: 1 – 0.2, 2 – 0.6, 3 – 0.7.

В данном случае с помощью полученных результатов можно сказать, что при увеличении влагосодержания ЛГМ уменьшается скорость распространения пожара, а с увеличением скорости ветра - увеличивается. Следует отметить, что при скорости ветра 3 м/с и влагосодержания ЛГМ 0.2 кг/м^3 горение протекает очень бурно, и при увеличении скорости ветра скорость распространения увеличивается. При уменьшении влагосодержания ЛГМ и неизменности запаса ЛГМ скорость распространения пожара увеличивается, так, например, при

влажностисодержания ЛГМ 0.7 огонь распространяться не будет, а при 0.2 огонь развивается быстро.

Далее более детально рассмотрим влияние скорости ветра, влагосодержания ЛГМ и запаса ЛГМ на скорость распространения огня. На рис.6 можно увидеть три фрагмента одного расчета, где представлен фронт горения, который распространяется по лесному массиву. На первом фрагменте представлены распределения изотерм газовой фазы и массовых концентраций компонентов газовой фазы различные в моменты времени (1 - $t=3$ с., 2 - $t=10$ с., 3 - $t=18$ с., 4 - $t=24$ с). Из рисунка видно, что за время распространения (24 секунды) фронт пожара расширился в направлении оси x_2 (в направлении перпендикулярном направлению ветра) практически в два раза. Были проведены численные расчеты для различных скоростей ветра от 3 м/с до 7 м/с с шагом 1 м/с, исследована зависимость скорости распространения верхового лесного пожара от запаса лесных горючих материалов. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что с увеличением запаса лесных горючих материалов скорость распространения лесного пожара уменьшается, а с увеличением скорости ветра - увеличивается. Так, при скорости ветра 3 м/с с увеличением запаса ЛГМ от 0.2 до 0.6 кг/м³ скорость распространения верхового лесного пожара уменьшается от 3 до 2 м/с. При скорости ветра 7 м/с увеличения запаса ЛГМ от 0.2 до 0.6 кг/м³ приводит к уменьшению скорости распространения фронта горения от 4 до 2.5 м/с.

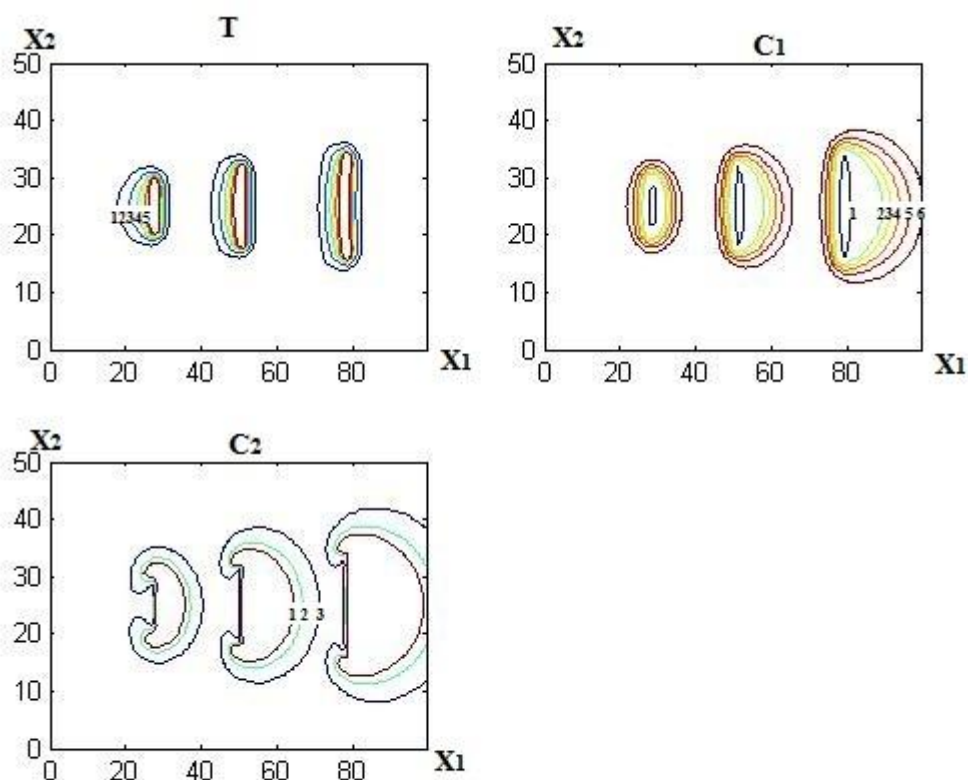


Рисунок 6 - Изотермы газовой фазы $\bar{T}$ ($\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$): 1- 2., 2 – 2.6, 3 – 3, 4 – 3.5, 5 – 4. Изолинии концентрации кислорода ($\bar{c}_1 = c_1/c_{1e}, c_{1e} = 0.23$): 1 – 0.1, 2 – 0.5, 3 – 0.6, 4 – 0.7, 5 – 0.8, 6 – 0.9. Изолинии концентрации продуктов пиролиз $\bar{c}_2$ ($\bar{c}_2 = c_2/c_{1e}, c_{1e} = 0.23$): 1- 0.1, 2 – 0.05, 3 – 0.01.

Теперь рассмотрим влияние противопожарного разрыва на скорость распространения лесного пожара. Изначально задаются неизменяющиеся параметры лесного массива, а именно запас ЛГМ, скорость распространения ветра и величина разрыва, 0.2кг/м^3 , 5м/с , 2.5 м соответственно. Изменяется только влагосодержания ЛГМ от 0.2 до 0.7 (рис.7,8). На рис.7,8 представлено распределение изолиний изотермы газовой фазы $\bar{T}$ ($\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$): 1- 2., 2 – 2.6, 3 – 3, 4 – 3.5, 5 – 4. Изолинии концентрации кислорода (

$\bar{c}_1 = c_1 / c_{1e}, c_{1e} = 0.23$): 1 – 0.1, 2 – 0.5, 3 – 0.6, 4 – 0.7, 5 – 0.8, 6 – 0.9. Изолинии концентрации продуктов пиролиз $\bar{c}_2$ ($\bar{c}_2 = c_2 / c_{1e}, c_{1e} = 0.23$): 1- 0.1, 2 – 0.05, 3 – 0.01. Изолинии объёмных долей фаз.

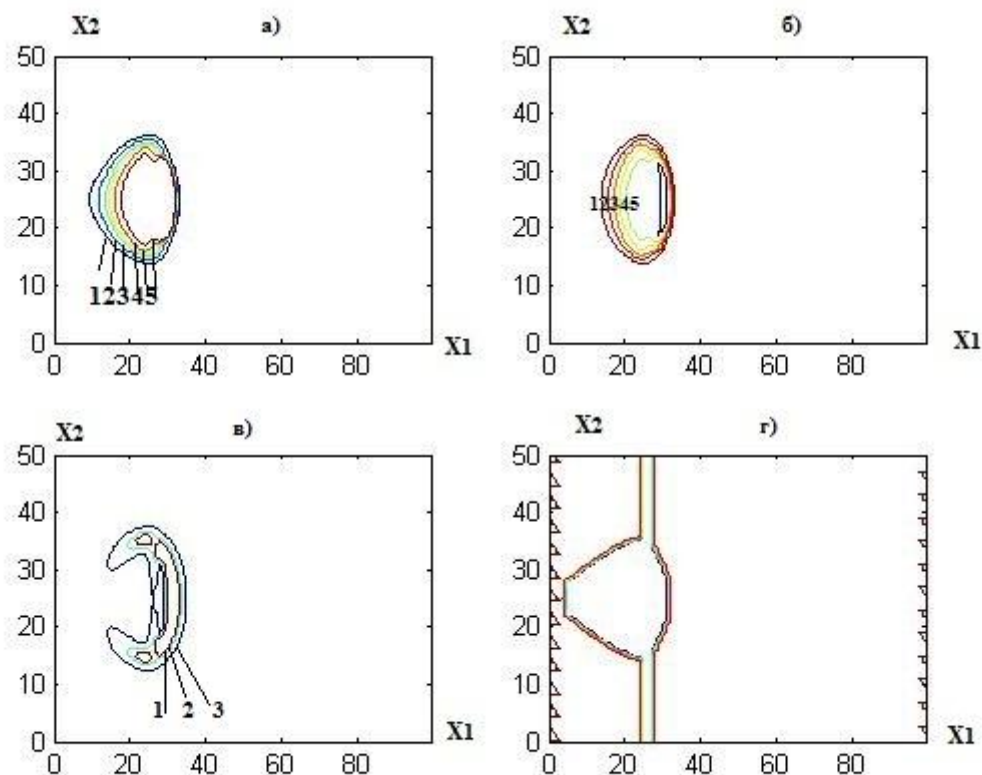


Рисунок 7 - Влияние противопожарного разрыва на скорость распространения лесного пожара при заданном влагосодержании 0.2.

Анализируя получившиеся результаты можно прийти к выводу, что огонь распространяясь до противопожарного барьера, с лёгкостью его перейдёт и начнет распространяться дальше.

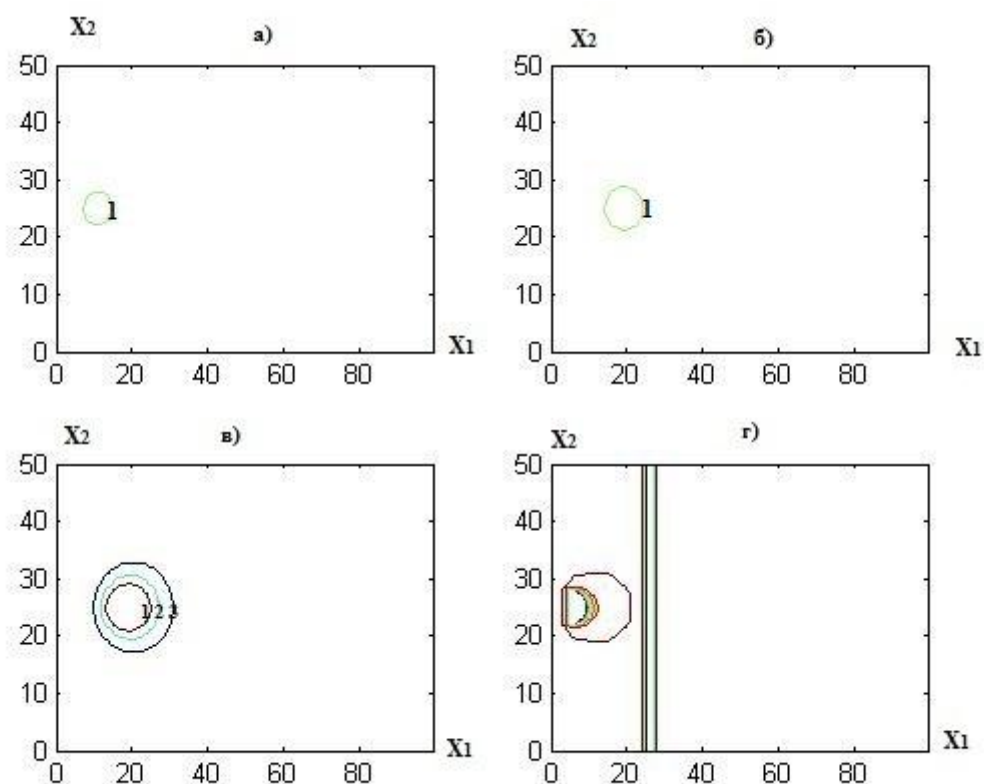


Рисунок 8 - Влияние противопожарного разрыва на скорость распространения лесного пожара при влагосодержании 0.7.

В данном случае при влагосодержании 0.7 распространения пожара прекратится, не дойдя до противопожарного разрыва, а при влагосодержании 0.6 противопожарный разрыв обеспечит непроходимость огня дальше (рис.9). На рис.9 представлено распределение изолиний концентрации продуктов пиролиз $\bar{c}_2$ ($\bar{c}_2 = c_2 / c_{1e}, c_{1e} = 0.23$): 1- 0.1, 2 – 0.05, 3 – 0.01. Изолинии объёмных долей фаз.

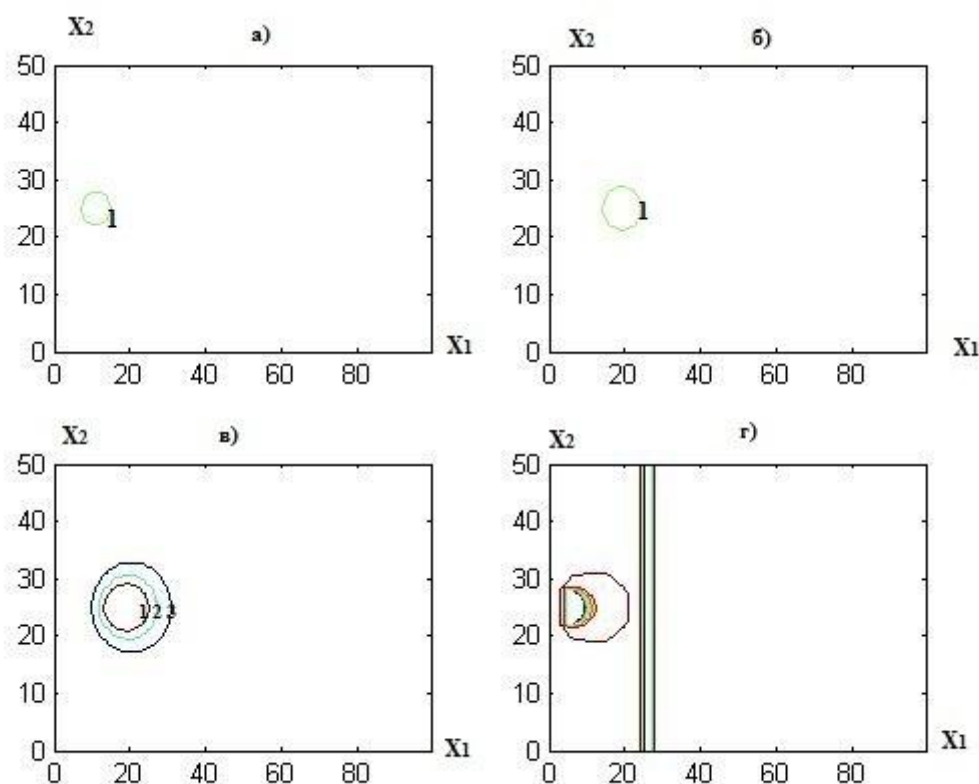


Рисунок 9 - Влияние противопожарного разрыва на скорость распространения лесного пожара при заданном влагосодержании 0.6.

Регулярно осуществляются необходимые профилактирующие мероприятия, которые предупреждают, снижают пожарную опасность, своевременно обнаруживают и ликвидируют лесные пожары. Такими мероприятиями могут являться специальные противопожарные разрывы шириной до 25 м, убираются все горючие материалы, организовывается минерализованные полосы или дороги, которые препятствуют распространению пожара и создают условия тушения[15]. Размер противопожарного разрыва зависит от параметров лесного массива, а именно влагосодержании и запасе ЛГМ, а так же скорости ветра.

Так же экспериментально получено минимальное расстояние разрыва, при котором фронт пожара останавливается и уже не распространяется на дальнейшие участки. На рисунках 2,3 представлено распределение изолиний изотермы газовой фазы $\bar{T}$ ($\bar{T} = T/T_e, T_e = 300K$): 1- 2., 2 – 2.6, 3 – 3, 4 – 3.5, 5 –

4. Изолинии концентрации кислорода ($\bar{c}_1 = c_1 / c_{1e}, c_{1e} = 0.23$): 1 – 0.1, 2 – 0.5, 3 – 0.6, 4 – 0.7, 5 – 0.8, 6 – 0.9. Изолинии концентрации продуктов пиролиз $\bar{c}_2$ ($\bar{c}_2 = c_2 / c_{1e}, c_{1e} = 0.23$): 1- 0.1, 2 – 0.05, 3 – 0.01. Изолинии объёмных долей фаз.

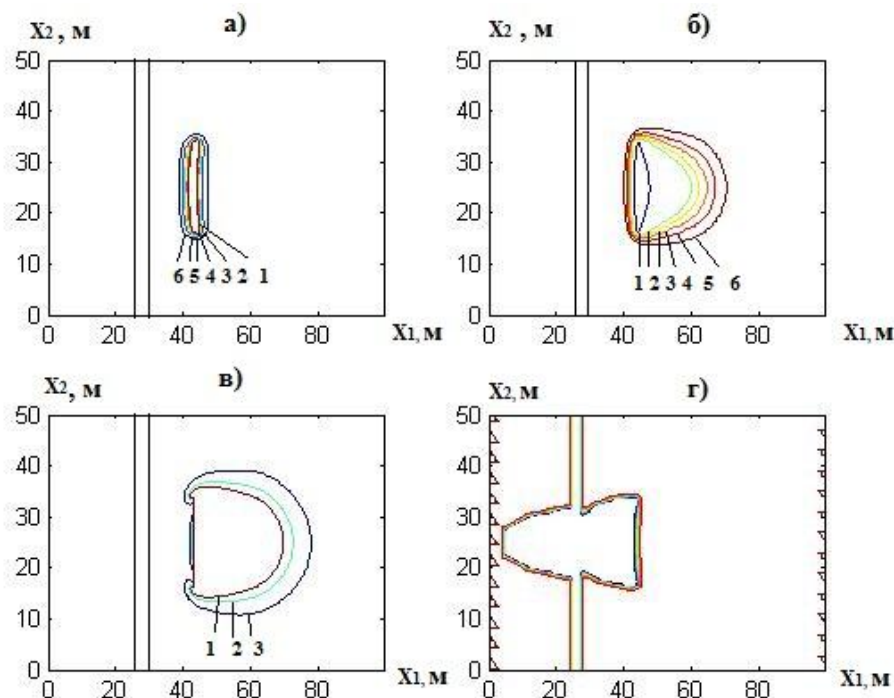


Рисунок 10 - Распределения изолиний $\bar{T}$, $\bar{c}_1$, $\bar{c}_2$ и объёмных долей фаз при наличии разрыва в 2.5м.

При заданной влажности, запасе ЛГМ и скорости ветра пожар с лёгкостью пройдёт заданный разрыв в 2.5м. Далее рассмотрим график в котором разрыв увеличен всего на 1 метр, и пожар уже не распространяется дальше.

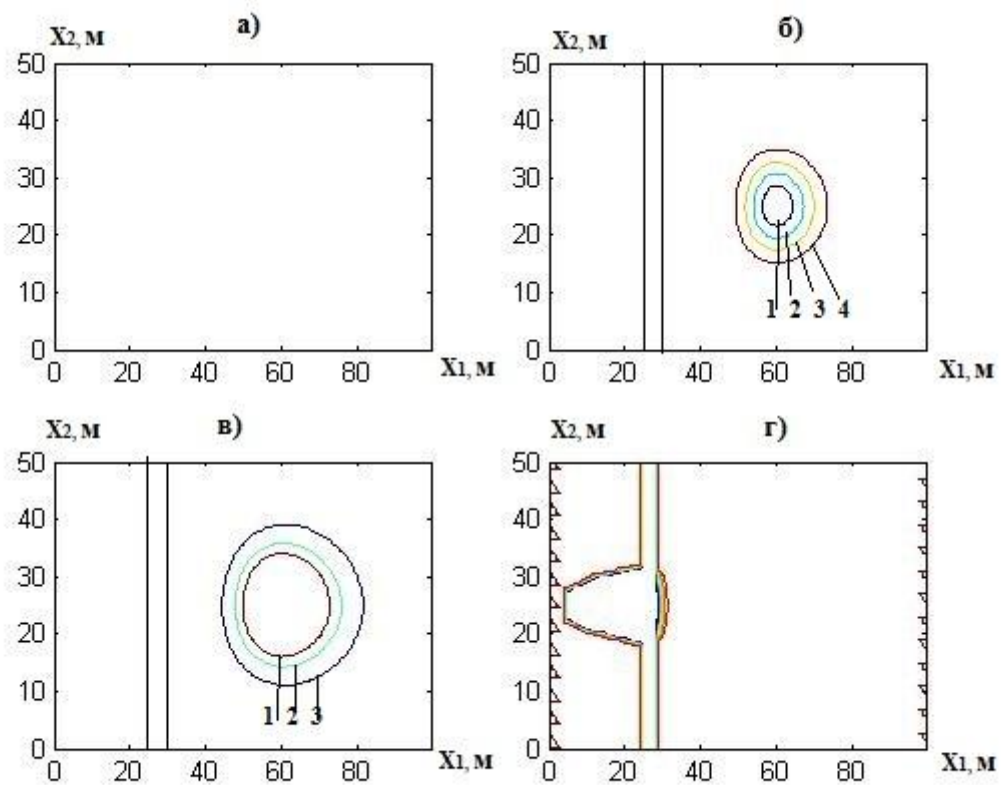


Рисунок 11 - Распределения изолиний $\bar{T}$, $\bar{c}_1$, $\bar{c}_2$ и объёмных долей фаз при наличии разрыва в 3.5м.

На рис. 10,11 представлены перечисленные выше характеристики, равномерно распределенные по всей области, где есть разрывы, на рис. 10 разрыв составляет 2.5м, на рис. 11 разрыв составляет 3.5 м. Изотермы газовой фазы и изолинии концентраций кислорода и продуктов пиролиза равномерно распределены по всей области. Фронт движется по направлению ветра (ось x_1) и расширяется в перпендикулярном направлении ветру по оси x_2 .

Далее опытным путём была выведена зависимость расстояния противопожарного разрыва от скорости ветра.

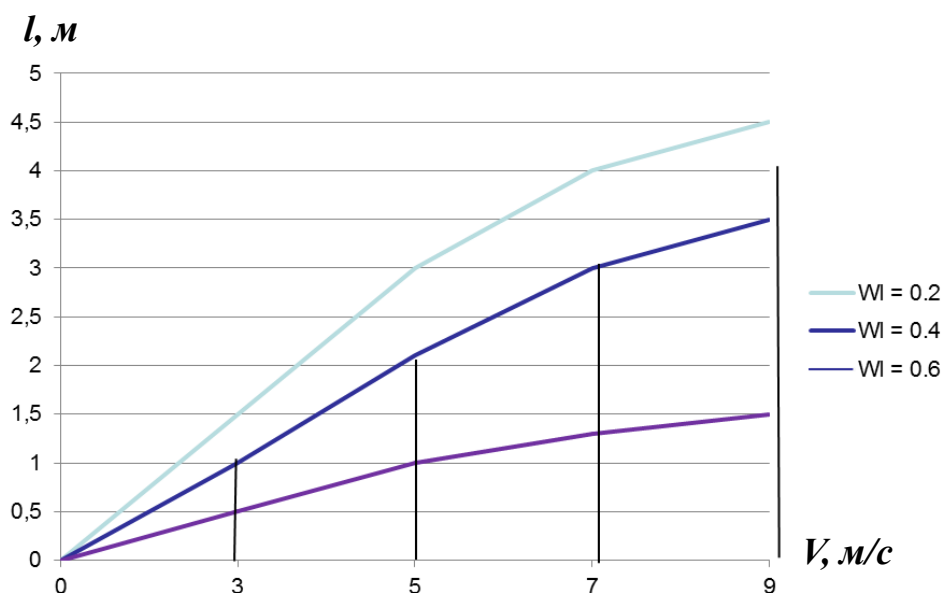


Рисунок 12 – Зависимость расстояния противопожарного разрыва от скорости ветра.

Расчеты показали, что при высоком влагосодержании ЛГМ расстояние противопожарного разрыва следует сделать меньше, чем при влагосодержании ЛГМ большего значения.

Математическая модель лесного пожара помогает проводить численный расчет по общей картине перемещения фронта верхового пожара, задавался разрыв в виде минерализованной полосы конечного размера. Произведен численный расчет для определения ширины противопожарного разрыва, в одном случае пожар проходил через него, в другом нет. При численном интегрировании получены поля массовых концентраций компонент газовой фазы, температур, объемных долей компонентов конденсированной фазы. Анализируя полученные данные нужно отметить, что формируется фронт горения, который распространяется по лесному массиву. При определённых значениях параметров он обходит такой разрыв и распространяется далее. В то же время существуют критические значения, при которых фронт горения затухает при подходе к данной преграде.

Далее была проанализирована полученная зависимость скорости ветра от скорости распространения, с учетом влагосодержания ЛГМ. Расчеты

показали, что чем выше влагосодержание ЛГМ, тем ниже скорость распространения пожара, а чем меньше влагосодержание ЛГМ, тем скорость распространения фронта пожара больше.

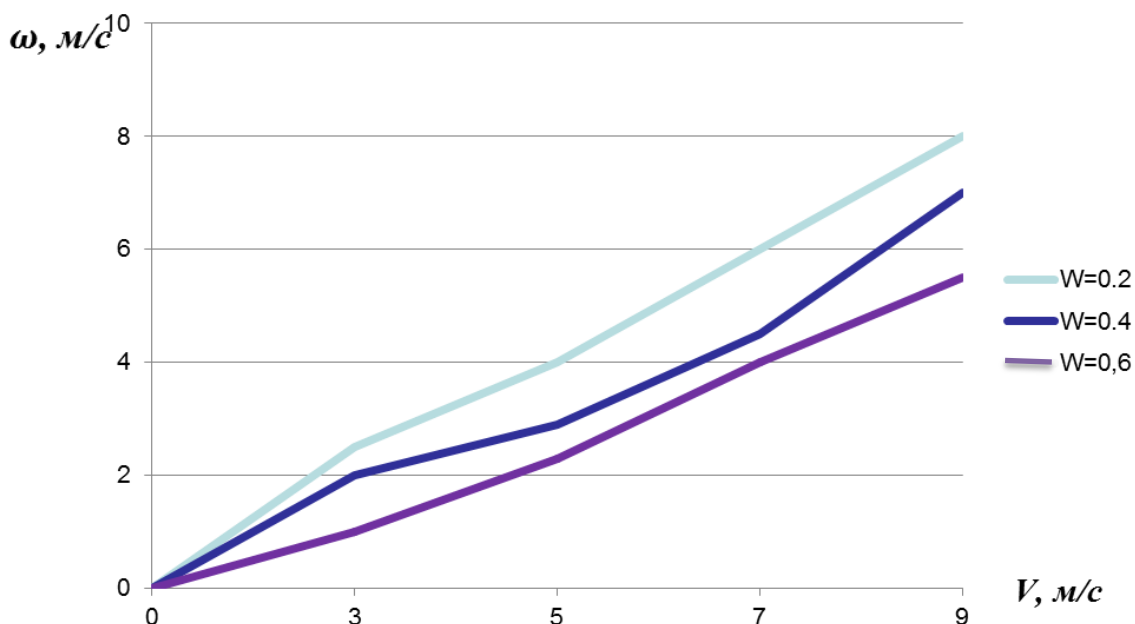


Рисунок 13 - Зависимость скорости распространения пожара от скорости ветра.

Следовательно, на местности где осадков больше, та территория больше проявляет устойчивость к катастрофическим последствиям пожара.

С помощью математической модели лесных пожаров проводились численные расчеты по определению картины процесса перемещения фронта верхового лесного пожара, при наличии противопожарных разрывов конечных размеров (поляна). Были проведены численные расчеты для определения значений длины разрыва, при котором пожар переходит его либо не преодолевает данный разрыв. В результате численного интегрирования получены поля температуры и массовых концентраций компонент газовой фазы и температуры, объемных долей компонентов конденсированной фазы. Из анализа полученных данных следует, что формируется фронт горения, который распространяется по лесному массиву. При определённых значениях параметров он обходит такую поляну с двух

сторон и распространяется далее. В то же время существуют критические значения, при которых фронт горения затухает при подходе к данной преграде.

На рисунках 14, 15 показаны результаты расчетов при распространении фронта пожара вокруг поляны со скоростью ветра 7 м/с. Скорость ветра совпадает с направлением оси X_1 . Изначально источник пожара имеет форму прямоугольника. На рисунках 14 и 15 представлено распределение концентраций кислорода и горючих летучих продуктов пиролиза в этом случае. Ширина данной поляны равно 5-ти метрам, а длина 9-ти метрам. В этом случае пожар распространяется дальше. В этих случаях влагосодержание ЛГМ 0.6, а запас ЛГМ 0.2 кг/м³.

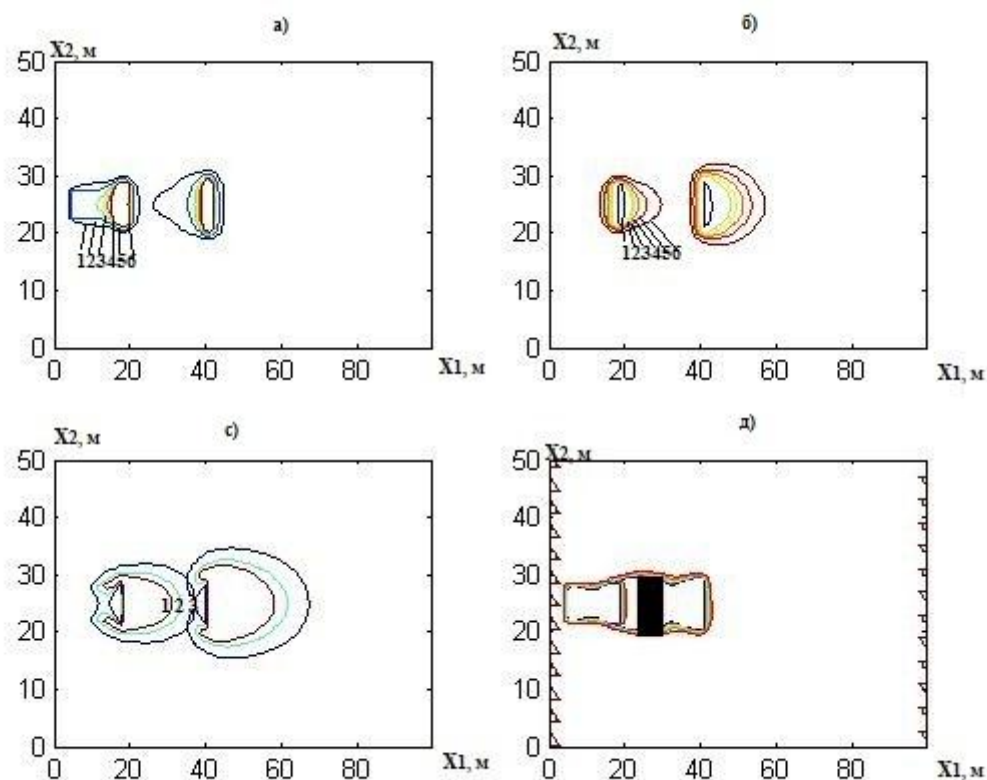


Рисунок 14 – Распределение изотерм газовой фазы (а), изолиний кислорода (б) и летучих продуктов пиролиза (в), объемных долей компонентов конденсированной фазы(д) при небольших параметров поляны.

Далее мы несколько увеличиваем ширину поляны до 9-ти метров.

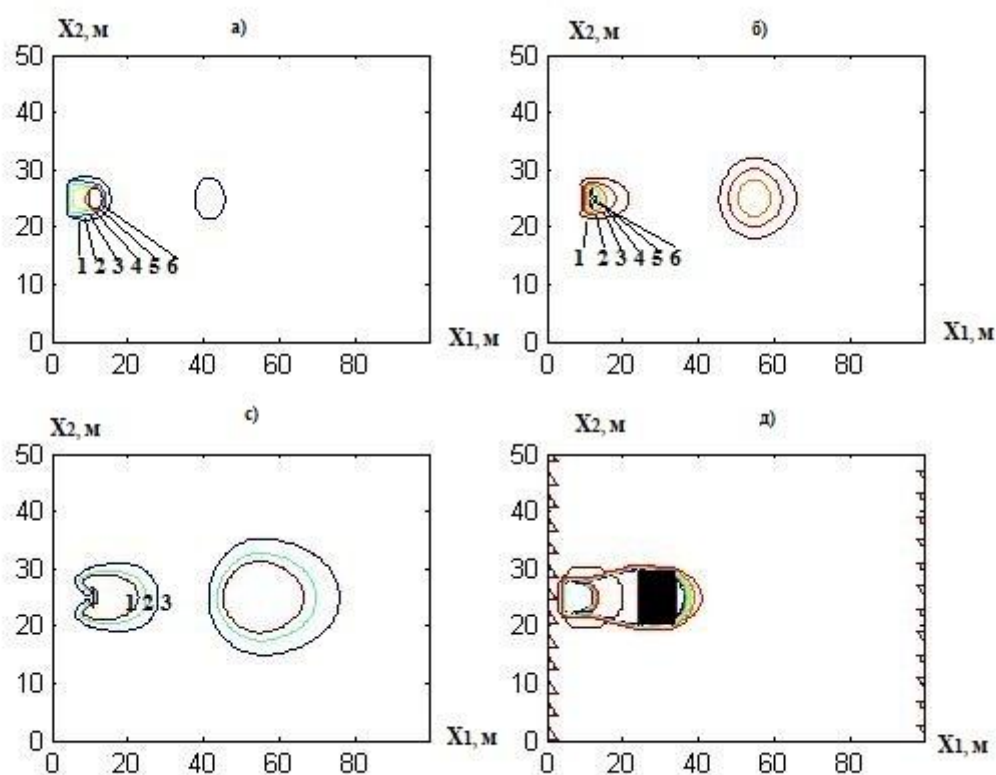


Рисунок 15 – Распределение изотерм газовой фазы (а), изолиний кислорода (б) и летучих продуктов пиролиза (в), объемных долей компонентов конденсированной фазы(д) при увеличенных параметрах поляны.

На рис.15 представлена поляна с увеличенной шириной, тем самым можно сделать вывод о том, что незначительное увеличение ширины поляны препятствует дальнейшему распространению пожара.

Таким образом, проведенные численные расчеты распространения верховых лесных пожаров при наличии противопожарных разрывов бесконечной длины (в направлении оси X_2) и конечных размеров (поляна). Получены условия распространения процесса горения для различных типов разрывов.

Заключение

В ходе данной работы проведено математическое моделирование возникновения и развития верховых лесных пожаров. На основе общей математической модели лесных пожаров и физической, математической постановки задачи о распространении верховых лесных пожаров была получена математическая постановка задачи для полога леса и приземного слоя атмосферы. Разработано программное обеспечение, с помощью которого проводились численные расчёты. Получены данные о предельном распространении пожара, найдены минимальные размеры противопожарных разрывов (ширина и длина), при которых фронт горения не распространяется. Проведена оценка эффективности размеров противопожарных разрывов для различных скоростей ветра. Проведен большой обзор существующих теоретических и экспериментальных методов изучения верховых лесных пожаров.

Графическое представление результатов моделирования распространения лесного пожара позволяет оценить изменение пространственных характеристик пожара при варьировании основными характеристиками лесного массива. С помощью небольшого числа доступных входных данных можно описать процесс распространения пожара в виде модели распространения лесного пожара.

Текущее развитие информационных технологий, а также повышение качества и доступности интернета, позволяют автоматизировать многие процессы, в том числе обнаружения и прогнозирования лесных пожаров, а также поддержки принятия решения по борьбе с ними. Подобные возможности применимо к нынешнему развитию технических средств, позволяющих запускать функциональные приложения не только на слабых компьютерах и нетбуках, но даже и на современных мобильных телефонах

или смартфонах, способны облегчить вопросы борьбы с лесными пожарами в случае предоставления соответствующей программной части.

Управление лесными пожарами невозможно осуществить без их исследования. Комплексная оценка пожарной опасности должна не только учитывать условия, вызывающие возникновение пожара, но и прогнозировать параметры пожара, обуславливающие вероятный ущерб. Использование современных методов исследования лесных пожаров позволяет существенно повысить экономическую эффективность работы пожарных служб.

Таким образом, проведённое исследование может стать основой для разработки новых усовершенствованных способов борьбы с лесными пожарами, а также методик по профилактике данного явления.