

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Южно-Уральский государственный университет  
(национальный исследовательский университет)»  
Политехнический институт  
Факультет «Механико-технологический»  
Кафедра «Безопасность жизнедеятельности»

Рецензент, \_\_\_\_\_

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ

Заведующий кафедрой БЖД

\_\_\_\_\_/А.И. Сидоров/

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Особенности развития и тушения лесных пожаров  
на удаленных лесных площадях

ПОЯСНИТЕЛЬНАЯ ЗАПИСКА  
К МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ  
ЮУрГУ– 20.04.01.2017.211 ПЗ МД

Научный руководитель профессор

\_\_\_\_\_/Н.В. Негуторов /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Автор диссертации

студент группы П–267

\_\_\_\_\_/В.М. Галеев /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Нормоконтролер, доцент

\_\_\_\_\_/А.В. Кудряшов /

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 г.

Челябинск 2017

## РЕФЕРАТ

Галеев В.М. – Челябинск:  
ЮУрГУ, П–267, 2017. – 68 с.,  
30 ил., 2 табл., библиогр. список  
– 78 наим.

В результате изучения научной литературы и источников, отражающих практический опыт, накопленный при прогнозировании, предотвращении и тушении лесных пожаров, а также исследований, проведенных лично автором настоящей работы, сделаны следующие заключение и сформулированы выводы по работе.

Лесные пожары – стихийные явления по распространению огня по лесным площадям. Лесные пожары оказывают огромное влияние на экосистемы. С одной стороны, пожары нарушают естественное равновесие между компонентами биогеоценозов. С другой, оказывают большое влияние на процессы лесовозобновления.

Причины возникновения пожаров в лесу делятся на естественные и антропогенные. Основной причиной возникновения лесных пожаров является деятельность человека. Наиболее распространенными из естественных причин лесных пожаров на Земле обычно являются молнии.

Возможность возникновения лесных пожаров определяется степенью пожарной опасности – степенью готовности лесных горючих материалов к возгоранию и устойчивому горению. Для этого разработана «Шкала оценки лесных участков по степени опасности возникновения в них пожаров». Однако «Шкала» требует доработки и уточнения, которые особенно актуальны для удаленных лесных территорий. Настоящее исследование выполнено для уточнения пожарной опасности удаленных лесных территорий, и может быть полезным для совершенствования положений «Шкалы».

## SYNOPSIS

Galeev V.M. – Chelyabinsk:  
SUSU, P–267, 2017. – 68 p,  
30 il, 2 tabl, Bibliografy – 78.

A study of scientific literature and sources, reflecting the practical experience in forecasting, preventing and fighting forest fires, as well as studies conducted by the author of this work made the following conclusion and conclusions on the work.

Forest fires are a natural phenomenon of the spread of fire on forest land. Forest fires have a huge impact on ecosystems. On the one hand, fires disrupt the natural balance between the components of biogeocenoses. On the other, have a great influence on the processes of reforestation.

The causes of fires in the forest are divided into natural and anthropogenic. The main cause of forest fires is human activity. The most common natural causes of forest fires on Earth are usually zippered.

The possibility of occurrence of forest fires is determined by the degree of fire hazard – the degree of readiness of forest combustible materials to ignition and stable burning. To this end, developed «the rating Scale of forest plots according to the degree of risk of them fires». However, «Scale» requires revision and refinements that are particularly relevant to remote forest areas. The present study was performed to clarify the fire hazard in remote forest areas and can be useful for improving the provisions of the «Scale».

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР.....	9
1.1 Понятие и причины лесных пожаров.....	9
1.2 Классификация лесных пожаров.....	22
1.3 Влияние лесных пожаров.....	25
1.4 Борьба с лесными пожарами.....	28
2 ЛЕСНЫЕ ГОРЮЧИЕ МАТЕРИАЛЫ.....	31
2.1 Понятие лесных горючих материалов.....	31
2.2 Горение лесных горючих материалов.....	33
3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	37
4 ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ЛЕСНЫХ ГОРЮЧИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ.....	44
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	58
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	60

## ВВЕДЕНИЕ

### **Актуальность темы**

Российская Федерация имеет огромные запасы лесных ресурсов, поэтому проблеме лесных пожаров уделяется большое внимание. Их возникновению и развитию посвящено огромное количество материалов. По данным Федерального агентства лесного хозяйства, лесные пожары являются основной причиной повреждения и гибели лесов на значительных площадях. Ежегодно в России происходит более 18 тысяч лесных пожаров. Согласно сведениям пожарного мониторинга, за 2016 год в РФ количество возникших пожаров было 11025, а пройденная пожарами площадь 2658999 га.

Лесные пожары являются одним из факторов, вносящих изменения в окружающую среду. Влияние пожара на лесные экосистемы проявляется по-разному и зависит от его интенсивности, климатических особенностей региона, строения древостоя, структуры нижних ярусов растительности и других факторов.

Среди исследователей существуют различные мнения о причинах лесных пожаров. Две основные и самые противоречивые причины: возгорание лесов может быть результатом антропогенного влияния; изменение климатических условий приводит в ряде районов региона к локальным изменениям гидрометеорологического режима и последующим лесным пожарам.

Известно, что опасность пожара возрастает в засушливые годы, и чаще всего загораются хвойные леса, особенно подстилка. Лиственные леса менее «горючи». Опасность пожара неодинакова не только в разных типах леса, но и в разных климатических условиях. В районах с влажным климатом пожары случаются реже, чем в районах с засушливым. В связи с этим исследование лесных горючих материалов приобретает важнейшее значение, поскольку горючий материал оказывает непосредственное влияние на характеристики пожаров в лесу.

Сам процесс горения лесных горючих материалов представляет комплекс физико-химических явлений, основными из которых являются: теплообмен частиц с окружающей средой; выход и горение летучих веществ – продуктов термического распада сложных органических соединений; горение коксового остатка – взаимодействие углерода кокса с газовыми компонентами: кислородом, углекислотой и водяным паром, диффундирующими к поверхности частицы. При анализе процесса горения необходимо учитывать как характеристики материала, состояние поверхности, наличие пор и трещин, так и внешние условия.

Для построения моделей лесных пожаров и более глубокого понимания процессов, происходящих при лесных пожарах, необходима информация о теплофизических, термокинетических и гидродинамических характеристиках лесных горючих материалов, влиянии различных внешних факторов на пожароопасность лесов.

Зачастую лесные пожары происходят на удаленных территориях, из-за чего их тушение с земли оказывается затрудненным. Изучение пожароопасных свойств лесных горючих материалов позволит эффективнее прогнозировать возникновение пожаров на удаленных лесных площадях.

**Объектом исследования** являются лесные пожары.

**Предметом исследования** являются процессы изменений состояния лесных горючих материалов, происходящие при нагреве.

**Целью работы** является:

Исследовать поведение лесных горючих материалов при разных температурных режимах нагрева.

**Методы исследования.** В качестве основных методов исследования использовались методы экспериментального моделирования процессов нагрева лесных горючих материалов.

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

1) Разработать методики и собрать установки для экспериментального исследования поведения лесных горючих материалов при нагревании.

2) Провести экспериментальные исследования лесных горючих материалов по изучению влияния вида и влажности лесных горючих материалов на процессы, происходящие при горении, а также на процессы, происходящие в начале горения при нагревании до температур ниже температур воспламенения.

3) Выяснить особенности механизма испарения свободной и связанной влаги в лесных горючих материалах при различных температурах.

4) Установить особенности развития процессов горения в лесных горючих материалах при различных температурах.

**Научная новизна работы** заключается в следующем:

1) Показаны отличия в кинетике сушки свободной и связанной влаги в случае разных температур.

2) Получены данные по влиянию вида, состава, влагосодержания, на процессы происходящие при горении и при низкотемпературном нагреве лесных горючих материалов.

3) Разработаны и изготовлены устройства для изучения влияния вида лесных горючих материалов и уровня влажности на различные температурные режимы при горении, а также изменения массы лесных горючих материалов при разном температурном воздействии.

**На защиту выносятся следующие положения:**

1) Методики и установки для проведения экспериментальных работ по исследованию процессов горения лесных горючих материалов в лабораторных условиях.

2) Экспериментальные результаты параметров горения лесных горючих материалов, полученные с использованием разработанных установок.

3) Экспериментальные результаты исследования процессов изменения массы лесных горючих материалов.

**Достоверность** основных положений и выводов подтверждается:

- 1) Не противоречием результатов исследований, полученных при нагреве и горении лесных горючих материалов.
- 2) Сравнением экспериментальных данных с аналогичными данными, полученных ранее у других исследователей.
- 3) Применением современных методов планирования экспериментов и статистической обработки результатов.

**Практическая значимость полученных результатов.** Установившаяся практика определения начала пожароопасного состояния лесов по времени после крайнего дождя должна быть дополнена данными по способности конкретного лесных горючих материалов (ЛГМ) поглощать влагу при естественном увлажнении и отдавать ее при атмосферной сушке. Разработаны 2 методики и собраны 2 установки: для определения влияния вида ЛГМ и уровня влажности на различные температурные режимы при горении, а также для изучения изменения массы ЛГМ при разном температурном воздействии.

**Апробация работы.** Основные результаты исследований, представленных в диссертации, апробировались на XX аспирантско-магистерском семинаре, посвященного «Дню энергетика», КГЭУ г. Казань (декабрь 2016 г.), IV всероссийской студенческой конференции (с международным участием) «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи», ЮУрГУ г. Челябинск (апрель 2017 г.).

По теме диссертации опубликовано 4 работы, в том числе 1 статья в сборнике «Наука ЮУрГУ 2016», журнале, рекомендованном ВАК. Материалы докладов XX аспирантско-магистерского семинара, посвященного «Дню энергетика», КГЭУ г. Казань (декабрь 2016 г.). «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи» сборник материалов IV всероссийской студенческой конференции (с международным участием), ЮУрГУ г. Челябинск (апрель 2017 г.).

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и библиографического списка из 78 наименований на русском и иностранных языках. Работа содержит 70 страниц текста, 30 рисунков и 2 таблицы.



# 1 ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР

## 1.1 Понятие и причины лесных пожаров

Пожалуй, одним из распространеннейших процессов на Земле является процесс горения. Люди с глубокой древности наблюдали за процессами горения и постепенно научились использовать эти процессы в своих целях. Это позволило довольно быстро развиваться, использовать огонь и тепло пламени для собственного развития.

Однако, используя горение как мощный источник развития, человек столкнулся с проблемами, связанными с ним. Речь идет о пожарах.

Согласно [67], пожар – неконтролируемое горение, причиняющее материальный ущерб, вред жизни и здоровью граждан, интересам общества и государства.

Разновидностью пожаров являются лесные пожары (ЛП).

Лесной пожар является многостадийным физико-химическим явлением. Во фронте пожара могут быть выделены зоны предварительного нагрева, испарения влаги, пиролиза органического вещества, плазменного горения лесных горючих материалов и догорание коксового остатка [19].

Лесной пожар – пожар, распространяющийся по лесной площади [18].



Рисунок 1 – Лесной пожар

Российская Федерация имеет огромные запасы лесных ресурсов, поэтому проблеме ЛП уделяется большое внимание. Их возникновению и развитию посвящено огромное количество материалов. По данным Федерального агентства лесного хозяйства, лесные пожары являются основной причиной повреждения и гибели лесов на значительных площадях. Ежегодно в России происходит более 18 тыс. лесных пожаров. Согласно сведениям пожарного мониторинга за 2016 год в РФ количество возникших пожаров было 11025, а пройденная пожарами площадь 2658999 га. В пожароопасный сезон возникают сотни очагов лесных пожаров. Поэтому борьба с ними для нашей страны как нельзя актуальна.

Отметим, что роль естественных лесов огромна. Их средообразующая и защитная роль тщательно изучена в работе [11].

Вообще, пожар в лесу – процесс естественный, в некоторых случаях даже необходимый. С одной стороны, пожар может уничтожить старые

лесоматериалы, очистить место для биоты, способствовать более интенсивному росту, удобрять почву, но с другой – пожар может уничтожить значительные участки с лесными насаждениями, привести к гибели многих биогеоценозов, разрушить предметы материальной культуры. Таким образом, лесной пожар является одним из факторов, определяющим тип растительности и динамику растительных сообществ. В зависимости от вида и масштаба пожара вносится возмущение в аэродинамику и состояние окружающей среды.

Для эффективной борьбы с лесными пожарами, минимизации последствий от них, необходим высокий уровень понимания закономерностей возникновения, развития и ликвидации неуправляемых процессов горения леса.

Более подробная оценка влияния, которую оказывают ЛП, а также способов борьбы, будет рассмотрена в следующей главе.

Традиционно ЛП считают стихийное, неуправляемое распространение огня по лесным площадям.

Причины возникновения ЛП делятся на естественные и антропогенные.



Рисунок 2 – Причины лесных пожаров

Среди естественных причин наиболее распространенными являются молнии.

В молодняках вероятность загорания по причине молнии ниже, чем в лесах возрастных, в которых много сухих ЛГМ.

В связи с пожарной ситуацией в России и мире возникновению и развитию ЛП посвящено огромное количество литературных источников. Однако большинство из них отражает ЛП как результат антропогенной деятельности людей. Между тем около 10 – 15% ЛП в России происходит вследствие природных причин, в основном за счет грозовой активности. Поэтому тема возгораний лесов от попаданий молний широко также освещается в материалах, посвященных лесоведению и защите лесных насаждений.

В [11], например, показано, что широкое распространение молодняков и средневозрастных древостоев светлохвойной формации не является следствием рубок, а связано с их происхождением после пожара.

Лесные пожары являются одним из факторов, вносящих изменения в окружающую среду.

Влияние пожара на лесные экосистемы проявляется по-разному и зависит от его интенсивности, климатических особенностей региона, строения древостоя, структуры нижних ярусов растительности и других факторов. Пожар в лесу – один из факторов, определяющих тип растительности и динамику растительных сообществ [13].

Большая часть гроз сопровождаются обилием дождевых осадков. Но в природе нередки случаи, в которых грозные явления наблюдаются при отсутствии осадков. Возникновение ЛП летом, в отсутствие антропогенных факторов, чаще всего обусловлено действием «сухих» гроз (СГ).

Тема возгораний лесов от попаданий молний широко освещается в материалах, посвященных лесоведению, защите лесных насаждений.

Иногда пожары имеют искусственный характер. Такие пожары называются управляемыми. Их цель – уничтожение пожароопасных ЛГМ, удаление отходов,

подготовка расчищенных участков для посадки, борьба с насекомыми и болезнями и т.д., также поджог леса для последующей его вырубki.

Среди исследователей существуют различные мнения о причинах пожаров. Например, что возгорание лесов может быть результатом антропогенного влияния или что изменение климатических условий приводит в ряде районов региона к локальным изменениям гидрометеорологического режима.

Известно, что опасность пожара возрастает в засушливые годы, и чаще всего загораются хвойные леса, особенно подстилка. Лиственные леса менее «горючи». Опасность пожара неодинакова не только в разных типах леса, но и в разных климатических условиях. В районах с влажным климатом пожары случаются реже, чем в засушливых.



Рисунок 3 – Удар молнии в дерево

Источником природного возгорания в лесах может стать молния во время грозы, капля росы на листьях деревьев (последняя – в качестве фокусирующей линзы солнечных лучей).





Рисунок 4 – Капля росы как фокусирующая линза

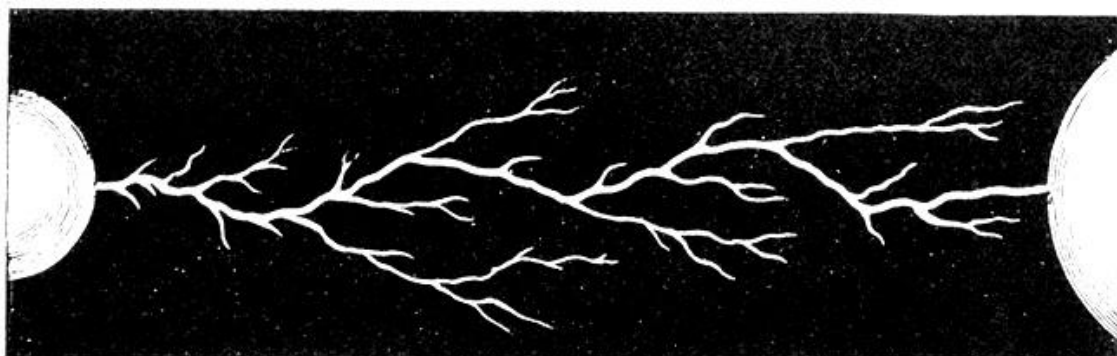


Рисунок 5 – Электрический пробой

А также электрический разряд в кронах хвойных деревьев или других растений. Это обусловлено тем, что усиление тектонических процессов в сейсмоактивных районах сопровождается выбросом в атмосферу различных газов, в частности радона. Поступление радона из литосферы в атмосферу может произойти и вследствие магнитострикционного сжатия-растяжения в высокочастотном поле геомагнитных возмущений. Газы радона усиливают ионизацию частиц воздуха в приземном слое атмосферы [72].

Незначительная искра в хвое, насыщенной легко воспламеняемыми парами эфирных масел, в засушливый период становится источником возгорания. Известно, что радон вносит основной вклад в образование атмосферного электричества.

Электрические явления в растениях связаны с обменом зарядами между жидкостью и стенками капиллярных сосудов при протекании питательных растворов по капиллярам растений. Обмен ионов между клетками и окружающей средой также способствует возникновению электрических явлений. Электрические поля (ЭП) в основном инициируются в клетках растений [46, 78].

При анализе ЛП следует также обратить внимание на электрические свойства воздушной среды в различных типах леса и насаждениях, которые пока что изучены слабо, а литературные сведения иногда противоречивы.

Воздух в приземной атмосфере содержит аэроионы, концентрация которых изменяется от нескольких сотен до нескольких десятков тысяч в кубическом сантиметре. Образуются аэроионы за счет ионизации молекул воздуха космическим и солнечным излучением, а также естественным радиационным излучением Земли. Эффективными ионизаторами являются, например, грозовые облака, трение частиц о твердую поверхность вследствие пылевых и снежных бурь, разнообразные химические реакции.

По данным А. А. Минха [47], ионизация воздуха в лесу значительно выше, чем на открытой местности. Особенно большое количество легких ионов обнаруживается на участках, где зеленые насаждения занимают 35 – 60% территории. Ионизация воздуха находится в тесной связи с естественным радиоактивным фоном, количеством и химическим составом летучих веществ, выделяемых растительностью, что, в свою очередь, определяется породным составом, полнотой и возрастом лесных насаждений.

По исследованиям В. Н. Власюк [16], высокий уровень естественной ионизации наблюдается в культурах сосны обыкновенной, лиственницы сибирской, а также в смешанных насаждениях с участием сосны до 30 – 50%.

В. Д. Пряхин и В. Т. Николаенко [56] сообщают, что в присутствии сосны обыкновенной, пихты, лиственницы сибирской, таких лиственных пород как береза, дубы черешчатый и красный, клены и рябина, содержание легких ионов в воздухе лесных сообществ заметно увеличивается.

Процесс протекания электрического тока через газ называют газовым разрядом. Все газовые разряды делятся на две группы: самостоятельные и несамостоятельные. В зависимости от давления, рода газа, процессов на электродах, плотности разрядного тока и т. д. выделяют различные типы разрядов: тихий, тлеющий, дуговой, искровой, коронный, кистевой. По способу подведения энергии различают электродный, безэлектродный и одноэлектродный разряды [57].

При исследовании возникновения возгорания лесов интерес представляют искровые, тихие (кистевые, коронные) разряды. Известно, что любой заряженный электричеством проводник в лесу имеет острие или ребро. В таком случае поле в месте заострения будет намного сильнее, чем в других местах.

Это обусловлено тем, что заряды стремятся настолько возможно шире растечься по поверхности проводника. Конец же острия находится дальше всего от остальной поверхности. Если будет относительно малое количество заряда, то оно сможет создать большую поверхностную плотность, которая означает сильное поле близ проводника в этом месте [68].

Чем меньше радиус кривизны проводника, тем сильнее поле.

Если же поле становится очень большим, то тогда возникает пробой в воздухе. Происходит это так: если поле очень сильное, то оно ускоряет свободный заряд в воздухе (электрон или ион) с такой скоростью, что заряд при столкновении с атомом вышибает из него новый электрон. В результате количество ионов растет. Искра или разряд составляет их движение.

В промежутке времени между установлением ЭП и возникновением разряда проходит заметное время. Это происходит, потому что необходима ионизация. Для чего требуется некоторое количество электронов, которые возникают в



результате ионизации воздуха космическим излучением, а также излучением радиоактивных элементов земной коры.

Т.к. ЭП неоднородно, процесс зажигания начинается в областях высокой напряженности поля, т.е. вблизи острий. Сначала возникают «пучки», затем – искры [54].

Искра является конечной стадией пучкового разряда. Пучки соединяются и перекрывают пространство между электродами, роль которых в лесу выполняет сухая хвоя. В этот момент ЭП разрушается, но при этом возникает кратковременный импульс тока большой силы. Чем интенсивнее ударная ионизация, тем чаще всего происходит ослепительное свечение. При этом сильный местный нагрев на пути тока вызывает громкий треск.

Аналогичным образом развиваются молнии.

Молекулы газов нейтральны, поэтому газы являются хорошими изоляторами электричества.

Обычно атмосферный воздух всегда ионизирован. Но концентрация ионов незначительна, и, чтобы воздух проводил электрический ток, необходимо на него воздействие интенсивных ионизаторов.

При ионизации газовых молекул под действием внешнего источника из молекулы обычно вырывается один электрон и положительный молекулярный ион с зарядом  $+e$ . Вырвавшийся электрон обычно присоединяется к какой-либо другой молекуле образуя отрицательный ион с зарядом  $-e$ . Оба типа ионов одновалентны ( $z=1$ ), имеют одинаковую концентрацию  $n$ , но несколько различные подвижности  $k_+$  и  $k_-$ . Под действием внешнего электрического поля эти ионы начинают двигаться, и возникает электрический ток [27].

Такой тип разряда получил название коронного. Корона возникает в естественных условиях под влиянием атмосферного электричества на верхушках деревьев [63].

Коронный разряд – это неполный пробой газового промежутка, возникающий в неоднородном электрическом поле. Он может проявиться под действием атмосферного электричества на верхушках мачт, шпилей, деревьев и

в других тонких и заостренных местах. В обиходе он получил название «огней Святого Эльма» [33]. Подобный разряд наблюдается при сравнительно высоких давлениях газов в сильно неоднородном поле.



Рисунок 6 – «огни Святого Эльма»

Тихий разряд — это несамостоятельный электрический разряд в газе, возникающий под действием непрерывного потока ионизирующих частиц или излучения извне при малом напряжении между электродами. При сильной ионизации в приземном слое атмосферы электрическое поле вблизи остроконечных предметов приближается к пробивному значению. Электроны и ионы в этой области двигаются с такой скоростью, что ионизируют встречающиеся молекулы воздуха (ионизация ударом). В этих случаях наблюдается явление истечения электричества с остриев — травинок, веток и т. п. Такие разряды, в отличие от молнии, сопровождаются легким треском или слабым шорохом и по форме имеют вид кисти или короны.

В работе [4] указывается, под грозовым облаком, имеющем грозовую ячейку, несущую электрический заряд порядка 4 – 5 Кл, находящемся на высоте 1 км над поверхностью Земли, создается электрическое поле порядка  $(3 - 5) \cdot 10^4$  В/м, а в аномальных условиях по заряду в грозовой ячейке, это значение может быть в несколько раз большим, характеризующимся даже свечением травы [58]. При развитии газовых разрядов в условиях таких электрических полей возможно воспламенение природных органических материалов, также электрические поля, достаточные для воспламенения, могут реализоваться в результате геотектонических процессов, в приземном слое, причем с соответствующими процессами ионизации и заряжения различных объектов, в т.ч. деревьев и их листвы. Разряды с заострений, различных выступов и тонких предметов, на которых реализуются высокие электрические поля, могут приводить к воспламенению поднимающихся вверх паров и струй органических компонентов.

Следует отметить, что развитие лесных пожаров во многом зависит от метеорологических факторов, в частности от продолжительных периодов засух и высокой увлажненности.

Электрические заряды в материалах могут возникать в случаях разрыва контакта между ними, при деформации материалов, при их трении друг о друга.

Возникновение зарядов может инициироваться за счет трения хвои сосны как между собой, так и между соседними деревьями. Следует отметить, что при образовании зарядов вследствие неровностей поверхностей контактирующих материалов на отдельных участках при перемещении этих материалов, имеет место последовательный многократный контакт и разрыв контакта, который сопровождается электризацией. Это явление получило название трибоэлектрический эффект.

Для оценивания заряжения при трении друг о друга материалы располагают в трибоэлектрический ряд. В нем материалы, стоящие ближе к минусу, будут приобретать отрицательный заряд по отношению к материалам, стоящим ближе к плюсу.

Способность жидкого или твердого тела накапливать опасные электростатические заряды зависит от их удельного или поверхностного сопротивления. Удельное объёмное сопротивление обычно выражается в Ом·см, а поверхностное сопротивление в Ом·см<sup>-2</sup>.

Непроводящие и плохо проводящие материалы склонны к накоплению электростатического заряда, в то время как на проводящих материалах заряды, как правило, не образуются. Отметим, что на объекте из проводящего материала может образоваться электростатический заряд, но он не будет сосредоточенным на определенном участке, а будет распределяться по всей длине объекта.

Существенно влияет на условия накопления зарядов и условия протекания электростатического разряда влажность окружающего воздуха. Как правило, при повышении влажности воздуха уровни статических напряжений снижаются.

Однако следует иметь в виду процессы утечки зарядов. В [39] отмечено, ионизация воздуха в естественных условиях приводит к столь малой его электропроводности, что для заряженных тел утечки зарядов через воздух оказываются значительно слабее, чем через изоляторы.

Происходит зажигание, которое характеризует условия возникновения горения.

В случае зажигания нагревается небольшой объем. В нашем случае зажигание происходит иницированием горения с помощью электрической искры. Свойства горючей смеси, свойства источника зажигания, начальные условия распространения пламени оказывают сильное влияние на критические условия зажигания.

Основная отличительная особенность зажигания заключается в протекании реакции окисления, инициируемой локальным источником тепла, а не путем накопления тепла в системе за счет реализации химической реакции. Для процесса зажигания определяющим является наличие большой разности температур между горючей системой и источником зажигания. Размеры системы играют второстепенную роль.

Зажигание искрой горючей смеси представляет сложное явление. В искре происходит интенсивное местное возбуждение молекул и их ионизация. Одновременно с этим искра в зоне своего действия вызывает высокое повышение температуры газа.

При зажигании искрой для каждой горючей смеси есть некоторая минимальная мощность искры, при которой смесь воспламеняется. Зависимость мощности определяется составом смеси, давлением и температурой.

Наименьшая величина энергии необходима для зажигания смесей стехиометрического состава. Эта величина называется минимальной энергией зажигания.

В работе [70] утверждается, что зажигание искрой составляет один из распространенных видов вынужденного зажигания. Механизм этого процесса весьма сложен, поскольку при возникновении искры имеет место очень интенсивное местное возбуждение молекул газа и их ионизация. Это обстоятельство может в сильной степени интенсифицировать и изменить протекание химических процессов в области искры в соответствии изменить критические условия зажигания в этом случае. Вместе с тем несомненно, что возникновение искры вызывает сильное повышение температуры газа в области искры, так что искру можно представлять как своеобразное накалившееся газообразное тело.

Оба эти обстоятельства послужили причиной появления двух различных трактовок механизма искрового зажигания: ионной теории искрового зажигания и тепловой теории.

Основной причиной пожаров в лесу является человек. [2] изучает влияние антропогенных факторов на возникновение и пространственно-временное распределение ЛП для оценки и прогнозирования антропогенной пожарной опасности в лесу как основы противопожарной профилактической работы.

В работе [22] приводится информация по причинам возникновения ЛП исходя из многолетних данных. В 50% случаях виновными является местное население, 19% – молнии, 5% – сельхозпалы, 5% – лесозаготовители, 3% – МПС,

экспедиции, 18% приходится на невыясненные причины. Также отмечается, что в некоторых районах Сибири и Дальнего Востока удельный вес ЛП от молний достигает 70%.

Отметим, что роль естественных лесов огромна. Их средообразующая и защитная роль тщательно изучена в работе [10].

## 1.2 Классификация лесных пожаров

В зависимости от места распространения огня, пожары делятся на низовые, верховые и подземные:

Низовой пожар: сгорает лесная подстилка, лишайники, мхи, травы, опавшие на землю ветки и т.п. Скорость движения пожара по ветру 0,25 – 5 км/ч. Высота пламени до 2,5 м. Температура горения около 700 °С (иногда выше).

Низовые пожары бывают беглые и устойчивые:

- При беглом низовом пожаре сгорает верхняя часть напочвенного покрова, подрост и подлесок. Такой пожар распространяется с большой скоростью, обходя места с повышенной влажностью, поэтому часть площади остается незатронутой огнем. Беглые пожары в основном происходят весной, когда просыхает лишь самый верхний слой мелких горючих материалов.

- Устойчивые низовые пожары распространяются медленно, при этом полностью выгорает живой и мертвый напочвенный покров, сильно обгорают корни и кора деревьев, полностью сгорают подрост и подлесок. Устойчивые пожары возникают преимущественно с середины лета.

Верховой пожар: пламя охватывает листья, хвою, ветви, и всю крону, может охватить (в случае повального пожара) травяно-моховой покров почвы и подрост. Скорость распространения от 5 – 30 км/ч. Температура от 900 °С до 1200 °С. Развиваются они обычно при засушливой ветреной погоде из низового пожара в насаждениях с низкоопущенными кронами, в разновозрастных насаждениях, а также при обильном хвойном подросте. Верховой пожар –

обычно завершающаяся стадия пожара. Область распространения яйцевидно-вытянутая.

Верховые пожары, как и низовые, могут быть беглыми (ураганными) и устойчивыми (повальными):

- Ураганный пожар распространяется со скоростью от 7 до 30 км/ч. Возникают при сильном ветре. Опасны высокой скоростью распространения.

- При повальном верховом пожаре огонь движется сплошной стеной от надпочвенного покрова до крон деревьев со скоростью до 8 км/ч. При повальном пожаре лес выгорает полностью.

При верховых пожарах образуется большая масса искр из горящих ветвей и хвои, летящих перед фронтом огня и создающих низовые пожары за несколько десятков, а в случае ураганного пожара иногда за несколько сотен метров от основного очага.

Подземные (почвенные) пожары в лесу зачастую связаны с возгоранием, торфа, возможным в результате осушения болот. Распространяются со скоростью до 1 км в сутки. Могут быть малозаметны и распространяться на глубину до нескольких метров, вследствие чего представляют дополнительную опасность и крайне плохо поддаются тушению.

В зависимости от характера возгорания и состава леса ЛП также подразделяются на низовые, верховые и почвенные. По скорости распространения огня низовые и верховые пожары делятся на устойчивые и беглые. Скорости распространения фронта пламени различны:

- при слабом низовом пожаре не превышает 1 м/мин (высота слабого низового пожара до 0,5 м);

- при среднем от 1 м/мин до 3 м/мин (высота среднего – до 1,5 м);

- при сильном свыше 3 м/мин (высота сильного – свыше 1,5 м).

Для верхового пожара скорости распространения:

- при слабом до 3 м/мин;

- при среднем до 100 м/мин;

- при сильном свыше 100 м/мин.

Сила почвенного (подземного) пожара определяется по глубине выгорания:

- слабый – у которого глубина прогорания не превышает 25 см;
- средний – 25 – 50 см;
- сильный – более 50 см.

В зависимости от площади, охваченной огнем:

- загорание – 0,1 – 2 га;
- малый – 2 – 20 га;
- средний – 20 – 200 га;
- крупный – 200 – 2000 га;
- катастрофический – более 2000 га.

В зависимости от характера возгорания и состава леса лесные пожары подразделяются на низовые, при которых выгорает только лесная подстилка, мхи и лишайники, а деревья, в основном, остаются нетронутыми; верховые, при которых сгорает весь лес, и почвенные (подземные). В сухую погоду низовой пожар легко переходит в верховой, а верховой может распространяться на огромные площади.

По интенсивности ЛП подразделяются на слабые, средние и сильные. Интенсивность горения зависит как от состояния и запаса ЛГМ, так и от погоды и рельефа местности.

По скорости распространения огня низовые и верховые пожары делятся на устойчивые и беглые. Скорость распространения слабого низового пожара не превышает 1 м/мин, сильного – свыше 3 м/мин. Слабый верховой пожар имеет скорость до 3 м/мин, средний – до 100 м/мин, а сильный – свыше 100 м/мин.

Высота слабого низового пожара до 0,5 м, среднего – 1,5 м, сильного – свыше 1,5 м. Слабым почвенным (подземным) пожаром считается такой, у которого глубина прогорания не превышает 25 см, средним – 25 – 50 см, сильным – более 50 см.



Существующие методики оценки лесопожарной обстановки позволяют определить площадь и периметр зоны возможных пожаров в регионе (области, районе). Исходными данными являются значение лесопожарного коэффициента и время развития пожара. Значение лесопожарного коэффициента зависит от природных и погодных условий региона и времени года. Время развития пожаров определяется временем прибытия сил и средств ликвидации пожара в лесопожарную зону.

### 1.3 Влияние лесных пожаров

Влияние ЛП различно. С одной стороны, ЛП уничтожают лес, с другой, способствуют его обновлению.

ЛП оказывают огромное влияние, как на природные комплексы, так и на экономику страны. ЛП оказывают огромное воздействие на лесные экосистемы. Согласно работе [53], одно из последствий пожаров – смена хозяйственно ценных лесообразующих пород на менее ценные, которая может серьезно изменить структуру лесного фонда, ухудшить водоохранные и почвозащитные характеристики лесов.

Там же, однако отмечают, что пожары в лесу являются естественным экологическим фактором земной среды, к которой большинство древесных и других видов растений приспособились в ходе эволюции. По мнению многих исследователей, пожары стимулируют возобновление, поддерживают стабильность и продуктивность природных популяций и экосистем.

ЛП являются важным фактором, определяющим возможность существования лесов, сообщает нам [5]. Последствия от которых во многом зависят от своеобразия условий произрастания в различных регионах.

Заметим, что процесс послепожарного восстановления, улучшения пожароустойчивости лесов, их экологических и сырьевых функций является отдельным направлением исследований. Разработке системы лесохозяйственных

мероприятий, а также оценке воздействия крупных пожаров на лесные фитоценозы как раз и посвящена работа [29].

Влияние ЛП не ограничивается только лишь воздействием на лесные экосистемы непосредственно. Работа [35] обращает внимание на воздействие лесных низовых пожаров разной интенсивности на эмиссию, запас и баланс углерода в конкретных типах леса – среднетаежных сосняках; ЛП рассматриваются как один из главных источников газовой и аэрозольной эмиссии в атмосферу.

ЛП являются сильными стимуляторами роста растений. Так, [77] приходит у выводу, что горельники в первые 3 года после пожара характеризуются всплеском естественного возобновления. Также исследуется динамика ЛП и их последствий и разрабатываются на ее основе практические рекомендации по снижению послепожарного ущерба.

Деятельность человека является одним из факторов лесообразования. [49] исследовала лесовозобновление на нарушенных территориях (вырубках и гарях), а также выявила зависимость частоты и средней площади пожаров для различных лесных территорий от степени их нарушенности.

Влияние ЛП на лесные экосистемы многоплановое [7]. С одной стороны, пожары нарушают естественное равновесие между компонентами биогеоценозов. С другой, оказывают большое влияние на процессы лесовозобновления. Изменение экологических условий на гарях требует обширных исследований, чему и уделяется в работе [7].

После пожаров и сплошных рубок существенно меняются условия формирования поверхностного стока, усиливаются эрозионные процессы. Снижаются водоохранно-защитная, водорегулирующая и противоэрозионно-аккумулятивная роль лесов [69].

Следует отметить, что ЛП, несмотря на свою дестабилизирующую роль для лесных экосистем, регулируют формирование новых послепожарных биогеоценозов.

Работа [9] оценивает влияние низовых пожаров на состав почвенного органического вещества (ПОВ) и его трансформацию.

Влияние пирогенного фактора на особенности структуры и продуктивности луговых сообществ юго-западного Забайкалья выявлено в работе [48].

В [14] проведены количественные оценки влияния эмиссий от природных пожаров на содержание монооксида углерода в приземном слое атмосферы в северной Евразии.

В работе [64] утверждается, что анализ самой проблемы и мирового опыта лесопожарной охраны убеждает, что решение проблемы возможно только при условии совершенствования и широкого применения методов оценки и прогнозирования пожарной опасности, прогноза поведения пожаров и их возможных последствий. А в качестве методологической и методической основы использовать обобщенную и согласованную систему пирологических характеристик и оценок.

[44] отражает необходимость выборочных рубок для определенных древостоев с целью улучшения земель лесного фонда. С давних пор пожары в лесу выполняли такую роль, что подтверждает их необходимость в определенных случаях.

Также отметим еще одну опасность, которую оказывают ЛП на леса, – [26] исследует серьезную проблему: ЛП в условиях существенного загрязнения радионуклидами лесного фонда. В таком случае, утверждается в [26], ЛГМ приобретают новые физические характеристики.

Согласно [65], ЛП являются фактором изменения древесно-кустарниковой растительности. Там же проводится анализ влияния ЛП на процесс изменения.

[45] приводит к выводу, что главным дестабилизирующим фактором в лесных экосистемах выступают пожары, трансформирующие как среду существования леса, так и состав, и структуру растительного покрова.

В целом, влиянию ЛП на экологию, окружающую среду, атмосферу, лесные биогеоценозы, посвящено множество работ [23, 38, 8, 76, 25, 75, 42, 71, 61].

## 1.4 Борьба с лесными пожарами

На современном этапе развития науки и техники для предсказания поведения лесных пожаров (ЛП), чтобы в дальнейшем эффективнее бороться как с самими ЛП, так и с их последствиями, широко применяют математические модели.

Создание математических моделей горения лесных горючих материалов (ЛГМ) и торфа и их реализации требует информации о теплофизических, термокинетических и гидродинамических характеристиках ЛГМ и торфа, утверждает [1].

Разработка математических моделей распространения пожара позволяет предсказать его поведение, что способствует более эффективной борьбе со стихией огня [15]. Там же проводится исследование и разрабатываются эффективные параллельные вычислительные алгоритмы моделирования процессов распространения кромки ЛП.

Отметим, в последнее время для борьбы с ЛП разработаны ударно-волновые методы борьбы. На основе конкретных условий ударные волны (УВ) могут либо интенсифицировать, либо подавить горение.

Изучению ударно-волновых процессов, обеспечивающих интенсивное газодинамическое воздействие на фронт низового ЛП, и научному обоснованию повышения эффективности практического применения ударно-волнового метода пожаротушения посвящена работа [3].

Согласно [62], особенности возникновения, распространения и характер пожаров обусловлены географическим месторасположением, экологическими особенностями, соотношением категорий лесных и нелесных площадей, типологической и возрастной структурой лесного фонда. Также утверждается, пожароустойчивость насаждений зависит от экологических, лесоводственных и пирологических факторов, параметры которых обусловлены климатическими и лесорастительными условиями исследуемого объекта.

Для оценки и прогнозирования параметров крупных ЛП возможно применение данных дистанционного мониторинга как динамических процессов на поверхности Земли. Создание методов по решению такой цели и решается в работе [30].

Для анализа ЛП в работе [60] проведено тестирование и параметризация индексов погодной пожарной опасности (ППО) и разработан модуль пожаров глобальной модели динамики растительности ORCHIDEE.

Исследование возникновения верховых ЛП из низовых, их распространения и возникновения крупномасштабных ЛП проводится в [52].

В [74] обращают внимание на авиационный мониторинг, улучшению работы которого посвящена сама работа.

Для учета реальных физико-химических процессов, протекающих при ЛП, в работе [6] созданы основные элементы прогностического моделирования лесной пожарной опасности (условий возникновения пожара).

Отдельно особенности математического моделирования распространения лучистого теплового потока от очага горения при ЛП исследуются в работе [43].

Способам повышения интенсивности УВ для тушения низового ЛП посвящено исследование [66].

Среди средств обнаружения ЛП в настоящее время наиболее перспективными следует считать системы спутникового мониторинга [73]. Там же разработаны методы и средства обнаружения ЛП с применением вероятностных порогов и оценки их энергетических параметров по данным приборов космического базирования.

В работе [32] разработаны меры для дальнейшего улучшения ИСДМ-Рослесхоз.

В работе [21] в качестве одного из перспективных направлений повышения эффективности применения авиации для борьбы с ЛП в современных условиях является использование авиатанкеров.

Особенностям организации и тактики тушения крупных ЛП посвящена работа [20]. В [31] приводятся аргументы в пользу формирования гибкой

системы охраны леса от пожаров (СОЛП), способной адаптироваться к непрерывно изменяющейся лесопожарной обстановке, что возможно только при наличии достаточно развитой системы мониторинга ЛП, способной обеспечить регулярную слежку за условиями и процессами возникновения и развития ЛП, масштабами воздействия огня на лесные экосистемы.

[50], на основании проведенного анализа индексов определения пожарной опасности, выделяет 4 группы основных факторов, влияющих на возникновение пожара, – метеоусловия, антропогенная нагрузка, пожарная опасность по лесотехническим характеристикам, риск торфяного пожара.

Для разработки системы мероприятий по совершенствованию охраны лесов от пожаров необходимо изучить показатели фактической горимости лесов, чему посвящена работа [51].

Работа [40] уделяет особое внимание математическому и физическому моделированию сушки слоя ЛГМ, что позволит лучше понять и эффективнее бороться с ЛП.

Согласно [41], использование феноменологического подхода позволило построить новые модели для решения поставленных задач. Работа же посвящена исследованию процессов, возникающих при тушении ЛП.

Проблеме прогнозирования распространения ЛП как основному направлению в исследованиях по борьбе с ЛП посвящена работа [28], которая предлагает для решения этой проблемы применение вероятно-множественного подхода.

Поиску методов защиты лесных массивов от сельскохозяйственных палов уделено пристальное внимание в работе [34].

Работа [72] определяет факторы и их особенности, определяющие вероятность возникновения пожаров растительности, для оценки и прогноза возникновения пожаров растительности.

Несмотря на обилие работ, посвященных данной тематике, круг нерешенных вопросов все еще широк.

## 2 ЛЕСНЫЕ ГОРЮЧИЕ МАТЕРИАЛЫ

### 2.1 Понятие лесных горючих материалов

Лесными горючими материалами (ЛГМ) являются растения лесов, их морфологические части и растительные остатки различной степени разложения, которые могут гореть при лесных пожарах.

Лесные горючие материалы, определяющие возможность возникновения и развития лесных пожаров, отличаются большим разнообразием. Кроме надземных частей древостоев (стволовая древесина, кора, ветви, хвоя и листья) к числу этих материалов относятся также живой напочвенный покров в виде лишайников, мхов и травянистых растений, древесный отпад в виде сухостоя и валежа, свежий опад из остатков древесной и травянистой растительности и, наконец, лесная подстилка, а в заболоченных участках и на болотах – торф [12].

На основании [36] ЛГМ по роли в распространении горения применительно к пожароопасному периоду делятся на 3 категории:

- проводники горения;
- поддерживающие горение;
- задерживающие горение.

Лесными горючими материалами (ЛГМ) являются древесные и травянистые материалы, которые могут загореться под действием источников высоких температур.

ЛГМ подразделяются:

1) Легко воспламеняющиеся и быстро сгорающие компоненты лесного опада (сухая трава, опавшие листья, хвоя, мелкие ветки, сучья, некоторые кустарнички, самосеи др.), которые способствуют быстрому распространению огня и служат воспламенителями для нижеуказанных материалов 2 и 3;

2) Медленно воспламеняющиеся материалы;

3) Медленно воспламеняющиеся и медленно горящие лесные горючие материалы (валежник, пни, сухостой, нижние слои лесной подстилки,

кустарники и деревья), способствующие усилению и развитию горения; травянистые растения и мхи, которые вследствие высокого содержания влаги сдерживают распространение горения.

На инициацию и развитие ЛП большое влияние оказывает вид, а также влагосодержание ЛГМ. Поэтому в лесной пирологии особое внимание уделяется процессам увлажнения и высыхания ЛГМ. Инициации горения в лесу всегда предшествует удаление влаги из ЛГМ под действием источников тепла различной физической природы и происхождения. Удаление влаги из ЛГМ должно зависеть не только от погодно-климатических условий, но и от вида материала и его физико-химического состояния.

Сушка ЛГМ до состояния устойчивой воспламеняемости возможна при различных положительных температурах. Но наиболее отчетливо процесс удаления влаги может быть изучен в условиях нагрева, соответствующих промышленной сушке материалов: температура выше 100 °С и открытой поверхности испарения.

Отмершие клетки растительных организмов, лишенные протоплазмы и ядра, в основном содержат целлюлозу, гемицеллюлозу, лигнин с некоторым включением смол, восков, жиров и других веществ [55].

В [55] также делят составляющие растительных организмов по склонности к естественному распаду на две группы:

- 1) целлюлозы, гемицеллюлозы, белки и другие составляющие, легко поддающиеся разложению;
- 2) лигнин, воск, смолы, углеводороды и другие вещества, трудно поддающиеся или вообще не поддающиеся разложению в течение нескольких геологических периодов.



## 2.2 Горение лесных горючих материалов

ЛГМ в лесу различаются по своим физико-химическим свойствам: составу органической массы, зольности, влажности, теплоте сгорания и т.п. Эти свойства нужно учитывать при анализе процесса горения.

ЛГМ в основном состоят из углерода, водорода и кислорода; эти вещества и определяют состав органической массы. Также органическая масса содержит серу и азот, которые могут тоже участвовать в процессе горения, поэтому они составляют горючую массу.

Продукты сгорания всегда содержат пары воды, которые образуются из-за наличия влаги в ЛГМ и при сгорании водорода.

Одной из особенностей твердых горючих материалов (ТГМ) является способность выделять при нагревании газообразных и жидких продуктов термического разложения их органической массы (летучие). По окончании термического разложения остаётся твердый остаток – кокс, содержащий в основном углерод и золу. Роль летучих весьма заметна при воспламенении и на начальных стадиях горения ТГМ, также летучие в значительной мере определяют их реакционную способность.

ТГМ содержат углерод, различные углеводородные соединения, влагу, золу и т.д. До воспламенения при нагревании происходит термическое разложение органической массы с выделением летучих веществ, которые в значительной мере определяют условия воспламенения и горения материалов. После выделения летучих остается кокс, состоящий из углерода.

Горение углерода – гетерогенный процесс, определяемый как кинетикой горения (на поверхности и в глубину) углеродного массива частицы, так и диффузионным переносом кислорода и продуктов сгорания у горячей поверхности частицы [55].

В продуктах термического распада ТГМ содержатся твердые и жидкие соединения, а также соединения, находящиеся в газообразном состоянии.

Появление летучих веществ играет важную роль в термическом разложении, воспламенении и горении ТГМ [24].

Древесина при воздействии тепла разлагается с образованием твердого углеродистого остатка и летучих веществ.

Выделяющееся при сгорании ЛГМ тепло большей частью передается поверхностям нагрева излучением.

Помимо радиационного теплообмена излучением, также протекают процессы горения ЛГМ, движения газов и частиц, массообмена в объеме факела и на его границах и т.п.

Поток энергии, передаваемый частицами более горячего тела частицам тела более холодного, называется тепловым потоком [37].

Древесина разлагается при 403 – 423 К. До 443 К из древесины выделяются в основном пары воды. Около 473 К выделяются метан, углекислый газ, окись углерода, азот, уксусная кислота, метиловый спирт. При температуре 573 К продукты разложения в основном состоят из окиси углерода (~25%), водорода (~30%), метана (~33%), углекислого газа (~9%). При температуре от 473 до 673 К происходит интенсивное разложение древесины и выделяется основная масса всех газообразных продуктов разложения [24].

Чтобы ТГМ воспламенился, нужно нагреть его поверхность до температуры, при которой скорость выделения летучих веществ достаточна для поддержания горения. Источник воспламенения, воздействуя такой температурой на летучие, воспламеняет их и образуется факел пламени, т.е. вещество начинает гореть.

Температура воспламенения разлагающихся твердых веществ зависит от степени их дисперсности. Чем выше степень дисперсности, тем ниже температура воспламенения. Это связано с тем, что при увеличении степени дисперсности облегчается выход летучих веществ, следовательно, их концентрация растет. Чем ближе концентрация летучих к стехиометрической, тем ниже температура воспламенения.

Механизм воспламенения ТЛГМ происходит по определенному сценарию. Когда подводится тепло к веществу, то происходит как нагрев его поверхности, так и прогрев в глубину. В случае горения на поверхности вещества изменение температуры определяется процессом теплоотвода вглубь.

Чтобы вещество устойчиво горело, необходимо прогреть слой на определенную величину. В [24] указано, что для этого нужен источник тепла с температурой выше температуры самовоспламенения выделяющихся летучих. С уменьшением тепла для создания прогретого слоя облегчается воспламенение вещества, следовательно, его пожарная опасность выше.

Вещества при нагреве могут разлагаться полностью, превращаясь в пары и газы, либо образовывать твердый углеродистый остаток – уголь. В лесу ЛГМ как раз и относятся к таким (древесина, сено и др.).

[24] утверждает, что органическая масса древесины содержит около 49,5% углерода, 6,3% водорода и 44,2% кислорода. Древесина является пористым веществом по строению. Эти поры занимают 56 – 72% ее объема.

Рассмотрим поведение древесины при нагреве. В процессе нагревания до 383 К из древесины удаляется влага. Если температура еще больше, то начинается процесс разложения, который сопровождается выделением тепла.

При воспламенении древесины температура верхнего слоя по-прежнему растет из-за излучения пламенем тепла и достигает 563 – 573 К, тогда выход газообразных продуктов становится максимальным. Поскольку верхний слой разлагается, древесина постепенно превращается в древесный уголь – происходит неполное сгорание. Это связано с тем, что на стадии пламенного горения древесины кислород воздуха почти полностью расходуется в пламени, не достигая поверхности угля.

С течением времени пламя нагревает уголь до 773 – 973 К. С разложением верхнего слоя и образованием угля нижележащие слои прогреваются до 573 К и также разлагаются. Таким образом, с образованием на поверхности древесины слоя угля пламенное горение не прекращается.

Слой угля постепенно увеличивается, при этом уменьшается теплопередача разлагающемуся слою древесины, тогда выход газообразных продуктов разложения уменьшается, пламя перестает охватывать всю поверхность древесины. Пламя смещается туда, где имеются трещины на поверхности слоя угля, через которые выходят продукты разложения. В [24] отмечают, что такое возможно при толщине слоя угля  $(1,5-2) \cdot 10^{-2}$  м. К углю получает доступ кислород воздуха, и происходит одновременно горение угля и выделяются газообразные продукты разложения. При выгорании угля его толщина вначале уменьшается, в дальнейшем – остается постоянной. Заканчивается первая фаза горения древесины – пламенное горение. Начинается вторая фаза: горение угля, при котором отсутствует факел пламени и есть малая скорость выгорания.

Сам процесс горения ТЛГМ представляет комплекс физико-химических явлений, основными из которых являются: теплообмен частиц с окружающей средой; выход и горение летучих веществ – продуктов термического распада сложных органических соединений; горение коксового остатка – взаимодействие углерода кокса с газовыми компонентами: кислородом, углекислотой и водяным паром, диффундирующими к поверхности частицы. При анализе процесса горения необходимо учитывать как характеристики материала, состояние поверхности, наличие пор и трещин, так и внешние условия.

### 3 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ЛГМ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Целью исследования являлось изучение влияния вида ЛГМ, а также уровня их влажности на процессы, происходящие в начале горения при нагревании до температур заметно ниже температур воспламенения. В качестве объекта исследования выбраны характерные компоненты лесного опада, из которых в процессе осенне-зимнего вылеживания естественным путем были удалены органические вещества, но затем свободные поры могли вторично заполниться водой естественных осадков.

#### **Материалы и методы**

Материал лиственного опада в основном представляет собой целлюлозу и продукты ее разложения. Зеленые иголки – опад сосны и ели, как правило, слабо увлажнены, но содержат смолистые соединения, обедненные легколетучими компонентами. Опад травы представлял собой вертикальные и горизонтальные высохшие стебли. Для проведения исследования в зимний период из-под снежного покрова были взяты 5 образцов ЛГМ. Образцы ЛГМ диспергировались для ускорения процессов насыщения влагой и высушивания. Затем образцы ЛГМ подвергались нагреванию в сушильном шкафу при 115 °С до постоянной массы. Высушенные образцы увлажнялись до 3-х разных уровней влажности путем выдержки в окружающей атмосфере, а также в условиях контролируемого искусственного увлажнения в атмосфере пересыщенного водяного пара. В среднем масса образца составляла 0,5 – 0,9 г.

Для исследования процесса изменения массы ЛГМ, а также изменения содержания в них влаги, при воздействии температуры была собрана установка (рисунок 7). Установка представляет собой трубчатую печь, подключенную к регулирующему автотрансформатору ЛАТР-1М через реле. К реле присоединяется измеритель-регулятор ТРМ-1, к которому подключается

термопара, посредством которой можно отслеживать температуру внутри печи. С помощью регулятора-измерителя поддерживалась необходимая температура. Температура печи превышала температуру эффективной сушки и равнялась 120 °С. Над печью на специальной стойке установлены весы НТR-80Е, которые имеют выход для передачи информации на ПК. К весам подвешивается тигель, в который помещается исследуемый образец материала. Тигель с ЛГМ выдерживался в печном пространстве при 120 °С в течение 480 с.

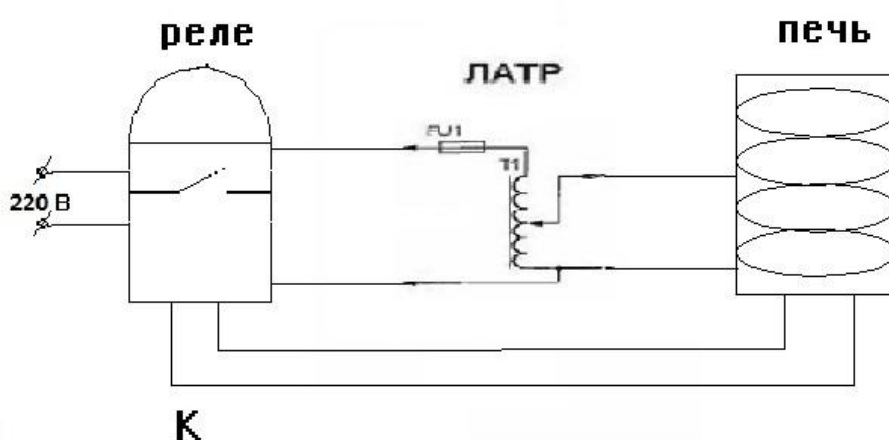


Рисунок 7 – Электрическая схема установки для исследования поведения лесных горючих материалов при длительном воздействии температуры



Рисунок 8 – Установка для исследования поведения лесных горючих материалов при длительном воздействии температуры

### **Результаты и их обсуждение**

На рисунках 9, 10, 11 отображены изменения массы ( $m$ ) образцов во времени ( $t$ ) в зависимости исходного уровня влажности без учета массы тигля, в который они помещены.

В таблицах 1, 2 отображены данные по влажности образцов ( $W$ ) до начала нагрева, % и максимальной потере массы ( $\Delta m/m$ , %) в процессе нагревания при  $120^{\circ}\text{C}$ . Потеря массы отражает уменьшение влажности ЛГМ.

Таблица 1 – Влажность образцов ЛГМ перед нагревом в печи и относительные потери массы в процессе выдержки при 120°C

Материал	w, %	$\Delta m/m, \%$
Берёзовые листья	22,85	17,13
Сухая трава	32,87	21,81
Кленовые листья	43,64	27,14
Еловые иглы	33,52	23,15
Сосновые иглы	34,81	21,55

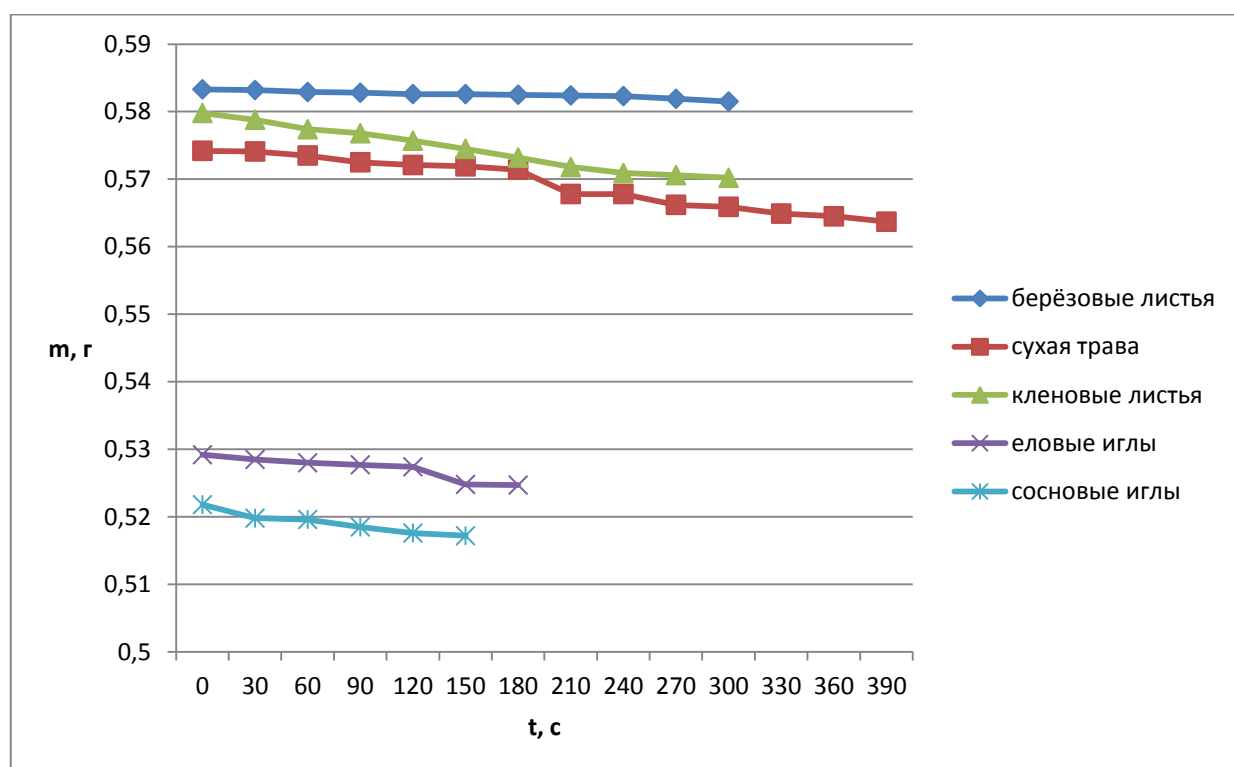


Рисунок 9 – Изменение массы естественно сухих образцов в процессе выдержки при 120 °С



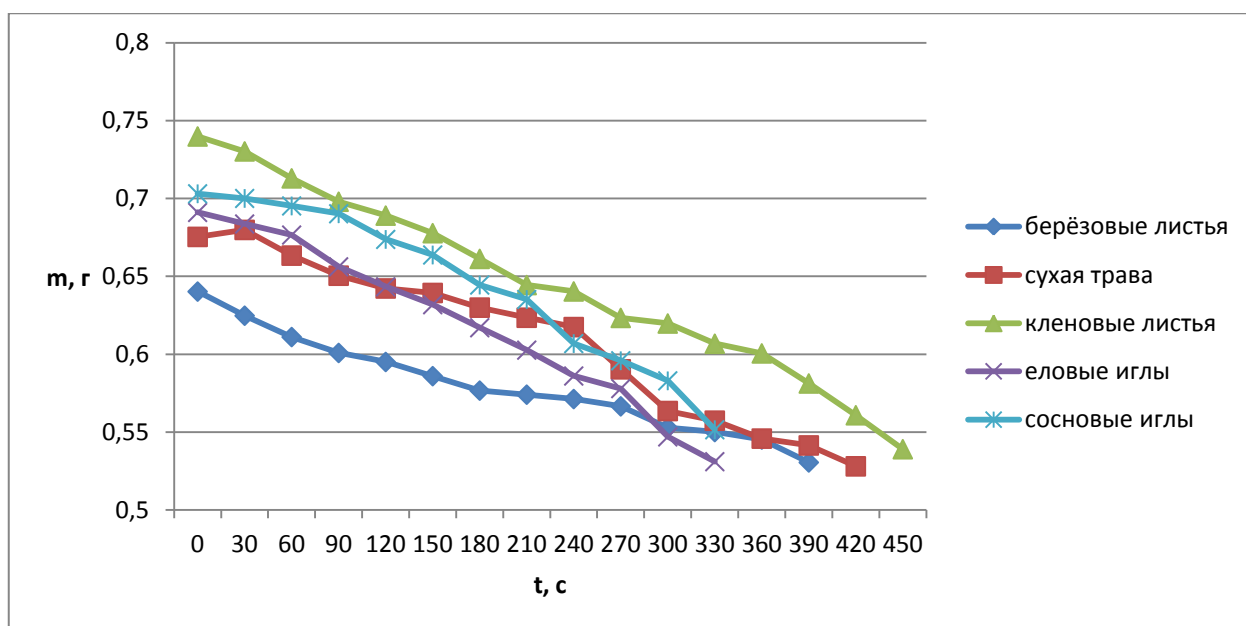


Рисунок 10 – Изменение массы увлажненных образцов в течение выдержки при 120 °С

Таблица 2 – Влажность образцов ЛГМ перед нагревом в печи и относительные потери массы в процессе выдержки при 120°С

Материал	w, %	$\Delta m/m$ , %
Берёзовые листья	28,8	23,67
Сухая трава	56,4	36,55
Кленовые листья	52,4	34,81
Еловые иглы	59,4	38,54
Сосновые иглы	60,3	36,36

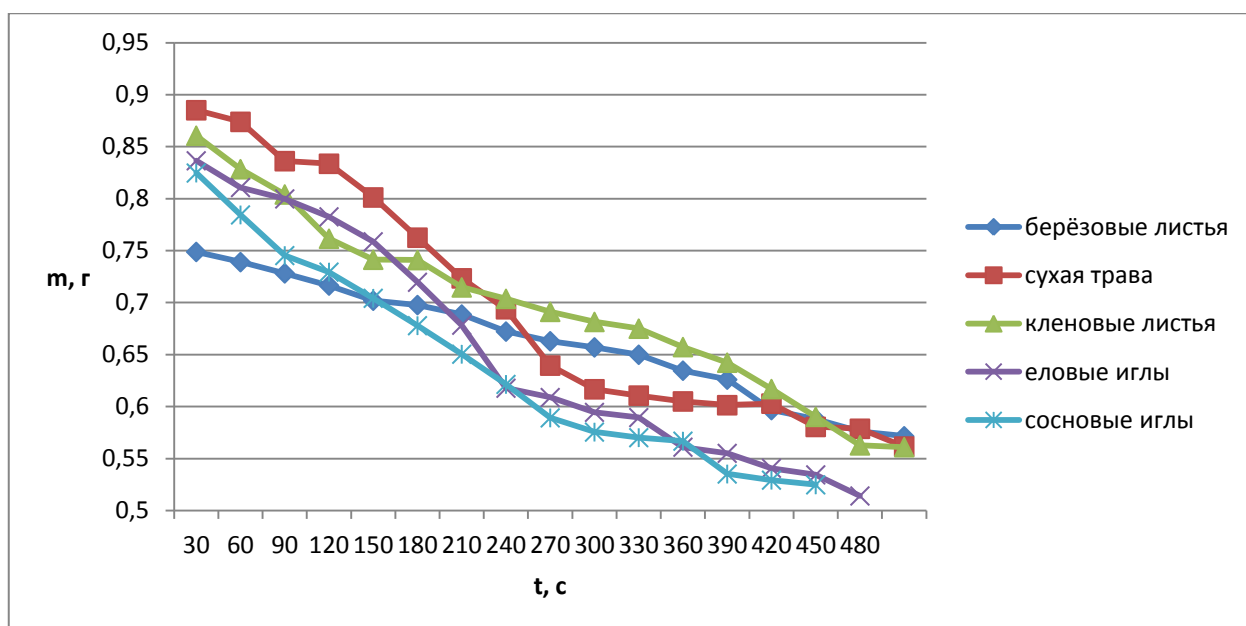


Рисунок 11 – Изменение массы увлажненных образцов в процессе выдержки при 120 °С

Рисунок 9 отражает изменение влажности ЛГМ непосредственно после начальной сушки при 115 °С и последующей короткой выдержки на воздухе для достижения постоянного воздушно сухого состояния при температуре эксперимента. В силу различной гигроскопичности изучаемые виды ЛГМ при одинаковых внешних условиях накапливали различное количество влаги (таблица 1). Наименьшей гигроскопичностью обладают берёзовые листья, наибольшей – кленовые. Наиболее быстро отдают влагу кленовые листья и трава. Хвойные компоненты сосны и ели при нагревании ведут себя различно, при близких значениях исходной влажности. Естественно-сухая влажность предполагает объемное впитывание влаги из воздуха всем объемом материала и отражает собственно поведение материала.

Искусственное увлажнение (аналог насыщенного тумана) способствует не только заполнению объема материала, но и визуально видимому накоплению конденсированной влаги на внешней поверхности ЛГМ. Количество этой влаги, слабо связанной с поверхностью материала, может существенно превышать количество внутренней влаги. Но такая влага при нагревании сравнительно легко удаляется с поверхности ЛГМ (рисунки 10, 11). Влияние вида материала

ЛГМ на процесс удаления такой влаги не существенен и все исследованные ЛГМ при увеличении влажности сверх уровня естественно сухого состояния при 120 °С в пределах выбранного нами времени ведут себя подобно.

## **Выводы**

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

1) Лесные горючие материалы при естественной атмосферной влажности и достаточном времени для поглощения влаги и ее удаления ведут себя существенно различно.

2) Естественные осадки, передающие избыточную влагу, не поглощаемую всем объемом ГЛМ, могут нивелировать различия в поведении разных видов ГЛМ в естественных условиях увлажнения и высыхания.

3) При воздействии тепла на влажный ЛГМ первоначально удаляется внешняя влага.

4) Установившаяся практика определения начала пожароопасного состояния лесов по времени после крайнего дождя должна быть дополнена данными по способности конкретного ЛГМ поглощать влагу при естественном увлажнении и отдавать ее при атмосферной сушке.

5) Определение времени снижения влажности ЛГМ до сухого пожароопасного состояния требует проведения дополнительных экспериментов.

#### 4 ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ ГОРЕНИЯ ЛГМ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМАХ

Целью исследования являлось изучение влияния вида и уровня влажности ЛГМ на процессы, происходящие при горении. В качестве объекта исследования выбраны компоненты лесного опада, прошедшего осенне-зимний период вылеживания и достаточно глубоко пропитанный водой естественных осадков. Лиственный опад в процессе естественной сезонной трансформации, в основном, состоит из целлюлозы и продуктов ее разложения. Опад сосны и ели, как правило, изменяется в меньшей степени, но теряет часть смолистых соединений и содержит небольшое количество влаги. Остатки травы состоят из целлюлозы с незначительным содержанием других веществ. Обладая трубчатым и капиллярным строением, остатки травы легко впитывают и отдают влагу.

#### **Материалы и методы**

Для проведения исследования в зимний период из под снежного покрова были взяты 5 образцов ЛГМ. Образцы тщательно высушивались при 115 °С до постоянной массы. Образцы каждого вида ЛГМ перед нагревом в печи искусственно увлажнялись до 3-х различных уровней влажности. Температура печи, при которой проводились наблюдения за поведением образцов ЛГМ при нагреве, равнялась 200, 300, 400, 500 °С.



Рисунок 12 – Установка для исследования процесса изменения массы лесных горючих материалов

Установка для исследования поведения образцов ЛГМ при воздействии различных температур состоит из разъемной трубчатой печи, температура которой задавалась и поддерживалась с помощью автотрансформатора. Температура эксперимента определялась с помощью термопары типа ХК и милливольтметра. Для удобства и объективности наблюдения за всеми процессами горения подготовленный к эксперименту материал помещали в кварцевую трубку с обоими открытыми концами. Трубка имеет длину превышающую длину равномерной горячей зоны печи, которая обеспечивает зоны конденсации продуктов нагревания ЛГМ. Трубку с подготовленным материалом помещали в предварительно нагретую печь и проводили визуальные наблюдения и видеосъемку за видимыми признаками поведения ЛГМ, проявляемыми в процессе нагревания в самой печи и на ее границах – более холодных концах трубки.



Рисунок 13 – Конденсация летучих при горении лесных горючих материалов в кварцевой трубке

### Результаты и их обсуждение

Загорание проходит следующие этапы [59]:

- 1) Предварительный нагрев и подсушивание с выделением водяных паров (120 °С);
- 2) Высыхание, загорание и горение с выделением из горючих материалов водяных паров, горючих газов, кислот, смол (260 °С);
- 3) Воспламенение газов (315 – 425 °С) и пламенное горение с выделением дыма, углекислого газа, водяных паров и несгоревших газов (650 – 1095 °С);
- 4) Обугливание и горение углей до полного сгорания лесных горючих материалов (650 – 1095 °С).

Горение любого материала можно представить как последовательность закономерно сменяющих друг друга процессов. Для упрощения понимания, а также наглядности при анализе, явление горения материалов представили в виде последовательности определенных процессов – этапов, логично сменяющих друг друга, которые проявляются в форме видимых индикаторов протекающих событий в самом нагреваемом материале и на «холодных» концах кварцевой

трубки. В процессе постановочного эксперимента были установлены следующие этапы и их визуально наблюдаемые индикаторы, в определенной степени характерные для всех температур эксперимента и всех ЛГМ:

1) Интенсивное испарение влаги из ЛГМ – появление конденсированной влаги на стенке трубки.

2) Начало выделения летучих органических веществ из ЛГМ – появление слабого запаха.

3) Усиление выделения летучих веществ и начало их частичного сгорания с образованием небольшого количества твердых частиц – выделение легкого дыма.

4) Интенсивное образование частиц сажи и тяжелых органических соединений в условиях недостатка окислителя – интенсивное образование дыма, дым заполняет трубку.

5) Образование и конденсация органических веществ с высокой температурой конденсации – почернение стенки трубки и очень резкий запах.

6) Догорание остатков ЛГМ, образование золы – ослабление выделения дыма и запаха.

7) Окончание эксперимента, прекращение горения ЛГМ – отсутствие выделения летучих веществ и точек горения в зольном остатке ЛГМ.



Рисунок 14 – Результат горения



Результаты, полученные при нагревании при выбранных температурах, одном типе ЛГМ, но разных уровнях влажности, представлены на рисунках 15 – 19. Рисунки 15 – 19 соответствуют данным для образцов ЛГМ: березовые листья, трава, кленовые листья, еловые иглы и сосновые иглы соответственно. Буква «а» в названии соответствует данным по температурам 200 и 300 °С, буква «б» – 400 и 500 °С. На диаграммах на оси абсцисс отражен этап наблюдаемого процесса, на оси ординат – время наступления события. Числа в скобках возле температур соответствуют уровням влажности в начальный момент нагревания ЛГМ в печи. Рисунки 20 а, б соответствуют данным для образца – трава, а рисунок 20 в – для сосновых игл при одном типе ЛГМ, одном уровне влажности, но разных температурах. Рисунки 21 а, б, в, г отражают результаты для разных ЛГМ при одних и тех же температурах и уровнях влажности для березовых листьев – травы, березовых листьев – еловых игл, травы – еловых игл, кленовых листьев – сосновых игл.

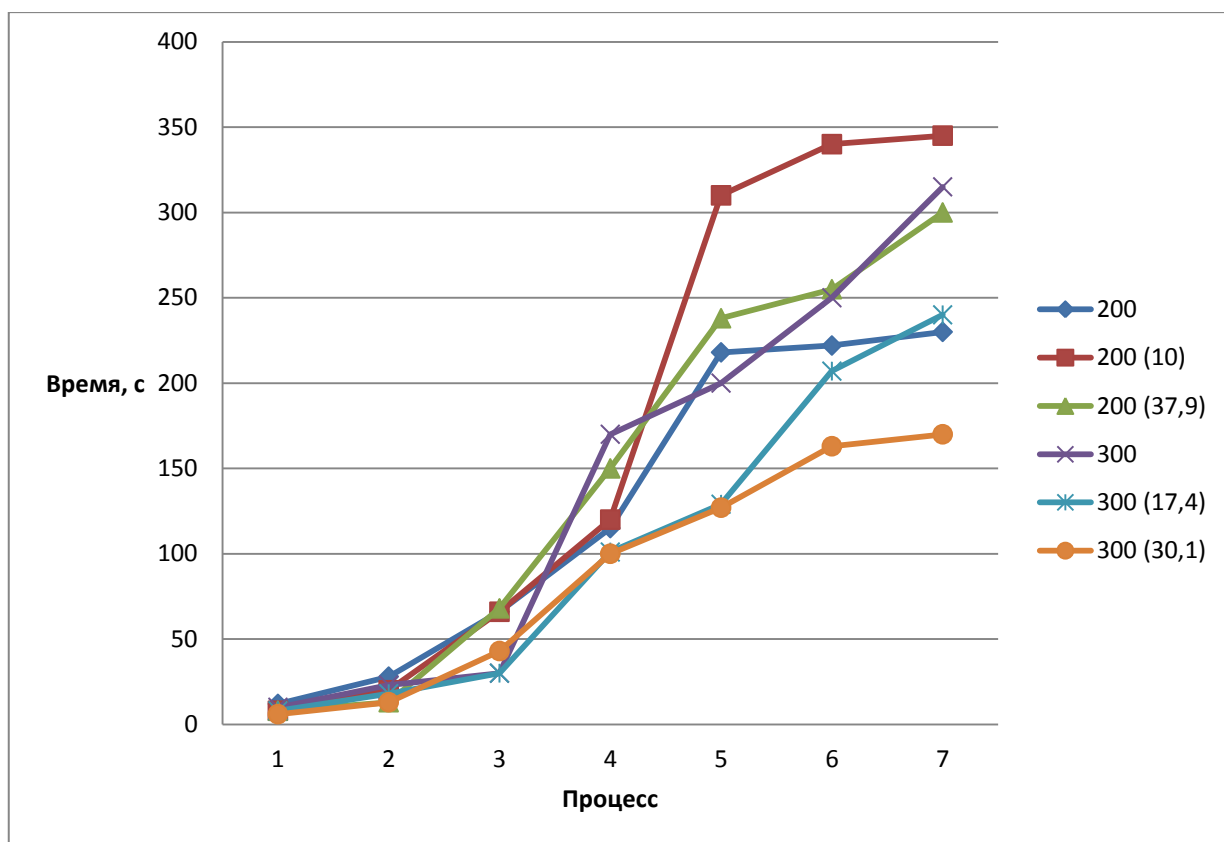


Рисунок 15 а – Многостадийный процесс горения ЛГМ



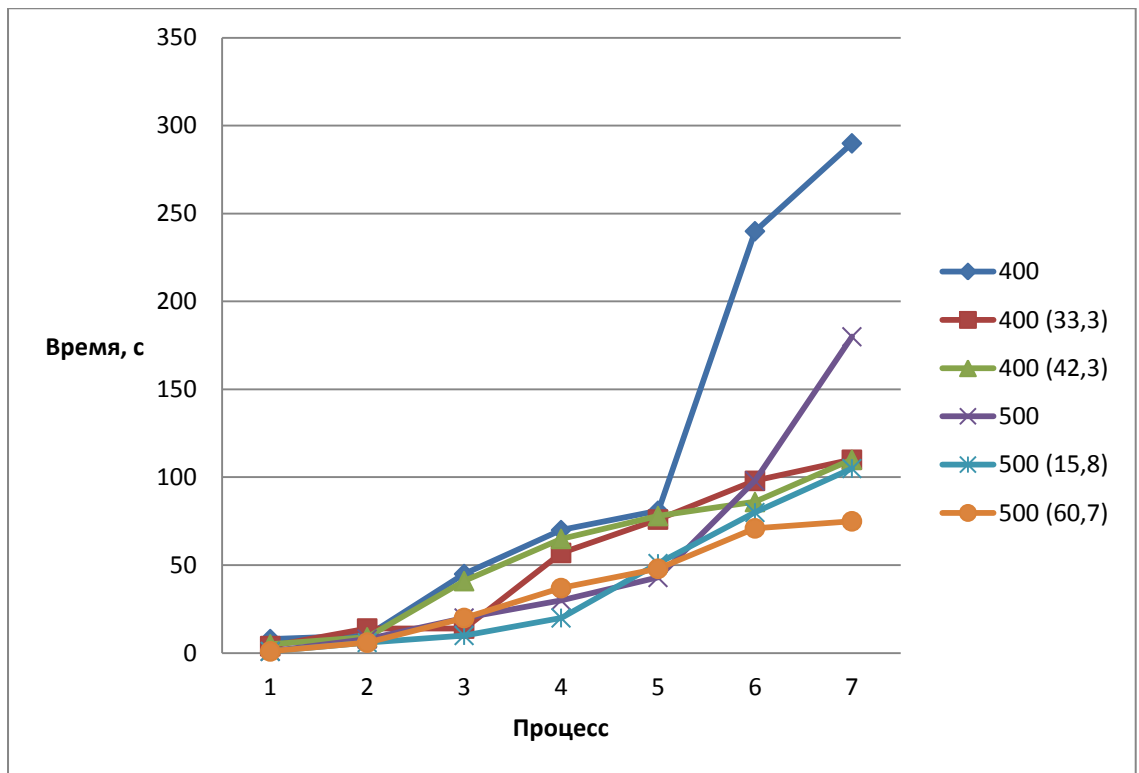


Рисунок 15 б – Многостадийный процесс горения ЛГМ

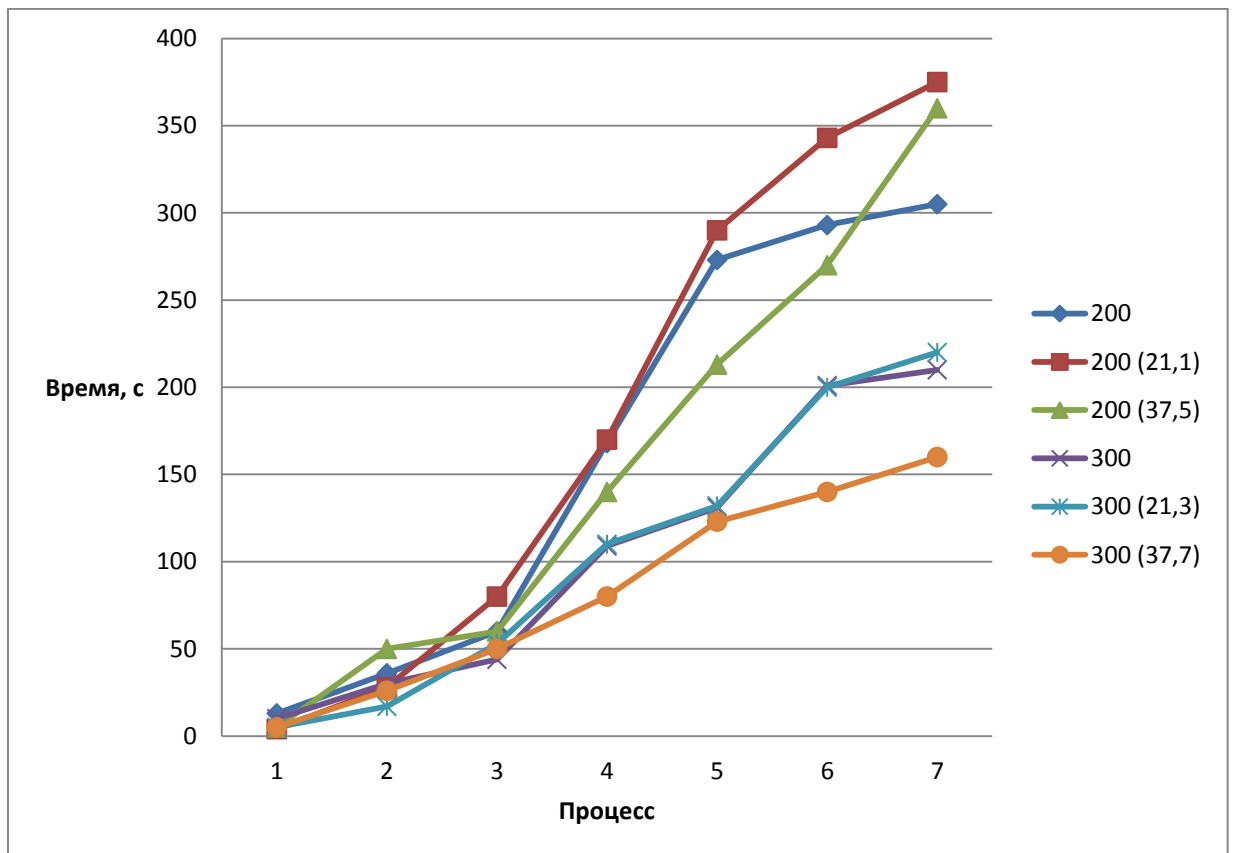


Рисунок 16 а – Многостадийный процесс горения ЛГМ

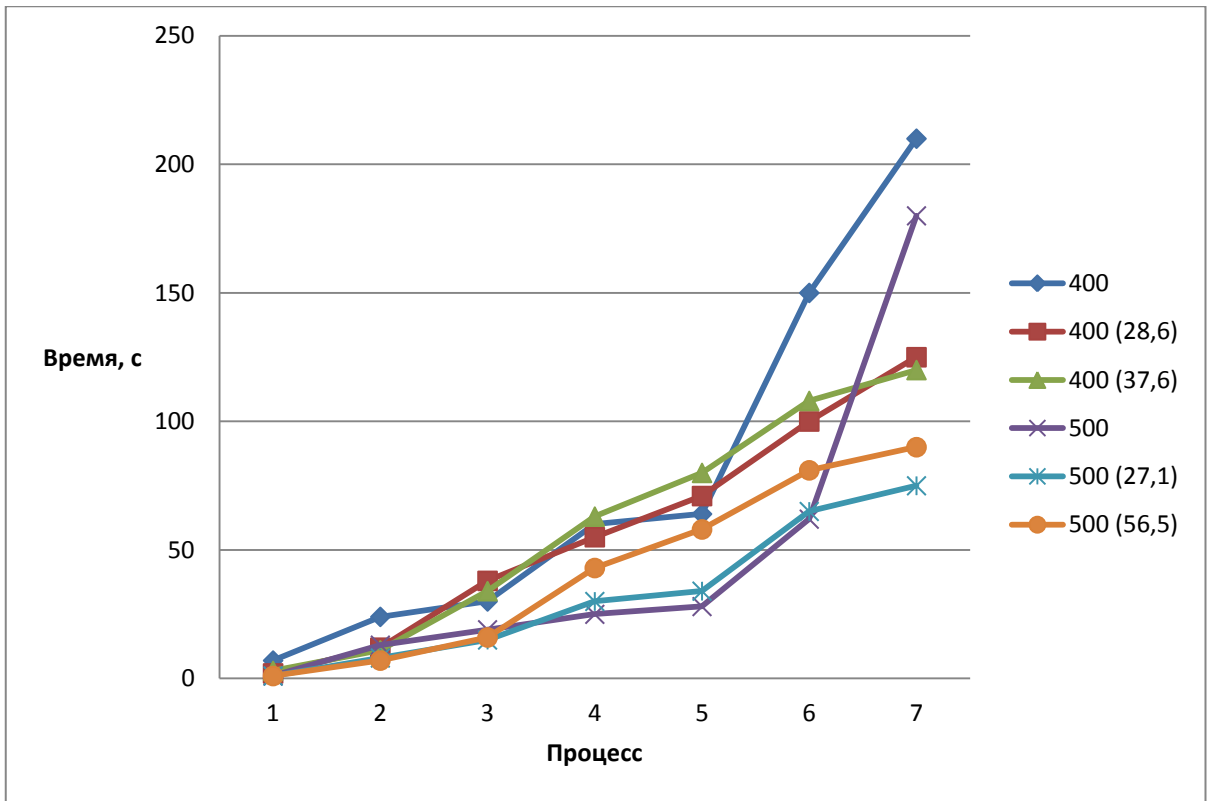


Рисунок 16 б – Многостадийный процесс горения ЛГМ

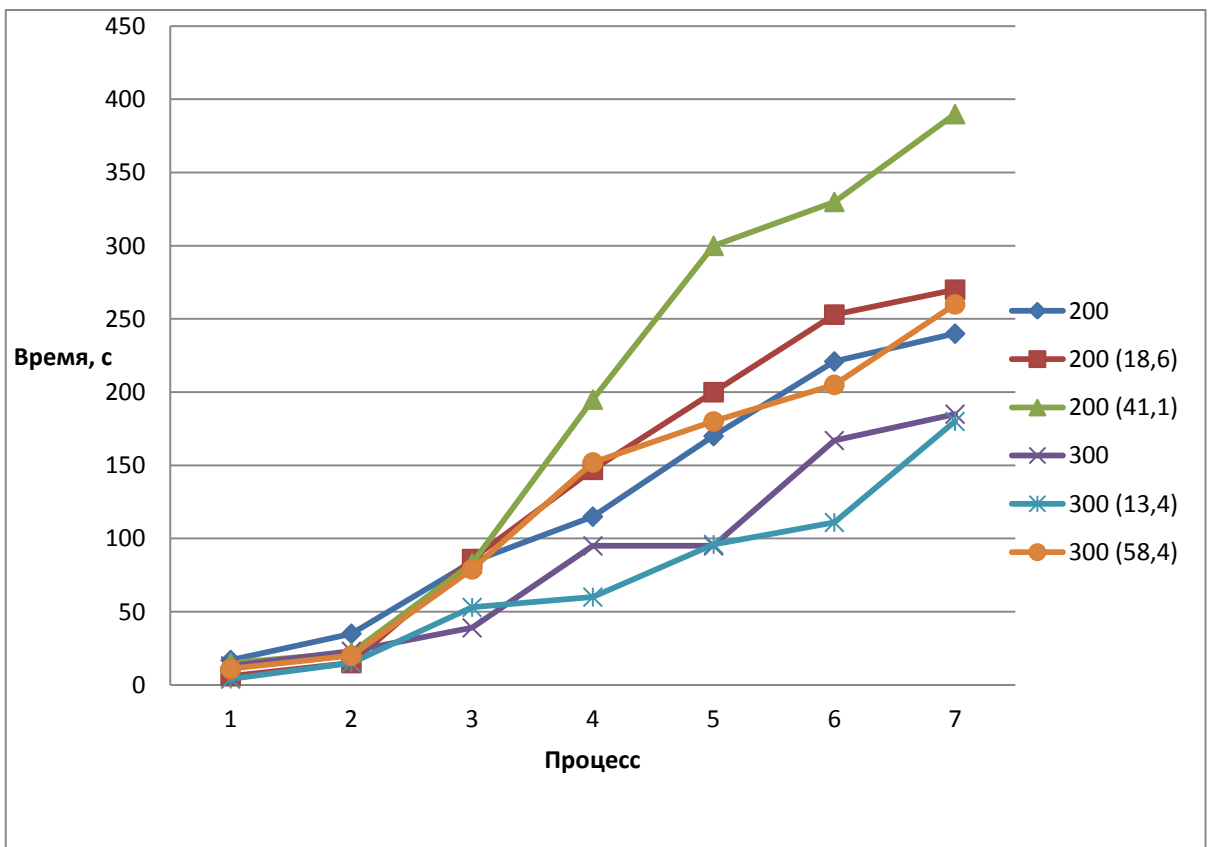


Рисунок 17 а – Многостадийный процесс горения ЛГМ

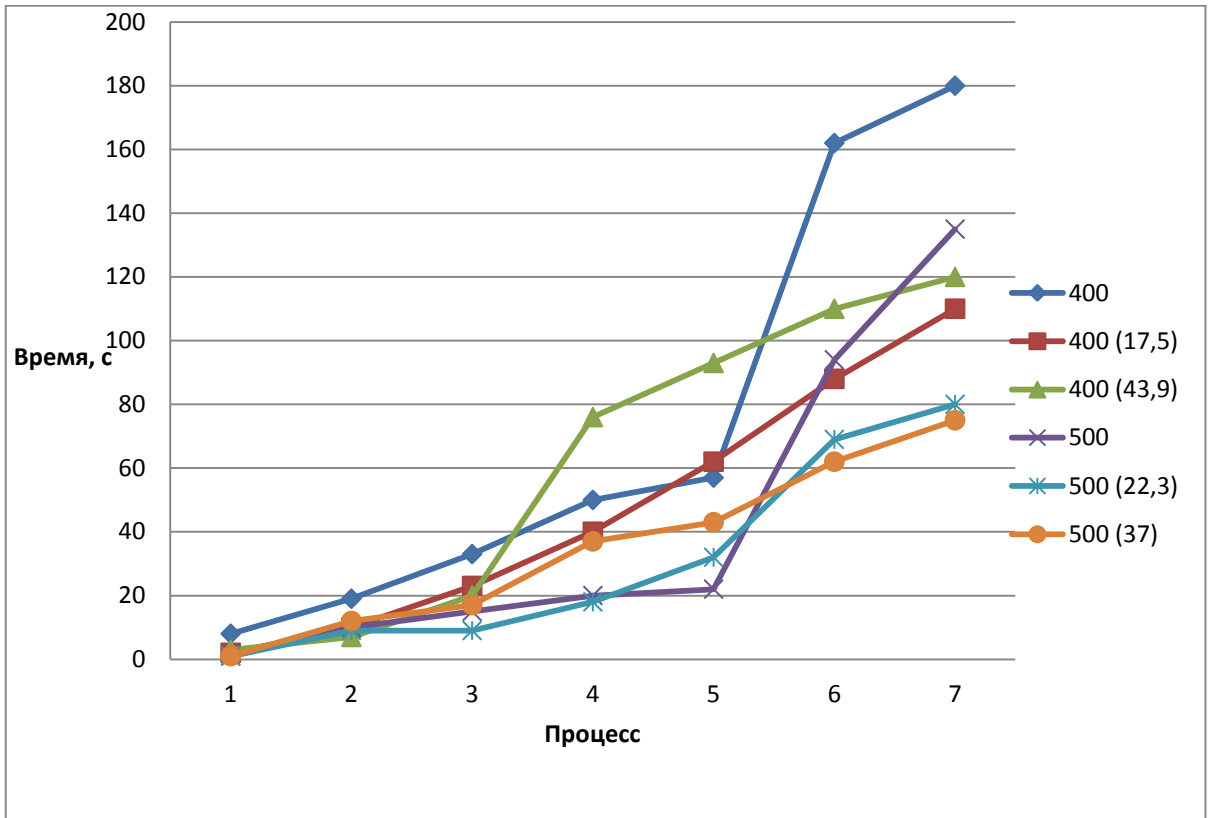


Рисунок 17 б – Многостадийный процесс горения ЛГМ

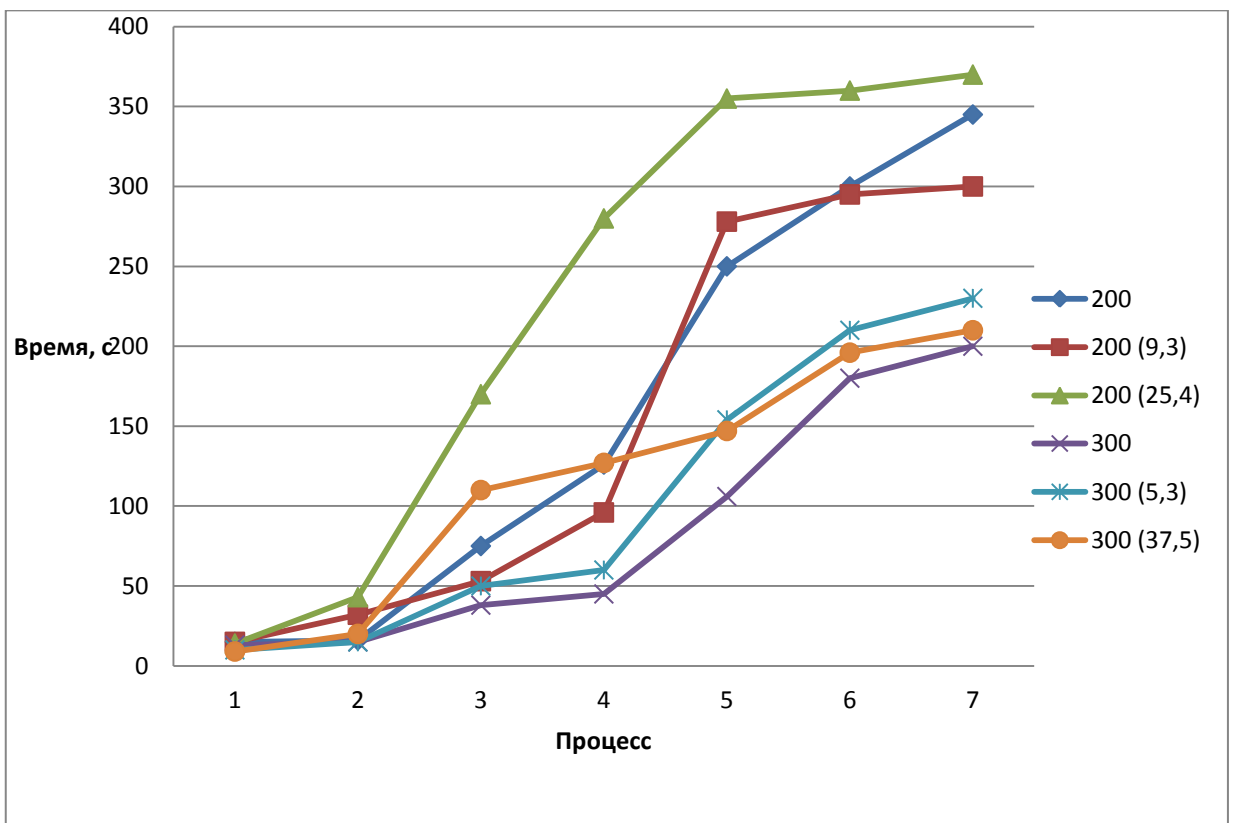


Рисунок 18 а – Многостадийный процесс горения ЛГМ

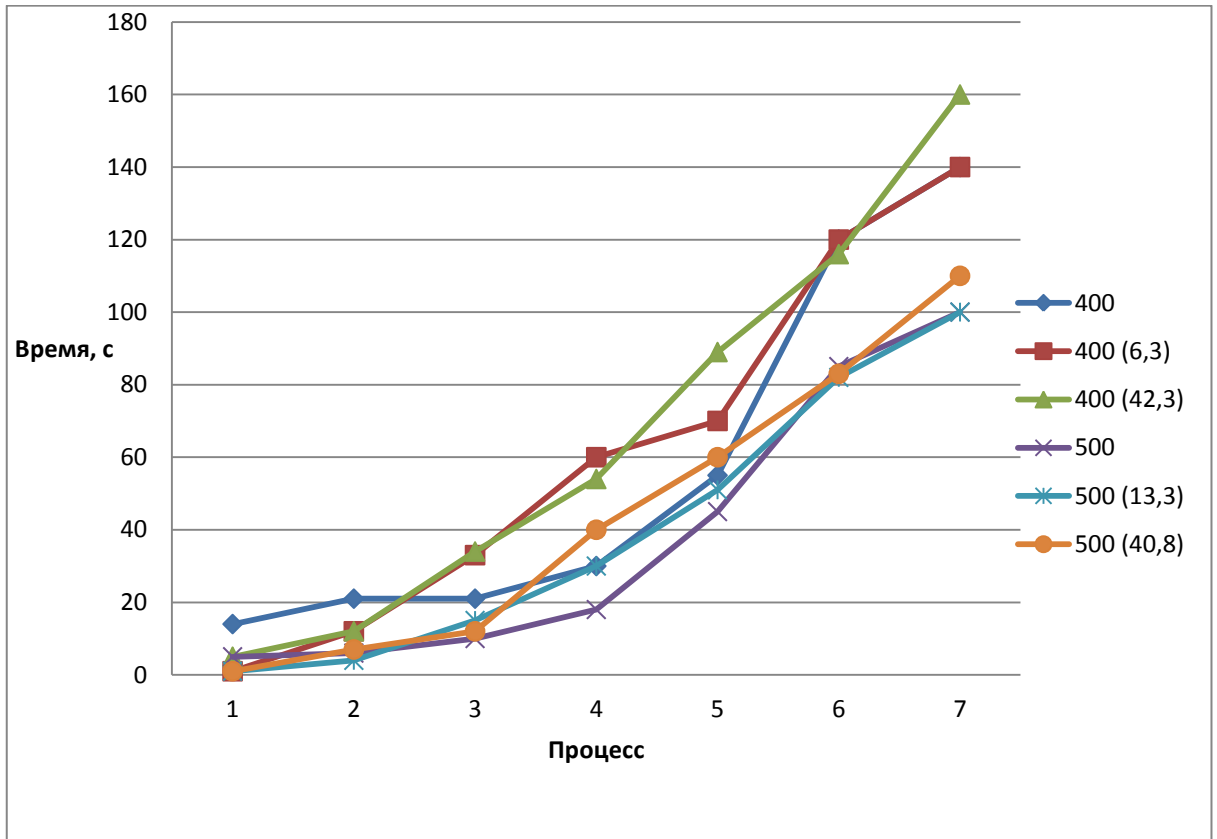


Рисунок 18 б – Многостадийный процесс горения ЛГМ

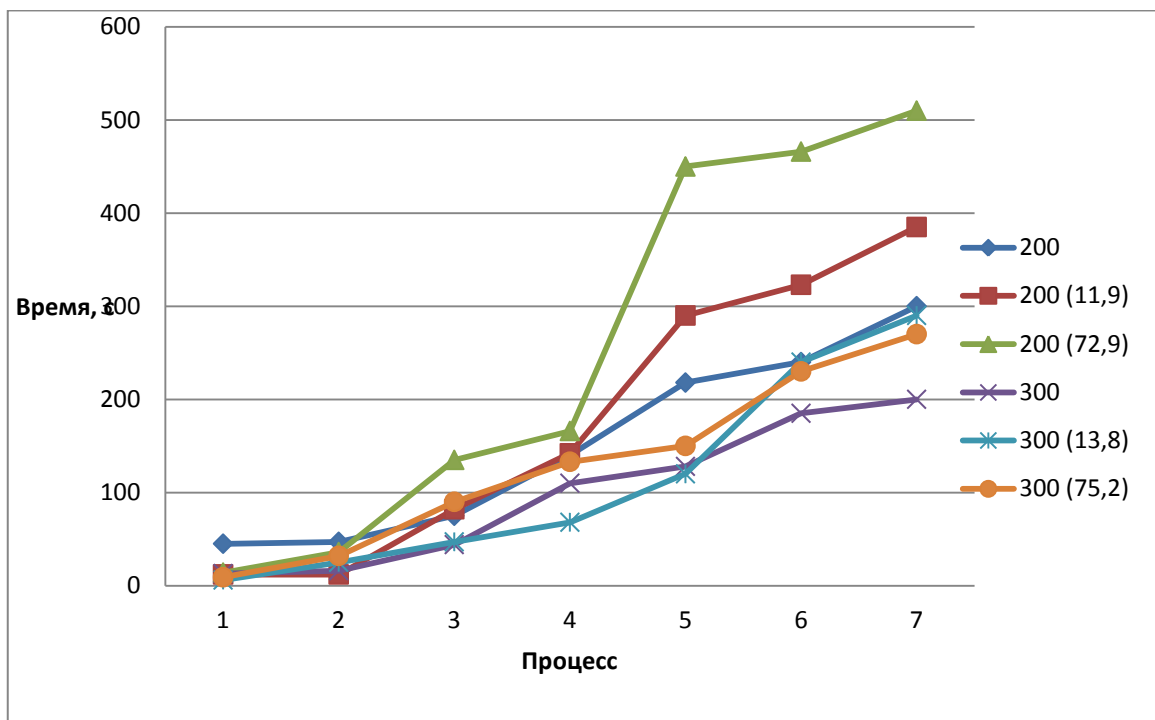


Рисунок 19 а – Многостадийный процесс горения ЛГМ

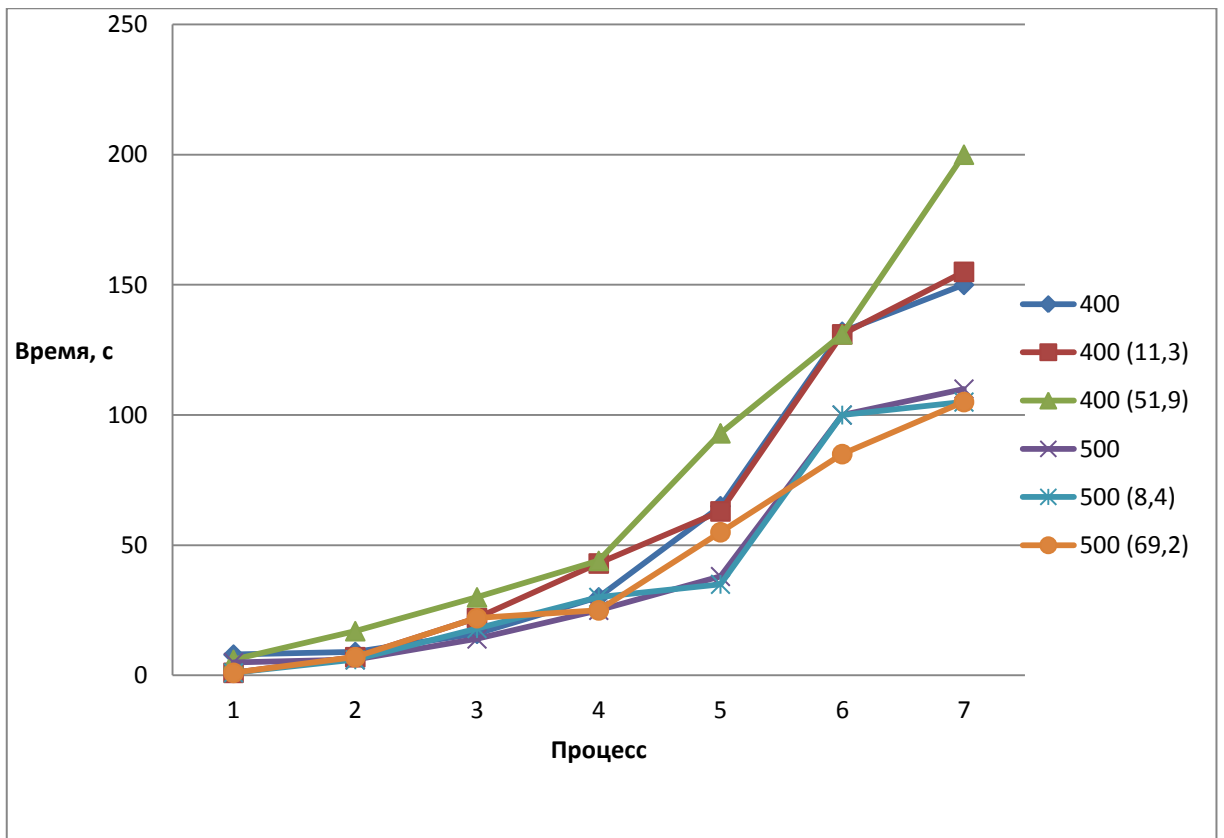


Рисунок 19 б – Многостадийный процесс горения ЛГМ

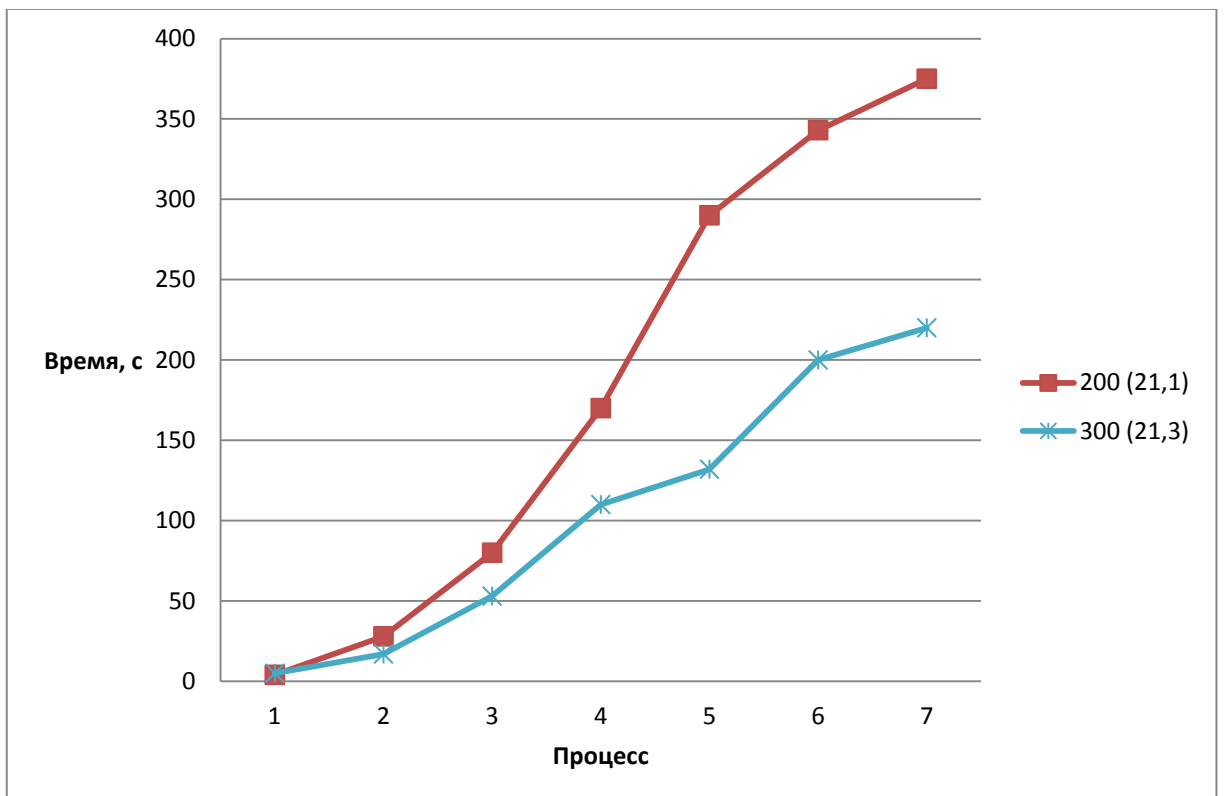


Рисунок 20 а – Многостадийный процесс горения ЛГМ

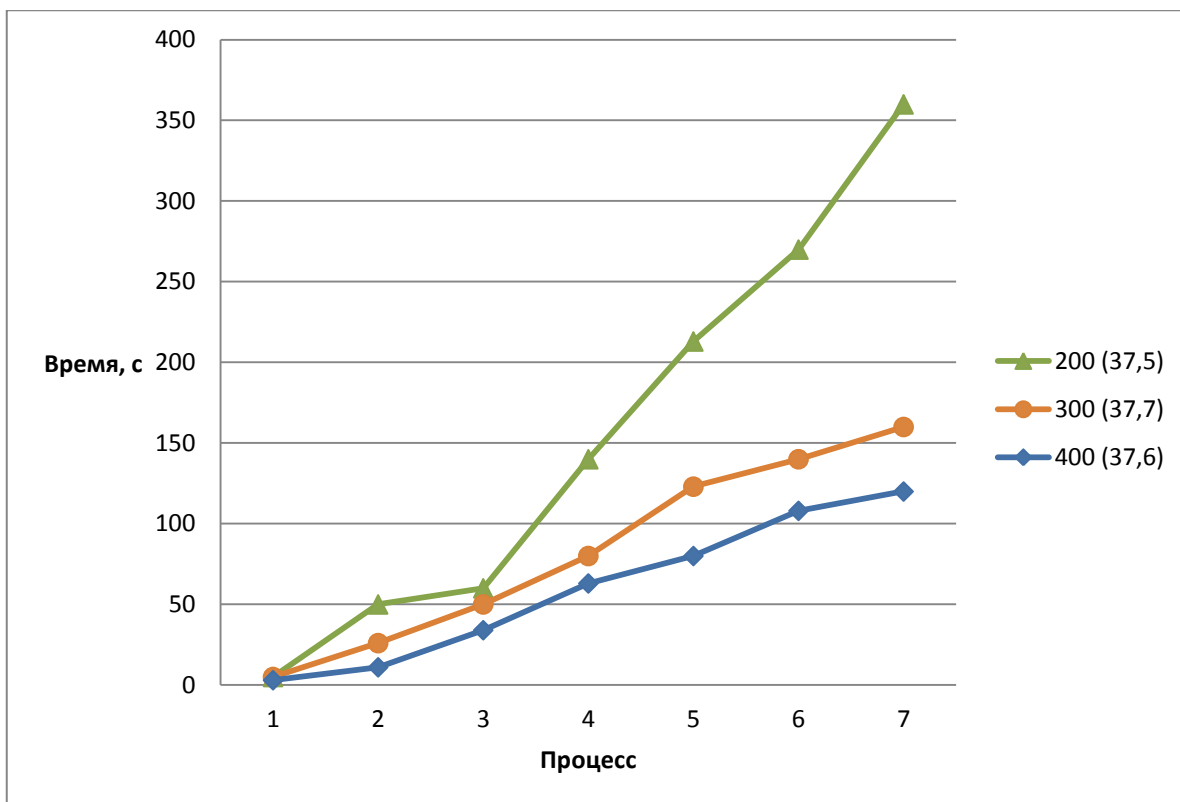


Рисунок 20 б – Многостадийный процесс горения ЛГМ

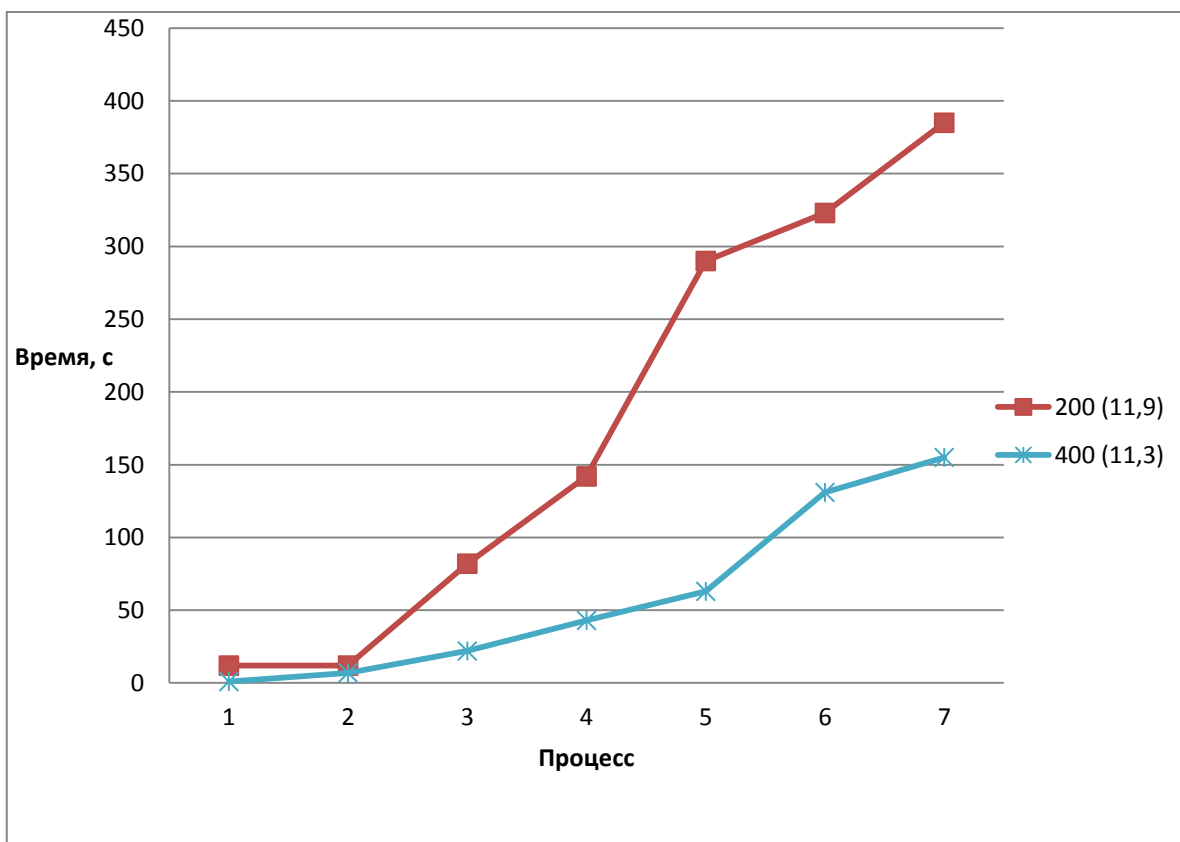


Рисунок 20 в – Многостадийный процесс горения ЛГМ

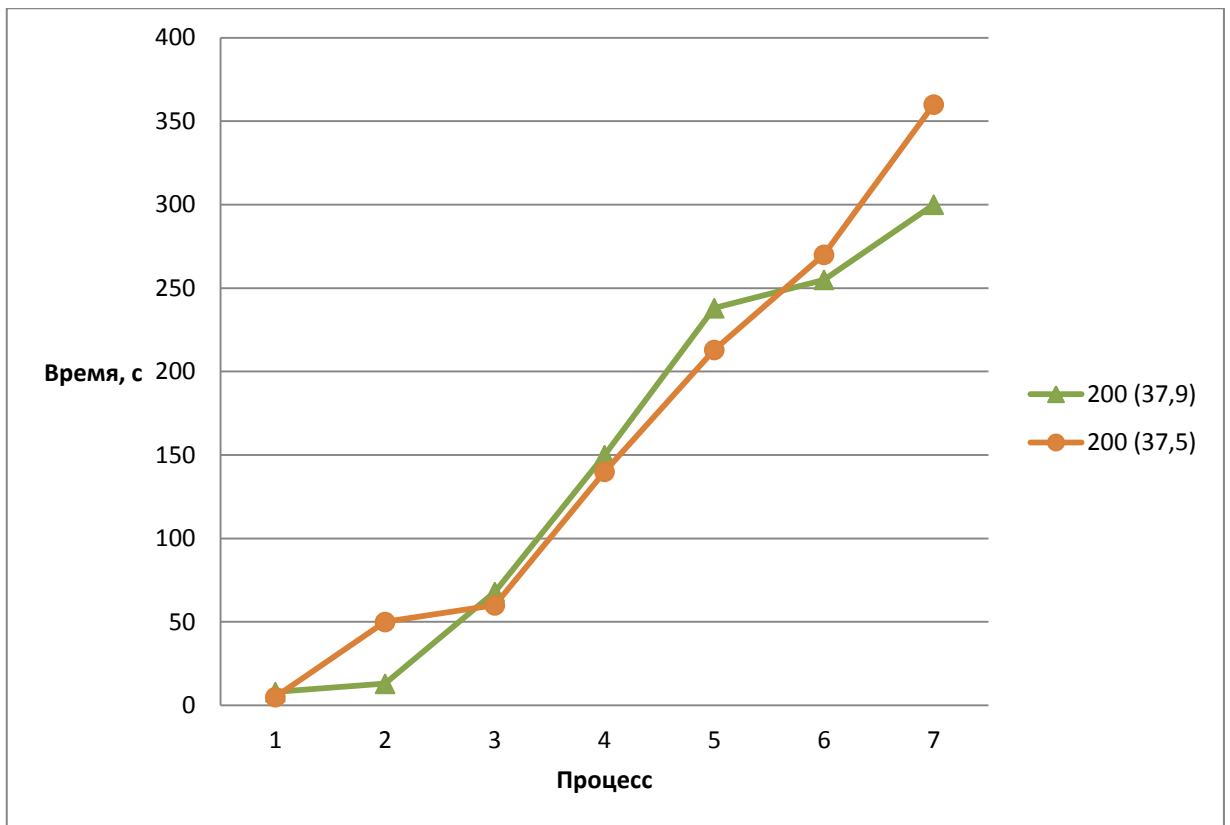


Рисунок 21 а – Многостадийный процесс горения ЛГМ

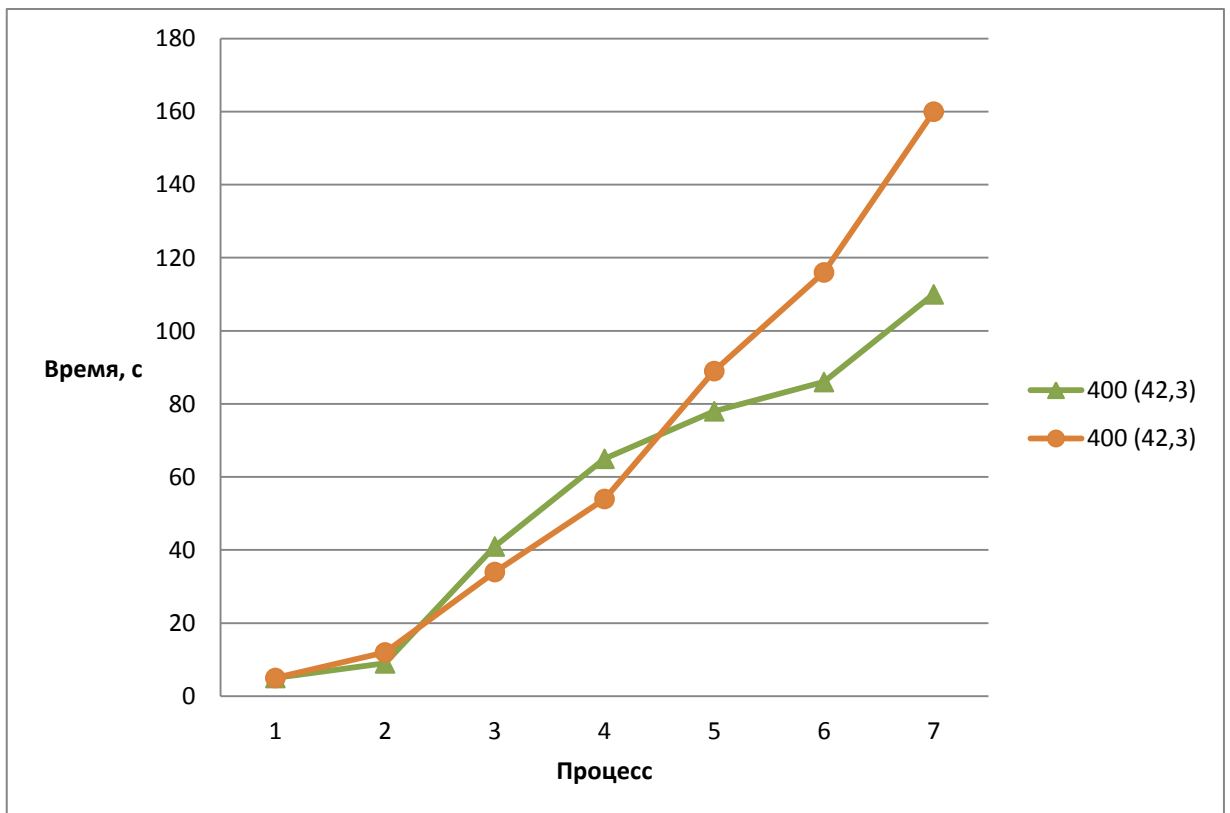


Рисунок 21 б – Многостадийный процесс горения ЛГМ

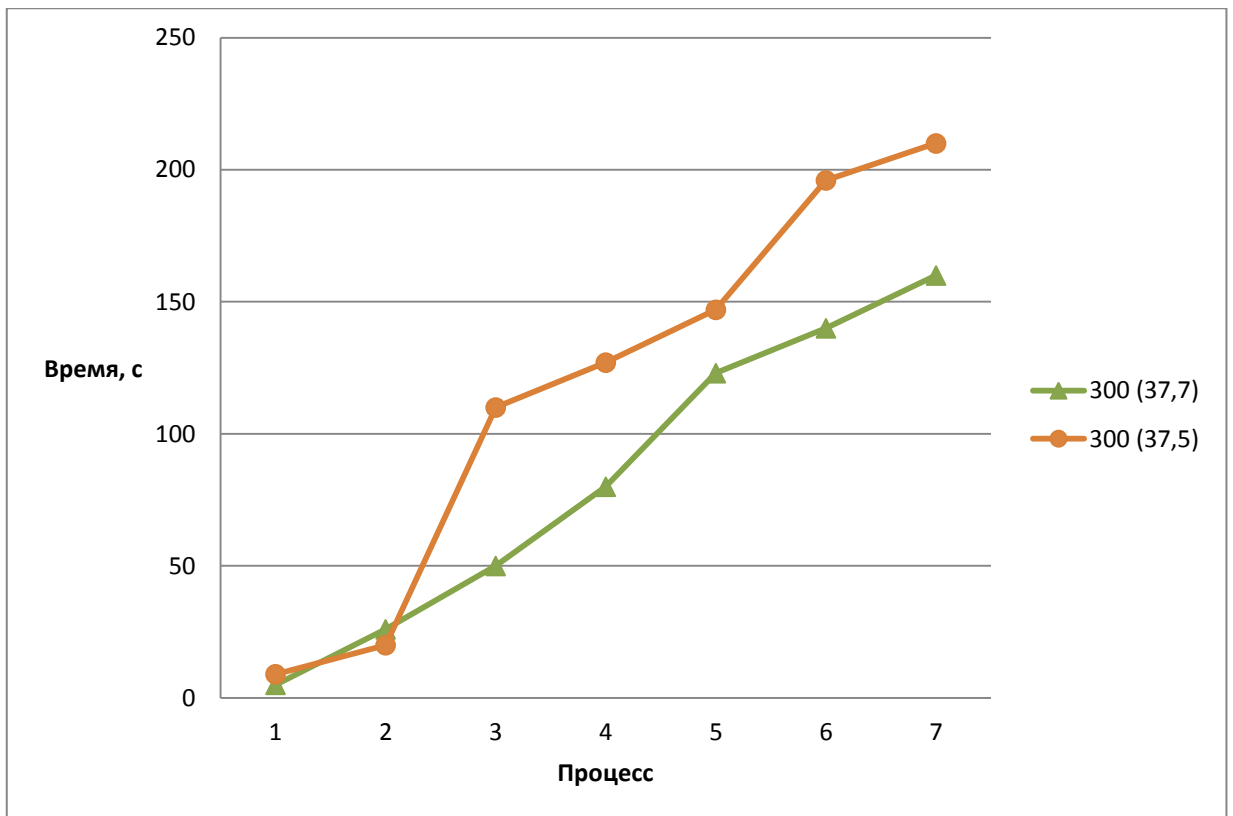


Рисунок 21 в – Многостадийный процесс горения ЛГМ

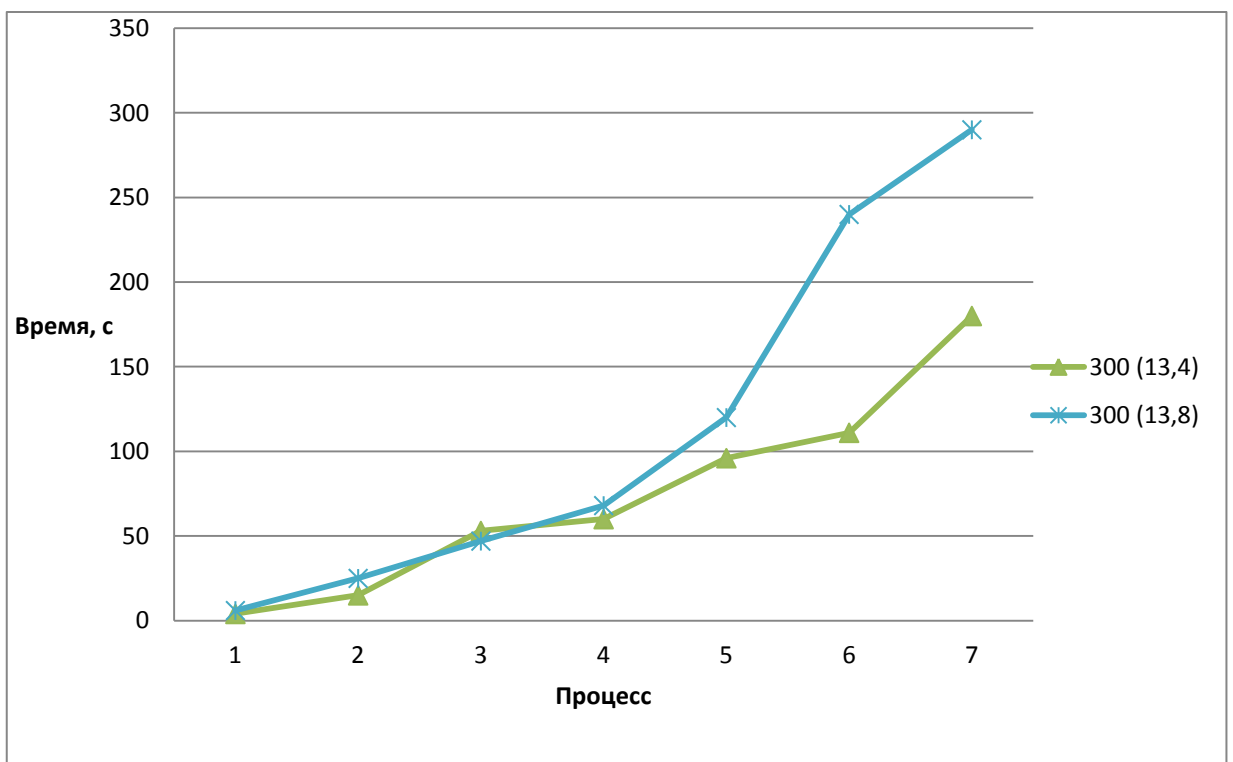


Рисунок 21 г – Многостадийный процесс горения ЛГМ



## **Выводы**

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) Полученные результаты подтверждают установившееся представление о явлении горения ЛГМ как о многостадийном процессе.
- 2) Наличие определенного количества влаги в ЛГМ опада не только смещает во времени наступление определенных этапов горения, но и влияет на существо физико-химических процессов, происходящих при нагревании ЛГМ.
- 3) Смещение во времени и по температуре некоторых этапов горения не позволяет выделить их видимые признаки и наступление события, а при горении ЛГМ сложно зафиксировать, либо их последовательность нарушается.
- 4) Попадание ЛГМ опада в зону высоких температур приводит к ускорению химических реакций и физико-химических процессов.
- 5) От типа ЛГМ из-за внутренней структуры материала и химического состава зависит режим горения, а также большое значение оказывает степень дисперсности материала, его плотность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения научной литературы и источников, отражающих практический опыт, накопленный при прогнозировании, предотвращении и тушении лесных пожаров, а также исследований, проведенных лично автором настоящей работы, сделаны следующее заключение и сформулированы выводы по работе.

Лесные пожары – стихийные явления по распространению огня по лесным площадям. Лесные пожары оказывают огромное влияние на экосистемы. С одной стороны, пожары нарушают естественное равновесие между компонентами биогеоценозов. С другой, оказывают большое влияние на процессы лесовозобновления.

Причины возникновения пожаров в лесу делятся на естественные и антропогенные. Основной причиной возникновения лесных пожаров является деятельность человека. Наиболее распространенными из естественных причин лесных пожаров на Земле обычно являются молнии.

Возможность возникновения лесных пожаров определяется степенью пожарной опасности – степенью готовности лесных горючих материалов к возгоранию и устойчивому горению. Для этого разработана «Шкала оценки лесных участков по степени опасности возникновения в них пожаров». Однако «Шкала» требует доработки и уточнения, которые особенно актуальны для удаленных лесных территорий. Настоящее исследование выполнено для уточнения пожарной опасности удаленных лесных территорий, и может быть полезным для совершенствования положений «Шкалы».

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

- 1) Лесные горючие материалы при естественной атмосферной влажности и достаточном времени для поглощения влаги и ее удаления ведут себя различно.

2) Естественные осадки, передающие избыточную влагу, не поглощаемую всем объемом лесных горючих материалов, могут нивелировать различия в поведении разных видов лесных горючих материалов в естественных условиях увлажнения и высыхания.

3) При воздействии тепла на влажные лесные горючие материалы первоначально удаляется внешняя влага.

4) Определение времени снижения влажности лесных горючих материалов до сухого пожароопасного состояния требует проведения дополнительных экспериментов.

5) Полученные результаты подтверждают установившееся представление о явлении горения лесных горючих материалов как о многостадийном процессе.

6) Наличие определенного количества влаги в лесных горючих материалах опада не только смещает во времени наступление определенных этапов горения, но и влияет на существо физико-химических процессов, происходящих при нагревании лесных горючих материалов.

7) Смещение во времени и по температуре некоторых этапов горения не позволяет выделить их видимые признаки и наступление события, а при горении лесных горючих материалов сложно зафиксировать, либо их последовательность нарушается.

8) Попадание лесных горючих материалов опада в зону высоких температур приводит к ускорению химических реакций и физико-химических процессов.

9) От типа лесного горючего материала из-за внутренней структуры материала и химического состава зависит режим горения, а также большое значение оказывает степень дисперсности материала, его плотность.

10) Установившаяся практика определения начала пожароопасного состояния лесов по времени после крайнего дождя должна быть дополнена данными по способности конкретного лесного горючего материала поглощать влагу при естественном увлажнении и отдавать ее при атмосферной сушке.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Абрамовских, А.А. Экспериментальное исследование процессов тепломассообмена, зажигания и горения лесных горючих материалов и торфа: автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук / А.А. Абрамовских. – Томск, 2008. – 24 с.;
2. Андреев, Ю.А. Влияние антропогенных факторов на возникновение лесных пожаров: На примере Красноярского Приангарья: автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / Ю.А. Андреев. – Красноярск, 1991. – 22 с.;
3. Ануфриев, И.С. Физическое и математическое моделирование ударно-волновых процессов, обеспечивающих интенсивное газодинамическое воздействие на фронт низового лесного пожара: автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук / И.С. Ануфриев. – Томск, 2009. – 20 с.;
4. Арделян, Н.В. Ионизация воздуха в предгрозовых атмосферных условиях / Н. В. Арделян, В. Л. Бычков, К. В. Космачевский, Д. С. Максимов // Успехи прикладной физики. – 2015. – Т. 3, № 6. – С. 553–558;
5. Бакшеева, Е.О. Послепожарное возобновление в среднетаежных лиственничниках Красноярского края и пути его улучшения: дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / Е.О. Бакшеева. – Красноярск, 2001. – 194 с.;
6. Барановский, Н.В. Теплофизические аспекты прогностического моделирования лесной пожарной опасности: автореферат дис. ... доктора физико-математических наук / Н.В. Барановский. – Томск, 2012. – 32 с.;
7. Бахарева, И.Ю. Изменение экологических условий на горях в ленточных борах Алтайского края в зонах сухой и умеренно-засушливой колючей степи: автореферат дис. ... кандидата биологических наук / И.Ю. Бахарева. – Барнаул, 2009. – 18 с.;
8. Бедрицкий, А.И. Лес и глобальные изменения климата / А.И. Бедрицкий, В.Х. Бердин // Лесной вестник / Forestry bulletin. – № 1. – 1999. – С. 34 – 41;

9. Богданов, В.В. Влияние низовых пожаров на органическое вещество почвы в криолитозоне Центральной Эвенкии: автореферат дис. ... кандидата биологических наук / В.В. Богданов. – Красноярск, 2010. – 18 с.;
10. Бойко, Д.М. Средообразующая и защитная роль естественных лесов Нижнего Поволжья: автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / Д.М. Бойко. – Волгоград, 2011. – 22 с.;
11. Бурлаков, П.С. Лесные пожары от гроз как геоэкологический фактор устойчивости светлохвойных лесов бассейна реки Сояна на Беломорско-Кулойском плато / П.С. Бурлаков, К.А. Хмара // Труды Карельского научного центра РАН. – 2011. – № 1. – С. 48–53;
12. Вакуров, А. Д. Лесные пожары на Севере: учебное пособие / А. Д. Вакуров. – М.: Наука; Лаборатория лесоведения АН СССР. – 1975. – 100 с.;
13. Валендик, Э.Н. Основы пожароуправления в бореальных лесах Евразии: учебное пособие / Э.Н. Валендик, В.Н. Векшин, Р. Ласко // Управление лесными пожарами на экорегиональном уровне. – М.: Алекс. – 2004. – 208 с.;
14. Васильева, А.В. Влияние природных пожаров на крупномасштабную изменчивость поля приземного СО в Северной Евразии: автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук / А.В.Васильева. – Москва, 2012. – 22 с.;
15. Вдовенко, М.С. Моделирование процессов распространения лесных пожаров на основе параллельных алгоритмов: автореферат дис. ... кандидата технических наук / М.С. Вдовенко. – Красноярск, 2009. – 24 с.;
16. Власюк, В.Н. Фитонцидные и ионизационные свойства основных древесных пород зеленой зоны г. Москвы: Автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / В.Н. Власюк. – М., 1970. – 21 с.;
17. Глаголев, В.А. Оценка и прогноз возникновения пожаров растительности на территории Еврейской автономной области: дис. ... кандидата географических наук / В.А. Глаголев. – Биробиджан, 2015. – 147 с.;
18. ГОСТ 17.6.1.01-83. Охрана природы (ССОП). Охрана и защита лесов. Термины и определения. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 6 с.;

19. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними: монография / А.М. Гришин. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1992. – 408 с.;
20. Груманс, В.М. Особенности организации и тактики тушения крупных лесных пожаров (КЛП): На примере Красноярского Приангарья: дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / В.М. Груманс. – Красноярск, 1999. – 222 с.;
21. Давыденко, Э.П. Тактика применения авиатанкеров для тушения лесных пожаров с воздуха: автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук в форме науч. докл. / Э.П. Давыденко. – Б. м. Б. г., 1999. – 27 с.;
22. Давыденко, Э.П. Тактика применения авиатанкеров для тушения лесных пожаров с воздуха: дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук в форме науч. докл. / Э.П. Давыденко. – Б. м. Б. г. – 27 с.;
23. Давыдова, И.Ю. Экологические особенности пирогенных почв в ландшафтах Рязанской Мещеры / И.Ю. Давыдова, Ю.А. Мажайский, Е.А. Давыдов // Вестник Рязанского государственного университета им. С.А. Есенина. – № 4 (45). – 2014. – С. 115 – 125;
24. Демидов, П.Г. Горение и свойства горючих веществ / П.Г. Демидов, В.С. Саушев. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1975. – 280 с.;
25. Дубровская, О.А. Влияние лесных пожаров на климатические и ландшафтные изменения в азиатской части России / О.А. Дубровская, А.А. Леженин, В.М. Мальбахов, В.А. Шлычков // Интерэкспо Гео-Сибирь. – том 3., № 2. – 2006. – С. 108 – 112;
26. Душа-Гудым, С.И. Системы противопожарного устройства лесов на территориях с естественным радиационным фоном и в условиях радиоактивного загрязнения: дис. ... доктора сельскохозяйственных наук в форме науч. докл. / С.И. Душа-Гудым. – Москва, 1998. – 77 с.;
27. Зисман, Г.А., Курс общей физики: Том 2. Электричество и магнетизм (5-е издание) / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. – М.: Наука, 1972. – 366 с.;

28. Иванилова, Т.Н. Вероятностно-множественные методы моделирования распространения лесных пожаров: автореферат дис. ... кандидата технических наук / Т.Н. Иванилова. – Красноярск, 1991. – 24 с.;
29. Калинин, К.К. Воздействие крупных пожаров на лесные фитоценозы и система лесохозяйственных мероприятий по ликвидации их последствий: На примере лесных пожаров 1921 и 1972 гг. в лесном Среднем Заволжье: дис. ... доктора сельскохозяйственных наук / К.К. Калинин. – Йошкар-Ола, 2002. – 449 с.;
30. Коморовский, В.С. Контроль и прогнозирование параметров крупных лесных пожаров как динамических процессов на поверхности Земли: автореферат дис. ... кандидата технических наук / В.С. Коморовский. – Красноярск, 2010. – 22 с.;
31. Коровин, Г.Н. Структура и механизм функционирования системы охраны леса от пожаров: дис. ... доктора сельскохозяйственных наук в форме науч. докл. / Г.Н. Коровин. – Б. м. – 1998. – 76 с.;
32. Котельников, Р.В. Разработка методов и технологий анализа данных в информационной системе дистанционного мониторинга лесных пожаров: автореферат дис. ... кандидата технических наук / Р.В. Котельников. – Пушкино, 2011. – 24 с.;
33. Котов, А.В. Коронный разряд и его использование в медицине и экологии / А.В. Котов, В.Л. Турубаров // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2014. – № 13. – С. 144-147;
34. Кузнецов, Ю.А. Защита леса от сельскохозяйственных палов в Забайкалье: автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / Ю.А. Кузнецов. – Красноярск, 1990. – 25 с.;
35. Кукавская, Е.А. Воздействие лесных пожаров на баланс углерода среднетаежных сосняков Енисейской равнины: автореферат дис. ... кандидата биологических наук / Е.А. Кукавская. – Красноярск, 2009. – 19 с.;

36. Курбатский, Н.П. Исследование количества и свойств лесных горючих материалов / Н.П. Курбатский // Вопросы лесной пирологии: сб. ст. –1970. – С. 5 – 30;
37. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена. Издание 5-е, переработанное и дополненное / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.;
38. Куценогий, К.П. Эмиссии лесного пожара в центральной Сибири / К.П. Куценогий, Э.Н. Валендик, Н.С. Буфетов, В.Б. Барышев // Интерэкспо Гео-Сибирь. – том 2, № 3. – 2012. – С. 89 – 91;
39. Леб, С. Статическая электризация / С. Леб; перевод с английского В.М. Фридкина. – М.:Л., Госэнергоиздат, 1963. – 408 с.;
40. Лобода, Е.Л. Физическое и математическое моделирование природных пожаров и применение методов инфракрасной диагностики для их исследования: дис. ... доктора физико-математических наук / Е.Л. Лобода. – Томск, 2012. – 286 с.;
41. Лоцилова, Н.А. Математическое моделирование воздействия заданного потока воды на динамику лесных пожаров и определение параметров, необходимых для успешной борьбы с пожарами: дис. ... кандидата физико-математических наук / Н.А. Лоцилова. – Нижний Новгород, 2014. – 123 с.;
42. Макаренко, Е.Л. Лесные пожары и их последствия в центральной экологической зоне байкальской природной территории / Е.Л. Макаренко // Интерактивная наука. – № 5. – 2016. – С. 9 – 12;
43. Масленников, Д.А. Особенности математического моделирования распространения лучистого теплового потока от очага горения при лесных пожарах на неоднородном рельефе: автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук / Д.А. Масленников. – Нижний Новгород, 2012. – 19 с.;
44. Матвеева, М.А. Влияние осушения и выборочных рубок на хвойно-лиственные болотные древостой: дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / М.А. Матвеева. – Екатеринбург, 1998. – 219 с.;



45. Матвеева, Т.А. Экологическая роль лесных пожаров / Т.А. Матвеева, А.М. Матвеев // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 10. – С. 107 – 109;
46. Медведев, С.С. Электрофизиология растений: учебное пособие / С.С. Медведев. – СПб: Изд-во Санкт-Петерб. ун-та, 1998. – 184 с.;
47. Минх, А.А. Ионизация воздуха и ее гигиеническое значение: монография / А.А. Минх. – М.: Медгиз, 1963. – 352 с.;
48. Молчанов, В.И. Влияние пирогенного фактора на особенности структуры и продуктивности луговых сообществ юго-западного Забайкалья: автореферат дис. ... кандидата биологических наук / В.И. Молчанов. – Улан-Удэ, 2012. – 21 с.;
49. Москальченко, С.А. Пожарная опасность и лесовозобновление на нарушенных лесных территориях Нижнего Приангарья: автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / С.А. Москальченко. – Красноярск, 2009. – 21 с.;
50. Озерова, М.И. Методы и алгоритмы мониторинга и прогнозирования риска природных пожаров на объектах деревообрабатывающей промышленности: дис. ... кандидата технических наук / М.И. Озерова. – Владимир, 2013. – 155 с.;
51. Ольховка, И.Э. Горимость лесов Курганской области и система мероприятий по совершенствованию охраны их от пожаров: дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / И.Э. Ольховка. – Екатеринбург, 2013. – 231 с.;
52. Перминов, В.А. Математическое моделирование возникновения верховых и массовых лесных пожаров: автореферат дис. ... доктора физико-математических наук / В.А. Перминов. – Томск, 2010. – 39 с.;
53. Подшивалов, В.А. Естественное возобновление на крупных гарях в сосновых лесах подзоны северной тайги Тюменской области: дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / В.А. Подшивалов. – Екатеринбург, 2000. – 128 с.;
54. Польш, Р.В. Учение об электричестве / Р.В. Польш; пер. с нем. Л.А. Тумермана. – Москва: Физматгиз, 1962. – 516 с.;

55. Померанцев, В.В. Основы практической теории горения. Издание 2-е, переработанное и дополненное / В.В. Померанцев, К.М. Арефьев, Д.Б. Ахмедов. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 312 с.;
56. Пряхин, В.Д. Пригородные леса: научное издание / В.Д. Пряхин, В.Т. Николаенко. – М.: Лесная промышленность, 1981. – 248 с.;
57. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда: учебное руководство / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1992. – 536 с.;
58. Reiter, R. Phenomena in Atmospheric and Environmental Electricity / R. Reiter. // Amsterdam: Elsevier. – 1992. – 541 p.;
59. Энциклопедия лесного хозяйства в 2-х томах. Том 1. / С.А. Родин и др. – Москва: Изд-во ВНИИЛМ, 2004. – 840 с.;
60. Рубцов, А.В. Анализ пожаров в Сибири по спутниковым данным и разработка модуля пожаров в модели динамики растительности: автореферат дис. ... кандидата технических наук / А.В. Рубцов. – Красноярск, 2011. – 20 с.;
61. Самбуу, А.Д. Воздействие лесных пожаров в туге на биоразнообразие / А.Д. Самбуу, А.М. Лайдып // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 6. – С. 83 – 84.
62. Самсоненко, С.Д. Эколого-лесоводственные факторы пожароустойчивости лесных экосистем Верхне-Обского массива: автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / С.Д. Самсоненко. – Барнаул, 2009 – 20 с.;
63. Сивухин, Д.В. Общий курс физики. В 5-ти томах: Том 3. Электричество / Д.В. Сивухин. – М.: Наука, 1979. – 703 с.;
64. Софронов, М.А. Система пирологических характеристик и оценок как основа управления пожарами в бореальных лесах: диссертация ... доктора сельскохозяйственных наук в форме науч. докл. / М.А. Софронов. – Красноярск, 1998. – 60 с.;
65. Танков, Д.А. Лесные пожары и их влияние на древесно-кустарниковую растительность в лесах Оренбуржья: дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / Д.А. Танков. – Оренбург, 2014. – 200 с.;

66. Фатеев, В.Н. Физическое и математическое моделирование усиления ударных волн в ударных трубах: автореферат дис. ... кандидата физико-математических наук / В.Н. Фатеев. – Томск, 2012. – 22 с.;
67. Федеральный закон от 21.12.1994 № 69-ФЗ (ред. от 30.12.2015) «О пожарной безопасности»;
68. Фейнман, Р. Фейнмановские лекции по физике: Том 5: Электричество и магнетизм / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М. Издательство: Мир, 1965. – 291 с.;
69. Филиппова, Е.В. Обоснование технологии восстановления лесных водосборов, нарушенных пожарами и сплошными рубками, в условиях Забайкалья: автореферат дис. ... кандидата технических наук / Е.В. Филиппова. – Чита, 2010. – 23 с.;
70. Хитрин, Л.Н. Физика горения и взрыва: учебное пособие / Л.Н. Хитрин. – Изд-во Моск. ун-та, 1957. – 452 с.;
71. Цветков, П.А. О последствиях лесных пожаров в Сибири / П.А. Цветков // Хвойные бореальной зоны. – 2013. – Т. 31, № 5/6. – С. 10 – 14;
72. Цой, О.М. Природные факторы возникновения пожаров в лесах юга Дальнего Востока / О.М. Цой // География и природные ресурсы. – 2009. – № 2. – С. 43-49;
73. Швецов, Е.Г. Вероятностный метод спутникового обнаружения и контроля энергетических параметров пожаров в лесах Восточной Сибири: автореферат дис. ... кандидата технических наук / Е.Г. Швецов. – Красноярск, 2012. – 20 с.;
74. Шкуратов, А.В. Алгоритмическое и программное обеспечение бортового комплекса мониторинга лесопожарной обстановки: автореферат дис. ... кандидата технических наук / А.В. Шкуратов. – Томск, 2011. – 22 с.;
75. Щеглова, Е.Г. Влияние пожаров на формирование и жизнедеятельность лесных биоценозов / Е.Г. Щеглова, Ю.М. Нестеренко, В.М. Шабаев, Д.В. Шабаев // Бюллетень Оренбургского научного центра УрО РАН. – № 4. – 2012. – 15 с.;

76. Щеглова, Е.Г. Лесные пожары и их роль в формировании и развитии лесных биоценозов в пойменных лесах степной зоны / Е.Г. Щеглова, Ю.М. Нестеренко, В.М. Шабаев // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. – № 2 (40). – 2013. – С. 8 – 11;

77. Шубин, Д.А. Анализ горимости лесов и послепожарные последствия в сосняках Приобского водоохранного сосново-березового лесохозяйственного района Алтайского края: автореферат дис. ... кандидата сельскохозяйственных наук / Д.А. Шубин. – Екатеринбург, 2009. – 23 с.;

78. Эккерт, Р. Физиология животных, механизмы и адаптация / Р. Эккерт, Д. Рэнделл, Дж. Огастин. – М.: Мир, 1991. – 424 с.