

МИНИСТЕРСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ПО ДЕЛАМ ГРАЖДАНСКОЙ ОБОРОНЫ, ЧРЕЗВЫЧАЙНЫМ СИТУАЦИЯМ  
И ЛИКВИДАЦИИ ПОСЛЕДСТВИЙ СТИХИЙНЫХ БЕДСТВИЙ

**Академия Государственной противопожарной службы**

На правах рукописи



ЛЕ АНЬ ТУАН

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА  
НА ОБЪЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА**

Специальность: 05.26.03 – Пожарная и промышленная  
безопасность (технические науки, отрасль энергетика)

**ДИССЕРТАЦИЯ**

на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель:  
Заслуженный деятель науки РФ  
доктор технических наук, профессор  
Пузач Сергей Викторович

Москва – 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ.....	13
1.1. Классификация лесных пожаров .....	13
1.2. Характеристики лесных пожаров .....	26
1.3. Условия, способствующие возникновению и распространению лесных пожаров .	28
1.4. Особенности лесных пожаров во Вьетнаме .....	36
1.5. Математическое моделирование параметров лесных пожаров .....	51
1.6. Объекты энергетики Вьетнама, расположенные в лесных массивах .....	56
1.7. Особенности профилактики и тушения лесных пожаров во Вьетнаме.....	61
Выводы по первой главе.....	70
ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ .....	72
2.1. Полевая модель расчета тепломассообмена при пожаре.....	72
2.1.1. Основные положения и уравнения.....	72
2.1.2. Соотношения, необходимые для замыкания основной системы уравнений.....	77
2.1.3. Условия однозначности.....	81
2.2. Математическая модель расчета параметров движения кромки лесного пожара....	83
2.2.1. Основные упрощения термогазодинамической картины лесного пожара .....	83
2.2.2. Основное уравнение.....	84
2.2.3. Влияние температуры и давления атмосферы .....	86
2.2.4. Влияние влажности воздуха и лесной биомассы.....	87
2.2.5. Влияние направления и скорости ветра.....	91
2.2.6. Влияние осадков.....	92
2.2.7. Влияние свойств горючих материалов .....	93
2.2.8. Влияние крутизны склона .....	94

2.2.9. Влияние тушения пожара.....	95
2.2.10. Влияние типа пожара.....	96
2.2.11. Особенности применения предложенной математической модели .....	97
2.3. Математическая модель расчета плотности лучистого теплового потока от кромки лесного пожара .....	99
2.4. Методика расчета теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама .....	100
Выводы по второй главе .....	102
ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЛЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЬЕТНАМА .....	103
3.1. Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов .....	103
3.2. Исходные данные .....	105
3.3. Результаты экспериментов по горению древесной массы и их анализ.....	107
3.4. Результаты экспериментов по горению лиственно-древесной массы и их анализ .....	109
Выводы по третьей главе.....	112
4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА НА ОБЪЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА .....	113
4.1. Пожарная опасность пятнистых возгораний.....	113
4.1.1. Постановка задачи.....	113
4.1.2. Математическая модель.....	117
4.1.3. Исходные данные для численных экспериментов.....	118
4.1.4. Результаты и анализ численных экспериментов .....	121
4.2. Исходные данные для численных экспериментов по тепловому воздействию лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама .....	126
4.3. Результаты численных экспериментов по тепловому воздействию лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама и их анализ.....	138
4.4. Практические рекомендации по обеспечению безопасности объектов энергетики Вьетнама от воздействия лесных пожаров .....	146

Выводы по четвертой главе.....	150
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	152
ЛИТЕРАТУРА .....	154
Приложение. ....	167

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы исследования.** В период 2011 – 2020 гг., несмотря на экономический спад во всем мире, спрос потребления электроэнергии во Вьетнаме продолжает расти со средней скоростью 25,43% в год [1]. Всего за этот промежуток времени было введено в эксплуатацию 156 электростанций, из которых гидроэлектростанции (ГЭС) составляют – 43%, тепловые электростанции (ТЭС) – 45%, Ветряные электростанции (ВЭС) и другие – 12% [1].

Потребление коммерческой электроэнергии в 2020 г. более чем 2,55 раза превышает потребление в 2011 г. и равно 240 млрд кВт.ч [1].

В 2020 г. производство электроэнергии на ГЭС составило около 154,4 млрд кВт.ч, что равно 66% от общего объема производства электроэнергии [2, 3].

Из-за значительного экономического роста Вьетнама, количество электростанций быстро возрастает, чтобы удовлетворить потребности потребления в электроэнергии в промышленных зонах и общественном секторе.

Большое количество существующих и строящихся электростанций, а также линий электропередач находятся в лесных массивах.

Лесные пожары могут вызвать катастрофические разрушения жизненно важных для экономики и безопасности страны объектов энергетики (ОЭ), прекращение функционирования которых ведет к нарушению жизнедеятельности человека.

В последние годы количество лесных пожаров во Вьетнаме резко возросло из-за необычайной жаркой погоды, рекордное солнечное излучение является одной из основных причин. В период между 2011 и 2020 гг. произошло 3043 лесных пожаров, которые привели к полному уничтожению 19620 га леса. В результате ущерб превысил 58 млн. дол. США.

В 2019 году во Вьетнаме зафиксировано 573 лесных пожаров, при этом уничтожено 3952 га леса, что эквивалентно 11 млн. 208 тыс. дол. США [4].

Большое количество людей было эвакуировано, а многие из них были госпитализированы из-за шока и вдыхания дыма. Число погибших от лесных пожаров, зафиксированных во Вьетнаме за последние 10 лет, составляет 2 человека.

Кроме экологического ущерба, тепло, выделяемое при лесных пожарах, оказывает большое влияние на бесперебойное функционирование ОЭ. Согласно статистическим данным, за последние 10 лет на ТЭС произошло 82 пожара, на ГЭС - 17 пожаров и на трансформаторных подстанциях – 95 пожаров, из которых около 17% связаны с лесными пожарами [5]. Эти факты показывают актуальность разработки противопожарных мероприятий по защите ОЭ от воздействия лесных пожаров во Вьетнаме.

Лесные пожары могут вызвать катастрофические разрушения жизненно важных для экономики и безопасности страны ОЭ, прекращение функционирования которых ведет к нарушению жизнедеятельности человека.

Сложность расчета теплового воздействия лесных пожаров на ОЭ (ГЭС, ТЭС, электроподстанции, линии электропередач и т.п.) заключается в многофакторности и нелинейности задачи, а также в неопределенности исходных данных по теплофизическим и химическим свойствам лесных горючих материалов Вьетнама.

Поэтому развитие методов математического моделирования лесных пожаров во Вьетнаме, учитывающих их пирологические и метеорологические характеристики, для обеспечения пожарной безопасности ОЭ Вьетнама является **актуальной задачей**.

**Степень разработанности темы исследования.** Существенный вклад в теоретические и экспериментальные исследования лесных пожаров внесли российские и зарубежные ученые: Гришин А.М., Доррер Г.А., Телицын Г.П., Валендик Э.Н., Софронов М.А., Ле Д.Х., Никищенко Н.Г., Басманов А.Е., Коровин Г.Н., Серебренников П.П., Фуряев В.В., Курбатский Н.П., Матвеев П.М., Davis K.P., Вугам G.M. и др.

Математическое моделирование лесного пожара, как неконтролируемого горения, является нерешенной до конца задачей [6-12]. При развитии пожара в

условиях трехмерных нестационарных тепломассообменных процессов изменяется химический состав газовой среды, образуются существенные неоднородности полей параметров газовой среды, что приводит к сложности расчета характеристик турбулентного конвективного тепломассообмена и лучистого теплопереноса с учетом протекания химических реакций.

В общем виде для определения характеристик природных пожаров решаются трехмерные нестационарные дифференциальные уравнения газодинамики и тепломассообмена [6, 10]. Однако, как и при решении метеорологических задач прогноза погоды недостаточное быстродействие современных ЭВМ и ряд других факторов (несовершенство моделей турбулентности, неоднородность распределения горючей нагрузки по местности и т.д.) делают невозможным достоверно спрогнозировать развитие лесного пожара в трехмерной нестационарной постановке задачи.

Поэтому разрабатываются полуэмпирические и эмпирические инженерные методы расчета [13-53], позволяющие с достаточной для практических целей точностью определять параметры природных пожаров. Однако, из-за неопределенности и неоднородности теплофизических и химических свойств горючих лесных материалов, а также влияния метеорологических факторов вышеуказанные методы требуют модификации с учетом конкретных условий развития пожара или привлечения дополнительной экспериментальной информации.

Таким образом, для разработки метода расчета теплового воздействия лесного пожара на ОЭ Вьетнама необходимо учитывать теплофизические и химические свойства лесных массивов, примыкающих к ОЭ, а также особенности метеорологических условий Вьетнама.

**Объектом исследования** в диссертации являются тепломассообменные процессы, протекающие на кромке лесного пожара и являющиеся основой для выполнения расчета его теплового воздействия на объекты энергетики Вьетнама.

**Предметом исследования** является предотвращение воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама.

**Целью диссертационной работы** является обеспечение пожарной безопасности объектов энергетики Вьетнама от теплового воздействия лесных пожаров.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие **основные задачи:**

- провести анализ литературных источников по математическому моделированию параметров лесных пожаров с учетом особенностей климатических условий Вьетнама;

- разработать математическую модель расчета скорости распространения и теплофизических параметров кромки лесного низового пожара, учитывающую совместное воздействие основных пирологических и метеорологических характеристик лесного пожара;

- разработать математическую модель теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама;

- провести экспериментальные исследования параметров процесса выгорания древесной и лиственной массы характерных для лесов Вьетнама деревьев;

- выполнить численные эксперименты по определению теплового воздействия лесного пожара на характерные объекты энергетики Вьетнама;

- разработать научно-обоснованные рекомендации по предотвращению воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама с учетом их объемно-планировочных и конструктивных решений.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

- разработана многофакторная математическая модель и методика расчета скорости движения кромки лесного низового пожара на местности с неоднородной растительностью и ландшафтом при учете негорючих участков поверхности;



- получены экспериментальные зависимости удельной массовой скорости газификации и удельного коэффициента выделения монооксида углерода от времени испытаний образцов древесной и лиственной массы пяти наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама, позволяющие проводить расчет расчета теплового и токсического воздействия лесных верховых пожаров на объекты энергетики Вьетнама;

- разработана и верифицирована на экспериментальных данных математическая модель расчета безопасного расстояния от пятнистого возгорания для персонала и горючих веществ, находящихся на территории объекта энергетики.

**Теоретическая значимость работы** заключается в совершенствовании научных основ обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики Вьетнама при тепловом воздействии на них лесного пожара. Предложенная методика расчета позволяет впервые учесть реальные параметры горения стволов и кроны наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама.

**Практическая значимость работы** заключается в том, что с помощью предложенной методики расчета более надежно, чем с использованием существующих методик, определяется безопасное расстояние от кромки лесного массива до объектов энергетики Вьетнама с учетом их объемно-планировочных и конструктивных решений, климатических условий и пирологических характеристик лесных горючих материалов Вьетнама с целью обеспечения требуемого уровня пожарной безопасности.

**Методология и методы исследования:** методы расчета и анализа газодинамических и тепломассообменных процессов, происходящих при горении лесов; экспериментальный метод получения параметров процесса горения стволов и кроны деревьев; анализ и обобщение теоретических и экспериментальных данных.

**Положения, выносимые на защиту:**

- математическая модель и методика расчета скорости распространения и теплофизических параметров кромки лесного пожара, учитывающая совместное

воздействие основных пирологических и метеорологических характеристик лесного пожара;

- математическая модель и методика расчета теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама;

- результаты экспериментальных исследований параметров процесса выгорания древесной и лиственной массы наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама;

- математическая модель расчета безопасного расстояния от пятнистого возгорания для персонала и горючих веществ, находящихся на территории объекта энергетики;

- результаты численных экспериментов по определению теплового воздействия лесного пожара на характерные объекты энергетики Вьетнама;

- научно-обоснованные рекомендации по предотвращению воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама с учётом их объёмно-планировочных и конструктивных решений, а также основных пирологических и метеорологических характеристик лесного пожара.

**Достоверность** полученных результатов подтверждается использованием апробированных методов расчета и анализа газодинамических и тепломассообменных процессов, апробированных методов экспериментальных исследований процессов горения веществ и материалов, поверенных приборов и оборудования при проведении экспериментов, достаточно точным совпадением результатов расчетов с экспериментальными данными и теоретическими результатами, представленными в научной литературе.

**Апробация результатов.** Основные результаты работы были доложены на: V Всероссийской научной конференции и школе для молодых ученых «Системы обеспечения техносферной безопасности» (г. Таганрог, 2018), IX Всероссийской научнопрактической конференции для молодых ученых «Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных

ситуаций» (г. Воронеж, 2018), 27-я международная научно-техническая конференция «Системы безопасности – 2018» (г. Москва, 2018), «Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности» (г. Москва, 2018), X Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций» (г. Воронеж, 2019), VI Всероссийская научная конференция и школа для молодых ученых «Системы обеспечения техносферной безопасности» (г. Таганрог, 2019); XI Всероссийская научно-практическая конференция «Надежность и долговечность машин и механизмов» (г. Иваново, 2020), VII Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов» (г. Иваново, 2020), на объединенном заседании «Учебно-научного центра проблем пожарной безопасности в строительстве», «Учебно-научного комплекса процессов горения и экологической безопасности», «Кафедры инженерной теплофизики и гидравлики», «Кафедры пожарной безопасности технологических процессов» Академии ГПС МЧС России.

**Материалы диссертации реализованы при:**

- создании новой учебной дисциплины «Прогнозирование опасных факторов пожара» для обучения магистров и в проведении научных исследований по совершенствованию методики расчета пожарных рисков в Институте противопожарной безопасности МОБ Вьетнама;
- разработке нормативных документов для противопожарных требований Вьетнама и создании мер пожарной безопасности при лесном пожаре на ОЭ Вьетнама в Главном управлении пожарной безопасности и аварийно-спасательных служб Министерства общественной безопасности СРВ;
- разработке фондовых лекций, проведении лекционных, лабораторных и практических занятий со специалистами и бакалаврами Академии ГПС МЧС России по дисциплине «Прогнозирование опасных факторов пожара»;

- разработке и совершенствованию нормативных документов по определению безопасных расстояний от объектов энергетики в ТЭК ЗУЕН ХАЙ 3 до кромки лесного массива.

**Публикации:** по результатам диссертационного исследования автором опубликовано 14 научных работ (в том числе в 2-х изданиях, рекомендованных ВАК, и в 2-х изданиях, включенных в список цитирования международной базы “Chemical Abstracts”).

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. Содержание работы изложено на 172 страницах текста, включает в себя 54 рисунка, 22 таблицы. Список литературы включает 132 наименования.

# ГЛАВА 1. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА ОТ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

## 1.1. Классификация лесных пожаров

Лесные пожары являются особенно опасными из-за больших масштабов и запасов горючих веществ, а также из-за большой разрушительной силы.

Классификация лесных пожаров является одной из основополагающих сторон при разработке противопожарных мероприятий по защите ОЭ Вьетнама, а также при выборе методики тушения лесного пожара вблизи вышеуказанных объектов. Только при правильном определении интенсивности и характера возгорания в самом начале возникновения пожара, скорости движения его кромки можно избежать распространения пожара на большую площадь и предотвращения человеческих жертв и материального ущерба.

Лесные пожары классифицируются по таким основным параметрам [13]:

- площадь пожара;
- характер возгорания;
- скорость распространения;
- интенсивность горения (высота пожара отражает интенсивность горения).

По площади лесные пожары можно разделить на [13]:

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

В лесной службе лесные пожары по признаку горимости лесов принято разделять на следующие [13]:

- обычные пожары – пожары, площадь огня достигает до 25 га;
- крупные пожары - пожары, площадь огня равна более 25 га.

По температуре можно выделить следующие виды пожара [74]:

- верховой -  $900\div 1200^{\circ}\text{C}$ ;
- низовой -  $400\div 900^{\circ}\text{C}$ ;
- подземный -  $400\div 600^{\circ}\text{C}$ .

По характеру возгорания, в зависимости от уровня леса и участков территории, участвующих в распространении огня, лесные пожары можно разделить на [13]:

- низовые;
- верховые;
- полевые;
- подземные.

По данным работы [19] на территории России низовые пожары составляют 95-97% от всего количества лесных пожаров, верховые – 1-5%, подземные – примерно 1%.

Низовой пожар характеризуется распространением огня по напочвенному покрову. Горит лесной опад, состоящий из мелких ветвей, коры, хвои, листьев; лесная подстилка, сухая трава и травянистая растительность; живой напочвенный покров из трав, мхов, лишайников, мелкий подрост и кора в нижней части древесных стволов. В направлении движения ветра скорость движения низового пожара достигает 0,25-5 км/час. Высота пламени может достигнуть 2,5 м. В области пожара температура пламени составляет около  $700^{\circ}\text{C}$  и выше.

Низовые пожары делятся на беглые и устойчивые [13].

В случае беглого низового пожара сгорает верхняя часть напочвенного покрова, подрост и подлесок. Такой пожар распространяется с большой скоростью (180...300 м/ч (3...5 м/мин) [13]), 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.

Скорость распространения устойчивых низовых пожаров небольшая порядка 1÷3 м/мин [3]. В этом случае выгорает полностью живой и мертвый напочвенный покров, сильно обгорают корни и кора деревьев, полностью сгорают подрост и подлесок. Устойчивый тип пожара возникает преимущественно, начиная с середины лета.

По скорости распространения и интенсивности горения низовые пожары делятся [13, 19]:

- слабые (скорость не превышает 1 м/мин (высота - до 0,5 м));
- средние (от 1 м/мин до 3 м/мин (высота - до 1,5 м));
- сильного свыше 3 м/мин. (высота - свыше 1,5 м).

Фотографии низовых пожаров, характерных для России и Вьетнама, представлены на рисунках 1.1-1.3.

В случае верхового лесного пожара пламя охватывает листья, хвою, ветки и всю крону деревьев. При повальном верховом пожаре пламенем охвачен также травяно-моховой покров почвы и подрост. Скорость распространения кромки пожара находится в диапазоне 5-70 км/час, а температура может достигнуть 900-1200°C [13, 19].

Верховые пожары развиваются из низовых пожаров наиболее часто при засушливой ветреной погоде в лесу с деревьями, кроны у которых низко опущены, а также в разновозрастных насаждениях и при обильном хвойном подросте. Поэтому верховой пожар, как правило, является завершающей стадией низового пожара.

Типичной формой границ контура верхового пожара обычно является яйцевидно-вытянутая.

Верховые пожары, подобно низовым, делятся на беглые (ураганные) и устойчивые (повальные).

В случае беглого (ураганного) верхового пожара пламя распространяется главным образом с кроны на крону с большой скоростью от 7 до 70 км/ч [13]), оставляя иногда целые участки нетронутого огнем леса. Такой вид пожара возникает

при сильном ветре и опасен высокой скоростью распространения. Верховым пожарам наиболее подвержены хвойные молодняки, заросли кедрового стланика и дуба кустарниковой формы (весной при наличии сухих прошлогодних листьев), в горных лесах - все хвойные насаждения в верхней части крутых склонов (более 25°) и на перевалах [13]. Возникновению верховых пожаров в значительной степени способствуют засухи и сильные ветры.

При устойчивом (повальном) верховом пожаре образуется сплошная движущаяся стена огня, которая охватывает растительность от почвенного покрова до крон деревьев. Огнем охвачены не только кроны, но и стволы деревьев. При повальном пожаре лес выгорает полностью. Пламя распространяется со скоростью 0,3...1,5 км/ч [13].





Рисунок 1.1 – Фотографии типичных низовых пожаров в мире:

*a* – в Гомельской областях, Беларусь (01.07.2014)

*б* – в Калифорнии, США (18.08.2015)

*a**б*

Рисунок 1.2 – Фотографии типичных низовых пожаров во Вьетнаме:  
*a* – в деревне На-Нгой, район Ки-Сон, провинция Нге-Ан (20.03.2015)  
*б* – в деревне Лап-Динь, провинция Винь-Фук (15.02.2016)



Рисунок 1.3 – Фотография типичного низового пожара во Вьетнаме: в провинции Коанг-Тьен, район Сок-Сон, Ханой (17.12.2014)

В случае верховых пожаров искры, распространяющиеся от горящей кроны деревьев перед фронтом пожара, могут вызвать низовые пожары на расстоянии десятков метров или несколько сотен метров от фронта пожара (при ураганном пожаре).

По скорости распространения верховые пожары делятся [13, 19]:

- слабый до 3 м/мин.;
- средний до 100 м/мин.;
- сильный свыше 100 м/мин.

Фотографии верховых пожаров, характерных для России и Вьетнама, представлены на рисунках 1.4 – 1.6.



Рисунок 1.4 – Фотографии типичных верховых пожаров в России:

*а* – в Республике Хакасия (01.04.2017)

*б* – в Амурской области (07.06.2018)



Рисунок 1.5 – Фотографии типичных верховых пожаров во Вьетнаме:

*a* – на перевале Мимоза, город Да-Лат (18.02.2013)

*б* – в деревне Нам-Лок, район Нам-Дан, провинция Нам-Динь (12.06.2016)



Рисунок 1.6 – Фотография типичного верхового пожара во Вьетнаме:  
в деревне Ан-Минь-Бак, район У-Минь-Тхьонг, провинция Кьен-Занг (05.04.2015)

Подземные (почвенные) пожары в лесных массивах [13] наиболее часто вызваны возгоранием торфа из-за осушения болот. Такой тип пожаров часто является продолжением низовых или верховых лесных пожаров и может распространяться по торфяному слою, находящемуся в земле, на глубину до 50 см и более. Скорость распространения равна 0,1-0,5 м/мин и может составлять до 1 км/сутки [13].

В случае подземного пожара процесс горения происходит медленно, практически без доступа воздуха. При этом выделяется большое количество дыма, и образуются выгоревшие пустоты (прогары). Даже зимой под слоем снега может продолжаться длительное время горение. Поэтому подходить к очагу подземного пожара необходимо с большой осторожностью, постоянно прощупывая грунт шестом или щупом [13].

Подземные пожары обычно малозаметны и могут распространяться вглубь до нескольких метров. Из-за этого такие пожары имеют дополнительную опасность и очень плохо поддаются тушению, так как торф может гореть без доступа воздуха и

даже под водой. Для тушения таких пожаров необходима предварительная разведка [13].

Подземные (почвенные) пожары классифицируются по глубине выгорания [13]:

- слабый почвенный (подземный) пожар: глубина прогорания не превышает 25 см;
- средний почвенный (подземный) пожар: 25-50 см;
- сильный почвенный (подземный) пожар: более 50 см.

Фотография типового подземного пожара представлена на рисунке 1.7.

Полевые (степные) пожары [13] происходят на открытой местности при наличии сухой травы или созревших хлебов. Такие пожары являются сезонным явлением и чаще всего возникают летом по мере созревания трав (хлебов), редко весной и практически отсутствуют зимой. Скорость их распространения может достигать 20- 30 км/ч.

Полевые пожары такой классификации как интенсивность горения не имеют т.к. интенсивность горения сухой травы всегда одинакова.

Фотография типового полевого пожара приведена на рисунке 1.8.

Наиболее разрушительным пожаром является огненный шторм или смерч [14, 15].

Огненный шторм образуется из-за объединения возникших разрозненных очагов пожаров в один огромный очаг горения. Воздух над ним из-за нагрева и, вследствие этого уменьшения его плотности, поднимается вверх. На место горячего воздуха поступает холодный воздух с периферии очага, который также нагревается. Над очагом горения образуется конвективная колонка.

Поступление кислорода в область горения действует как кузнечные меха. Образуются устойчивые центростремительные направленные потоки, ввинчивающиеся против часовой стрелки от земли на высоту до пяти километров, что вызывает эффект «дымовой трубы» [14, 15]. Температура во всей области смерча достигает 600°C. Все предметы, попадающие в область огненного шторма, горят или плавятся. Из-за сильного ветра всё, что находится рядом со смерчем, «всасывается» в огонь. Этот процесс

происходит, пока не сгорят все горючие материалы. Скорость распространения огненного шторма может достигать 100 м/мин.



Рисунок 1.7 – Фотография типичного подземного пожара



Рисунок 1.8 – Фотография типичного полевого пожара

Примером огненного шторма является пожар, произошедший в г. Гамбурге (Германия) в июле 1943 года [15]. Британские ВВС при проведении операции «Гоморра» совершили массированный авианалёт на Гамбург ночь с 27 на 28 июля 1943 г.



27 июля в Гамбурге образовалось редкое сочетание факторов летней погоды: атмосферное давление было довольно высоким (порядка 101,5 кПа), летняя жара (при безоблачности и безветрии средняя дневная температура составляла 26°C), низкая относительная влажность (обычная влажность для Гамбурга в середине июля составляет 78%, а 27 июля она была всего лишь 30%). Таким образом, погодные условия подготовили повышенную пожароопасную обстановку в городе.

Температура воздуха в городе поднялась до 600°C. Образовался сверхнагретый наземный слой. По широким (15-20 м) улицам возникали, разгонялись и набирали силу ураганные огненные смерчи, сталкивались на перекрёстках дорог. Это приводило к образованию огненных вихрей, поднимающихся вверх.

Большинство небольших пожаров объединялись в несколько больших пожаров. Высокая интенсивность бомбёжки в сочетании с неблагоприятными метеорологическими условиями создала эффект «дымовой трубы» - образование мощных вертикальных потоков воздуха. Возник огненный смерч, который можно рассматривать как крупномасштабное атмосферное явление.

Таким образом, только при правильном определении класса пожара можно избежать распространения пожара на большую площадь и предотвращения человеческих жертв и материального ущерба.

Из анализа классификации лесных пожаров можно сделать выводы:

- наиболее интенсивное тепловое воздействие на ОЭ Вьетнама оказывают устойчивые (повальные) верховые лесные пожары;
- наибольшей скоростью распространения обладают беглые (ураганные) верховые лесные пожары.

## 1.2. Характеристики лесных пожаров

Лесные пожары имеют три основные характеристики, которые учитывают влияние всех видов факторов на развитие пожара [13, 16]:

- пирологическая;
- метеорологическая;
- поражающая.

Пирологическая характеристика лесных пожаров определяется двумя основными факторами [13, 16-18]:

- тип горючей нагрузки (растительности);
- влажность горючего материала.

Лесная пирология при решении практических задач использует подходы физики и химии горения, математические методы исследования и т.д.

Растительный покров леса при пожаре в общем случае представляет собой многофазную пористо-дисперсную среду, которая состоит из следующих компонентов [23, 24]:

- сухое органическое вещество;
- вода в жидко-капельном состоянии, связанная с этим веществом;
- конденсированный продукт пиролиза (кокстик);
- конденсированный продукт горения коксика (пепел);
- газовая фаза;
- дисперсные частицы сажи;
- зола;
- капли воды над очагом пожара.

От влажности растительности и почвы зависит скорость распространения пожара.

От вышеуказанных факторов в первую очередь зависит класс пожарной опасности леса и скорость распространения пожара.

К метеорологическим факторам лесных пожаров относятся такие характеристики как влажность воздуха на месте возникновения пожара, крутизна склона, скорость и направление ветра, а также учитывается влияние дождя на пожар.

Поражающая характеристика лесных пожаров определяется воздействием на человека, окружающую среду и материальные ценности следующих опасных факторов [87]:

- пламя и искры;
- тепловой поток;
- повышенная температура окружающей среды;
- повышенная концентрация токсичных продуктов горения и термического разложения;
- пониженная концентрация кислорода;
- снижение видимости в дыму.

К сопутствующим проявлениям опасных факторов пожара относятся [87]:

- осколки, части разрушившихся зданий, сооружений, строений, транспортных средств, технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- радиоактивные и токсичные вещества и материалы, попавшие в окружающую среду из разрушенных технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- вынос высокого напряжения на токопроводящие части технологических установок, оборудования, агрегатов, изделий и иного имущества;
- опасные факторы взрыва, происшедшего вследствие пожара;
- воздействие огнетушащих веществ.

В зависимости от развития лесной пожар имеет форму [19]:

- округлая форма образуется в случае равномерного распространения огня на относительно ровной местности при безветренной погоде при однородной растительности;

- неравномерная разносторонняя форма возникает на пересеченной местности при переменном ветре и разнородной растительности;

- эллиптическая вытянутая форма образуется на относительно ровной местности в случае ветра и однородных горючих материалах.

Анализ основных характеристик лесных пожаров показывает, что для моделирования теплового воздействия лесных пожаров на ОЭ Вьетнама необходимо, в первую очередь, знать тип горючей нагрузки (растительности) и влажность горючего материала лесного массива, с которым граничит или находится внутри рассматриваемый ОЭ.

### **1.3. Условия, способствующие возникновению и распространению лесных пожаров**

Основные причины загорания лесов известны. В 90-97% случаев виновником возникновения лесных пожаров является субъективный фактор - поведение человека, его небрежное отношение к пользованию в лесу огня во время отдыха или работы. До 90% лесных пожаров возникают по вине человека.

Пожары - это неконтролируемый процесс горения, влекущий за собой гибель людей и уничтожение материальных ценностей.

Другой из наиболее частых причин лесных пожаров являются грозовые разряды. Однако, только 7-8% возгораний вызваны молнией

Возникновение, распространение и развитие лесных пожаров зависят, в основном, от метеорологических и рельефно-ландшафтных условий, а также

пирологических характеристик лесной растительности. Это необходимо принимать во внимание, чтобы наиболее эффективно организовать противопожарную защиту от теплового воздействия пожара на ОЭ Вьетнама, пожаротушение, обеспечить безопасность пожарных и других участников тушения пожара.

Среди основных условий, определяющих возникновение и динамику пожара, можно выделить [10, 13, 16]:

- особенности горения лесных горючих материалов;
- условия погоды;
- влияние ветра;
- влажность воздуха;
- температура воздуха;
- рельеф местности;
- время года;
- организационные причины.

Лесной пожар, вызванный горением лесных горючих материалов, представляет собой совокупность термогазодинамических процессов, вызванных реакцией горения и протекающих в условиях высокой температуры, избытка кислорода воздуха и массы горючих материалов. В лесу в изобилии имеются горючие материалы и кислород воздуха. Источник высокой температуры (огня), который может вызвать горение, попадает извне. Это оставленный без присмотра и разведенный вне установленного места костер, горящий окурок или спичка, искры из выхлопных труб различных механизмов, выжигание остатков прошлогодней растительности и горючего хлама, другие источники огня, связанные с деятельностью человека, и разряды молний.

Процесс горения лесной растительности состоит из следующих фаз [10, 13, 16]:

- до температур, меньших  $120^{\circ}\text{C}$  - предварительный нагрев с подсушиванием горючих материалов и выделением водяных паров;

- при температурах в диапазоне  $120\div 260^{\circ}\text{C}$  – процессы высыхания горючих материалов и их газификации с выделением водяных паров, горючих веществ (кислот, смол);
- при  $315\div 425^{\circ}\text{C}$  происходит воспламенение выделенных горючих газов;
- пламенное горение с образованием дыма, токсичных и других газов, водяного пара ( $650\div 1095^{\circ}\text{C}$ );
- процесс обугливания и горения углей, происходящий до полного сгорания горючих материалов.

Лесные горючие материалы по условиям загорания можно разделить на две основные группы [10, 13, 16]:

- легковоспламеняющиеся и быстрогорящие материалы, такие как, сухая трава, отмершие листья, хвоя, мелкие ветки, сучья, некоторые кустарники, самосев и др., которые способствуют быстрому распространению огня и являются воспламенителями для медленно воспламеняющихся материалов [10, 13, 16];
- медленно воспламеняющиеся лесные горючие материалы, такие как, валежник, пни, нижние слои лесной подстилки, кустарники и деревья, которые при горении выделяют большое количество тепла и способствует развитию пожара) [10, 13, 16].

Метеорологические условия играют решающую роль на процесс распространения пожара. Например, дождь и высокая влажность уменьшают скорость распространения пожара и прекращают горение. В то же время, сильный ветер существенно увеличивает скорость распространения пожара [13].

Безветренная погода и снижение температуры воздуха, особенно в ночное время, ограничивают область горения и уменьшают его интенсивность. Наоборот, сухая жаркая погода создает наиболее благоприятные условия для возникновения и распространения огня.

Основное влияние на скорость распространения и интенсивность пожара оказывают скорость и направление ветра, влажность и температура атмосферы и лесных горючих материалов, их запас, воздуха и рельеф местности [13].

Горючие материалы под влиянием ветра высыхают, что увеличивает скорость распространения горения, особенно в случае верховых лесных пожаров. Снижение влажности горючих материалов приводит к возникновению новых очагов горения как от лучистого теплового потока, так и от переноса горящих частиц от фронта пожара.

Лесной пожар приводит к образованию локальных воздушных потоков, которые усиливают влияние существующего ветра на распространение пожара. Локальные воздушные потоки возникают из-за того, что воздух в области горения нагревается и поднимается вверх. Снаружи области горения на его место подсасывается свежий воздух, который способствует развитию процесса горения. Над областью горения образуется конвекционная колонка, в которой часто находятся горящие ветки, пучки хвои, листьев. Горящие частицы (в зависимости от скорости ветра и наклона конвекционной колонки) могут подниматься над деревьями, а затем опускаться на подстилку и деревья леса на расстоянии от 200÷300 м и более метров от основного очага горения и создавать новые очаги горения.

Влажность горючего материала является одним из наиболее важных факторов, влияющих на развитие и ход тушения пожара, так как горючий материал с повышенной влажностью, как и большинство видов «зеленого» горючего растительного материала, не горит.

В воздухе влага присутствует в виде водяных паров. Влажность воздуха существенно влияет на влагосодержание горючих материалов. Воздух днем обычно суше, чем ночью. Поэтому, как правило, при обычных условиях ночью пожары имеют меньшую интенсивность и распространяются медленнее, чем днем. Это происходит из-за того, что горючие материалы поглощают более интенсивно влагу из более влажного ночного воздуха. В большей мере, это относится к легким горючим материалам (сухая трава, хвоя, листва и другие).

Поглощение влаги горючим материалом, дующие вниз по склону ветры, более низкая ночная температура, а также другие элементы ночной погоды обычно облегчают работу пожарных. Поэтому пожары, которые вышли из-под контроля в дневное время, удается ночью потушить (ограничить распространение). Следует приложить все возможные усилия для полной локализации лесного пожара, чтобы на следующий день, когда создаются условия для его распространения, он не мог выйти за пределы локализованной площади. Это не означает, что следует отказаться от попытки тушения пожаров днем (когда тушится большинство пожаров). Однако если не представляется возможным потушить пожар в дневное время, основные усилия по борьбе с ним должны быть предприняты светлое время суток.

Характерный суточный цикл развития лесных пожаров и эффективность пожаротушения, примерно следующие [13]:

- с 9 до 21 час - максимальная интенсивность горения - тушить очень трудно [13];

- с 21 до 4 час - снижение интенсивности горения - эффективность тушения повышается [13];

- с 4 до 6 час (в основном беспламенное горение) - слабая интенсивность горения - лучшее время тушения [13];

- с 6 до 9 час - увеличение интенсивности горения - хорошее время для тушения [13].

При тушении лесных пожаров температура атмосферного воздуха является одним из основных факторов. Это вызвано тем, что нагретый от солнца горючий материал теряет влагу и горит быстрее, чем в случае отсутствия прогрева. Температура поверхности почвы также влияет на образование и движение воздушных потоков. Эта температура непосредственно воздействует и на пожарных, что может затруднить их работу.

Своеобразное влияние на распространение лесного пожара и образование воздушных потоков оказывает рельеф местности (особенно горный). Днем, по мере нагрева солнцем земной поверхности, происходит нагрев и подъем вверх слоев



воздуха, находящихся у земли, вверх по ложбинам и склонам. Вечером и ночью из-за охлаждения поверхности земли, воздушные потоки изменяют свое направление на противоположное и двигаются вниз по ложбинам и склонам.

Ветровые потоки также подчиняются той же закономерности, а именно, днем двигаются вверх по склону, ночью - вниз по склону. Это необходимо учитывать при планировании тушения лесного пожара.

В горных условиях скорость и направление распространения фронта лесного пожара зависят от расположения и крутизны склонов горы. Распространение пожара вверх по склону более легкое, чем вниз. Крутизна склона при ее увеличении увеличивает скорость движения пожара при условии, что ветер не способен изменить эту ситуацию. При движении вверх по склону горы огонь пожара находится на небольшой высоте от нижней части крон деревьев, что вызывает их подогрев, подсушивание и более быстрое воспламенение. Движение подогретого воздуха вверх по склону вызывает «тягу», увеличивающую скорость распространения пламени. Однако, при большой крутизне склонов горящие частицы материалов могут скатываться вниз, что приводит к образованию новых очагов горения.

Большое влияние на возникновение и интенсивность развития лесных пожаров оказывает время года.

Ранневесенние пожары (в большинстве случаев низовые беглые (пятнистые)) развиваются на сухой травянистой растительности со скоростью, определяемой скоростью и направлением ветра.

Весенне-летние пожары - это в большинстве случаев низовые пожары, при которых сгорает напочвенный покров и частично гумус лесной подстилки. Такие пожары являются более устойчивыми, чем ранневесенние. В случае определенных неблагоприятных условий (ветер, низко расположенные ветви крон хвойных пород, наличие подроста и др.) низовой пожар может перейти в верховой, который охватывает кроны деревьев и может полностью уничтожить насаждения.

Летние и летне-осенние низовые пожары являются более устойчивыми и могут уничтожить напочвенный покров, подлесок, весь слой гумуса и поверхностные корни древесных пород [13]. В случае торфяных почв огонь уходит вглубь, переходя в подземный, или может также перейти в верховой пожар.

Осенние лесные пожары обычно низовые и образуются, и распространяются только в дневное время [13]. Из-за низких температур воздуха и влажности в ночное время горение замедляется и частично прекращается.

Важной характеристикой возможности осуществления природного пожара является показатель пожарной опасности [13].

Показатель пожарной опасности (класс пожарной опасности КПО) по условиям погоды определяется на 12÷14 часов местного времени по формуле [13]:

$$\text{КПО} = \sum_1^n [t_{\text{в}} (t_{\text{в}} - t_{\text{р}})], \quad (1.1)$$

где  $t_{\text{в}}$  – температура воздуха, °С;  $t_{\text{р}}$  – точка росы, °С;  $n$  – количество дней без дождя.

В табл. 1.1 [13] приведена классификация классов пожарной опасности.

Таблица 1.1 – Шкала классов пожарной опасности

<b>КПО</b>	<b>Комплексный показатель</b>	<b>Пожарная опасность</b>
I	0...300	Отсутствует
II	301...1000	Малая
III	1001...4000	Средняя
IV	4001...10000	Высокая
V	Более 10001	Чрезвычайная

Показатель пожарной опасности местности позволяет достоверно определить влияние на возникновение и развитие лесного пожара состояния атмосферы (температура, влажность и давление), влажности лесной биомассы и наличия осадков.

Организационные причины, которые способствуют распространению лесных пожаров, в большинстве случаев следующие [13]:

- несвоевременное обнаружение лесных пожаров (20% пожаров обнаруживают в конце дня или на следующий день) [13];

- несвоевременное начало тушения (к тушению 15% пожаров приступают в конце дня или на следующий день) [13];

- недостаточное количество сил и средств, направляемых на тушение [13];

- непрофессиональное руководство организацией тушения [13].

Лесные пожары могут привести к возникновению катастрофических ситуаций, при которых пожары становятся неуправляемыми и катастрофическими (массовая гибель людей, уничтожение жилых домов, объектов энергетики, техники и других материальных ценностей). Условиями, способствующими образованию таких пожаров, являются [13]:

1) чрезвычайная пожарная опасность по условиям погоды;

2) наличие перед фронтом пожара легковоспламеняющегося горючего материала (сухая трава, другие травянистые растения, мелкие кустарники, подрост и т.п.);

3) порывистый ветер с меняющимся направлением и силой;

4) слияние мелких очагов горения в один и образование крупных пожаров.

Каждое из этих условий по отдельности может привести к катастрофическим последствиям. Например, резкое увеличение скорости и силы ветра может привести к резкому изменению направления распространения пожара независимо от уклона местности, расположения горючих лесных материалов и т.п.

#### 1.4. Особенности лесных пожаров во Вьетнаме

Лесные пожары ежегодно уничтожают несколько тысяч гектаров растительности во Вьетнаме. Многие из этих пожаров оказали негативное воздействие на безопасность людей, здоровье, региональную экономику, глобальное изменение климата и экосистемы в биомах, не подверженных пожарам.

Площадь Вьетнама составляет около 33 млн. га, из которых 13,9 млн. Га классифицируются как леса (10,4 млн. Га естественных лесов, 3,5 млн. Га лесных насаждений) [95].

Антропогенные причины растительных пожаров во Вьетнаме:

- сжигание сельскохозяйственных угодий и сжигание соломы и трав на рисовых полях - 20%;
- при охоте местными жителями используется огонь для подготовки добычи, отлова диких животных в лесах, также использование дыма для сбора пчелиного меда - 55%;
- использование древесины для изготовления товара из дерева, кулинарии и копчения - 15%;
- оставшиеся 10% лесных пожаров вызваны торговыми конфликтами из-за эксплуатации лесных ресурсов [96].

В настоящее время, согласно статистике лесных ресурсов, во Вьетнаме насчитывается около 6 миллионов гектаров горючих лесов, в том числе Сосновые леса (*Pinaceae*), Эвкалиптовые леса (*Eucalyptus Camaldulensis Dehnhardt*), Мелия ацедарах (*Chinaberry*), Лонган (*Dimocarpus longan*), Акация (*Acacia Auriculiformis*), Бамбуковые леса (*Bambusoideae*), Кайепутские леса (*Melaleuca leucadendra*) и т.д. С учетом этого все более сложная и непредсказуемая ситуация с изменением климата во Вьетнаме создает значительный потенциал лесным пожарам, увеличению их масштабов и последствий от них.

В каждой территориальной зоне Вьетнама свои климатические условия, поэтому лесной пожар может произойти в любое время года и в разных зонах.

Таблица 1.2 – Высокий риск возникновения лесных пожаров в различных регионах Вьетнама

Лесной регион	Янв.	Февр.	Март.	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
Северо-Восточный	+	+	+	+	-						-	+
Северо-Западный	+	+	+	+	-						-	+
Дельта «Красной реки»	+	+	+	+	-						-	+
Западно-Вьетнамское плато	+	+	+	+	-						-	+
Юго-Восточный	+	+	+	+	-						-	+
Дельта «Реки Девяти Драконов»	+	+	+	+	-						-	+
Северно-Центральный					-	+	+	+	-			
Центральное побережье			-	+	+	+	-					

Примечание: (+) Опасный засушенный месяц (-) Рисковый сухой месяц

В среднем высокий риск возникновения лесных пожаров в различных регионах (таблица 1.2) [105]:

- с декабря по апрель: Северо-Восточный регион, Северо-Западный регион, Дельта «Красной реки», Западно-Вьетнамское плато, Юго-Восточный регион, Дельта «Реки Девяти Драконов», Северно-Центральный регион, Центральное побережье:

- с июня по август с учетом сухого и жаркого западного ветра - начало сезона лесных пожаров в северной части Среднего Вьетнама;

- с апреля по июнь - сезон лесных пожаров в прибрежных провинциях центральной части среднего Вьетнама.

Существует довольно тесная связь между общим количеством лесных пожаров и деятельностью Эль-Ниньо. Вообще говоря, в период Эль-Ниньо среднее количество лесных пожаров во Вьетнаме намного выше, чем в период Ла-Нина.

Динамика лесных пожаров за 10 лет (2011-2020 гг.) представлена в таблице 1.3 и на рисунке 1.9. Изменение площади лесных пожаров по годам (2011-2020 гг.) показано на рисунке 1.10. [106].

Согласно статистике Департамента лесного хозяйства Вьетнама за последние 10 лет с 2011 по 2020 года, общее количество лесных пожаров составило 3043 случаев, площадь ущерба составила около 19 620 га, потеря денег оценивалась в миллионы долларов США в каждом году.

Особенно сложным был 2019 год. С 26 июня по 1 июля 2019 года крупные лесные пожары последовательно происходили в провинциях Нгеан, Ха-Тинь, Куанг-Бинь, Тхья-Тхиен-Хюэ, Куанг-Нам, Куанг-Нгай и Бинь-Динь. Только в провинции Ха Тинь в семи районах есть сотни очагов возгорания. Объективная причина объясняется продолжительной жаркой погодой с температурами до 43°C в Центральной прибрежной зоне в течение последних 12 дней июня. Высокие температуры в сочетании с влажностью ниже 30% позволяют легко загореться в лесу, а когда возник пожар, его очень трудно потушить.

Кроме того, лесные пожары также влияют на экологическую среду, на производство и на жизнь людей, в дополнение к ущербу, вызванному наводнениями, и в засушливых районах с острой нехваткой воды.

Таблица 1.3 – Динамика лесных пожаров во Вьетнаме в период 2011 - 2020 гг.

№ п/п	Годы	Число лесных пожаров	Площадь пожаров, га
1	2011	132	1598
2	2012	155	2091
3	2013	230	1156
4	2014	350	3157
5	2015	388	1076
6	2016	490	3320
7	2017	210	1118
8	2018	167	740
9	2019	573	3952
10	2020	348	1412
<b>Среднее</b>		304,3	1962

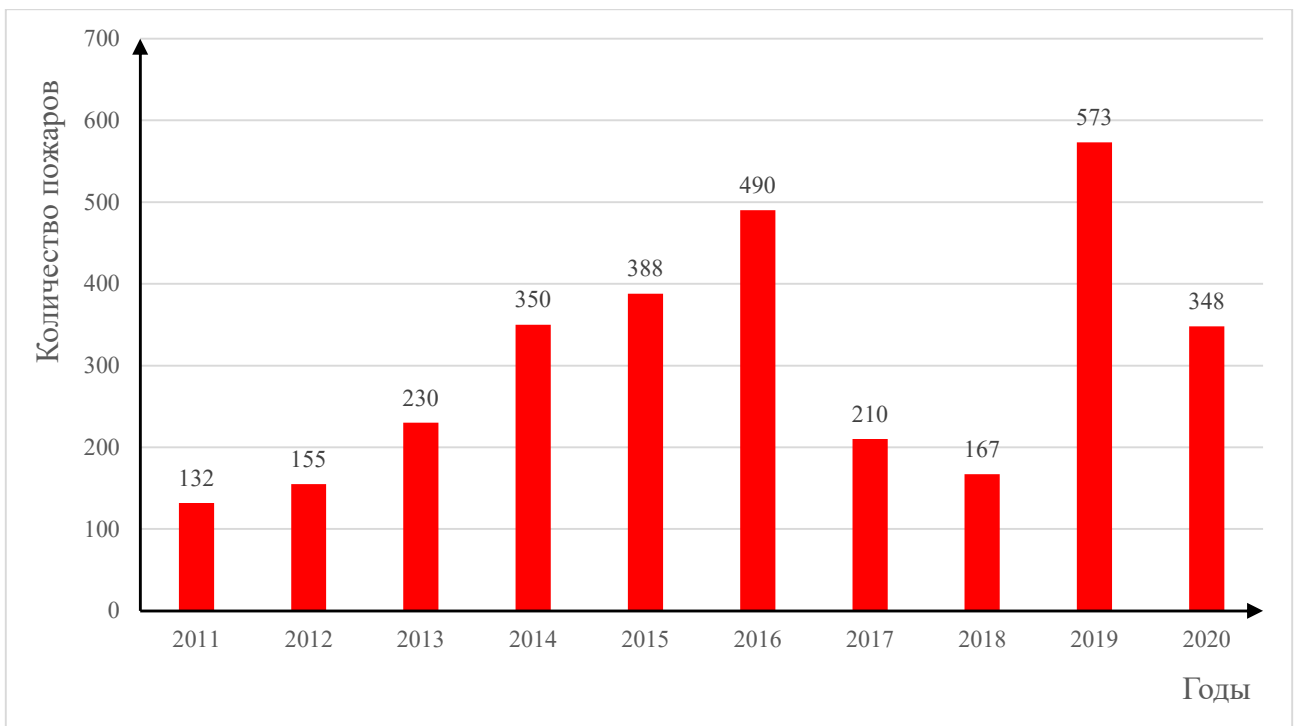


Рисунок 1.9 – Динамика количества лесных пожаров по годам

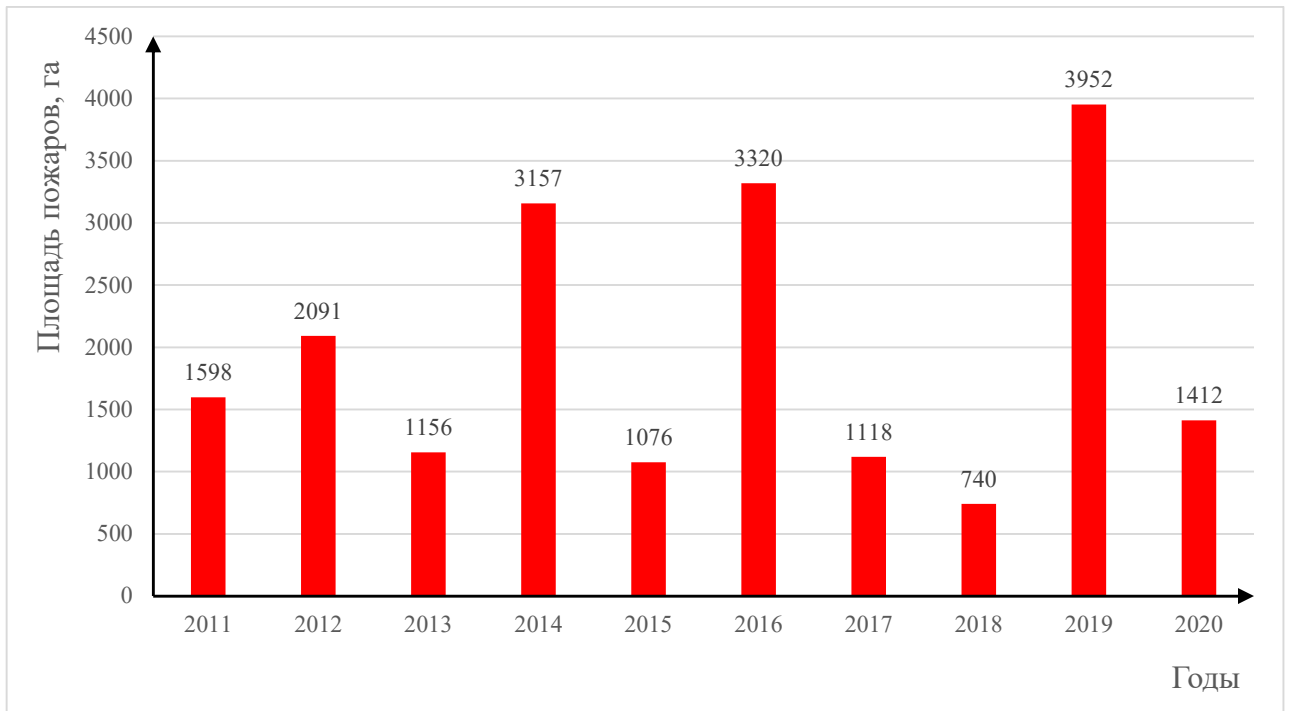


Рисунок 1.10 – Изменение площади лесных пожаров по годам

В последние годы местными властями и специализированными учреждениями уделялось большое внимание предотвращению и борьбе с лесными пожарами, поэтому ущерб от лесных пожаров значительно снизился. Согласно статистике Департамента лесного хозяйства Вьетнама за последние года: в 2020 году произошло 348 лесных пожаров по всей стране, около 1412 га поврежденных лесных площадей, что на 64% меньше, чем в 2019 году [106].

Основная причина лесных пожаров во Вьетнаме (более 90%) вызвана людьми и лишь несколько процентов - стихийными бедствиями.

Следующие особенности лесов и климатических условий Вьетнама приводят к частому возникновению лесных пожаров:

- легковоспламеняющиеся материалы - толстый слой лесной подстилки;
- высокая температура в сочетании с ветром вызывают быстрое распространение пламени.

Вышеуказанные особенности приводят к наиболее опасным видам лесных пожаров – верховым. Например, четыре лесных пожара произошли 28.06.2019 г. в



провинциях Тхыа-Тхиен-Хуэ и Ха-Тинь и охватили более 100 гектаров сосновых и акациевых лесов (рисунки 1.11 и 1.12) [107].

Трудности при пожаротушении лесов (рисунок 1.13) возникают из-за того, что не создаются противопожарные полосы, разрывы и т.п.

Большую роль на возникновение и распространение лесных пожаров играют характеристики влажности воздуха во Вьетнаме, существенно меняющиеся по месяцам.

*a**б*

Рисунок 1.11 – Фотографии лесных верховых пожаров в 28.06.2019

*a* – в провинции Тхья-Тхиен-Хуэ

*б* – в провинции Ха-Тинь



Рисунок 1.12 – Фотографии лесных верховых пожаров в 28.06.2019

6 – в провинции Тхья-Тхиен-Хуэ

2 – в провинции Ха-Тинь



Рисунок 1.13 – Фотографии пожаротушения лесных верховых пожаров 28.06.2019

а – в провинции Тхья-Тхиен-Хуэ

б – в провинции Ха-Тинь

Относительная влажность на Севере Вьетнама сильно варьируется в зависимости от сезона для каждого населенного пункта. На Севере Вьетнама, самый сухой период в ноябре и декабре, средняя влажность составляет около 60%. Самый влажный период - февраль и март, относительная влажность достигает 75%. В жаркое время года средняя влажность воздуха колеблется около 65 – 70% [108].

На Центральном побережье Вьетнама, влажность воздуха уникальна из-за влияния сухого ветра и дождливого сезона, зима - влажный сезон, среднее значение влажности составляет около 72%. Летом влажность очень низкая, особенно в июне и июле, средняя влажность составляет около 59%, минимальная может достигать 35%. Начиная с сентября влажность воздуха начинает расти.

В Южных провинциях Вьетнама разница между сухим и влажным сезонами существенна. В Южных и Центральных нагорьях в течение 4-х месяцев («сухих» месяцев с января по апрель) средняя влажность ниже 55%. В отличие от сухого сезона, во время сезона дождей в июле и августе влажность составляет около 70%. Самый сухой период - в марте, когда самая низкая влажность – 41%. Самый влажный период приходится на сентябрь (Юго-Восточный регион) и август (Центральное нагорье) с влажностью до 70 – 75% (таблица 1.4 и рисунок 1.14).

Изменение температуры воздуха по месяцам во Вьетнаме является существенным.

С апреля по август на Севере Вьетнама наступает жара, где самая высокая температура может превышать 40°C. С сентября по декабрь температура понижается, становится прохладно. Летние месяцы с мая по июль характеризуются высокими температурами и многими дождливыми днями. В апреле температура постепенно поднимается, достигая максимума в мае; снижается с сентября. В среднем температура колеблется около 35-40°C в течение летних месяцев.

Таблица 1.4 – Среднемесячная минимальная влажность (%) воздуха в областях Вьетнама [108]

Регион	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
Северный Мидлендс и горные провинции	64.0	64.1	63.2	63.2	62.0	65.7	67.4	66.9	63.4	61.9	60.6	59.8
Дельта Красной Реки	68.6	73.4	76.2	74.9	68.4	67.4	67.7	70.4	67.5	63.9	61.3	61.7
Центральное побережье	72.1	72.7	70.6	67.7	62.7	59.6	57.9	59.9	66.4	71.6	72.8	72.6
Центральное нагорье	49.0	43.5	41.3	46.6	58.0	68.4	70.7	72.4	69.5	64.3	60.8	56.3
Юго-Восточный	51.2	50.5	50.2	54.5	60.2	65.8	67.2	67.7	67.9	67.0	61.7	56.6
Дельта Меконга	58.9	57.9	55.8	57.2	64.5	69.7	70.5	71.6	71.9	71.0	66.9	62.5

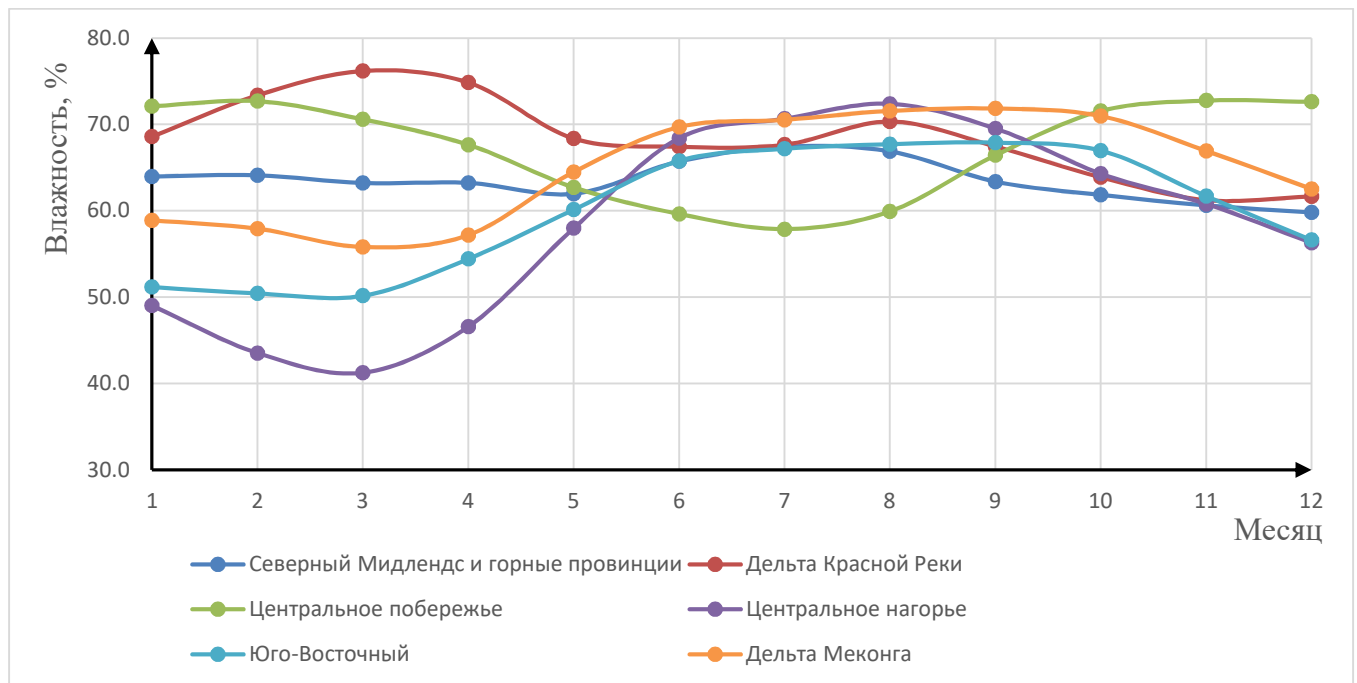


Рисунок 1.14 – Среднемесячная минимальная влажность (%) воздуха в областях Вьетнама

В Центральном регионе Вьетнама сухой сезон происходит с апреля по сентябрь. Сезон дождей длится с октября по февраль. Самая высокая температура наблюдается в период с мая по июнь, когда она превышает 40°C [108].

Климат на Юге Вьетнама является жарким тропическим климатом. Сухой сезон на Юге Вьетнама более выражен, чем на Севере Вьетнама. В сухой сезон с ноября по апрель дневные температуры на Юге редко опускаются ниже 30°C, а ночные температуры не опускаются ниже 20°C. Самым жарким месяцем года является май, в некоторых местах температура превышает 40°C.

Максимальные месячные температуры в различных областях Вьетнама представлены в таблице 1.5 и на рисунке 1.15.

Таблица 1.5 – Максимальные месячные температуры (°C) в различных областях Вьетнама [108]

Регион	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
<b>Северный Мидлендс и горные провинции</b>	30,59	35,58	35,85	37,60	39,13	37,97	37,33	37,23	35,98	35,20	32,89	31,05
<b>Дельта Красной Реки</b>	31,04	32,60	35,57	37,10	39,09	38,97	38,44	37,53	36,12	34,61	33,43	30,61
<b>Центральное побережье</b>	33,40	35,08	36,95	38,72	39,76	39,79	39,21	39,16	38,06	35,63	34,47	31,62
<b>Центральное нагорье</b>	33,6	35,93	36,87	37,77	37,03	34,60	32,87	32,47	32,60	33,13	32,53	32,17
<b>Юго-Восточный</b>	34,32	35,17	36,30	37,12	38,23	36,80	34,38	35,83	34,13	33,82	33,57	33,80
<b>Дельта Меконга</b>	34,52	35,08	36,73	37,71	37,51	35,54	34,84	34,37	34,14	33,92	33,42	33,32

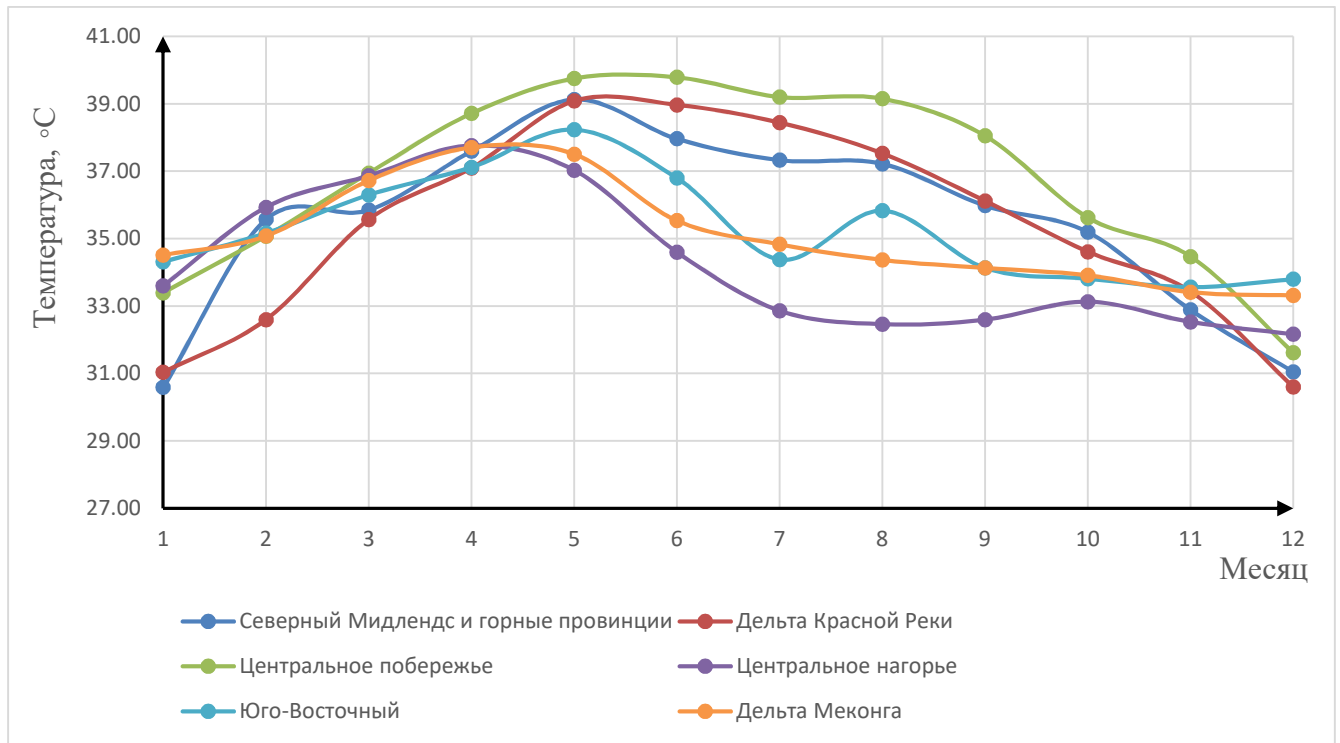


Рисунок 1.15 – Максимальные месячные температуры (°C) в различных областях Вьетнама

Среднегодовая скорость ветра во Вьетнаме составляет более 2,5 м/с на Центральном побережье; 2,0 – 3,0 м/с на Севере; 1,0 – 2,0 м/с в Северный Мидленд и горы; 1,5 - 2,5 м/с в Дельте Меконга; 2,0 - 3,0 м/с на Юго-Восточном районе. Самая высокая среднегодовая скорость ветра составляет 6,2 м/с, наблюдаемая на острове Фу Куи (Центральное побережье), а самая низкая - 0,8 м/с, наблюдаемая в провинции Лай-Чау (Северный Мидлендс и горные провинции) [109].

Среднемесячные величины скорости ветра в различных областях Вьетнама приведены в таблице 1.6 и на рисунке 1.16.

Согласно статистического сборника, за 57 года с 1964 по 2020 год во Вьетнаме произошло 412 ураганов, наиболее сконцентрированных в сентябре (22%), а затем в октябре (20%), в мае (16%), август (14%), июль (13%) (рисунок 1.17).



Таблица 1.6 – Среднемесячные величины скорости ветра (м/с) в различных областях Вьетнама [109]

Регион	Янв.	Фев.	Март	Апр.	Май	Июнь	Июль	Авг.	Сент.	Окт.	Нояб.	Дек.
Северный Мидлендс и горные провинции	1,44	1,59	1,61	1,59	1,45	1,26	1,21	1,04	1,03	1,08	1,14	1,23
Дельта Красной Реки	2,09	2,11	2,03	2,14	2,21	2,08	2,17	1,77	1,83	2,02	1,95	1,93
Центральное побережье	2,81	2,59	2,33	2,09	2,04	2,39	2,47	2,34	2,01	2,34	2,99	3,10
Центральное нагорье	3,3	3,07	2,63	2,03	1,53	1,77	1,80	1,93	1,43	1,77	2,87	3,27
Юго-Восточный	2,47	2,77	2,83	2,48	2,08	2,40	2,45	2,73	2,05	1,90	2,37	2,47
Дельта Меконга	1,84	2,01	1,97	1,69	1,57	2,06	2,14	2,42	1,87	1,39	1,76	1,90



Рисунок 1.16 – Среднемесячные величины скорости ветра (м/с) в различных областях Вьетнама

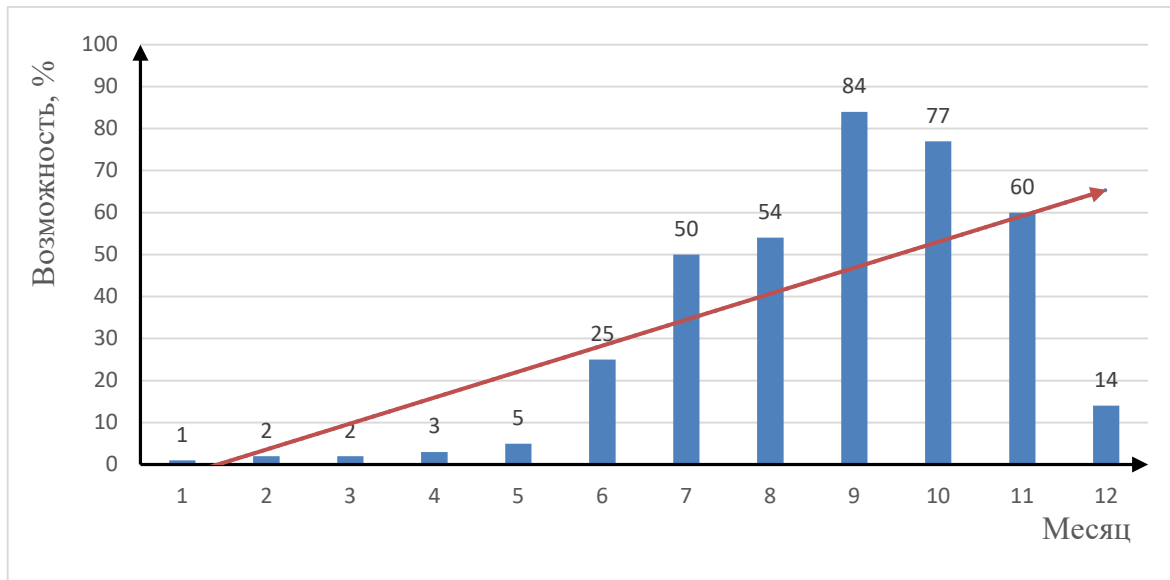


Рисунок 1.17 – Возможность урагана по месяцам во Вьетнаме за 1964-2020 гг.

Однако, для каждого района, характеристики урагана различаются по продолжительности воздействия, частоте ударов и интенсивности ветра, возникающего из-за ураганов.

Сезон ураганов во Вьетнаме обычно длится с мая по декабрь и происходит рано на Севере, замедляясь к Югу. Каждый год во Вьетнаме происходит от 6 до 7 ураганов, частота ураганов уменьшается с Севера на Юг. На Севере тремя самыми штормовыми месяцами от Куанг-Нинь до Тхань-Хоа являются июль, август и сентябрь (76%) с частотой 2-3 урагана в год. На Северном Центральном побережье, от Нге-Ан до Тхья-Тхиен-Хюэ, ураганы в основном происходят в августе, сентябре и октябре (86%) с частотой 1,5 - 2,0 раза/год. От Дананга до Нинь-Тхуан - в основном в сентябре, октябре и ноябре (80%) с частотой от 1,0 - 1,5 раза/год. От Фу-Йен до Нинь-Тхуан - в основном в октябре, ноябре и декабре (86%) с частотой 0,5 - 1,0 раз/год. В Южном регионе от Бинь-Тхуан до Ка-Мау ураганы имеют частоту возникновения <0,5 раза/год [110].

Таким образом, к основным особенностям климатических условий Вьетнама, влияющим на возникновение и развитие лесных пожаров, относятся:

- существенное изменение влажности воздуха по месяцам в зависимости от области Вьетнама (сухие и дождливые сезоны);

- среднемесячные колебания температуры воздуха в зависимости от расположения области Вьетнама;
- наличие сезона ураганов.

### **1.5. Математическое моделирование параметров лесных пожаров**

Математические модели и созданные на их основе методики расчета движения кромки фронта лесного пожара позволяют сделать прогноз поведения пожара, что позволяет разработать правильную стратегию и тактику по пожаротушению и эффективные противопожарные мероприятия. Одной из основных проблем математического моделирования лесных пожаров является недостаток информации по исходным данным, необходимым для прогнозирования динамики лесного пожара (метеорологические и пирологические условия, неоднородность горючей нагрузки на местности и т.д.).

Теоретические исследования и разработка методов расчета параметров лесных пожаров выполнены в большом количестве работ [14-53, 60, 64, 68-81].

В работе [18] представлены двумерные математические модели лесных пожаров. В основе этих моделей лежат уравнения теплофизики гетерогенных многофазных сред, полученные с помощью осреднения по высоте слоя лесных горючих материалов соответствующих трехмерных уравнений. Однако недостатком математических моделей является не учёт трехмерных эффектов.

В работе [19] исследована возможность моделирования лесного пожара как источника инфракрасного излучения. Выполнен анализ основных составляющих лесного пожара, которые определяют его характеристики. В статье разработан общий алгоритм синтеза тепловизионного изображения лесного пожара. С помощью разработанной математической модели лесного пожара предложен алгоритм поиска

контуров возгораний. Однако математическая модель не позволяет моделировать воздействие лесного пожара на объекты энергетики.

В работе [20] рассмотрена возможность применения гиперспектрального аэрозондирования лесных пожаров при модельном описании их распространения от очага возникновения. Для этой цели формируют изображения природных, техногенных и жилых объектов (объектов энергетики, поселков, водоемов, дорожно-транспортных сетей, лесных экосистем и т.д.), охваченных дымами разной концентрации. Для оценки возможной опасности продуктов горения лесных материалов разработаны приложения, которые используют данные гиперспектрального аэрозондирования. Приведены примеры расчетов распространения фронта модельного лесного пожара и характерных спектров различных объектов: водоемов при задымлении от пожаров, различных типов зеленой и пожелтевшей растительности, гарей и др. Обсуждены перспективы использования результатов гиперспектрального аэрозондирования для распознавания вышеуказанных объектов. Однако математическая модель не позволяет моделировать воздействие лесного пожара на объекты энергетики.

Результаты теоретического исследования процессов возникновения и распространения верховых лесных пожаров представлены в работе [21]. Лесной массив рассматривается в виде многокомпонентной многофазной пористой реагирующей среды. В работе приведено численное решение уравнений Рейнольдса для турбулентного течения, учитывающих химические реакции. Дискретный аналог дифференциальных уравнений получен с использованием метода контрольных объемов [56]. Выполненные численные эксперименты позволили получить поля скоростей, температур, концентраций летучих продуктов пиролиза и горения, массовых концентраций кислорода и объемных долей конденсированной фазы, а также контуров распространения верховых лесных пожаров в различные моменты времени. В статье показано, что контуры пожара зависят от вида и запаса лесных горючих материалов (т.е. состояния и свойств полога леса), их влагосодержания,

неоднородности растительности, направления и скорости ветра и т. д. Однако данная математическая модель не позволяет рассчитать тепловое воздействие лесного пожара на объекты энергетики.

Для моделирования процессов возникновения, развития и распространения лесных пожаров с учетом протекающих физико-химических процессов в работе [22] предложены основные принципы параллельной реализации общей математической модели лесных пожаров. Для двумерных течений предложен подход параллельной реализации и представлены схемы декомпозиции области решения. Для распараллеливания в SPMD-модели вычислений предложено использовать крупнозернистые методы. Статья является первой в цикле публикаций по созданию комплексной системы прогноза распространения низовых и верховых пожаров. Однако не показано конкретное математическое моделирование лесных пожаров.

В работе [23] для расчета параметров распространения низовых лесных и степных пожаров разработаны физические модели. Полученные аналитические формулы расчета скорости распространения низовых лесных и степных пожаров учитывают влияние скорости и направления ветра, запас горючих материалов, их влагосодержание и тепловые потери в условиях горения горючих материалов. В статье найдены предельные условия распространения низовых лесных и степных пожаров, проведено исследование влияния теплового излучения на распространения пожара. Численное решение нестационарной задачи возникновения и распространения низовых лесных и степных пожаров получено с учетом двухтемпературности среды и излучения от факела пламени. Однако математическая модель не показано математическое моделирование воздействия лесного пожара на объекты энергетики.

В работе [73] рассмотрены моделирование пожара как источника инфракрасного излучения. Математическая модель пожара позволяет с учетом вида пожара, его формы, характеристик окружающей среды и условий наблюдения

синтезировать изображение контуров лесного пожара в тепловизионном канале оптической системы.

Отмечено, что форма пожара зависит от многих параметров (сила и направление ветра, состав лесного массива, время с начала пожара и т.д.) [73].

Наиболее частыми формами лесного пожара в соответствии с работой [74] являются:

- округлая форма (равномерное распространение огня в случае отсутствия ветра на однородных горючих веществах и на относительно ровной местности);
- неравномерная (разносторонняя) форма (переменный ветер, разнородные горючие материалы и пересеченная местность);
- эллиптическая (вытянутая) форма (сильный ветер, однородные горючие вещества и относительно ровная местность).

Для синтеза пожара в [73] используется каноническое уравнение эллипса, в котором размеры малой и большой полуосей должны определяться из знания скоростей движения кромки пожара.

Границы пожара сформированы кромкой шириной 1-3 м на флангах и до 8 м на фронте пожара [74].

В работе [75] выполнен анализ математических моделей лесных пожаров. Рассмотрены двумерные модели, основу которых составляют уравнения динамики гетерогенных многофазных сред, полученные с помощью метода осреднения трехмерных уравнений по высоте слоя лесных горючих материалов.

Отмечено, что наиболее полной является трехмерная модель [76], в которой лес является многоярусной (9 ярусов) по высоте и многофазной (8 фаз) реакционноспособной средой. Газовая фаза при этом описывается системой трехмерных уравнений газодинамики.

Предложенные в работе [75] двухфазная и трехфазная модели являются очень сложными при их реализации на практике, так как содержат большое количество

эмпирических констант, описывающих межфазный массообмен, тепловыделение за счет протекания химических реакций и т.д.

Существенное влияние влажности горючего материала на скорость распространения лесного пожара рассмотрено в работе [89].

В работе [90] проанализирована модель бегущей волны для оценки скорости распространения лесного пожара. Показано, что существует возможность прогнозирования расположения горящей кромки фронта пожара с использованием параметров реальных условий распространения пламени. Метод основан на теории локальных фронтов, которая позволяет найти решение практически важной задачи, как оценка динамики развития характерных параметров пожара и разработка достоверного математического вероятностного аппарата для расчета внутренних параметров пожара. В статье обосновано, что данный подход достаточно просто может быть реализован с помощью численных методов, в том числе с целью построения предложенных в статье [90] параллельных алгоритмов.

Модель единичного контура горения (годограф скорости распространения лесного низового пожара) разработана в работе [91]. Годограф скорости описывается эллипсом, размеры которого определяются скоростями распространения кромки пожара в направлениях по ветру, против ветра и поперек ветра. Величины скоростей кромки пожара, развивающегося на различные горючие материалы, зависят от скорости ветра и получены в работах [92, 93] в виде полуэмпирических формул.

В работе [49] приведена универсальная математическая модель лесных пожаров, в которой используется подробная схема физико-химических процессов, происходящих в зоне лесного пожара и в приземном слое атмосферы. Предложена замкнутая система уравнений, которую можно использовать для численного решения. Лесная растительность, включая деревья, моделируется как многоярусная многофазная пористо-дисперсная и пространственно-неоднородная среда. Однако данный подход является чрезвычайно трудоемким, и для его применения необходимо

большое количество исходных данных по метеорологическим и пирологическим характеристикам конкретной местности.

Современные программы, подходящие для расчета характеристик лесных пожаров, можно разделить на две группы [88]:

- универсальные пакеты: FLUENT, STAR-CD, ANSYS CFX, PHOENICS, предназначены для решения широкого спектра задач термогазодинамики и теплообмена; основными недостатками являются большая стоимость, сложность в освоении и отсутствии адаптации их интерфейсов к решению задач пожарной безопасности;

- специализированные пакеты для расчета параметров пожаров: JASMINE, SOFIE, SMARTFIRE, KOBRA-3D, PHOENICS и FDS; при этом программа SMARTFIRE является коммерческой программой, а FDS – свободно распространяема.

Таким образом, в настоящее время не существует универсальной надежной математической модели расчета термогазодинамик лесного пожара, позволяющей достоверно прогнозировать параметры лесного пожара, необходимые для его успешного тушения, прогнозирования его воздействия на объекты энергетики и разработки эффективных противопожарных профилактических мероприятий.

## **1.6. Объекты энергетики Вьетнама, расположенные в лесных массивах**

Электрические объекты являются важнейшей базовой отраслью промышленности Вьетнама. От уровня ее развития зависит все народное хозяйство страны. За последние полвека во Вьетнаме в лесу построено много энергетических объектов, включающих в себе: трансформаторные станции, высоковольтные линии электропередачи для обеспечения спроса потребности электроэнергии и



беспрепятственной передачи электроэнергии от электростанции до коммерческих, промышленных и жилых районов.

Кроме того, развитие туризма также является одной из основных целей Вьетнама. С 2003 по 2018 годы было построено много сооружений в виде канатной дороги, пересекающих лес для туризма.

Линия электропередачи 500 кВ Север-Юг Вьетнама (ЛЭПСЮ) является первой сверхвысокой линией передачи 500 кВ во Вьетнаме с общей протяженностью 1 487 км, простирающейся от провинции Хоа-Бинь до города Хошимина [111]. Она устанавливается в сотрудничестве Советского Союза с 1981 по 1985 года. Цель сооружения предназначена для передачи избыточной электроэнергии из Севера Вьетнама (от ГЭС Хоа-Бинь, ГЭС Тхак-Ба, ТЭС Фа-Лай, ТЭС Уонг-Би, ТЭС Нинь-Бинь) для электроснабжения Югу и Центру Вьетнам. ЛЭПСЮ имеет 3437 электрических башен в 14 провинциях, включим Хоа-Бинь, Тхань-Хоа, Нге-Ан, Хатинь, Куанг-Бинь, Куанг-Чи, Тхья-Тхьен-Хуэ, Куанг-Нам, Да-Нанг, Кон-Тум, За-Лай, Дак-Лак, Бинь-Дьонг, город Хошимина, в том числе через равнины составляет 297 км (20%), леса - 669 км (45%), плато - 521 км (35%) [112].

На рис. 1.18 показана фотография линии электропередачи 500 кВ «Север-Юг» Вьетнама, проходящая через лес провинции Хоа-Бинь (север Вьетнама).



Рисунок 1.18 – Линия электропередачи 500 кВ «Север-Юг» Вьетнама, проходящая через леса провинции Хоа-Бинь (север Вьетнама)

Трансформаторные станции, расположенные в лесных массивах, включают 5 станций в Хоа-Бинь, Ха-Тинь, Да-Нанг, Плейку и Фу-Лам, в том числе 1 трансформатор 550/220/35кВ - 3х150000кВА на станции Хоа Бинь; 3 трансформатора 550/220/35кВ - 3х150кВА на станциях Ха-Тинь, Фу-Лам, Да-Нанг; 2 трансформатора 550/220/35кВ - 3х150кВА и 3 трансформатора 220/110/ 35кВ на станции Плейку (рисунок 1.19) [113].

Провинции в центре Вьетнама, такие как За-Лай, Дак-Лак, Фу-Йен и Да-Нанг, характеризуются сложной рельефом и экстремальными погодными условиями. Особенно часто лесные пожары возникают во время сухого сезона. Пожары серьезно влияют на безопасность высоковольтной сети в этих районах, а также являются угрозой электроснабжению государственной энергосистемы [114].



Рисунок 1.19 – Трансформаторы 220/110/35кВ на станции Плейку

Особенно много ЛЭП, трансформаторных станций в районе Тай-Нгуен в сложной местности, характеризующейся глубокими лесами, глубокими бассейнами рек с высоким наклоном. В этом районе есть 2 трансформаторные станции Pleiku-1 и Pleiku-2 500кВ, которые являются очень важными в энергетической системе Вьетнама и соединяют электрическую систему между севером и югом Вьетнама через ЛЭП 500кВ с общей протяженностью 351,9 км, ЛЭП 220 кВ и 18 промежуточных трансформаторных станций с общей протяженностью более 349,8 км. Линии в основном проходят в национальном парке Йок-Дон, через лес промышленных деревьев (сосна, гевея бразильская, мелалеука и т.д.) и более чем 60 общин (рисунок 1.20) в провинции За-Лай. При возникновении лесных пожаров в этом районе очень сложно обеспечить безопасную эвакуацию людей [115].



Рисунок 1.20 – Промежуточная трансформаторная станция подает электроэнергию  
общинам Дак-Мил и Дак-Глун

Кроме того, в этой области большинство национальных меньшинств имеют привычку сжигать лес для выращивания сельскохозяйственных растений, что приводит к распространению огня на трансформаторные станции и ЛЭП.

К 2018 году во Вьетнаме уже есть 10 канатных дорог (КД), проходящих по первозданным лесам на туристических достопримечательностях с севера до юга Вьетнама, такие как КД Нуи-Ба, провинция Тай-Нинь; КД Нуи-Кам, провинция Ан-Занг; КД Вунг-Тау; КД Ба-На, Да-Нанг (рисунок 1.21); КД Vinpearl - Land, провинция Хань-Хоа; КД Иен-Ты, КД Чуа-Хыонг; КД Да-Лат; КД Та-Ку; КД Хон-Тхом, для того чтобы обслуживать путешественникам, быстродвигающимся, осмотр достопримечательностей [115].

Таким образом, большое количество объектов энергетики (в частности, электрической сети Вьетнама) находятся в лесных массивах, что может привести к катастрофическим последствиям в случае их выхода из строя под воздействием лесных пожаров.



Рисунок 1.21 – КД Ба-На, Да-Нанг - самая длинная КД в мире с длиной 11.587 км

### **1.7. Особенности профилактики и тушения лесных пожаров во Вьетнаме**

Согласно статистике Департамента охраны лесов Вьетнама, за последние 10 лет (2011 – 2020 годы), по всей стране произошло 3043 лесных пожаров, в результате которых в среднем ежегодно уничтожалось 1962 га лесов [4]. В последние годы правительство уделяло особое внимание тому, чтобы все уровни и сектора были направлены на усиление мер по предотвращению лесных пожаров и борьбе с ними с целью предотвращения лесных пожаров и сведения к минимуму ущерба, вызванного лесными пожарами.

В настоящее время национальная сеть электропередачи во Вьетнаме насчитывает около 19 000 км линий 220 кВ и 500 кВ, около 100 подстанций с общей мощностью более 50 000 МВА по всей стране.

Самая большая трудность в обеспечении безопасного и бесперебойного электропитания системы передачи электроэнергии - это увеличение числа лесных пожаров в местах нахождения высоковольтных электрических сетей.

Охрана лесов от пожаров включает в себя выполнение мер пожарной безопасности в лесах (профилактика пожаров) и тушение пожаров в лесах.

Меры пожарной безопасности в лесах включают в себя:

- предупреждение лесных пожаров;
- мониторинг пожарной опасности в лесах и лесных пожаров;
- разработка и утверждение планов тушения лесных пожаров;
- иные меры пожарной безопасности в лесах.

Тушение лесного пожара включает в себя:

- обследование лесного пожара в целях уточнения вида и интенсивности лесного пожара, его границ, направления его движения, выявления возможных границ его распространения и локализации, источников противопожарного водоснабжения, подъездов к ним и к месту лесного пожара, а также других особенностей, определяющих тактику тушения лесного пожара;

- доставку людей и средств тушения лесных пожаров к месту тушения лесного пожара и обратно;

- локализацию лесного пожара;
- ликвидацию лесного пожара;
- наблюдение за локализованным лесным пожаром и его дотушивание;
- предотвращение возобновления лесного пожара.

Противопожарные расстояния, в пределах которых осуществляются рубка деревьев, кустарников, лиан, очистка от захламления, устанавливаются в России в соответствии с Федеральным законом от 22 июля 2008 года N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности», Федеральным законом от 21 декабря 1994 года N 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» и «Лесным Кодексом» от 04.12.2006.

В пункте 12 Постановления Правительства Вьетнама № 14 - Положения и руководящие указания Закона об электроэнергетике «О безопасности и защите высоковольтных сетей», в случае нахождения деревьев в коридорах безопасности воздушных линий электропередач безопасные расстояния прописаны следующим образом [116]:

- для линий с напряжением от 220 кВ до 500 кВ в городах, поселках высота деревьев не должна быть выше самых низких проводников;

- расстояние от любой точки дерева до провода, когда провод находится в состоянии максимального прогиба, составляет не менее 2,0 м для напряжения 110 кВ; 3,0 м для напряжения 220 кВ и 4,5 м для напряжения 500 кВ;

- для линий за пределами городов и поселков расстояние от самой высокой точки дерева в вертикальном направлении до высоты самого низкого проводника в состоянии максимального прогиба должно быть не менее 3,0 м для напряжения 110 кВ, не менее 4,0 м для с напряжения 220 кВ и 6,0 м для напряжения 500 кВ;

- для воздушных линий электропередачи, пересекающих леса или сады, расстояние в вертикальном направлении от средней высоты дерева, которое выросло до провода, когда провод находится в состоянии максимального прогиба, составляет не менее 3,0 м для напряжения 110 кВ, 4,0 м для напряжения 220 кВ и 6 м для напряжения 500 кВ;

- в случае, если дерево находится за пределами безопасного коридора воздушной ЛЭП и за пределами города, поселка, расстояние от любой части дерева, когда дерево упало до любой части линии, должно быть не менее 1,0 м для напряжения 110 и 220 кВ и 2,0 м для напряжений 500 кВ.

Для предотвращения лесных пожаров во Вьетнаме принимаются следующие меры [117].

Выполняется разработка плана предотвращения лесных пожаров и карты высокого риска лесных пожаров.

Соответствующие агентства при этом опираются на текущее состояние лесов, дают рекомендации по составлению ключевой карты высокого риска лесных пожаров в службе управления и организации предотвращения и борьбы с лесными пожарами.

Каждую неделю в сухой сезон специализированный отдел предоставляет своевременную информацию о прогнозе лесных пожаров, чтобы оперативно сообщать в совет по борьбе с лесными пожарами на всех уровнях и в провинциальный совет по борьбе с лесными пожарами, а также СМИ.

Организована и поддерживается система ключевых точек и пожарных вышек. Владельцы леса оснащены мобильными телефонами для связи и борьбы с лесными пожарами.

Информация о прогнозе пожара поступает по мобильному телефону. Получив информацию о пожаре, владелец леса проинформирует местные власти и полицию о том, как организовать борьбу с лесными пожарами.

Лесозащитные силы сотрудничают с местными властями и массовыми организациями, чтобы усилить пропаганду и мобилизовать людей и туристов для обеспечения пожарной безопасности.

Повышение осведомленности и знаний о предотвращении лесных пожаров осуществляется по следующим формам:

- раздаются пропагандистские материалы по лесным пожарам, распространяемые через систему коммунальных и селений радиостанций;
- выполняется организация домохозяйств для подписания обязательств по выполнению правил по предотвращению лесных пожаров;
- проводится координация с газетными и радио-агентствами для пропаганды и распространения законов о предотвращении лесных пожаров, информации об уровне прогнозирования пожаров в сухие месяцы;
- реализуется программа распространения законов о пожарной безопасности, напоминания о правилах лесных пожаров и обучения, руководство основными методами борьбы с лесными пожарами для людей;



- разрабатываются агитационные плакаты по лесным пожарам, запрету разводить костры в лесу, напоминанию людям о защите от лесных пожаров;
- выполняется планирование производственных площадей с целью предотвращения сжигания леса для полеводства.

Главное управление по защите лесов и пожарная охрана организуют сотрудникам курсы профессиональной подготовки по вопросам управления лесными пожарами, предотвращения лесных пожаров [118, 119].

К противопожарным мероприятиям по защите лесов во Вьетнаме относятся:

- в конце сезона дождей (октябрь) построение и обслуживание плотин для сохранения воды и поддержания влажности лесов в течение сухого сезона;
- очистка гиацинтов на каналах для обеспечения удобства патрулирования, своевременной транспортировки транспортных средств для спасения при возникновении пожара;
- реконструкция пожарных наблюдательных вышек;
- инвестиции в транспортные средства, машины и оборудование, обслуживание противопожарной техники и создание необходимого запаса топлива (бензин, масло, смазочные материалы);
- реализация мер по уменьшению количества возможных источников возникновения пожара на дамбах путем контролируемого сжигания в начале сухого сезона.

В районах, прилегающих к лесам, выполняется разработка мер по предотвращению возникновения лесных пожаров, распределение обязанностей домашних хозяйств при сжигании травы до и после уборки урожая. Устанавливается запрет на огонь и организовывается патруль, чтобы своевременно предотвратить нарушение правил использования огня в лесу при его посещении туристами [120, 121].

Для предотвращения лесных пожаров и борьбы с ними во Вьетнаме применяются следующие мероприятия [122, 123]:

- контроль за людьми, входящими и выходящими из леса;
- регулярный мониторинг и оперативное обновление прогноза погоды являются необходимыми мерами для прогнозирования возникновения лесных пожаров;
- раннее обнаружение и быстрая обработка информации о пожарах при их возникновении;
- всем людям, в том числе, владельцам лесов строго запрещено заниматься сжиганием леса без разрешения;
- в сухой сезон владельцы лесов часто организуют проверки безопасности по предотвращению лесных пожаров;
- в сухой сезон или при сухой погоде назначается инспекционная группа с целью мониторинга обстановки наблюдение в пик сезона;
- усиливается межсекторальное сотрудничество между агенством лесного хозяйства, вооруженными силами, полицией и пожарной охраной в защите и предотвращении лесных пожаров.

Все вышесказанное позволяет своевременно действовать в чрезвычайных ситуациях, когда возникают лесные пожары.

Необходимо поддерживать постоянный режим готовности 24 часа в сутки в сухой сезон для строго контроля обстановки, что позволяет уменьшить риск лесных пожаров или своевременно обнаружить пожары.

При организации пожаротушения при лесных пожарах лицо, занимающее самую высокую должность в подразделении пожарной охраны, является командиром пожарной охраны на месте пожара. Все члены команды по борьбе с лесными пожарами обязаны присоединиться к командиру пожарной охраны.

По требованию командира пожарной охраны может проводиться мобилизации рабочей силы и транспортных средств в этом районе для участия в пожаротушении. Во всех ситуациях мобилизационные силы должны включать пожарную охрану, провинциальное лесное хозяйство, полицию, отряды народной самообороны, отряды народного самоуправления и медицинский персонал.

Силы, участвующие в борьбе с лесными пожарами состоят из нескольких основных частей [124, 125]:

- основное подразделение, которое несет прямую ответственность за использование всех инструментов, средств и мер для ликвидации пожара (профессиональные силы пожарной охраны, гражданская оборона и провинциальное лесное хозяйство);

- вспомогательное подразделение, которое несет ответственность за оказание помощи основному подразделению в доставке пожарной техники и оборудования на место происшествия лесного пожара (местная полиция и милиция);

- спасательное подразделение, которое отвечает за спасение пострадавших (местный медицинский персонал, персонал спасательного центра и персонал провинциального медицинского центра);

- тыловое подразделение, которое выполняет задачи дозаправки топливом, обеспечением водой и пищей для сил, участвующих в тушении пожара (в случае продолжительного времени тушения пожара).

При ликвидации лесных пожаров применяется прямое и не прямое пожаротушение [126].

Прямое пожаротушение - использование всех ручных и механических средств, действующих непосредственно на огонь для тушения пожара. Непосредственное не прямое пожаротушение используется при больших пожарах. К нему относятся следующие мероприятия.

Создание противопожарной полосы: противопожарная полоса создается перед огнем и имеет тенденцию изгибаться по обе стороны от огня. Расстояние между полосой и огнем зависит от интенсивности пожара, уклона и скорости ветра, но оно должно быть организовано так, чтобы после завершения полосы, а затем огонь достиг этой полосы. Ширина полосы составляет 15-20 м (как минимум в 1,5 раза больше высоты пламени). Однако при больших пожарах и сильном ветре или крутом склоне ширина полосы может увеличиться до 20-30 метров. Необходимо использовать

местность рек, ручьев и троп, чтобы предотвратить распространение пожара через полосу.

Ограничение огня путем сжигания растительности: недалеко от фронта пожара создается полоса вокруг огня шириной 15-20 м. На полосе фронт горения направлен навстречу фронту основного пожара. Ширина полосы зависит от интенсивности пожара и скорости ветра.

К мерам противопожарного обустройства лесов помимо перечисленных выше относятся (в соответствии с Федеральным законом РФ № 455-ФЗ от 30.12.2015):

- строительство, реконструкцию и эксплуатацию лесных дорог, предназначенных для охраны лесов от пожаров;

- строительство, реконструкцию и эксплуатацию посадочных площадок для самолетов, вертолетов, используемых в целях проведения авиационных работ по охране и защите лесов;

- прокладка просек, противопожарных разрывов, устройство противопожарных минерализованных полос;

- строительство, реконструкцию и эксплуатацию пожарных наблюдательных пунктов (вышек, мачт, павильонов и других наблюдательных пунктов), пунктов сосредоточения противопожарного инвентаря;

- устройство пожарных водоемов и подъездов к источникам противопожарного водоснабжения;

- проведение работ по гидромелиорации;

- снижение природной пожарной опасности лесов путем регулирования породного состава лесных насаждений.

В качестве профилактических мероприятий по предотвращению распространения пожара на ОЭ являются периодический сбор сухой травы вокруг ОЭ, а также вспахивание полосы земли вдоль границ лесного массива шириной не менее 5 м.

При проектировании объемно-планировочных решений ОЭ и выборе площадок под их строительство необходимо учитывать расстояния от них до границ лесных

массивов, на которых в случае лесного пожара, воздействие высоких температур будет минимальным. Однако нормативных и научных методик расчета безопасных расстояний нет.

В российских нормативных документах безопасные расстояния от трансформаторных подстанций до границы лесных массивов указаны РД 153-34.0-49.101-2003 «Инструкция по проектированию противопожарной защиты энергетических предприятий».

Согласно п. 9.8. расстояние от конструкций, порталов и оборудования подстанций и открытых распределительных устройств до границ лесного массива следует принимать в зависимости от породы леса, например, 100 м для лесов из хвойных пород, 50 м - смешанных пород и 20 м - лиственных пород.

При размещении подстанций и открытых распределительных устройств в лесных массивах, когда строительство их связано с вырубкой леса, указанные расстояния до лесных массивов хвойных пород допускается сокращать в 2 раза.

Расстояние от ограды подстанции и открытых распределительных устройств до лесных массивов должно быть не менее 5 м.

Таким образом, для предотвращения теплового воздействия лесного пожара на ОЭ Вьетнама нет научно-обоснованных рекомендаций по эффективным противопожарным мероприятиям, в частности, по определению безопасных расстояний между ОЭ и кромкой лесного массива.

## Выводы по первой главе

На основе анализа литературных источников можно сделать следующие основные выводы.

1. Проблема обеспечения безопасности людей и материальных ценностей на объектах энергетики Вьетнама от теплового воздействия лесных пожаров является одной из наиболее актуальных и острых среди других проблем пожарной безопасности вышеуказанных объектов.

2. Современные математические модели расчета термогазодинамики лесного пожара, а также скорости движения его кромки не учитывают в полной мере реальные пирологические и метеорологические характеристики лесных пожаров.

3. Математическая модель расчета параметров лесного пожара (в том числе и скорости движения его кромки) должна учитывать:

- состояние атмосферы (температура, давление и влажность);
- влажность лесной биомассы;
- влияние направления и скорости ветра;
- влияние дождя;
- пирологические характеристики лесного массива;
- процесс тушения лесного пожара.

4. В современных базах данных по параметрам пожарной нагрузки отсутствуют величины удельной массовой скорости выгорания и удельного коэффициента выделения CO (и других токсичных газов) при горении стволов и кроны основных пород деревьев Вьетнама, что не позволяет задавать достоверные исходные данные для расчета теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама с использованием математических моделей термогазодинамики пожара.

5. Для предотвращения теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама нет научно-обоснованных рекомендаций по эффективным

противопожарным мероприятиям, в частности, по определению безопасных расстояний между ОЭ и кромкой лесного массива.

По результатам проведенных исследований можно сформулировать **цель диссертационной работы:** обеспечение пожарной безопасности объектов энергетики Вьетнама от теплового воздействия лесных пожаров.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо решить следующие **основные задачи:**

- провести анализ литературных источников по математическому моделированию параметров лесных пожаров с учетом особенностей климатических условий Вьетнама;

- разработать математическую модель и методику расчета скорости распространения и теплофизических параметров кромки лесного пожара, учитывающую совместное воздействие основных пирологических и метеорологических характеристик лесного пожара;

- разработать математическую модель и методику расчета теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама;

- провести экспериментальные исследования параметров процесса выгорания древесной и лиственной массы характерных для лесов Вьетнама деревьев;

- выполнить численные эксперименты по определению теплового воздействия лесного пожара на характерные объекты энергетики Вьетнама;

- разработать научно-обоснованные рекомендации по предотвращению воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама с учётом их объёмно-планировочных и конструктивных решений.

## ГЛАВА 2. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ

### 2.1. Полевая модель расчета тепломассообмена при пожаре

#### 2.1.1. Основные положения и уравнения

При лесном пожаре одновременно присутствует ряд факторов, существенно влияющих на его термогазодинамическую картину развития:

- излучение от очага горения и смеси продуктов горения и воздуха;
- наличие ветра с переменной по времени скоростью и направлением;
- многофазность течения (газ, твердые частицы и жидкость);
- крупномасштабная турбулентность.

Упростить сложную реальную термогазодинамическую картину лесного пожара без существенной потери точности расчетов можно, принимая следующие допущения [54]:

- воздушно-газовая смесь является смесью идеальных газов, что является достаточно точным при атмосферном давлении в диапазонах температур, характерных для лесного пожара [54];

- можно использовать равновесное уравнение состояния газовой среды, так как локальное термодинамическое и химическое равновесие существует во всем объеме термодинамической газо-воздушной системы, окружающей очаг лесного пожара [54];

- можно использовать односкоростную однотемпературную модель газо-воздушной среды, в которой локальные скорости и температуры компонентов газовой смеси и твердых (или жидких) частиц равны друг другу в каждой точке пространства,



а также отсутствует межфазное взаимодействие, т.е. нет температурного скачка между фазами и «скольжения» фаз друг относительно друга [54];

- диссоциацией и ионизацией в газо-воздушной среде при высоких температурах можно пренебречь;

- пренебрегаем влиянием турбулентных пульсаций на теплофизические свойства газо-воздушной среды;

- взаимным влиянием турбулентности и излучения пренебрегаем;

- пренебрегаем влиянием теплового потока из зоны зоны горения на скорость выгорания горючих материалов, поэтому скорость газификации пожарной нагрузки рассчитывается на основе экспериментальных зависимостей без учета текущих параметров газовой среды.

Принятые допущения позволяют рассматривать газо-воздушную среду лесного пожара как вязкий теплопроводный сжимаемый идеальный газ.

Основные уравнения полевой (дифференциальной) модели лесного пожара являются математическими выражениями фундаментальных законов физики (законов сохранения массы, энергии и импульса) [54, 55].

На рисунке 2.1 показана структура полевой модели, используемой для расчета параметров лесного пожара.

Из рисунка 2.2 видно, между всеми составными частями полевой модели существует обратная связь с помощью общих параметров.

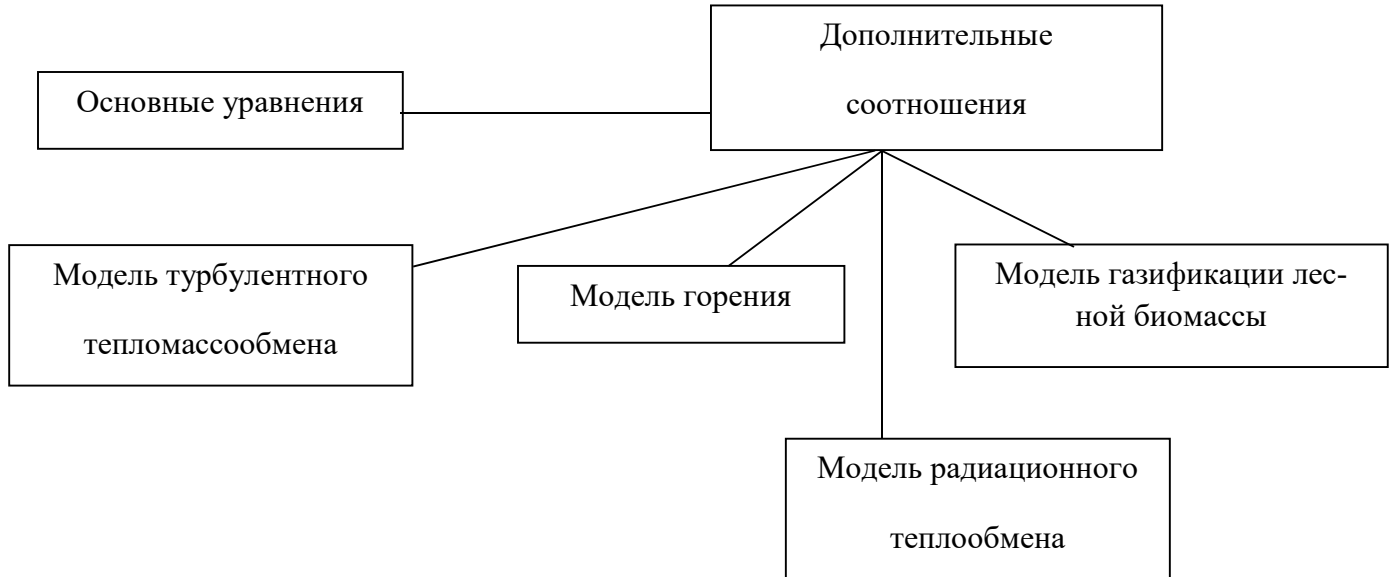


Рисунок 2.1 – Структура полевой модели

Используются основные уравнения полевой модели, записанные в ортогональной системе координат. Ось  $x$  направлена вдоль длины, ось  $y$  – вдоль ширины и ось  $z$  – вдоль высоты рассматриваемой расчетной области лесного пожара.

Все основные дифференциальные уравнения математической модели приводятся к «стандартному» виду [56], который удобен для их совместного численного решения:

$$\frac{\partial}{\partial \tau} (\rho \Phi) + \operatorname{div} (\rho w \Phi) = \operatorname{div} (\Gamma \operatorname{grad} \Phi) + S, \quad (2.1)$$

где  $\rho$  – плотность газо-воздушной смеси,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $w$  – скорость газо-воздушной смеси,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $\tau$  – время,  $\text{с}$ ;  $\Phi$  – искомая функция (температура газо-воздушной смеси, парциальные плотности отдельных газов, входящих в смесь, оптическая плотность дыма, кинетическая энергия турбулентности и скорость её диссипации и т.д.);  $\Gamma$  – диффузионный коэффициент для функции  $\Phi$ ;  $S$  – источниковый член для функции  $\Phi$ .

Нестационарные трехмерные дифференциальные уравнения полевой модели, приведенные к виду (2.1), имеют вид [54, 57, 103].

Уравнение неразрывности для газовой смеси [103]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho w_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho w_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w_z) = 0, \quad (2.2)$$

где  $\tau$  – время, с;  $x, y, z$  – координатные оси, направленные соответственно по длине, ширине и высоте расчетной области лесного пожара, м;  $\rho$  – плотность газо-воздушной смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $w_x, w_y, w_z$  – проекции скорости газо-воздушной смеси на координатные оси вдоль длины, ширины и высоты расчетной области, м/с.

Уравнения движения для газовой смеси, записанные вдоль координатных осей расчетной области [103]:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_x}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_T) \frac{\partial w_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_y}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_y}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_y}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_y}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + 2 \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_T) \frac{\partial w_y}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial w_x}{\partial y} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \right) \right) \\ + \frac{\partial}{\partial z} \left( (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial w_z}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial w_z}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial w_z}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial w_z}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - (\rho - \rho_o)g + 2 \frac{\partial}{\partial z} \left( (\mu + \mu_T) \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial w_x}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial w_y}{\partial z} + \frac{\partial w_z}{\partial y} \right) \right) - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial z} \left( (\mu + \mu_T) \left( \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} + \frac{\partial w_z}{\partial z} \right) \right), \end{aligned} \quad (2.5)$$

где  $\rho_o$  – плотность газовой среды за пределами области лесного пожара, кг/м<sup>3</sup>;  $p$  – давление, Па;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $\mu_T$  – коэффициент турбулентной вязкости, кг/(с·м);  $\mu$  – динамический коэффициент вязкости, кг/(с·м).

Уравнение энергии для смеси газов имеет вид [103]:

$$\rho c_p \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial T}{\partial x} + w_y \frac{\partial T}{\partial y} + w_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( (\lambda + \lambda_\tau + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( (\lambda + \lambda_\tau + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( (\lambda + \lambda_\tau + \lambda_p) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_v, \quad (2.6)$$

где  $T$  – температура газо-воздушной смеси, К;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности газо-воздушной смеси, Вт/(м·К);  $\lambda_\tau$  – коэффициент турбулентной теплопроводности, Вт/(м·К);  $\lambda_p$  – коэффициент радиационной теплопроводности, Вт/(м·К);  $c_p$  – удельная изобарная массовая теплоемкость газо-воздушной смеси, Дж/(кг·К);  $q_v$  – интенсивность внутренних источников тепла, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_v = q_{v\tau} + q_{vp}$ ,  $q_{vp}$  – интенсивность внутренних источников тепла за счет радиационного теплопереноса, Вт/м<sup>3</sup>;  $q_{v\tau}$  – интенсивность внутренних источников тепла за счет реакций горения, Вт/м<sup>3</sup>.

Уравнение неразрывности, записанное для каждого рассматриваемого газа газо-воздушной смеси, имеет вид [103]:

$$\rho \frac{\partial X_i}{\partial \tau} + \rho w_x \frac{\partial X_i}{\partial x} + \rho w_y \frac{\partial X_i}{\partial y} + \rho w_z \frac{\partial X_i}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho (D_i + D_\delta) \frac{\partial X_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho (D_i + D_\delta) \frac{\partial X_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho (D_i + D_\delta) \frac{\partial X_i}{\partial z} \right) + m_i, \quad (2.7)$$

где  $X_i$  – массовая концентрация  $i$ -го газа газо-воздушной смеси;  $D_i$  – коэффициент диффузии  $i$ -го газа смеси, м<sup>2</sup>/с;  $D_\tau$  – коэффициент турбулентной диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $m_i$  – интенсивность внутренних источников (стоков) массы, возникающих из-за образования (или исчезновения) молекул  $i$ -го газа вследствие протекания химических реакций, кг/(с·м<sup>3</sup>).

В качестве основного токсичного газа для лесных пожаров рассматриваем оксид углерода (СО), расчет парциальной плотности которого проводится с использованием уравнения (2.7).

Величина оптической плотности дыма рассчитывается из уравнения закона ее сохранения [54]:

$$\frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial x} + w_y \frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial y} + w_z \frac{\partial D_{\text{оп}}}{\partial z} = m_{\text{оп}}, \quad (2.8)$$

где  $D_{\text{оп}}$  – локальная величина оптической плотности дыма, Нп/м;  $D_{\text{опг}}$  – удельная дымообразующая способность горючего материала, Нп·м<sup>2</sup>/кг;  $m_{\text{оп}}$  – интенсивность внутренних источников образования оптической плотности дыма, Нп/(м·с).

### 2.1.2. Соотношения, необходимые для замыкания основной системы уравнений

Из-за того, что число неизвестных параметров газо-воздушной смеси, входящих в систему основных уравнений (2.2) - (2.8) полевой модели больше числа уравнений (незамкнутая система), необходимы дополнительные соотношения. К ним относятся уравнения, приведенные далее.

Локальное уравнение состояния газовой смеси имеет вид [58]:

$$p = \rho RT, \quad (2.9)$$

где  $R$  – газовая постоянная газо-воздушной смеси, Дж/(кг·К).

Теплофизические параметры смеси идеальных газов рассчитываются из выражений [58]:

$$\rho = \sum_{i=1}^n r_i \rho_i, \quad R = \sum_{i=1}^n g_i R_i, \quad c_p = \sum_{i=1}^n g_i c_{pi}, \quad (2.10)$$

где  $n$  – количество газов в смеси;  $i$  – номер отдельного газа;  $r_i$ ,  $g_i$ ,  $R_i$ ,  $c_{pi}$ ,  $\rho_i$  – объемная и массовая доля, газовая постоянная, удельная изобарная теплоемкость и плотность  $i$ -го газа.

Теплоёмкость  $i$ -го газа принимается постоянной или находится в зависимости от температуры.

Характеристики турбулентного тепло и массообмена, а также турбулентного трения при лесном пожаре определяются с использованием  $k$ - $\varepsilon$  модели турбулентности [56].

Формула Колмогорова [57] используется для расчета коэффициента турбулентной вязкости:

$$\nu_{\tau} = C_{\mu} \frac{k^2}{\varepsilon}, \quad (2.11)$$

где  $\nu$ ,  $\nu_{\tau}$  – кинематические коэффициент молекулярной и турбулентной вязкости, м<sup>2</sup>/с;

$C_{\mu}=0,09$  – эмпирическая константа;  $k = \frac{1}{2} \overline{(w_x'^2 + w_y'^2 + w_z'^2)}$ ;

$\varepsilon = \nu \overline{\left( \left( \frac{\partial w_x'}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_y'}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial w_z'}{\partial z} \right)^2 \right)}$  – соответственно кинетическая энергия

турбулентности (м<sup>2</sup>/с<sup>2</sup>) и скорость ее диссипации (м<sup>2</sup>/с<sup>3</sup>);  $w_x'$ ,  $w_y'$ ,  $w_z'$  – пульсационные составляющие проекций скорости газоздушной смеси на координатные оси, направленных по длине, ширине и высоте расчетной области, м/с.

Расчет кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации проводится с использованием уравнений соответствующих законов сохранения [56]:

$$\rho \left( \frac{\partial k}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial k}{\partial x} + w_y \frac{\partial k}{\partial y} + w_z \frac{\partial k}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_{\tau}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_{\tau}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{\tau}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + \nu_{\tau} \left( \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{Pr_{\tau}} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - \varepsilon, \quad (2.12)$$

$$\rho \left( \frac{\partial \varepsilon}{\partial \tau} + w_x \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} + w_y \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} + w_z \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_{\tau}}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\mu_{\tau}}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\mu_{\tau}}{\sigma_{\varepsilon}} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + C_1 \frac{\varepsilon}{k} \nu_{\tau} \left( \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \left( \frac{\partial w_i}{\partial x_j} + \frac{\partial w_j}{\partial x_i} \right) + \frac{g}{Pr_{\tau}} \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}, \quad (2.13)$$

Величины эмпирических констант в уравнениях (2.12) и (2.13) равны  $C_1 = 1,44$ ,  $C_2 = 1,92$ ,  $\sigma_k = 1,0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1,3$  и  $C_\mu = 0,09$  с модернизацией в конвективной колонке, образующейся над очагом горения, константы  $C_1 = 1,6$ .

Расчет коэффициентов турбулентной теплопроводности газовой смеси  $\lambda_t$  (входит в уравнение энергии (2.6)) и турбулентной диффузии компонентов  $D_t$  (уравнения неразрывности (2.7)) проводится с использованием тройной аналогии Прандтля [103]. В этом случае числа Прандтля и Льюиса равны единице ( $Pr = Le = 1$ ) и отсутствует градиент давления в потоке газа ( $dp/dx = 0$ ,  $dp/dy = 0$ ,  $dp/dz = 0$ ). Применение такой аналогии приводит к тому, что уравнения движения (2.3) - (2.5), энергии (2.6) и диффузии (2.7) становятся тождественными и при подобии граничных условий поля температур, скоростей и парциальных плотностей газов тоже являются подобными.

Тогда расчет турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии проводится на основе следующих соотношений:

$$\lambda_t = \frac{c_p \mu_t}{Pr_t}, \quad (2.14)$$

$$D_t = \mu_t / \rho Pr_d, \quad (2.15)$$

Уравнения (2.11) - (2.15) позволяют замкнуть уравнения (2.3) - (2.7), входящие в полевую модель.

Для расчета характеристик процесса распространения лучистой энергии в газовой среде используется интегро-дифференциальное уравнение [59]. Однако, при лесном пожаре из-за сложности расчета радиационных свойств газовой среды применяются приближенные подходы.

Принимаем, что наиболее адекватными реальной термогазодинамической картине пожара являются [54]:

- оптически толстый слой (в очаге горения и в конвективной колонке, образующейся над очагом горения);

- оптически тонкий слой (в остальном пространстве атмосферы).

В этих подходах принимается существование локального термодинамического равновесие внутри излучающего объема газовой среды [54].

При рассмотрении оптически толстого слоя, когда средняя длина свободного пробега фотона мала по сравнению с характерным размером среды, можно принять, что [54]:

$$q_{vp} = 0, \quad \lambda_p = \frac{16}{3} \frac{\sigma T^3}{k_p}, \quad (2.16)$$

где  $T$  – локальная температура оптически толстого слоя, К;  $k_p$  – интегральный коэффициент ослабления излучения оптически толстым слоем, 1/К.

В случае гетерогенной среды динамика процессов образования, движения и коагуляции твердых частиц дыма определяют излучательную, поглощательную и пропускательную способности газовой среды в области лесного пожара.

Интегральный коэффициент ослабления равен [54]  $k_p = \frac{n\pi d^2}{4}$ , где  $n$  - объемная концентрация твердых частиц, 1/м<sup>3</sup>;  $d$  - средний диаметр твердых частиц дыма, м.

В случае оптически тонкого слоя интегральная степень черноты равна [54]:

$$\lambda_p = 0, \quad q_{vp} = 4\pi\epsilon_p\sigma T^4, \quad (2.17)$$

где  $\epsilon_p$  – интегральная степень черноты оптически тонкого слоя.

Для расчета коэффициентов ослабления и поглощения излучения используется соотношение [54]:

$$k_p = \chi = \lambda^* D_{оп}, \quad (2.18)$$

где  $D_{оп}$  – локальное значение оптической плотности дыма, Нп/м;  $\lambda^*$  – коэффициент для пересчета оптического диапазона излучения в инфракрасный [54], 1/Нп.

Сложность расчета поглощательной, испускательной и рассеивающей способности газо-воздушной среды лесного пожара вызвана существованием значительных неоднородностей твердых частиц дыма по форме и размерам из-за процессов коагуляция, дробление и горения частиц вовремя их движения.



Пламенная зона задается с помощью внутренних источников массы (удельная скорость выгорания) и энергии.

Массовая скорость газификации лесного горючего материала ( $\Psi$ , кг/с) задается следующим полуэмпирическим соотношением [55]:

$$\Psi = \psi_{\text{уд}} F_{\text{Г}}, \quad (2.19)$$

где  $\tau$  – время, с;  $w_{\text{лс}}$  – линейная скорость распространения пламени по поверхности горючего материала, м/с;  $r = w_{\text{лс}}\tau$  – радиус горения, м;  $F_{\text{Г}}$  – площадь горючего материала, охваченная горением, м<sup>2</sup>:  $F_{\text{Г}} = \pi r^2$ ;  $\psi_{\text{уд}}$  – удельная скорость газификации горючего материала, кг/(с·м<sup>2</sup>).

### 2.1.3. Условия однозначности

Условия однозначности к системе уравнений полевой модели при свободном развитии лесного пожара в отсутствие пожаротушения являются следующими [54]:

- геометрические условия: координаты границ поверхностей разнородных горючих лесных материалов;

- физические условия:

теплофизические свойства газов, входящих в газо-воздушную среду;

пирологические свойства горючих лесных материалов (удельная скорость газификации, низшая рабочая теплота сгорания, удельный выход продуктов горения, удельное потребление кислорода, скорость распространения пламени, удельный коэффициент дымообразования);

- граничные условия: проекции скоростей равны нулю (невозмущенная атмосфера):  $w_x = w_y = w_z = 0$ ; для остальных параметров  $\Phi$  (уравнение (2.1)) принимается, что  $\partial\Phi/\partial n = 0$ , где  $n$  – нормаль к поверхности; температура

атмосферного воздуха  $T_a$ , скорость ветра  $w_w$ , давление  $p_a$  определяется в соответствии

с формулой [104]:  $\frac{p_a}{p_1} = e^{-\frac{g}{RT_0}z}$ , где  $p_1$  – давление на уровне земли, Па;

- начальные условия (при  $\tau=0$ ): состав атмосферного воздуха:

$$X_{O_2} + X_{N_2} = 1; X_{O_2} = 0,23; X_{N_2} = 0,77; X_{H_2} = 0; w_x = w_y = w_z = 0;$$

- скорость выгорания горючего материала  $\Psi_r = 0$ .

Дифференциальные уравнения в частных производных (2.1) решаются с использованием конечно-разностного метода контрольных объемов [56] методом итераций:

- 1) задается приближенное поле давления  $p^* = f(x, y, z)$ ;
- 2) проводится расчет приближенного поля скоростей  $w_x^*$ ,  $w_y^*$  и  $w_z^*$  с помощью решения алгебраических уравнений (аналоги уравнений движения (2.3)-(2.5));
- 3) проводится расчет поля поправок давления  $p'$  из решения уравнения (2.2);
- 4) определяется скорректированное поле давлений  $p = p^* + p'$ ;
- 5) рассчитываются составляющие скоростей  $w_x$ ,  $w_y$  и  $w_z$  из решения алгебраических уравнений (аналоги уравнений движения (2.3)-(2.5));
- 6) определяются поля остальных параметров (температура, парциальные плотности газов, коэффициенты турбулентного теплообмена) с помощью решения алгебраических уравнений (аналогами дифференциальных уравнений неразрывности газовой смеси (2.1) и отдельных газов (2.7), энергии (2.6) и уравнений  $k$ - $\epsilon$  модели турбулентности (2.12) и (2.13));
- 7) полученное поле давлений  $p$  принимается в качестве нового приближенного поля давлений  $p^*$  и расчет повторяется с пункта 2.

Итерационный процесс повторяется до тех пор, когда отличие температуры газо-воздушной смеси на соседних итерациях не превышает заданной точности расчета:  $|T^{(k+1)} - T^{(k)}| < 0,01$  К, где  $k+1$ ,  $k$  – номера текущей и предыдущей итераций).

## **2.2. Математическая модель расчета параметров движения кромки лесного пожара**

### **2.2.1. Основные упрощения термогазодинамической картины лесного пожара**

Рассматриваем детерминистический подход, при котором не используются статистические методы. При этом скорость движения кромки лесного пожара однозначно определяется исходными данными задачи.

Принимаем, что основное влияние на тепломассообмен при лесном пожаре оказывают следующие возмущающие факторы:

- состояние атмосферы (температура и давление);
- влажность атмосферы и горючих материалов;
- наличие осадков (дождь, снег, град);
- направление и скорость ветра;
- тип местности (химические и теплофизические свойства горючих материалов);
- крутизна склона;
- процесс тушения пожара.

В первом приближении принимаем принцип суперпозиции воздействий возмущающих факторов, при котором суммарное воздействие факторов является суммой воздействия отдельных факторов без учета их взаимного влияния друг на друга.

Данный подход не использует индекс пожароопасности (горимости) [14], а учитывает конкретное состояние атмосферы и основных особенностей растительности и ландшафта местности.

### 2.2.2. Основное уравнение

Схема распространения лесного низового пожара представлена на рисунке 2.2.

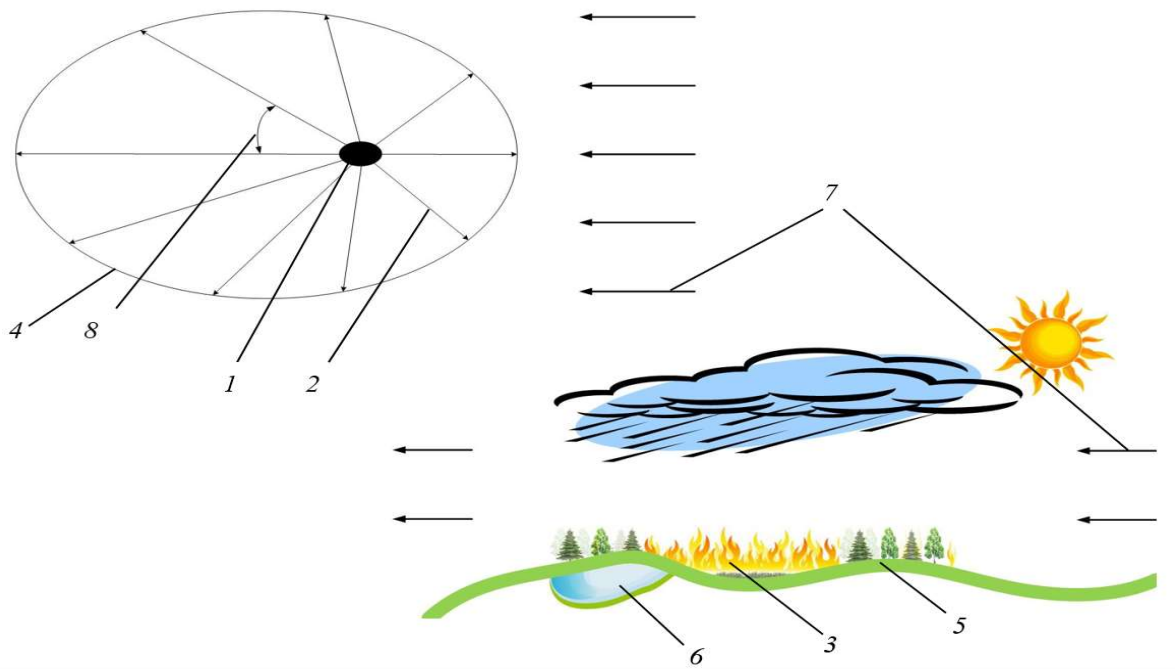


Рисунок 2.2 – Схема распространения лесного пожара: 1 – начальный очаг возгорания; 2 – направления распространения пожара; 3 – область лесного низового пожара; 4 – кромка лесного низового пожара; 5 – участки местности с горючей нагрузкой; 6 – «негорючие» участки местности; 7 – направление ветра; 8 – угол между направлением ветра и локальным направлением распространения кромки пожара.

Для использования полевой модели расчета тепломассообмена при лесном пожаре необходимо в качестве граничного условия знать положение кромки пожара.

Принимаем, что основное влияние на тепломассообмен при лесном пожаре оказывают следующие возмущающие факторы:

- состояние атмосферы (температура, влажность и давление);
- пирологические характеристики лесной биомассы (тип лесного массива и влажность);
- наличие осадков (дождь, снег, град);
- направление и скорость ветра;

- величина уклона поверхности земли;
- процесс тушения лесного пожара.

В первом приближении принимаем принцип суперпозиции воздействий возмущающих факторов, при котором суммарное воздействие факторов является суммой воздействия отдельных факторов без учета их взаимного влияния друг на друга.

В этом случае скорость кромки лесного низового пожара может быть рассчитана по следующей формуле:

$$W_{кр} = W_{кр,о} K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8, \quad (2.21)$$

где  $W_{кр}$  – скорость распространения кромки лесного пожара, м/с;

$W_{кр,о}$  – скорость распространения кромки лесного пожара без учета возмущающих факторов, м/с;

коэффициенты, учитывающие:

$K_1$  – состояние атмосферы (температура и давление);

$K_2$  – влажность воздуха и горючих лесных материалов;

$K_3$  – влияние направления и скорости ветра;

$K_4$  – влияние осадков;

$K_5$  – параметры горючих лесных материалов;

$K_6$  – крутизну склона поверхности земли;

$K_7$  – тушение лесного пожара;

$K_8$  – тип пожара.

За «эталонный» лесной пожар принимаем устойчивый низовой пожар, при котором полностью выгорает живой и мертвый напочвенный покров, сильно обгорают корни и кора деревьев, полностью сгорают подрост и подлесок, а также отсутствуют все перечисленные возмущающие факторы (ветер, наличие осадков и т.д.).

Показатель пожарной опасности местности (КПО, уравнение (1.1) и табл. 1.1) позволяет достоверно определить коэффициенты  $K_1$  (состояние атмосферы (температура и давление)),  $K_2$  (влажность воздуха и лесной биомассы) и  $K_5$  (влияние осадков) в формуле (2.21), описывающей скорость распространения кромки пожара.

Таким образом, метод расчета скорости движения кромки лесного пожара с помощью уравнения (2.21) учитывает:

- ландшафт местности;
- неоднородность распределения горючей нагрузки (тип растительности, водоемы, пустыни и т.д.);
- свойства горючих веществ (влажность, теплота сгорания, удельная скорость газификации и т.д.);
- состояние атмосферы (давление, температура, влажность, скорость и направление ветра, интенсивность и продолжительность осадков);
- силы и средства, привлекаемые на тушение лесного пожара;
- силы и средства, привлекаемые на тушение пожара внутри ОЭ;
- горение горючих материалов, находящихся внутри ОЭ.

Источник возникновения пожара задается в виде точки, привязанной к определенной местности с помощью географических координат.

Методы расчета коэффициентов, входящих в формулу (2.21), рассмотрены далее.

### **2.2.3. Влияние температуры и давления атмосферы**

Коэффициент, учитывающий состояние атмосферы, зависит от температуры окружающей среды и атмосферного давления [60]:

$$K_1 = \left( \frac{p_B}{760} \right)^{0,7} \left( \frac{T_B + 273}{293} \right), \quad (2.22)$$

где  $p_B$  – атмосферное давление воздуха, мм. рт. ст.;

$T_B$  – температура воздуха, °С.

#### 2.2.4. Влияние влажности воздуха и лесной биомассы

Коэффициент, учитывающий влажность воздуха и лесной биомассы, равен:

$$K_2 = \min(K_2' K_2''), \quad (2.23)$$

где  $K_2'$  – коэффициент, учитывающий влажность воздуха;  $K_2''$  – коэффициент, учитывающий влажность пожарной нагрузки.

Коэффициент  $K_2'$  находится по табл. 2.2 и зависит от влажности воздуха и крутизны склона [13]. Принимаем, что:

- пренебрегаем крутизной склона;
- $K_2' = 1$  при  $\varphi_B = 20\%$ .

Таблица 2.1 – Коэффициент, учитывающий влияние влажности воздуха на скорость движения кромки лесного пожара

Влажность воздуха, $\varphi_{\text{в}}$ , %	Коэффициент [13]	Коэффициент $K_2'$
20	3,80	1,00
25	3,40	0,894
30	2,90	0,763
35	2,60	0,684
40	2,20	0,579
45	1,90	0,50
50	1,70	0,447
55	1,60	0,421
60	1,40	0,368
65	1,35	0,355
70	1,25	0,329
80	1,15	0,303
90	1,00	0,263

На рисунке 2.3 приведена зависимость коэффициента  $K_2'$  от влажности воздуха (табл. 2.1), которая может быть аппроксимирована с величиной достоверности аппроксимации  $R^2=0,998$ :

$$K_2' = -2 \cdot 10^{-6} \varphi_{\text{в}}^3 + 5 \cdot 10^{-4} \varphi_{\text{в}}^2 - 4,79 \cdot 10^{-2} \varphi_{\text{в}} + 1,7734, \quad (2.24)$$

где  $\varphi_{\text{в}}$  – влажность воздуха, %.



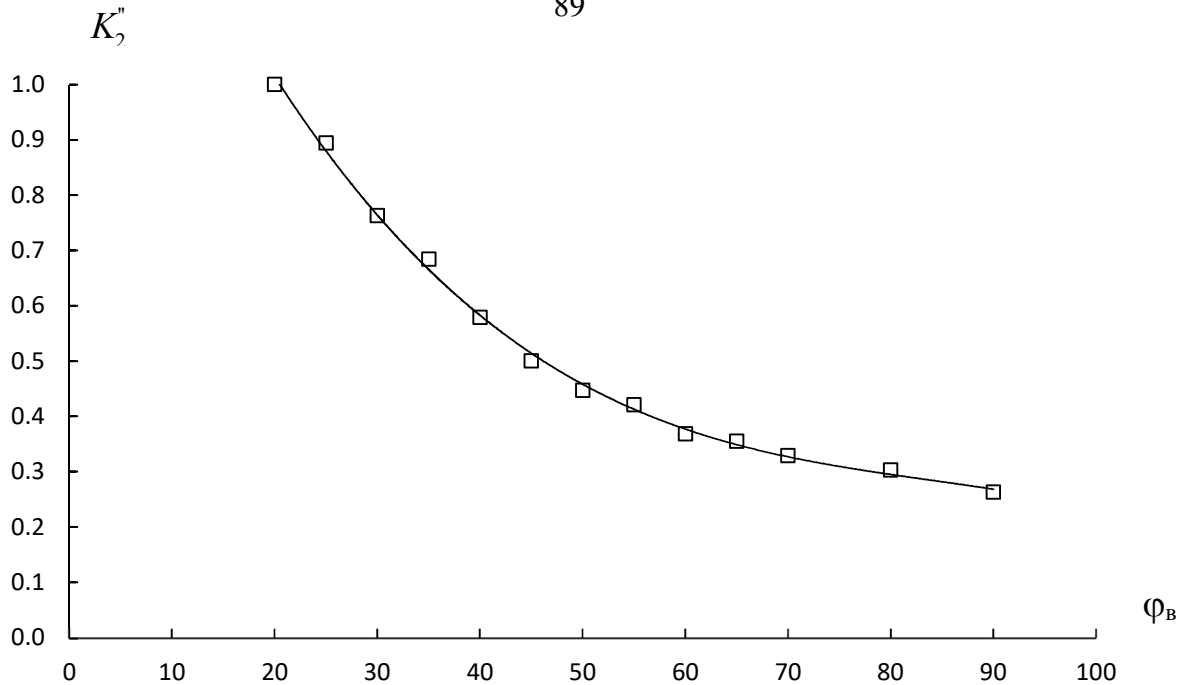


Рисунок 2.3 – Зависимость коэффициента  $K_2'$  от влажности воздуха: линия – уравнение (2.24)

Коэффициент  $K_2''$  находится по табл. 2.3. и зависит от влажности лесной биомассы [61].

Принимаем, что:

- влажность лесной биомассы в первом приближении определяется влажностью древесины;

-  $K_2'' = 1$  при  $\varphi_d = 8-12\%$ .

На рисунке 2.4 приведена зависимость коэффициента  $K_2''$  от влажности лесной биомассы (табл. 2.2), которая может быть аппроксимирована с величиной достоверности аппроксимации  $R^2=0,896$ :

при  $\varphi_d \leq 30\%$ :

$$K_2'' = 2 \cdot 10^{-7} \varphi_d^4 - 5 \cdot 10^{-5} \varphi_d^3 + 0,0042 \varphi_d^2 - 0,1444 \varphi_d + 2,0081, \quad (2.25)$$

при  $\varphi_d > 30\%$ :

$$K_2'' = 0,254, \quad (2.26)$$

где  $\varphi_d$  – влажность древесины, %.

Таблица 2.2 – Коэффициент, учитывающий влияние влажности древесины на скорость движения кромки лесного пожара

Влажность, $\varphi_d$ , %	Линейная скорость распространения пламени по поверхности древесины, $\times 10^2$ м/с [61]	Коэффициент $K_2''$
8-12	6,7	1
16-18	3,8	0,567
18-20	2,7	0,403
20-30	2,0	0,299
более 30	1,7	0,254

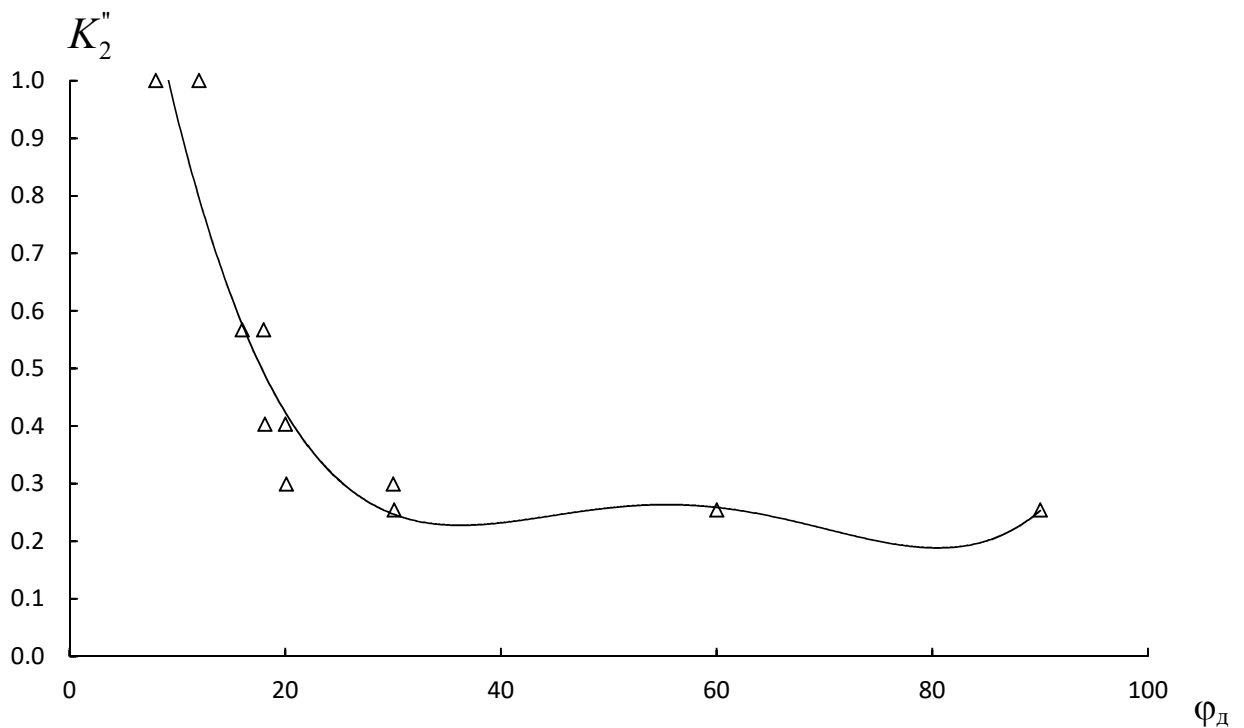


Рисунок 2.4 – Зависимость коэффициента  $K_2''$  от влажности древесины: линия – уравнение (2.25)

Из табл. 2.1 и 2.2 видно, что совместное влияние влажности воздуха и лесной биомассы на скорость движения кромки лесного пожара существенно. Так, при изменении влажности воздуха от 20% до 90% и одновременном увеличении влажности лесной биомассы от 8% до более, чем 30% коэффициент  $K_2$  уменьшается в 4 раза.

### 2.2.5. Влияние направления и скорости ветра

Коэффициент, учитывающий влияние скорости и направления ветра, находится по табл. 2.3 [13].

При отсутствии ветра ( $w_B = 0$  м/с):  $K_3 = 1$ .

Таблица 2.3 – Коэффициент, учитывающий влияние скорости и направления ветра на скорость движения кромки лесного пожара [13]

Скорость ветра, м/с	Коэффициент $K_3$		
	по ветру	против ветра	поперек ветра
0	1,0	1,0	1,0
0,2	1,2	0,9	1,1
0,4	1,4	0,8	1,2
0,6	1,8	0,7	1,3
0,8	2,1	0,6	1,4
1,0	2,6	0,6	1,5
1,2	3,3	0,6	1,7
1,4	4,0	0,6	1,9
1,6	4,9	0,6	2,2
1,8	5,9	0,6	2,5
2,0	7,0	0,7	2,8
2,5	10,0	0,7	3,7
3,0	13,0	0,7	4,7

На рисунке 2.5 представлены зависимости коэффициента  $K_3$  от скорости и направления ветра (табл. 2.3), которые могут быть аппроксимированы следующими уравнениями соответственно для направления по ветру, поперек и против ветра:

$$K_3 = -1,1481w_B^2 + 0,6439w_B + 0,9527, \quad (2.27)$$

$$K_3 = 0,3607w_B^2 + 0,1473w_B + 1,0397, \quad (2.28)$$

$$K_3 = 0,119w_B^2 - 0,4143w_B + 0,9454, \quad (2.29)$$

где  $w_B$  – скорость ветра, м/с.

Величины достоверностей аппроксимаций равны  $R^2 = 0,999$  для уравнений (2.27) и (2.28) и  $R^2 = 0,82$  для уравнения (2.29).

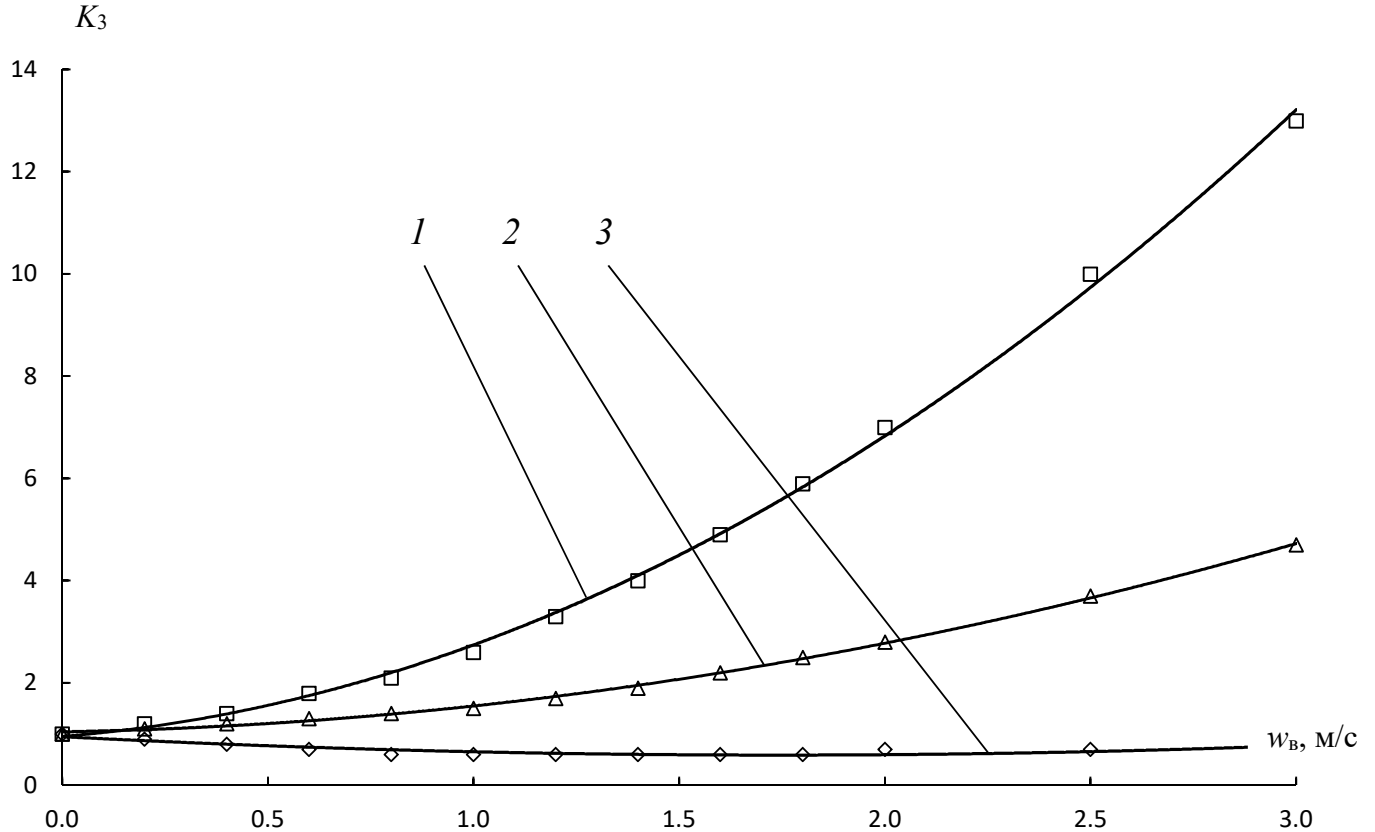


Рисунок 2.5 – Зависимости коэффициента  $K_3$  от скорости и направления ветра:  
по ветру: □ – [15]; 1 – уравнение (2.27); поперек ветра: △ – [15]; 2 – уравнение (2.28); против ветра:  
◇ – [15]; 3 – уравнение (2.29)

### 2.2.6. Влияние осадков

Коэффициент, учитывающий влияние осадков (дождя, снега и т.д.) ( $K_4$ ), зависит от количества осадков, которое выпадает во время пожара, и их интенсивности:

$$K_4 = 1 - \frac{\tau^2}{\tau^{*2}}, \quad (2.30)$$

$$K_4 = 1 - \frac{G}{G_{\text{кр}}}, \quad (2.31)$$

где  $G$  – интенсивность выпадения осадков, кг/(м<sup>2</sup>с);  $G_{\text{кр}}$  – критическая интенсивность выпадения осадков, кг/(м<sup>2</sup>с).

Под критической интенсивностью понимаем величину, при которой прекращается горение на кромке лесного низового пожара из-за влияния осадков. В первом приближении величину  $G_{\text{кр}}$  принимаем равной критической интенсивности подачи воды, при которой происходит тушение кромки пожара [19].

При  $G \geq G_{\text{кр}}$ :  $K_4 = 0$  и горение прекращается.

Расчет коэффициента  $K_4$  требует проведения дополнительных исследований.

### 2.2.7. Влияние свойств горючих материалов

Коэффициент, учитывающий свойства горючих материалов ( $K_5$ ), должен учитывать:

- неоднородность распределения горючей нагрузки (тип растительности, водоемы, пустыни и т.д.) на местности;
- химические и теплофизические свойства горючих материалов.

В случае участка местности, на котором отсутствуют или присутствуют в пренебрежимо малом количестве горючие материалы (водоем, песчаный карьер, глинозем и т.д.) принимаем коэффициент  $K_5 = 0$ . В этом случае кромка пожара огибает этот участок по флангам.

За «эталонный» лесной низовой пожар принимаем устойчивый низовой пожар, возникающий на сосняках лишайниковых и лишайниково-мшистых [74]. При этом  $K_5 = 1$  и средняя скорость распространения кромки фронта пожара равна  $W_{\text{кр.о}} = 0,015$  м/с [74].

Коэффициент, учитывающий свойства горючих материалов ( $K_5$ ), может быть рассчитан по следующей формуле:

$$K_5 = W_{кр.1} / W_{кр.0} \quad (2.32)$$

где  $W_{кр.1}$  – скорость распространения кромки устойчивого низового пожара по его фронту для конкретного типа растительности, м/с.

Коэффициент  $K_5$  зависит от типа растительности и может быть определен в первом приближении по данным работы [74]. Например, для сосняков вересковых он равен:  $K_5 = W_{кр.1} / W_{кр.0} = 0,036 / 0,015 = 2,4$ , где  $W_{кр.1} = 0,036$  м/с [74] – средняя скорость распространения кромки устойчивого низового пожара в сосняках вересковых.

### 2.2.8. Влияние крутизны склона

Коэффициент, учитывающий влияние крутизны склона, находится из табл. 2.4 [74].

Таблица 2.4 – Коэффициент, учитывающий влияние крутизны склона на скорость движения кромки низового лесного пожара [74]

Крутизна склона, град	Коэффициент $K_6$		
	Вверх по склону	Вниз по склону	Поперек склона
0	1,0	1,0	1,0
10	1,2	1,0	1,0
15	1,5	1,0	1,1
20	2,0	1,0	1,2
25	2,9	1,0	1,5
30	4,9	1,0	1,8
35	9,5	1,0	2,1
40	28,0	1,0	–

Зависимости коэффициента  $K_6$  от крутизны склона, представленные в табл. 2.4, могут быть аппроксимированы следующими уравнениями соответственно для направлений вверх, поперек и вниз склона соответственно:

$$K_6 = 6 \cdot 10^{-6} \gamma^5 - 0,0005 \gamma^4 + 0,0159 \gamma^3 - 0,2081 \gamma^2 + 0,9727 \gamma + 0,9921, \quad (2.33)$$

$$K_6 = 0,8564 e^{0,0229 \gamma}, \quad (2.34)$$

$$K_6 = 1, \quad (2.35)$$

где  $\gamma$  – угол крутизны склона, град.

Величины достоверностей аппроксимаций равны  $R^2 = 0,9993$  для уравнения (13) и  $R^2 = 0,8757$  - для уравнения (14).

### 2.2.9. Влияние тушения пожара

Коэффициент, учитывающий тушение лесного пожара ( $K_7$ ), зависит от того какие силы и средства придут на тушение и еще от многих факторов, связанных с тушением.

В данной работе принимаем в первом приближении учет только интенсивности подачи воды на кромку пожара. Тогда аналогично коэффициенту  $K_4$ , учитывающему влияние осадков:

$$K_7 = 1 - \frac{G_T}{G_{кр}}, \quad (2.36)$$

где  $G_T$  – интенсивность подачи воды на тушение, кг/(м<sup>2</sup>с);  $G_{кр}$  – критическая интенсивность воды, подаваемой на тушение, кг/(м<sup>2</sup>с).

Под критической интенсивностью понимаем величину, при которой прекращается горение на кромке лесного низового пожара при его тушении водой.

При  $G_T \geq G_{кр}$ :  $K_7 = 0$ .

В работе [94] обосновано теоретически влияние интенсивности подачи воды на тушение кромки низового лесного пожара водой в зависимости от скорости

тепловыделения на кромке. При высоте пламени на кромке от 1 до 3 м критическая интенсивность изменяется от 0,0313 до 0,0693 л/(м<sup>2</sup>с) [94].

Расчет вышеуказанного коэффициента  $K_7$  требует проведения дополнительных исследований.

### 2.2.10. Влияние типа пожара

Тип низового пожара выбираем по характеру возгорания и скорости распространения:

- устойчивый низовой пожар;
- беглый низовой пожар;
- подстилочный пожар.

В случае устойчивого низового пожара, возникающего на сосняках лишайниковых и лишайниково-мшистых:  $K_8 = 1$ .

Для беглого низового или подстилочного пожара коэффициент влияния типа низового пожара равен:

$$K_8 = W_{кр} / W_{кр.о} / K_5, \quad (2.37)$$

где  $W_{кр}$  – скорость распространения кромки беглого низового или подстилочного пожара по его фронту для конкретного типа растительности, м/с.

Величина коэффициента  $K_8$  для других типов (в том числе и верховых) пожаров будет обоснована в дальнейших работах.

Математическое моделирование лесных пожаров позволяет выстроить более четкую систему тушения пожара, применения необходимых сил и средств при тушении пожаров любой сложности и интенсивности, выстроить защиту более эффективным и малозатратным способом, проанализировать ряд вариантов возникновения и тушения пожара.



### 2.2.11. Особенности применения предложенной математической модели

Источник возникновения пожара задается в виде точки, привязанной к определенной местности с помощью географических координат.

Распространение пожара принимается круговым, т.е. от источника возникновения пожара распространение горения по горючим материалам идет по всем направлениям со скоростью, рассчитываемой по формуле (2.21).

Например, при распространении пожара по однородной местности при отсутствии ветра и осадков внешняя граница (кромка) природного пожара является окружностью в каждый момент времени.

При попадании кромки пожара в местность с другими горючими материалами скорость распространения пожара меняется.

В случае обтекания кромкой пожара негорючих участков местности, например, водных пространств, исходные лучи распространения пожара, выходящие из исходной точки, обрываются. Поэтому для задания условия непрерывного обтекания негорючего участка задаются новые источники возникновения пожара. От новых источников распространение пожара также принимается круговым.

Таким образом, принят источниково-лучевой принцип распространения пожара.

Пример расчета пожара с использованием вышеуказанного принципа его распространения и уравнения (2.21), выполненный в работе (15), представлен на рисунке 2.6.

На рисунке 2.6 приведен участок карты местности, на котором показаны поля температур через 3 часа и 1 час 4 мин от начала пожара соответственно без и с учетом скорости и направления ветра. Скорость ветра принималась равной 5 м/с. Направление ветра показано на рисунке 2.6.

Из рисунка 2.6 видно, что источниково-лучевой принцип распространения достаточно точно учитывает контуры негорючих участков местности (водоемы, каменистая местность и т.д.).

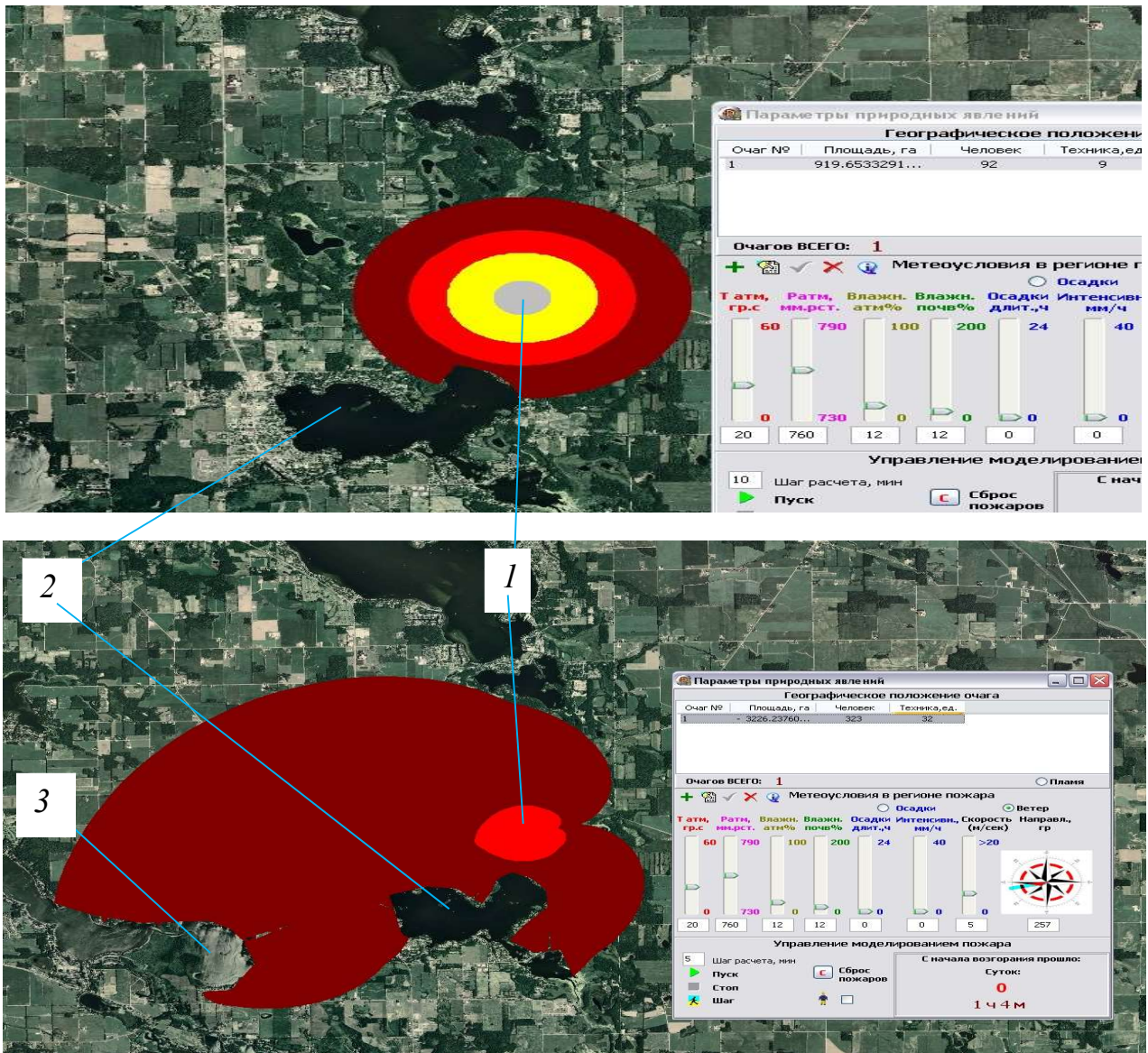


Рисунок 2.6 – Поля температур на местности через 3 часа от начала модельного лесного пожара при отсутствии ветра (а) и через 1 час 4 мин с учетом скорости и направления ветра (б):

1 – начальный очаг пожара; 2 – водоем; 3 – каменистая местность

### 2.3. Математическая модель расчета плотности лучистого теплового потока от кромки лесного пожара

Основой для простой математической модели расчета теплового излучения от кромки лесного пожара является уравнение лучистого теплообмена [66]:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} c_0 \left[ \left( \frac{T_{\text{и}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_0}{100} \right)^4 \right] \psi, \quad (2.38)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, падающего на облучаемую поверхность, Вт/м<sup>2</sup>,  $T_{\text{и}}$  – эффективная температура излучающей поверхности пламени, К,  $T_0$  – температура на облучаемой поверхности, К,  $\varepsilon_{\text{пр}}$  – приведенная степень черноты системы «излучаемая поверхность– облучаемая поверхность»;  $c_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\psi$  – коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями, в которой входит расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями.

Коэффициент облученности элементарной площадки облучаемого тела вычисляется по формуле [66]:

$$\psi = \int_{F_{\text{и}}} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_{\text{и}}, \quad (2.39)$$

где  $r$  – расстояние между элементарными площадками излучаемой и облучаемой поверхностей, м;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между нормальными к элементарным площадкам излучаемой и облучаемой поверхностей и прямой линией с длиной  $r$ , соединяющей центры этих площадок, рад;  $F_{\text{и}}$  – площадь излучаемой поверхности, м<sup>2</sup>.

При прямоугольной площади излучательной поверхности кромки лесного массива коэффициент облученности для одной четвертой части площади поверхности факела вычисляется по формуле:

$$\psi_{21} = \frac{1}{2\pi} \left( \frac{a}{\sqrt{a^2 + r^2}} \operatorname{arctg} \frac{b}{\sqrt{a^2 + r^2}} + \frac{b}{\sqrt{b^2 + r^2}} \operatorname{arctg} \frac{a}{\sqrt{b^2 + r^2}} \right), \quad (2.40)$$

где  $a$  и  $b$  – половина сторон прямоугольника факела [66].

## **2.4. Методика расчета теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама**

Распространение пожара принимается круговым, т.е. от источника возникновения пожара распространение горения по горючим материалам идет по всем направлениям.

Например, при распространении пожара по однородной местности при отсутствии ветра и осадков внешняя граница (кромка) природного пожара является окружностью в каждый момент времени.

При попадании кромки пожара в местность с другими горючими материалами скорость распространения пожара меняется.

В случае обтекания кромкой пожара негорючих участков местности, например, водных пространств, исходные лучи распространения пожара, выходящие из исходной точки, обрываются. Поэтому для задания условия непрерывного обтекания негорючего участка задаются новые источники возникновения пожара. От новых источников распространение пожара также принимается круговым.

Таким образом, принят источниково-лучевой принцип распространения пожара.

Расчет параметров лесного пожара проводится в следующей последовательности.

### 1. Сбор и анализ исходных данных:

- источник (источники) возникновения пожара задается в виде точки, привязанной к определенной местности с помощью географических координат;
- определяются размеры и пирологические характеристики природных зон территории, внутри которой находится источник горения;

- определяются метеорологические характеристики местности на момент начала пожара;

- задается шаг расчета по времени исходя из топографических, метеорологических и других условий задачи;

2. Проводится расчет параметров пожара в следующей последовательности:

- в следующий момент времени находится положение кромки пожара с использованием формулы (2.21) по всем направлениям кругового развития пожара;

- во всей области пожара определяются величины параметров теплообмена, в том числе, опасных факторов пожара, с использованием системы уравнений (2.1)-(2.19);

- в случае обтекания кромкой пожара негорючих участков местности, например, водных пространств, исходные лучи распространения пожара, выходящие из исходной точки, обрываются; поэтому для задания условия непрерывного обтекания негорючего участка задаются новые источники, распространение пожара от которых также принимается круговым;

- при попадании объектов инфраструктуры (вершин и связей) в область пожара начинается расчет параметров пожара внутри соответствующих объектов и определяются времена последовательного прекращения функционирования вершин и связей;

3. При достижении кромкой пожара границы леса у ОЭ проводится расчет теплового воздействия пожара на ОЭ с использованием системы уравнений (2.1) - (2.19), (2.38) - (2.40).

4. Расчет параметров пожара и теплового воздействия пожара на ОЭ повторяется с пункта 2 до заданного максимального промежутка времени развития пожара.

## Выводы по второй главе

1. Для возможности использования полевой модели расчета термогазодинамики пожара в случае лесного пожара разработана математическая модель расчета скорости распространения кромки низового лесного пожара.

2. Предложенная математическая модель и методика расчета скорости распространения и теплофизических параметров кромки низового лесного пожара позволяет учесть совместное влияние основных пирологических и метеорологических характеристик лесного пожара:

- давление, температура и влажность атмосферы;
- скорость и направление ветра;
- неоднородность растительности (а также негорючие участки поверхности) и ландшафт местности;
- влажность лесных горючих материалов;
- интенсивность и продолжительность осадков.

3. Разработанная математическая модель и методика расчета теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама позволяет учесть климатические условия и пирологические характеристики лесных горючих материалов Вьетнама.

## ГЛАВА 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ ЛЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ ВЬЕТНАМА

### 3.1. Экспериментальная установка и методика проведения экспериментов

Схема экспериментальной установки, приведенной в работах [62, 63], представлена на рисунке 3.1.

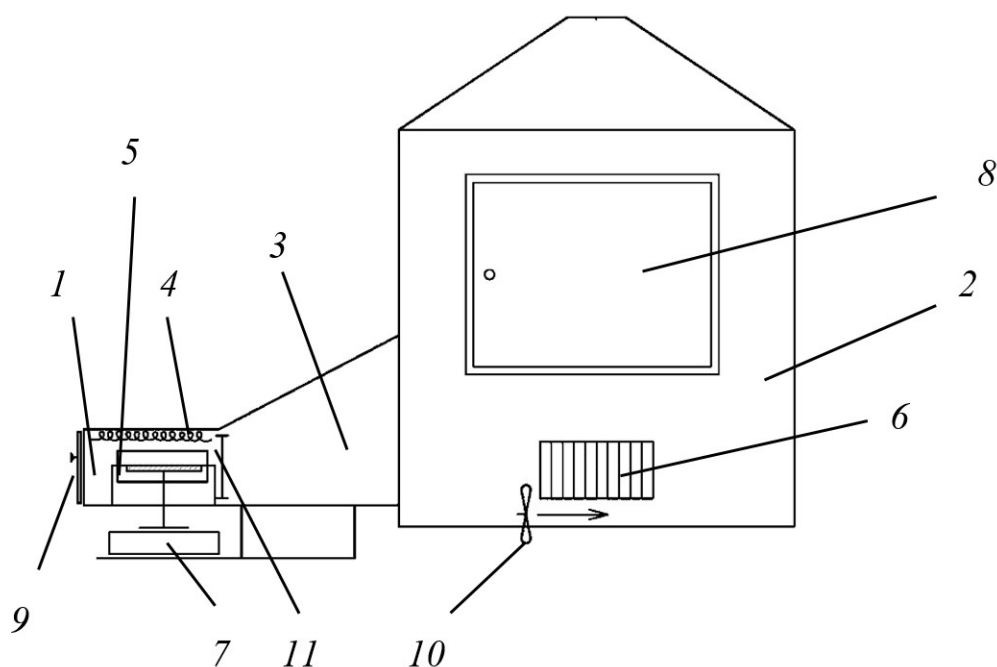


Рисунок 3.1 – Схема экспериментальной установки [62, 63]: 1 – камера сгорания; 2 – экспозиционная камера; 3 – переходной рукав; 4 – электронагревательный излучатель; 5 – держатель образца; 6 – шибберные отверстия; 7 – столик для весов; 8 – дверца экспозиционной камеры; 9 – дверца камеры сгорания; 10 – вентилятор; 11 – заслонка (перегородка) переходного рукава

В камере сгорания 1 под воздействием лучистого теплового потока от экранированного электронагревательного излучателя 4 происходит горение образца горючего материала, находящегося в держателе образца 5 на подвижной основе. Смесь продуктов горения и воздуха из камеры сгорания 1 поступает через переходный рукав 3 в экспозиционную камеру 2.

Камера сгорания объемом  $3 \times 10^{-3} \text{ м}^3$  изготовлена из листов нержавеющей стали толщиной  $2,0 \pm 0,1$  мм. На боковой стенке камеры имеются окно из кварцевого стекла для наблюдения за образцом при испытаниях, а также шибберные отверстия б, для изменения режимов испытания.

Экспозиционная камера выполнена в виде кубического объема ( $V = 0,5887 \text{ м}^3$ ), оканчивающегося сверху конусообразной частью.

На двух боковых стенках камеры установлены шибберные отверстия.

Держатель образцов размещен на электронных весах 7 с погрешностью не более  $\pm 1$  мг, расположенных на специальном подвижном столе.

Для непрерывного контроля температуры в экспозиционной камере использовались низко инерционные бронированные термопары в количестве 32 штук с диапазоном измерений от  $-40^\circ\text{C}$  до  $+1100^\circ\text{C}$  с погрешностью не более  $\pm 1,5 \cdot t(^\circ\text{C})$ .

Для контроля плотности теплового потока, падающего на образец, подвергшийся испытаниям, используется водоохлаждаемый датчик типа Гордона и регистрирующий прибор с диапазоном измерений от 0 до 100 мВ. Погрешность измерения плотности теплового потока не превышает  $\pm 8\%$ .

Для непрерывного контроля состава газовой среды в экспозиционной камере используется многоканальный газоанализатор, измеряющий концентрацию оксида углерода с диапазоном измерений от 0 до 1% об и допустимой погрешностью  $\pm 10\%$ , диоксида углерода с диапазоном измерений от 0 до 5% об и допустимой погрешностью  $\pm 10\%$ , кислорода с диапазоном измерений от 0 до 21% об и допустимой погрешностью  $\pm 10\%$  об.

Горючие материалы испытывались в режиме пламенного горения. Режим пламенного горения обеспечивается при температуре испытания  $750^\circ\text{C}$  (плотность падающего теплового потока  $60 \text{ кВт/м}^2$ ).

Предварительно взвешенный образец материала, имеющий комнатную температуру, помещают в держатель образца (вкладыш).



С момента выхода электронагревательного излучателя на стабилизированный режим открывают заслонку переходного рукава и дверцу камеры сгорания. Вкладыш с образцом без задержки помещают в держатель образца, после чего дверцу камеры сгорания закрывают.

В процессе испытаний в режиме постоянного мониторинга фиксируются показания концентраций CO (% об), CO<sub>2</sub>(% об), O<sub>2</sub> (% об), температуры и изменение массы образца.

Удельная массовая скорость газификации определяется по формуле:

$$\psi_{уд} = \frac{1}{F} \frac{dM}{d\tau}, \quad (3.1)$$

где  $\psi_{уд}$  – удельная массовая скорость газификации, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $M$  – текущая масса образца, кг;  $\tau$  – время, с;  $F$  – площадь поверхности образца, м<sup>2</sup>.

Для прогнозирования токсикологической обстановки на лесных пожарах необходимо, в первую очередь, знать концентрацию монооксида углерода. Поэтому в экспериментах определялся удельный коэффициент образования CO ( $L_{CO}$ ) в каждый момент времени по следующей формуле:

$$L_{CO} = \frac{V}{\psi_{уд} F} \frac{d\rho_{CO}}{d\tau}, \quad (3.2)$$

где  $V$  – внутренний объем установки, м<sup>3</sup>;  $\rho_{CO}$  – среднеобъемная плотность CO внутри установки, кг/м<sup>3</sup>.

### 3.2. Исходные данные

Для математического моделирования параметров и теплового воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики необходимо, в первую очередь, знать низшую рабочую теплоту сгорания ( $Q_{н^p}$ ) и удельную массовую скорость газификации древесной биомассы.

Низшая рабочая теплота сгорания для всех видов древесных лесоматериалов изменяется в пределах  $Q_{н^p}=13,8 - 21,2$  МДж/кг [16, 55]. Поэтому неопределенность в выборе вышеуказанной теплоты приведет к погрешности порядка 27% при задании средней ее величины 17,5 МДж/кг.

Проведем измерения удельной массовой скорости газификации образцов пород древесной массы ствола деревьев Вьетнама, представленных в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Образцы пород деревьев Вьетнама

№ образца	Название (русское, английское, вьетнамское)	Класс дерева	Влажность, %
1	Акация, <i>acacia auriculiformis</i> , keo	Двудольные	<5
2	Мелия ацедарах, <i>chinaberry</i> , хоан	Двудольные	<5
3	Сосна, <i>pinaceae</i> , họ thông	Хвойные	<5
4	Эвкалипт, <i>eucalyptus camaldulensis dehnhardt</i> , bạch đàn	Двудольные	8
5	Лонган, <i>dimocarpus longan</i> , nhãn	Двудольные	7

Размеры образцов древесины составляли 0,1×0,1×0,02 м.

Влажность образцов измерялась влагомером ZNT 125 Electronic с диапазоном измерений 5÷50% и погрешностью измерений ± 2%. Влажность образцов была менее 8% (таблица 3.1), что соответствует влажности деревьев Вьетнама в наиболее пожароопасный засушливый период времени.

Размеры образцов листьев и веток (лиственно-древесной массы) составляли 0,1×0,1×0,05 м. Вес листьев и ветвей в образце составляет 5,27 г и 12,3 г в соотношении 3:7, что соответствует характеристике тропических лесов во Вьетнаме.

### 3.3. Результаты экспериментов по горению древесной массы и их анализ

Зависимости удельной массовой скорости газификации горючего материала от времени испытаний приведены на рисунке 3.2.

Из рисунка 3.2 видно, что локальные величины  $\psi_{уд}$  после 2 мин испытаний находятся в диапазоне от  $\psi_{уд} = 0,0063 \div 0,014$  кг/(м<sup>2</sup>·с), где нижний предел соответствует горению хвойных пород деревьев, а верхний – лиственных [55].

На рисунке 3.3 представлены зависимости удельных массовых коэффициентов образования СО от времени испытаний. Результаты экспериментов показали, что значения удельных коэффициентов образования СО и, соответственно, плотности СО незначительны на начальной стадии горения, когда концентрация кислорода практически не меняется. При снижении концентрации O<sub>2</sub> выделение СО резко увеличивается.

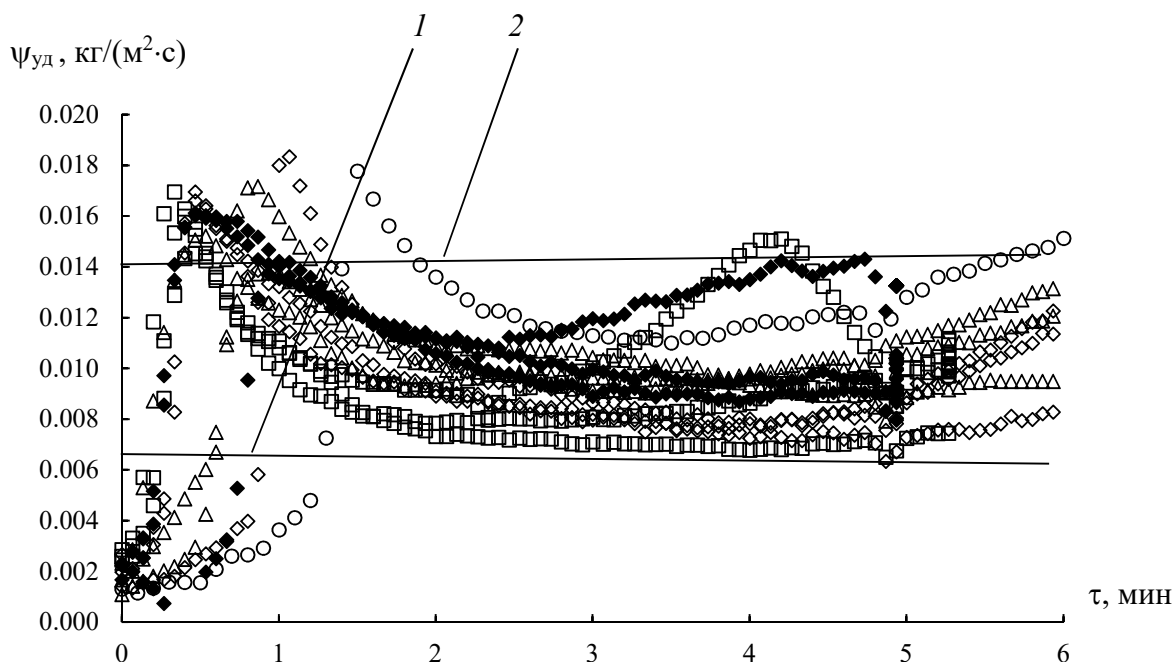


Рисунок 3.2 – Зависимости удельной массовой скорости газификации древесной массы от времени с начала горения: □ – образец №1; Δ – образец №2; ◆ – образец №3; ○ – образец №4; ◇ – образец №5; 1 –  $\psi_{уд} = 0,0063$  кг/(м<sup>2</sup>·с) (хвойные породы) [55];  
2 –  $\psi_{уд} = 0,014$  кг/(м<sup>2</sup>·с) (лиственные) [55]

Средние за время проведения экспериментов значения  $\psi_{уд}$  и  $L_{CO}$  представлены в таблице 3.2.

Из таблицы 3.2 видно, что экспериментальные средние величины  $\psi_{уд}$  для всех рассматриваемых пород деревьев находятся в диапазоне от  $\psi_{уд} = 0,0063$  кг/(м<sup>2</sup>·с) (хвойные породы) [55] до  $\psi_{уд} = 0,014$  кг/(м<sup>2</sup>·с) (лиственные) [55]. Средние опытные значения  $L_{CO}$  существенно меньше (более, чем в 2 раза) величины, приведенной в базе данных [55].

Проведенное экспериментальное исследование процесса горения образцов древесной массы наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама позволяет обосновать выбор значений удельной массовой скорости газификации и удельного коэффициента образования CO, необходимых для математического моделирования параметров и теплового воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики Вьетнама.

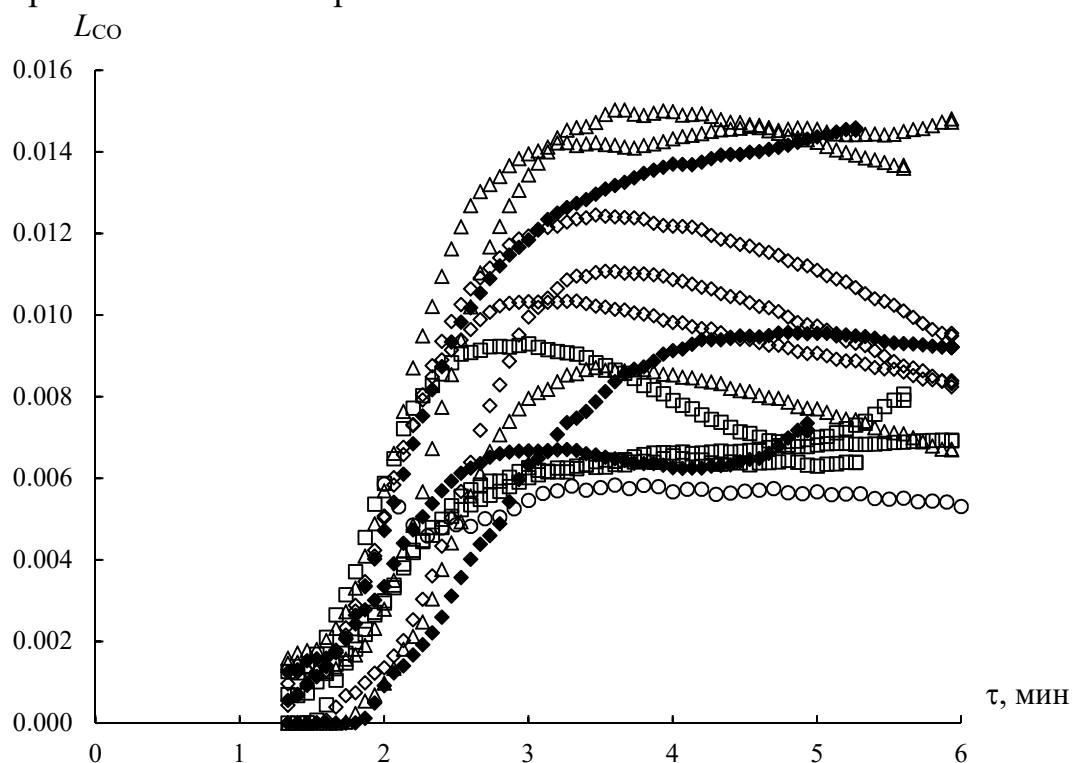


Рисунок 3.3 – Зависимости удельных массовых коэффициентов образования CO от времени с начала горения: □ – образец №1; Δ – образец №2; ◆ – образец №3; о – образец №4; ◇ – образец №5

Таблица 3.2 – Средние по времени проведения экспериментов значения  $\psi_{уд}$  и  $L_{CO}$ 

№ образца	$\psi_{уд}, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$		$L_{CO}$	
	среднее	по [14]	среднее	по [14]
1	0,0093	0,014	0,0052	0,024
2	0,0102		0,0107	
3	0,0113	0,0063	0,0073	
4	0,0127	0,014	0,012	
5	0,0091		0,008	

### 3.4. Результаты экспериментов по горению лиственнично-древесной массы и их анализ

Зависимости удельной массовой скорости газификации лиственнично-древесной массы от времени испытаний приведены на рисунке 3.4.

Из рисунка 3.4 видно, что локальные величины  $\psi_{уд}$ :

- до 1 мин испытаний имеют максимальное значение  $\psi_{уд} = 0,023 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;
- после 1 мин испытаний имеют максимальное значение  $\psi_{уд} = 0,011 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ .

На рисунке 3.5 представлены зависимости удельных массовых коэффициентов образования CO от времени испытаний. Результаты экспериментов показали, что значения удельных коэффициентов образования CO и, соответственно, плотности CO незначительны на начальной стадии горения, когда концентрация кислорода практически не меняется. При снижении концентрации  $O_2$  выделение CO резко увеличивается.

Средние за время проведения экспериментов значения  $\psi_{уд}$  и  $L_{CO}$  при горении лиственнично-древесной и древесной (п. 3.3 данной работы) массы представлены в таблице 3.3.

Из таблицы 3.3 видно, что экспериментальные средние величины  $\psi_{уд}$  для всех рассматриваемых пород деревьев:

- для древесной массы находятся в диапазоне  $\psi_{уд} = 0,0091 \div 0,0127 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ ;

- для лиственно-древесной массы находятся в диапазоне  $\psi_{уд} = 0,0016 \div 0,0036$  кг/(м<sup>2</sup>·с).

Таким образом, удельная скорость выгорания лиственно-древесной массы существенно ниже, чем в случае только древесной массы.

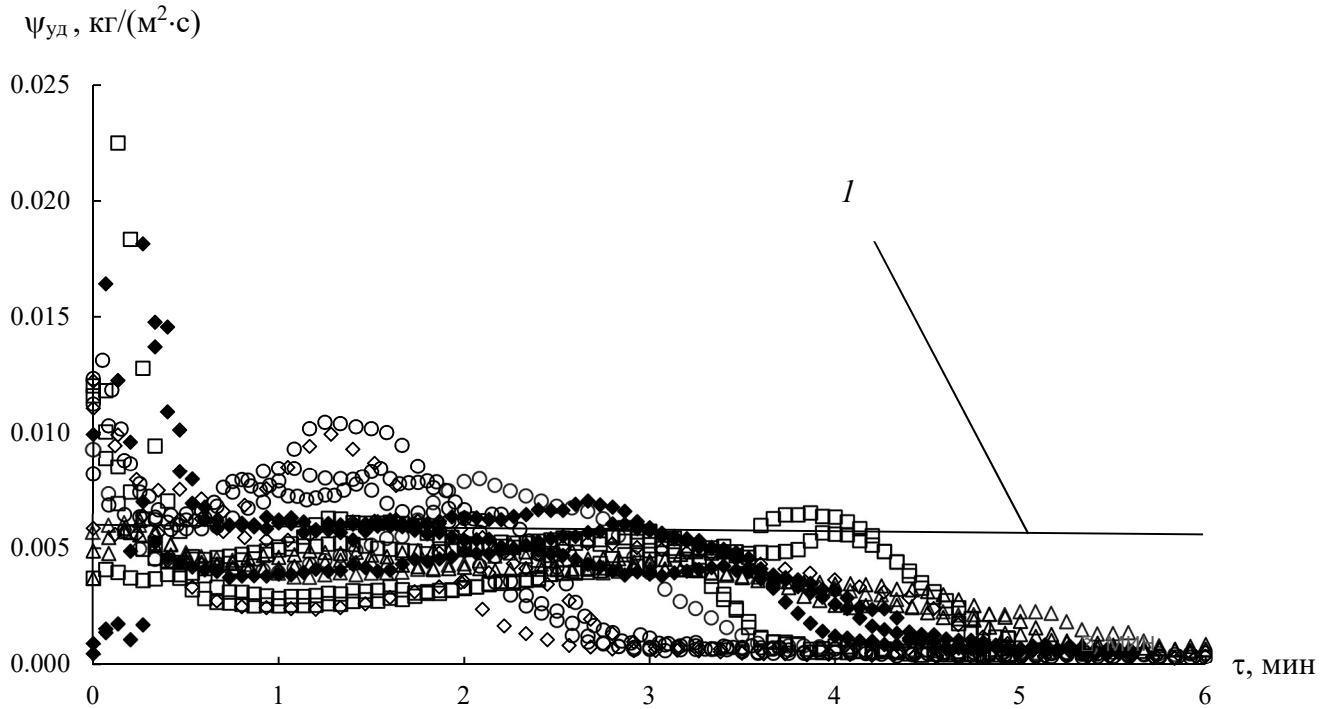


Рисунок 3.4 – Зависимости удельной массовой скорости газификации лиственно-древесной массы от времени с начала горения: □ – образец №1; Δ – образец №2; ◆ – образец №3; ○ – образец №4; ◇ – образец №5; I –  $\psi_{уд} = 0,0063$  кг/(м<sup>2</sup>·с) (хвойные породы) [55]

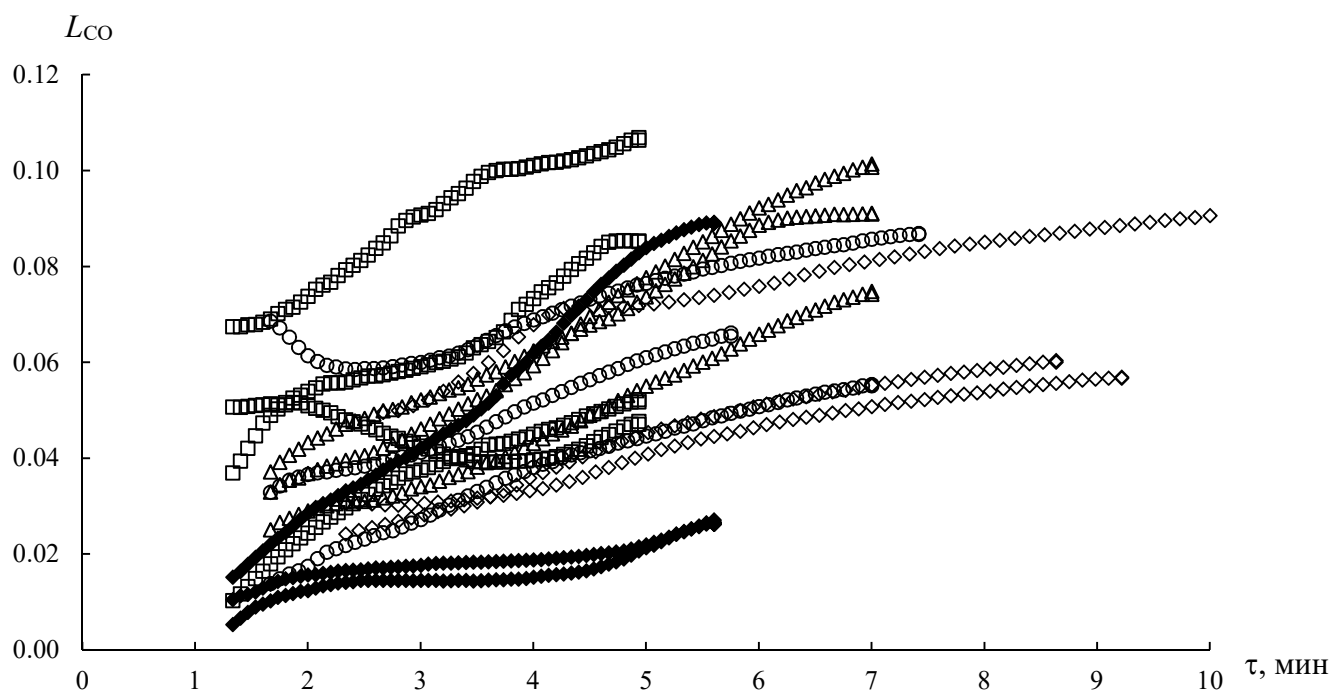


Рисунок 3.5 – Зависимости удельных массовых коэффициентов образования СО от времени с начала горения лиственнично-древесной массы: □ – образец №1; Δ – образец №2; ◆ – образец №3; о – образец №4; ◇ – образец №5

Таблица 3.3 – Средние по времени проведения экспериментов значения  $\psi_{уд}$  и  $L_{CO}$

№ образца	$\psi_{уд}, \text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$			$L_{CO}$		
	лиственнично-древесный образец	древесный образец	по [55]	лиственнично-древесный образец	древесный образец	по [55]
1	0,0032	0,0093	<b>0,014</b>	0,0565	0,0052	0,024
2	0,0027	0,0102		<b>0,0587</b>	0,0107	
3	0,0036	0,0113	0,0063	0,0180	0,0073	
4	0,0029	0,0127	0,014	0,0472	0,012	
5	0,0016	0,0091		0,0524	0,008	

## Выводы по третьей главе

1. Проведенные экспериментальные исследования процесса горения образцов древесной и листовенно-древесной массы наиболее распространенных листовенных и хвойных пород деревьев Вьетнама позволяют обосновать выбор значений удельной массовой скорости газификации и удельного коэффициента образования CO, необходимых для математического моделирования параметров и теплового воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики Вьетнама.

2. Проведенные экспериментальные исследования горения образцов древесной массы стволов наиболее распространенных пород деревьев Вьетнама показали, что при моделировании горения ствола дерева во Вьетнаме можно с запасом по надежности расчетов использовать величины удельной массовой скорости газификации  $\psi_{уд} = 0,014$  кг/(м<sup>2</sup>·с) и удельного коэффициента образования CO  $L_{CO} = 0,024$ , приведенные в базе данных горючей нагрузки [55] для горения листовенных пород.

3. При горении листовенно-древесной массы деревьев Вьетнама удельная массовая скорость газификации существенно меньше, чем в случае горения стволов деревьев. Однако удельный коэффициент образования CO в примерно 2 раза выше величины, принятой в работе [55], и в 2,5 – 6,5 раза, больше полученного из экспериментов при горении только древесной массы.

4. Проведенные экспериментальные исследования горения образцов листовенно-древесной и только древесной массы наиболее распространенных пород деревьев Вьетнама показали, что при моделировании лесных пожаров во Вьетнаме можно с запасом по надежности расчетов использовать величину удельной массовой скорости газификации  $\psi_{уд} = 0,014$  кг/(м<sup>2</sup>·с), приведенную в базе данных горючей нагрузки [55] для горения листовенных пород, и удельный коэффициент образования CO  $L_{CO} = 0,0587$ , который является максимальным значением из полученных экспериментальных величин.



## **4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛООВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ ЛЕСНОГО ПОЖАРА НА ОБЪЕКТЫ ЭНЕРГЕТИКИ ВЬЕТНАМА**

### **4.1. Пожарная опасность пятнистых возгораний**

#### **4.1.1. Постановка задачи**

Среди верховых лесных пожаров выделяется категория пожаров, определяющим механизмом распространения которых является разлет горящих и тлеющих частиц лесных горючих материалов, и которые называются пятнистыми возгораниями [64]. Горящие частицы в большом количестве падают перед фронтом верхового пожара, распространяющегося при сильном ветре, образуя новые очаги горения. При наличии мощной конвективной колонки над кромкой верхового пожара горящие частицы могут подниматься ею на значительную высоту и переноситься ветром на расстояния, достигающие нескольких сотен метров [64]. Такая конвективная колонка сама может стать источником пятнистых загораний, а лесной пожар может принять пульсирующий характер, распространяясь скачками [64].

Пятнистыми называются высокоинтенсивные лесные пожары, над которыми возникают мощные конвекционные потоки нагретого воздуха и продуктов сгорания [82]. 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.

В настоящее время не сложилось единого мнения в вопросе о статусе пятнистых пожаров в классической классификации природных пожаров. Одни исследователи [82], основываясь на особенностях этих пожаров, считают их отдельным видом, имеющим принципиальные отличия от всех прочих. Другие [83, 84] представляют пятнистые пожары как стадию развития верховых пожаров. Но в последнем случае и сами верховые пожары можно рассматривать в качестве стадии развития низовых пожаров, поскольку в подавляющем числе случаев первоначально происходит загорание напочвенного покрова и только потом огонь переходит в кроны. Поэтому, учитывая специфические условия распространения пятнистых пожаров, отличающиеся от других видов, и главное - во многом определяющие тактику тушения очага горения и способы борьбы с ним, будет более правильно выделить пятнистые пожары в отдельный вид.

Экспериментальных данных по параметрам такого типа пожара, которые могут быть использованы при разработке математической модели расчета воздействия пятнистого возгорания на объекты энергетики, в литературных источниках за исключением работы [64] практически нет, так как измерения и наблюдения в условиях таких пожаров сопряжены с большой опасностью.

Возможность подъема частиц горючего зависит от скорости потока на высоте древостоя. Если эта скорость высока, поток подхватывает падающие с деревьев кусочки коры, древесины, мелкие веточки и поднимает их вверх. Пятнистые загорания могут вызвать пожары, скорость потока газа над которыми в пределах высоты древостоя достигает 4,0 - 4,5 м/с. При подъеме частицы движутся со скоростью, меньшей скорости потока. Вверху колонки частицы под действием ветра движутся горизонтально и далее опускаются вниз.

На практике большое значение имеет визуальное определение вероятности пятнистых загораний на конкретном лесном пожаре. При формировании конвекционной колонки, теряющей свою структуру на высоте 1000 м и более, дополнительных очагов горения может не быть. Это объясняется тем, что вследствие

существующего подтока воздуха в дымовую колонку горящие частицы покидают ее только в самой верхней части, но за время подъема частица успевает сгореть.

Пожар может носить характер пятнистого, если ветер перегибает колонку, горящие частицы выпадают в точке перегиба и переносятся далее горизонтальными потоками воздуха. Но высота перегиба не должна быть так велика, чтобы падающие с нее частицы сгорали в воздухе. Когда газовый поток не имеет точки перегиба, но сильно наклонен ветром, пятнистые загорания возникают перед фронтом пожара. Тогда выпадение горючего из потока может происходить на различной высоте, не достигнув точки его перегиба.

Расстояние переноса частицы определяется временем ее горения, скоростью падения и скоростью ветра. Наиболее опасной будет та высота, при выпадении с которой кусочки горючего достигают земли за время, меньшее времени их сгорания. На высокоинтенсивных лесных пожарах скорость газового потока на высоте древостоя достигает 5 - 6 м/с. Следует отметить, что над пологие леса скорость конвекционного потока возрастает приблизительно до 0,25 - 0,3 его высоты при условии, что колонка не будет смята ветром. Здесь температуры окружающего и поднимающегося воздуха сравниваются, ускорение газового потока становится равным нулю, а его скорость будет максимальной.

Скорость восходящих над пожарами потоков может достигать 35 м/с. Известны случаи [85], 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 [86]. 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.

При небольшом ветре над слабыми низовыми пожарами могут образовываться конвекционные колонки (см. рисунок 4.1) высотой 300 - 400 м, но они мало влияют на горизонтальные потоки воздуха. В данном случае полеты на летательных аппаратах

становятся небезопасны на высоте 100 - 150 м только над фронтом пожара. Когда над очагом горения образуется конвекционная колонка без вихревых потоков, наиболее характерное удаление пятнистых загораний составляет 100 - 200 м, а максимальное - 300 м. По мере приближения к фронту пожара количество загораний резко возрастает. При засухе, ураганных ветрах со скоростью 30 м/с и более и, когда на площади сосредоточены большие запасы горючих материалов, в лесных массивах развиваются пожары очень высокой интенсивности с вихревыми конвекционными потоками. В подобной ситуации увеличивается расстояние переноса частиц горючего по воздуху. Даже широкие реки не могут служить тогда в качестве надежного противопожарного барьера.



Рисунок 4.1 – Фотография конвекционной колонки [82]

В данной главе проведен анализ условий возникновения пожарной опасности пятнистого возгорания (в добавление к переносу горящих и тлеющих частиц лесных горючих материалов) для объектов энергетики за счет повышенных лучистых тепловых потоков.

### 4.1.2. Математическая модель

Обобщенное трехмерное нестационарное дифференциальное уравнение законов сохранения массы, импульса и энергии имеет вид [56]:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho \Phi) + \operatorname{div}(\rho w \Phi) = \operatorname{div}(\Gamma \operatorname{grad} \Phi) + S, \quad (4.1)$$

где  $\tau$  – время, с;  $\rho$  – плотность газовой смеси, кг/м<sup>3</sup>;  $w$  – скорость газовой смеси, м/с;  $\Phi$  – зависимая переменная (температура, проекции скорости на координатные оси, массовые концентрации компонентов газовой смеси O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, кинетическая энергия турбулентности и скорость ее диссипации);  $\Gamma$  – коэффициент диффузии для  $\Phi$ ;  $S$  – источниковый член.

Начальные условия к уравнению (4.1) принимаются следующими:

- температура атмосферного воздуха равна 293 К;
- давление в атмосферном воздухе на уровне земли равно  $1,013 \times 10^5$  Па;
- массовые концентрации: кислорода -  $X_{O_2} = 0,23$ , азота -  $X_{N_2} = 0,77$ , остальных газов - равны нулю.

Граничные условия к уравнению (4.1) на твердых поверхностях:

- тепловой поток равен нулю;
- условие «прилипания» для уравнения неразрывности.

Замкнутая система уравнений (1) решена численно методом контрольных объемов [56] с использованием компьютерной программы [65], которая реализует полевую модель расчета термогазодинамики пожара [54].

Основой для простой математической модели расчета теплового излучения от пятнистого возгорания является уравнение лучистого теплообмена [66]:

$$q = \varepsilon_{\text{пр}} c_o \left[ \left( \frac{T_{\text{н}}}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_o}{100} \right)^4 \right] \Psi, \quad (4.2)$$

где  $q$  – плотность теплового потока, падающего на облучаемую поверхность, Вт/м<sup>2</sup>,  $T_{и}$  – эффективная температура излучающей поверхности пятнистого возгорания, К,  $T_{о}$  – температура на облучаемой поверхности, К,  $\varepsilon_{пр}$  – приведенная степень черноты системы «излучаемая поверхность– облучаемая поверхность»;  $c_0 = 5,67$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) – коэффициент излучения абсолютно черного тела;  $\psi$  – коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями, в которой входит расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями.

Коэффициент облученности элементарной площадки облучаемого тела вычисляется по формуле [66]:

$$\psi = \int_{F_{и}} \frac{\cos \varphi_1 \cos \varphi_2}{\pi r^2} dF_{и}, \quad (4.3)$$

где  $r$  – расстояние между элементарными площадками излучаемой и облучаемой поверхностей, м;  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – углы между нормальными к элементарным площадкам излучаемой и облучаемой поверхностей и прямой линией с длиной  $r$ , соединяющей центры этих площадок, рад;  $F_{и}$  – площадь излучаемой поверхности, м<sup>2</sup>.

Основная проблема при использовании формул (4.2) и (4.3) состоит в неопределенности формы излучающей поверхности пятнистого пожара и нахождении эффективной температуры  $T_{и}$ .

#### 4.1.3. Исходные данные для численных экспериментов

Размеры поверхности горючего материала (древесная стружка) при проведении экспериментов в работе [64] составляли 70×70 м.

Конечно-разностная сетка для решения системы уравнений (4.1) с использованием компьютерной программы [65] имела размеры по количеству ячеек 101×101×51 вдоль соответствующих координатных осей. Шаг по пространственным

координатам был переменным с минимальной величиной в области горючего материала, равной 0,5 м.

Пожарная нагрузка равнялась  $1 \text{ кг/м}^2$  [64]. Удельную массовую скорость выгорания принимаем равной  $\psi = 0,01 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$  [55].

Однако пожарная нагрузка поверхностного слоя лесного массива может достигать  $5 \text{ кг/м}^2$  и более [16, 67], что видно, например, из рис. 4.1, на котором приведены фотографии типичных лесных пожаров во Вьетнаме. Очаг горения охватывает всю толщину надземного слоя горючих материалов (рис.1, а). Поэтому массовая скорость выгорания, относящаяся к единице площади надземного слоя, может существенно превышать с соответствующую скорость для поверхности древесины. Примем ее для вариантных численных расчетов равной  $\psi = 0,05$  и  $\psi = 0,1 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$ .

Низшая рабочая теплота сгорания для всех видов древесных лесоматериалов изменяется в пределах  $16,8 - 21,2 \text{ МДж/кг}$  [16, 55]. Поэтому неопределенность в выборе вышеуказанной теплоты приведет к погрешности порядка 10% при задании средней ее величины  $19,0 \text{ МДж/кг}$ .

Рассматриваем лучистый теплоперенос от пятнистого пожара, который может привести к воспламенению горючих материалов, находящихся на объекте энергетики, или к термическим ожогам и другим тяжелым последствиям для персонала объекта.

Принимаем в соответствии с «Методикой определения расчетных величин пожарного риска на производственных объектах. Приложение к приказу МЧС России от 10.07.2009 № 404» и работой [66] критическую величину плотности лучистого теплового потока равной  $q_{кр1} = 1400 \text{ Вт/м}^2$  для человека и  $q_{кр2} = 12900 \text{ Вт/м}^2$  в случае воспламенения древесины.



Рисунок 4.2 – Фотографии типичных лесных пожаров во Вьетнаме:  
а – низовой пожар в деревне Лап-Динь, провинция Винь-Фук (15.02.2016)  
б – верховой пожар на перевале Мимоза, город Да-Лат (18.02.2013)



#### 4.1.4. Результаты и анализ численных экспериментов

В таблице 4.1 приведены результаты сравнения расчетных значений температур и скоростей на различных высотах  $z$  от поверхности земли внутри конвективной колонки с экспериментальными данными и результатами расчетов, представленными в работе [64], а также при повышенной скорости выгорания.

Таблица 4.1 – Величины температур и скоростей на различных высотах внутри конвективной колонки

Высота от поверхности земли, м	Превышение температуры газовой смеси над температурой окружающей среды, °С				Вертикальная составляющая скорости газового потока, м/с			
	Эксперимент [64]	Расчет [64]	Расчет по уравнению (4.1) при $\psi=0,01$ кг/(с·м <sup>2</sup> )	Расчет по уравнению (4.1) при $\psi=0,05$ кг/(с·м <sup>2</sup> )	Эксперимент [64]	Расчет [64]	Расчет по уравнению (4.1) при $\psi=0,01$ кг/(с·м <sup>2</sup> )	Расчет по уравнению (4.1) при $\psi=0,05$ кг/(с·м <sup>2</sup> )
1,5	251	282	271	458	–	4,3	4,1	4,0
5,0	84	91	89	156	1,9	3,9	3,2	4,6
10,0	45	40	47	83	2,6	3,5	3,4	4,6
20,0	17	24	23	53	2,9	4,1	3,8	5,8

Математическая модель в работе [64] имеет ряд существенных допущений по физической картине развития пожара внутри конвективной колонки, образующейся над пятнистым возгоранием: процесс, является стационарным, параметры в поперечном сечении колонки постоянны и изменяются только вдоль вертикальной оси колонки. Удовлетворительное совпадение расчета по методике [64] с экспериментом (см. таблицу 4.1) объясняется подбором большого количества эмпирических констант для определения изменения объема колонки по высоте.

Из анализа данных таблицы 4.1 видно, что отличие в превышении температуры газовой смеси над температурой окружающей среды, полученное с использованием системы уравнений (4.1) и из эксперимента, меньше 26% на высоте от уровня земли  $z = 20$  м и менее 5,6% при  $z < 10$  м.

Таким образом, точность предложенного в данной работе метода достаточна для инженерных расчетов, учитывая чрезвычайную сложность физического процесса.

На рисунке 4.3 представлены поля температур в продольном разрезе конвективной колонки, образующейся над горючим материалом, при условиях проведения эксперимента [64] и при повышенной массовой скорости выгорания.

На рисунке 4.4 представлены распределения температуры по высоте конвективной колонки в геометрическом центре прямоугольника горючего материала при различных удельных массовых скоростях выгорания горючего материала.

Поля плотностей лучистых тепловых потоков в продольном разрезе конвективной колонки, образующейся над горючим материалом, при повышенной массовой скорости выгорания приведены на рисунке 4.5.

На рисунке 4.6 представлены зависимости плотностей лучистых потоков от расстояния ( $x$ , м) от центра стороны прямоугольника горючего материала при повышенной массовой скорости выгорания на высоте 2 м от уровня земли.

При использовании формул (4.1) и (4.2) форма и площадь излучающей поверхности принималась по результатам численных экспериментов. В случае  $\psi = 0,05$  кг/(с·м<sup>2</sup>):  $T_{и} = 502^{\circ}\text{C}$ ,  $F_{и} = 70 \times 5$  м; при  $\psi = 0,1$  кг/(с·м<sup>2</sup>):  $T_{и} = 605^{\circ}\text{C}$ ,  $F_{и} = 70 \times 15$  м.

Анализ рисунков 4.5 и 4.6 показывает, что критическая величина для человека плотности лучистого теплового потока  $q_{кр1} = 1400$  Вт/м<sup>2</sup> достигается на расстояниях от центра стороны прямоугольника горючего материала, равных  $x_{кр} = 49$  м при  $\psi = 0,05$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и  $x_{кр} = 105$  м в случае  $\psi = 0,1$  кг/(с·м<sup>2</sup>).

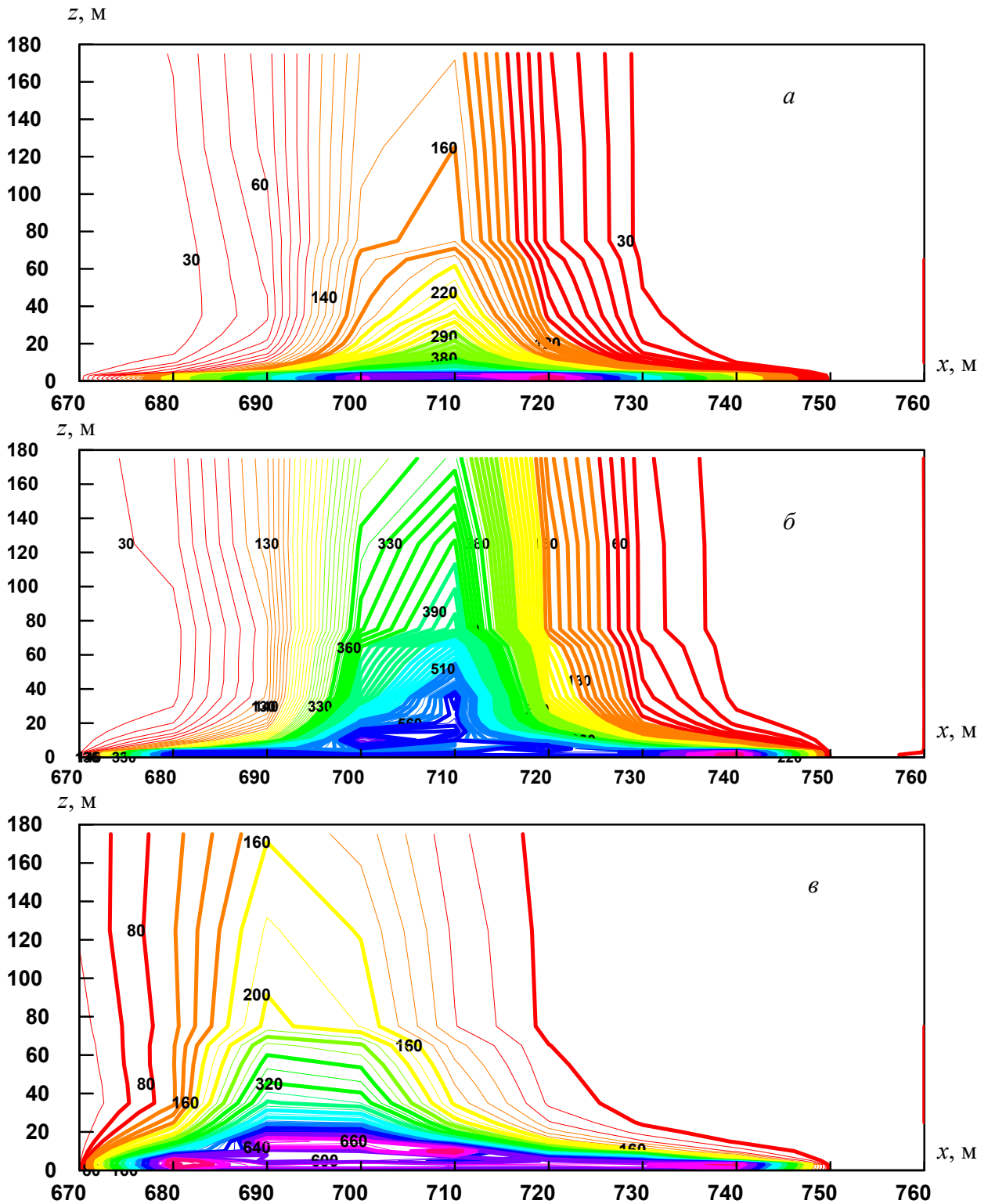


Рисунок 4.3 – Поля температур в продольном разрезе конвективной колонки, образующейся над горячим материалом, при условиях проведения эксперимента [64] и при повышенной массовой скорости выгорания:  $a - \psi = 0,01 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$  [64];  $b - \psi = 0,05$ ;  $v - \psi = 0,1$ .

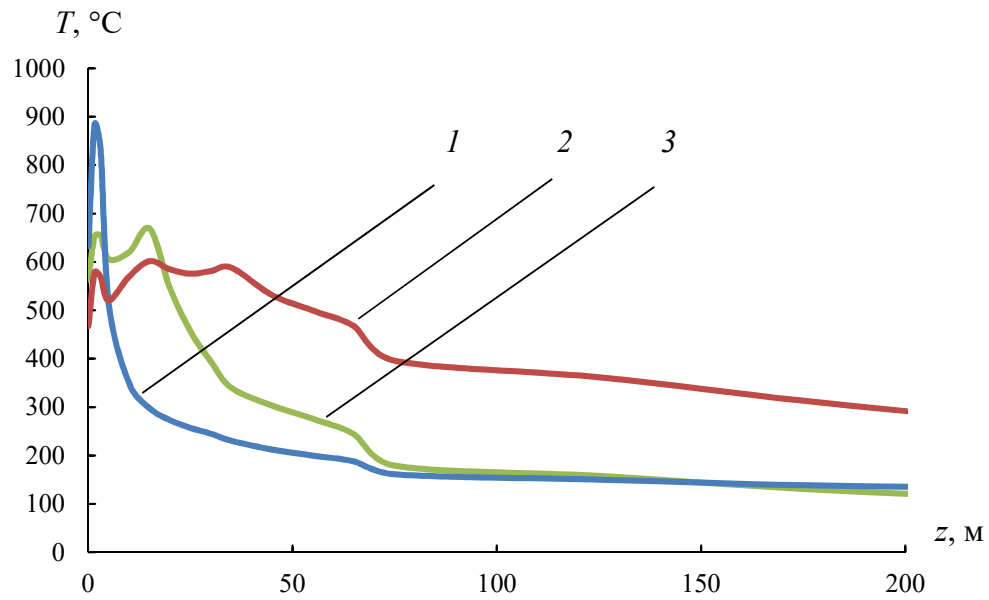


Рисунок 4.4 – Распределения температур по высоте конвективной колонки в геометрическом центре прямоугольника горючего материала при различных удельных массовых скоростях выгорания горючего материала: 1 –  $\psi = 0,01$  кг/(с·м<sup>2</sup>); 2 –  $\psi = 0,05$ ; 3 –  $\psi = 0,1$ .

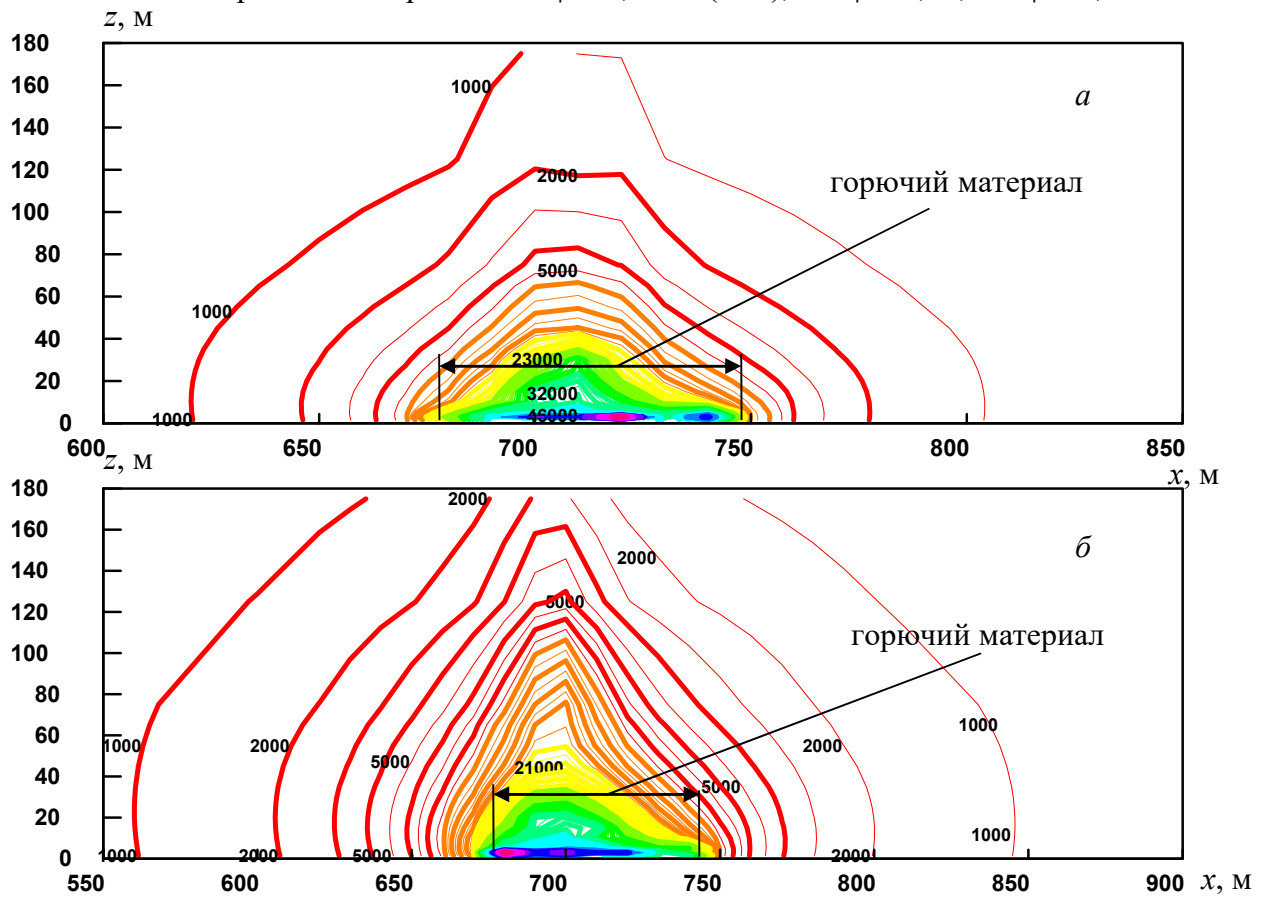


Рисунок 4.5 – Поля плотностей лучистых тепловых потоков в продольном разрезе конвективной колонки, образующейся над горючим материалом, при повышенной массовой скорости выгорания: а –  $\psi = 0,05$  кг/(с·м<sup>2</sup>); б –  $\psi = 0,1$  кг/(с·м<sup>2</sup>).

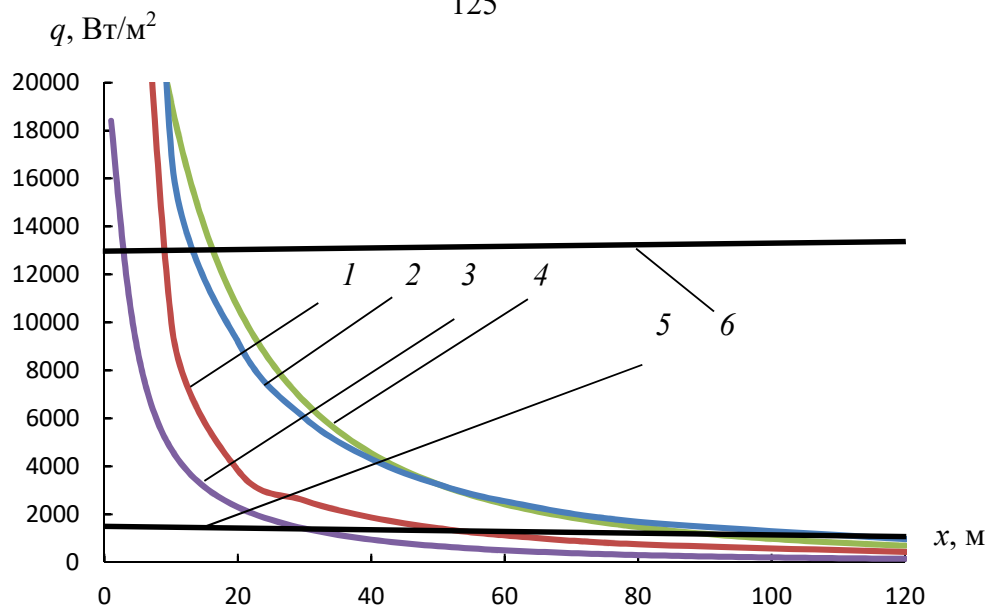


Рисунок 4.6 – Зависимости плотностей лучистых потоков от расстояния от центра стороны прямоугольника горючего материала на высоте 2 м от уровня земли: полевая модель (уравнения (4.1)): 1 –  $\psi = 0,05$  кг/(с·м<sup>2</sup>); 2 –  $\psi = 0,1$ ; выражение (4.2): 3 –  $\psi = 0,05$ ; 4 –  $\psi = 0,1$ ; 5 –  $q_{кр1}$ ; 6 –  $q_{кр2}$ .

Воспламенение древесины при  $q_{кр2} = 12900$  Вт/м<sup>2</sup> происходит на расстояниях от центра стороны прямоугольника горючего материала, равных  $x_{кр} = 14$  м при  $\psi = 0,1$  кг/(с·м<sup>2</sup>) и  $x_{кр} = 9$  м в случае  $\psi = 0,05$  кг/(с·м<sup>2</sup>).

Пожарная опасность пятнистого возгорания в добавление к переносу горящих и тлеющих частиц лесных горючих материалов [64, 68 - 72] для объектов энергетики заключается в повышенных лучистых тепловых потоках, возникающих при удельной (по площади пожара) массовой скорости выгорания, существенно превышающей соответствующее значение для поверхности древесины.

При рассмотренном модельном пятнистом возгорании безопасная зона от кромки пожара до места нахождения персонала объекта без учета коэффициента запаса по точности расчетов превысила 100 м.

Необходимо проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований для разработки нормативных документов по определению безопасных расстояний от объектов энергетики до кромки лесного массива.

## **4.2. Исходные данные для численных экспериментов по тепловому воздействию лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама**

Рассмотрим типовые объекты энергетики Вьетнама, расположенные рядом или внутри лесных массивов. Краткое описание рассматриваемых объектов представлено в таблице 4.2.

Ландшафтный вид и фотографии трансформаторной подстанции мощностью 500 кВ с масляными трансформаторами Вунг-Анг показаны на рисунках 4.7 и 4.8.

Трансформаторная подстанция 500 кВ Вунг-Анг района Ха-Тинь находится под охраной пожарно-спасательной части промышленного района Вунг-Анг. Расстояние от пожарной части до подстанции составляет 13,5 км. Средняя скорость движения пожарного автомобиля 35 км/ч, следовательно, приблизительное время прибытия пожарной машины составляет 23 мин.

Маршрут следования пожарного автомобиля от ближайшей пожарной части до трансформаторной подстанции мощностью 500 кВт с масляными трансформаторами Вунг-Анг приведен на рисунке 4.9.

Ландшафтный вид и фотографии трансформаторной подстанции мощностью 500 кВ с масляными трансформаторами Тхань-Ми района Коанг-Нам представлены на рисунках 4.10 и 4.11.

Трансформаторная подстанция 500 кВ Тхань-Ми района Коанг-Нам находится под охраной пожарно-спасательной части г. Да-Нанг. Расстояние от пожарной части до подстанции составляет 78,4 км. Средняя скорость движения пожарного автомобиля 45 км/ч, следовательно, приблизительное время прибытия пожарной машины составляет 1 час 44 мин. Маршрут следования пожарного автомобиля показан на рисунке 4.12.

Ландшафтный вид и фотографии трансформаторной подстанции мощностью 500 кВ с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь показаны на рисунках 4.13 и 4.14.

Таблица 4.2 – Краткое описание рассматриваемых объектов

№	Название объекта	Мощность, кВт	Высота стены подстанции / Расстояние между масляным трансформатором и стеной, м	Минимальное расстояние от стены подстанции до кромки лесного массива, м	Виды деревьев на кромке лесного массива	Средняя высота деревьев на кромке лесного массива, м	Расстояние до ближайшей пожарной части, км / время прибытия пожарной машины, мин
1	Трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Вунг-Анг района Ха-Тинь	500	3,2 / 12,0	8	лиана, сосна, мелия, акация	10-20	13,5 / 23,0
2	Трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Тхань-Ми района Коанг-Нам	500	2,1 / 20,0	2-3	лиана, мелия ацедарах, эвкалипт	10-15	78,4 / 104,5
3	Трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь	500	2,2 / 20,0	7,6	лиана, акация, лонган, эвкалипт	10-15	3,2 / 7,0



Рисунок 4.7 – Ландшафтный вид трансформаторной подстанции мощностью 500 кВт с масляными трансформаторами Вунг-Анг района Ха-Тинь

Трансформаторная подстанция 500 кВ Хоа-Бинь района Хоа-Бинь находится под охраной пожарно-спасательной части г. Хоа-Бинь. Расстояние от пожарной части до подстанции составляет 3,2 км. Средняя скорость движения пожарного автомобиля 27,5 км/ч, следовательно, приблизительное время прибытия пожарной машины составляет 7 мин. Маршрут следования пожарного автомобиля показан на рисунке 4.9.

Климатические условия областей Вьетнама, в которых расположены рассматриваемые станции, представлены в таблицах 4.3-4.6.





Рисунок 4.8 – Фотографии трансформаторной подстанции мощностью 500 кВт с масляными трансформаторами Вунг-Анг района Ха-Тинь: *а* – в зоне 1; *б* – в зоне 2



Рисунок 4.9 – Маршрут следования пожарного автомобиля от ближайшей пожарной части до трансформаторной подстанции мощностью 500 кВт с масляными трансформаторами Вунг-Анг района Ха-Тинь



Рисунок 4.10 – Ландшафтный вид трансформаторной подстанции мощностью 500 кВт с масляными трансформаторами Тхань-Ми района Коанг-Нам

Из таблиц 4.3 - 4.6 видно, что наиболее неблагоприятные климатические условия на рассматриваемых объектах:

- подстанция Вунг-Анг района Ха-Тинь:  $T_{\text{ср}} = 34,3^{\circ}\text{C}$  (июль);  $T_{\text{макс}} = 40,2^{\circ}\text{C}$  (май);  
 $\varphi_{\text{в}} = 56,5 \%$  (июль);  $w_{\text{в,макс}} = 1,9$  (октябрь);

- подстанция Тхань-Ми района Коанг-Нам:  $T_{\text{ср}} = 34,4^{\circ}\text{C}$  (июль);  $T_{\text{макс}} = 40,9^{\circ}\text{C}$  (май);  $\varphi_{\text{в}} = 56,0 \%$  (июль);  $w_{\text{в,макс}} = 2,0$  (ноябрь);

- подстанция Хоа-Бинь района Хоа-Бинь:  $T_{\text{ср}} = 33,6^{\circ}\text{C}$  (июнь-июль);  $T_{\text{макс}} = 41,2^{\circ}\text{C}$  (май);  $\varphi_{\text{в}} = 60,4 \%$  (декабрь);  $w_{\text{в,макс}} = 1,2$  (июль).



Рисунок 4.11 – Фотографии трансформаторной подстанции мощностью 500 кВт с масляными трансформаторами Тхань-Ми района Коанг-Нам: *a* – в зоне 1; *б* – в зоне 2

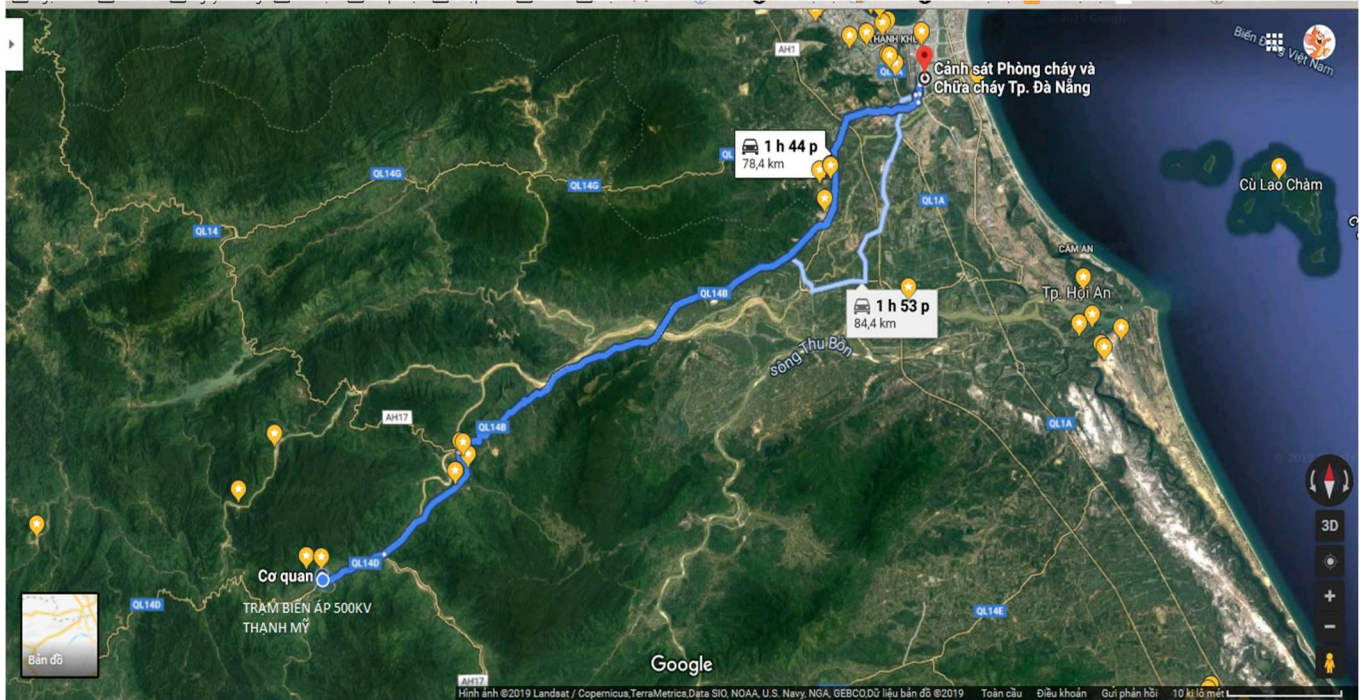


Рисунок 4.12 – Маршрут следования пожарного автомобиля от ближайшей пожарной части до трансформаторной подстанции мощностью 500 кВт с масляными трансформаторами Тхань-Ми района Коанг-Нам



Рисунок 4.13 – Ландшафтный вид трансформаторной подстанции мощностью 500 кВт с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь

*a**б**в*

Рисунок 4.14 – Фотографии трансформаторной подстанции мощностью 500 кВт с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь: *a* – в зоне 1; *б* – в зоне 2; *в* – в зоне 3

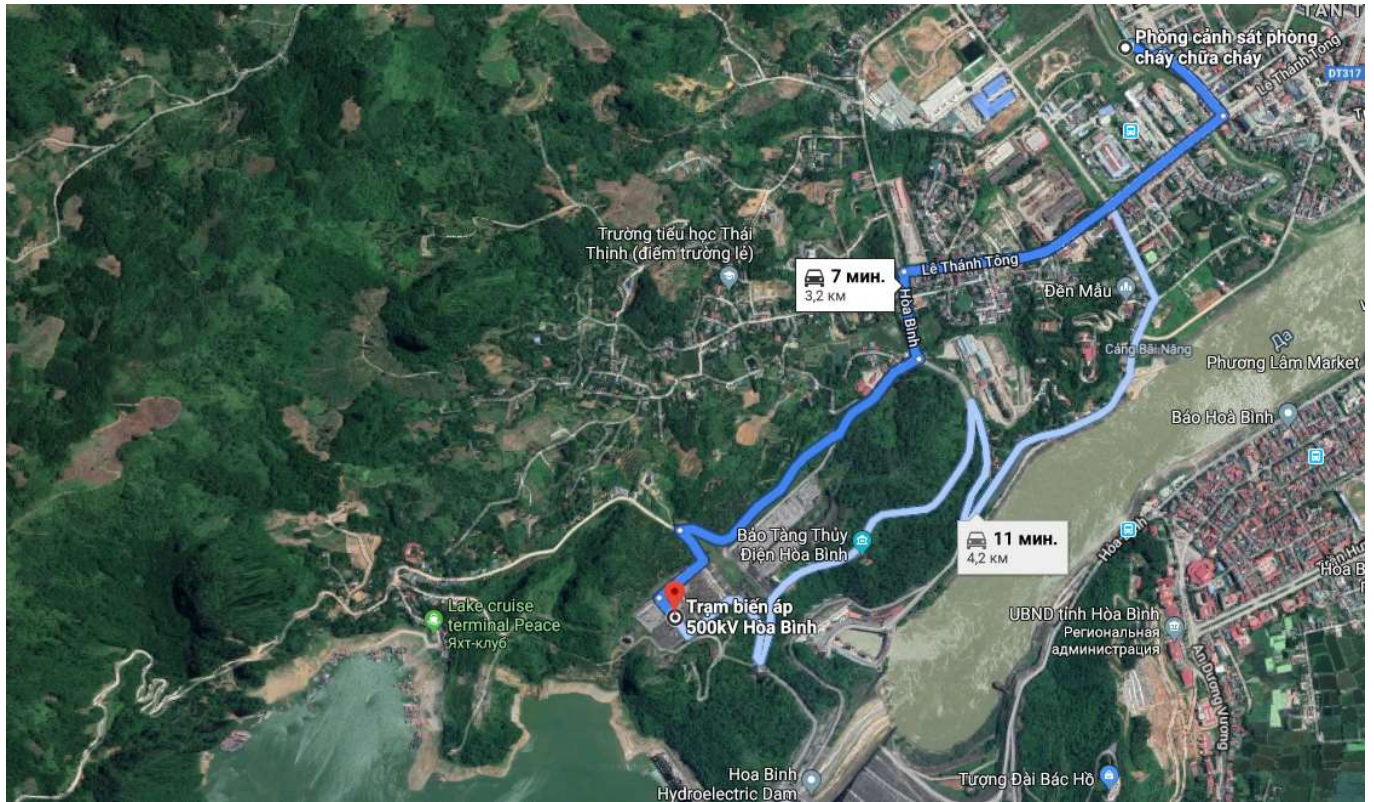


Рисунок 4.15 – Маршрут следования пожарного автомобиля от ближайшей пожарной части до трансформаторной подстанции мощностью 500 кВт с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь

Таблица 4.3 – Среднемесячная температура ( $T_{cp}$ , °C) воздуха на рассматриваемых объектах

№	Объекты	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
1	подстанция Вунг-Анг района Хатинь	20,6	20,8	23,8	28,2	32,2	33,7	34,3*	33,1	30,6	27,6	24,5	21,7
2	подстанция Тхань-Ми района Коанг-Нам	25,1	26,1	28,5	31,0	33,1	34,2	34,4*	33,9	31,6	29,3	27,1	24,9
3	подстанция Хоа-Бинь района Хоа-Бинь	20,5	21,4	24,6	29,1	32,7	33,6*	33,6*	32,8	31,6	29,0	25,8	22,6

Примечание: \* – максимальная среднемесячная температура

Таблица 4.4 – Максимальная температура ( $T_{max}$ , °C) воздуха на рассматриваемых объектах

№	Объекты	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
1	подстанция Вунг-Анг района Хатинь	32,4	35,8	38,1	39,9	40,2*	40,1	39,9	39,7	38,0	35,2	33,4	29,8
2	подстанция Тхань-Ми района Коанг-Нам	37,4	37,0	39,9	40,4	40,9*	40,4	40,6	39,5	38,2	35,8	32,8	31,0
3	подстанция Хоа-Бинь района Хоа-Бинь	34,1	35,7	38,5	39,7	41,2*	39,9	39,3	39,0	36,7	39,0	35,2	33,2

Примечание: \* – максимальная из максимальных температур



Таблица 4.5 – Среднемесячная минимальная влажность (%) воздуха на рассматриваемых объектах

№	Объекты	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
1	подстанция Вунг-Анг района Ха-Тинь	78,8	82,7	80,4	74,8	64,8	59,7	56,5*	62,4	70,6	74,7	75,3	75,3
2	подстанция Тхань-Ми района Ко-анг-Нам	70,3	69,6	67,1	65,8	62,0	58,3	56,0*	57,1	64,8	71,2	72,6	73,3
3	подстанция Хоа-Бинь района Хоа-Бинь	66,1	68,7	68,8	66,5	61,9	63,5	63,9	66,0	64,7	63,0	61,2	60,4*

Примечание: \* – минимальная среднемесячная влажность воздуха

Таблица 4.6 – Среднемесячная скорость ветра (м/с) на рассматриваемых объектах

№	Объекты	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
1	подстанция Вунг-Анг района Ха-Тинь	1,5	1,4	1,3	1,3	1,4	1,4	1,6	1,4	1,4	1,9*	1,8	1,7
2	подстанция Тхань-Ми района Ко-анг-Нам	1,5	1,7	1,8	1,7	1,5	1,2	1,2	1,2	1,3	1,6	2,0*	1,5
3	подстанция Хоа-Бинь района Хоа-Бинь	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	0,9	1,2*	1,0	0,9	0,9	0,9	0,9

Примечание: \* – максимальная среднемесячная скорость ветра

Основным критерием выбора наиболее опасного сценария развития лесного пожара является минимальное время возгорания трансформаторного масла, находящегося в трансформаторе или в емкости для его хранения, от теплового воздействия лесного пожара при максимальном времени прибытия пожарных подразделений для тушения пожара.

При обосновании выбора наиболее опасного сценария развития лесного пожара учитывалось:

- расстояние между трансформаторной подстанцией и кромкой леса;
- характеристики деревьев (порода, высота, среднее расстояние между деревьями), находящихся на кромке леса, ближайшей к трансформаторной подстанции;
- наиболее неблагоприятные метеорологические условия;
- наличие противопожарных водоемов, преград, минерализованных полос и т.д.;
- расположение пожарных частей (время прибытия первого пожарного расчета).

#### **4.3. Результаты численных экспериментов по тепловому воздействию лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама и их анализ**

Рассчитаем эффективную температуру факела пламени основных наиболее распространенных деревьев Вьетнама, которая позволит с помощью формулы (2.38) определить плотность лучистого теплового потока от кромки горящего фронта леса, падающую на горючие вещества и людей, находящихся на территории ОЭ.

Для этой цели используем полевую модель расчета (п. 2.1 диссертации) и экспериментальные значения удельной скорости выгорания (таблица 3.3).

Полученные расчетные величины эффективной температуры факела пламени основных наиболее распространенных деревьев Вьетнама (температура излучающей поверхности в формуле (2.38)) приведены в таблице 4.7.

Расчетная эффективная температура факела пламени деревьев России находилась при  $\psi_{уд} = 0,0063$  кг/(м<sup>2</sup>·с) (хвойные породы) [55] и  $\psi_{уд} = 0,014$  кг/(м<sup>2</sup>·с) (лиственные) [55]. При этом принималось, что  $Q_{н^p} = 13,8$  МДж/кг [55].

Из таблицы 4.7 видно, что при изменении только скорости выгорания ствола и кроны дерева эффективная температура факела пламени меняется в пределах 770,2÷790,7°С. Влияние остальных параметров (теплоты сгорания, удельного коэффициента потребления кислорода и т.д.) требует проведения дальнейших исследований.

Был проведен расчет нагрева емкости с трансформаторным маслом с использованием формулы (2.38).

Допустимая температура (температура самовоспламенения) на облучаемой поверхности горючего материала (трансформаторное масло) в формуле (2.38) равна:  $T_{св} = 380^{\circ}\text{C}$  [97].

Критическую температуру для стальной стенки емкости принимаем равной  $T_{кр} = 500^{\circ}\text{C}$  [98].

Таблица 4.7 – Эффективная температура факела пламени основных наиболее распространенных деревьев Вьетнама

Порода дерева Вьетнама	Эффективная температура факела пламени, °С			
	Деревья Вьетнама		Деревья России, близкие по свойствам	
	Ствол	Крона	Расчет в данной работе (ствол дерева)	Литература [16] (ствол дерева)
Акация, <i>acacia auriculiformis</i> , keo (двудольные)	786,4	774,3	765,8	–
Мелия ацедарах, <i>chinaberry</i> , хоан (двудольные)	787,2	770,2	765,8	
Сосна, <i>pinaceae</i> , họ thông (хвойные)	788,7	776,7	647,8	624
Эвкалипт, <i>eucalyptus samaldulensis dehnhardt</i> , bạch đàn (двудольные)	790,7	771,4	765,8	900 (дуб)
Лонган, <i>dimocarpus longan</i> , nhãn (двудольные)	786,1	648,0	765,8	

Дуб 900, Береза 816, Липа 650, Сосна 624, Осина 612, Ольха 522

В таблице 4.8 приведены результаты расчета входящих в формулу (2.21) (скорость распространения кромки лесного низового пожара) коэффициентов по влиянию возмущающих факторов, для характерных условий Вьетнама на рассматриваемых объектах, а также по влиянию этих факторов на скорость распространения верхового лесного пожара.

Из таблицы 4.8 видно, что из-за высокой среднемесячной влажности совместное слияние возмущающих факторов увеличивает скорость движения кромки низового пожара не более чем в 1,9 раза.

Таблица 4.8 – Коэффициенты по влиянию возмущающих факторов на скорость распространения кромки лесного пожара вблизи рассматриваемых объектов

№	Объекты	Лесной низовой пожар				Скорости распространения лесного верхового пожара, м/мин			
		состояние атмосферы (температура и давление), $K_1$	влажность воздуха и горючих лесных материалов, $K_2$	влияние направления и скорости ветра, $K_3$	совместное влияние*, $K_1 \times K_2 \times K_3$	Верховой устойчивый			Верховой беглый
						слабый	средний	сильный	
1	подстанция Вунг-Анг района Хатинь	1,069	0,254	6,45	1,75	3	100	500	> 500
2	подстанция Тхань-Ми района Коанг-Нам	1,071	0,254	7,0	1,9	3	100	500	>500
3	подстанция Хоа-Бинь района Хоа-Бинь	1,072	0,254	3,3	0,9	3	100	500	>500

Примечание: \* – коэффициенты по влиянию остальных возмущающих факторов на скорость распространения кромки лесного низового пожара принимаем равными 1.

На рисунках 4.16 и 4.17 представлены зависимости от времени плотности теплового потока, падающего на поверхность масляного трансформатора, находящегося на территории объекта, от фронта верхового пожара (кромка лесного массива напротив рассматриваемого объекта) при различных скоростях распространения верхового пожара.

На рисунках 4.18 и 4.19 показаны зависимости от времени температуры стенки емкости с трансформаторным маслом, нагреваемой лучистым потоком от фронта верхового пожара (кромка лесного массива напротив рассматриваемого объекта).

В таблице 4.9 приведены результаты численных экспериментов.

Таблица 4.9 – Результаты численных экспериментов

№	Объекты	Скорость распространения верхового пожара, м/мин	Критическая ширина фронта пламени верхового пожара $V_{кр}$ , м	Время достижения температура самовоспламенения трансформаторного масла, $\tau_{кр}$ , мин	Время прибытия первого пожарного расчета, мин	Время от начала возгорания трансформаторного масла до прибытия первого пожарного расчета $\Delta\tau_{кр}$ , мин
1	подстанция Вунг-Анг района Ха-Тинь	3	47,6	7,9	23,0	15,1
		100	–	4,6		18,4
2	подстанция Тхань-Ми района Коанг-Нам	3	60,3	10,1	104,5	94,4
		100	–	6,8		97,7
3	подстанция Хоа-Бинь района Хоа-Бинь	3	72,0	12,0	7,0	-5,0
		100	–	7,5		-0,5

Из рисунка 4.16 и таблицы 4.9 видно, что плотность теплового потока достигает критического значения при критической ширине фронта пламени  $V_{кр}$  за критическое время  $\tau_{кр}$ :

- трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Вунг-Анг района Ха-Тинь:  $V_{кр} = 47,6$  м;  $\tau_{кр} = 7,9$  мин;

- трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Тхань-Ми района Коанг-Нам:  $B_{кр} = 60,3$  м;  $\tau_{кр} = 10,1$  мин;

- трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь:  $B_{кр} = 72$  м;  $\tau_{кр} = 12$  мин.

Из таблицы 4.9 и рисунка 4.16 видно, что время от начала возгорания трансформаторного масла до прибытия первого пожарного расчета  $\Delta\tau_{кр}$  составляет:

- трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Вунг-Анг района Ха-Тинь:  $\Delta\tau_{кр} = 15,1$  мин;

- трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Тхань-Ми района Коанг-Нам:  $\Delta\tau_{кр} = 94,4$  мин.

На трансформаторной подстанции с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь  $\Delta\tau_{кр} = -5,0$  мин, т.е. пожарный расчет успевает прибыть до момента воспламенения трансформаторного масла.

Полученные данные по времени прибытия пожарного расчета на объект являются существенно заниженными, так как не учитывается время оповещения о пожаре, время до начала выезда из пожарной части. Кроме того, не учитывается время от прибытия пожарного расчета до подачи первого ствола на тушение.

Таким образом, необходима разработка противопожарных мероприятий по предотвращению пожара на территории трансформаторных подстанций с масляными трансформаторами Вунг-Анг района Ха-Тинь и Тхань-Ми района Коанг Нам.

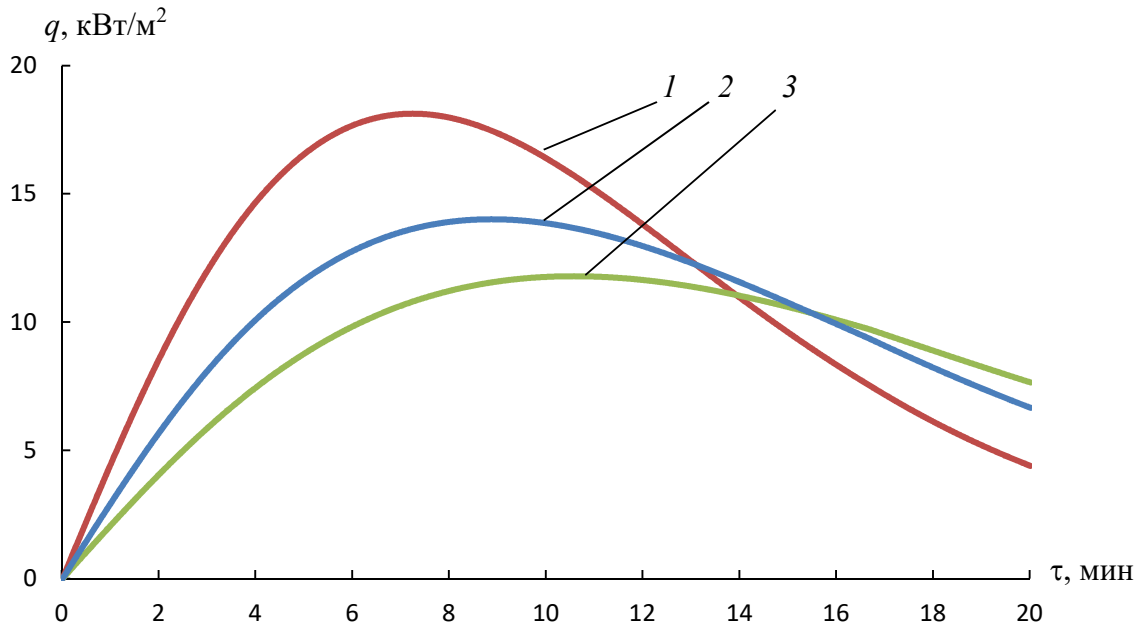


Рисунок 4.16 – Зависимость плотности теплового потока, падающего на поверхность емкости с трансформаторным маслом объекта, от времени с начала верхового пожара при скорости его распространения 3 м/мин: 1 – трансформаторная подстанция Вунг-Анг района Ха-Тинь; 2 – Тхань-Ми района Коанг-Нам; 3 – Хоа-Бинь района Хоа-Бинь

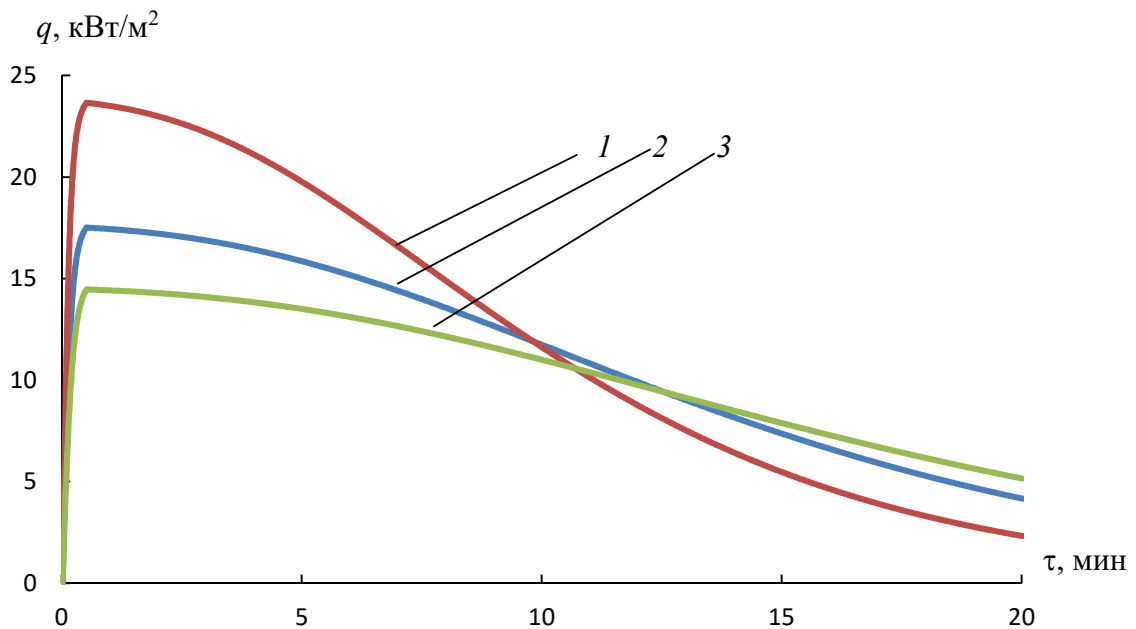


Рисунок 4.17 – Зависимость плотности теплового потока, падающего на поверхность емкости с трансформаторным маслом объекта, от времени с начала верхового пожара при скорости его распространения 100 м/мин: 1 – трансформаторная подстанция Вунг-Анг района Ха-Тинь; 2 – Тхань-Ми района Коанг-Нам; 3 – Хоа-Бинь района Хоа-Бинь



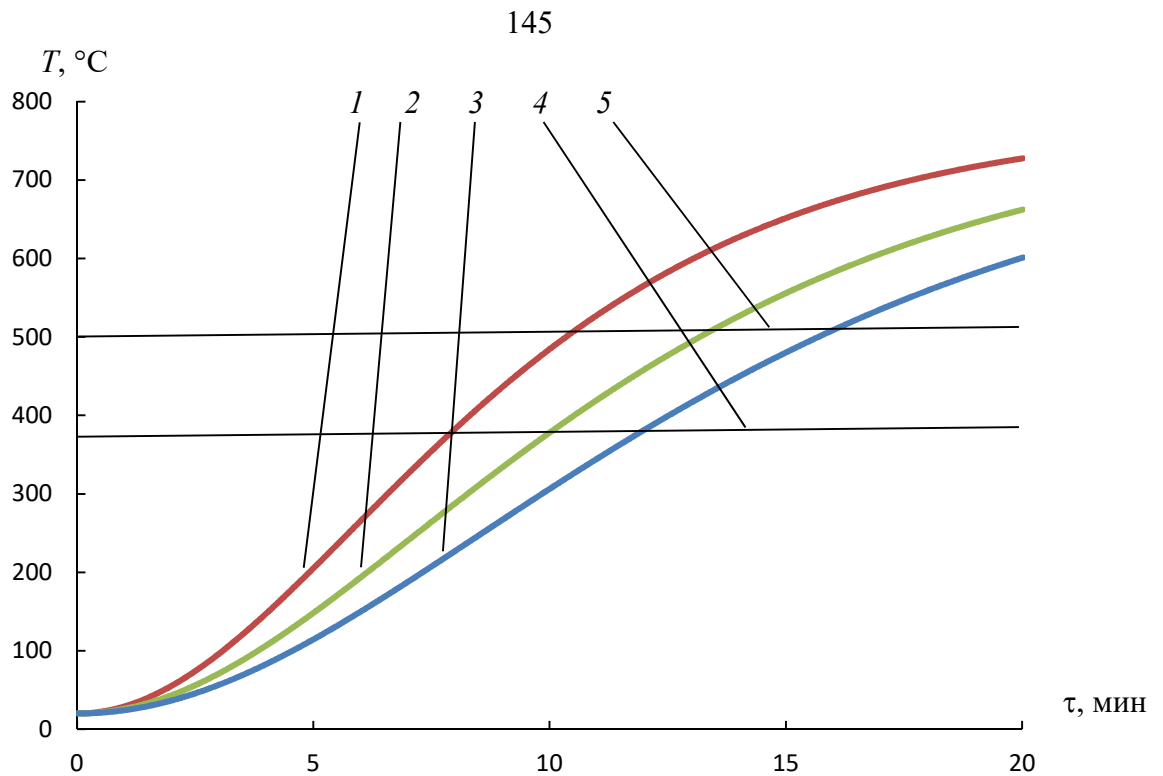


Рисунок 4.18 – Зависимости средней температуры стенки емкости с трансформаторным маслом в наиболее нагретом сечении от времени с начала верхового пожара при скорости его распространения 3 м/мин: 1 – трансформаторная подстанция Вунг-Анг района Ха-Тинь; 2 – трансформаторная подстанция Тхань-Ми района Коанг-Нам; 3 – трансформаторная подстанция Хоа-Бинь района Хоа-Бинь; 4 – температура самовоспламенения трансформаторного масла  $T_{св}=380^{\circ}\text{C}$ ; 5 – температура потери несущей способности стальной стенки  $T_{св}=500^{\circ}\text{C}$

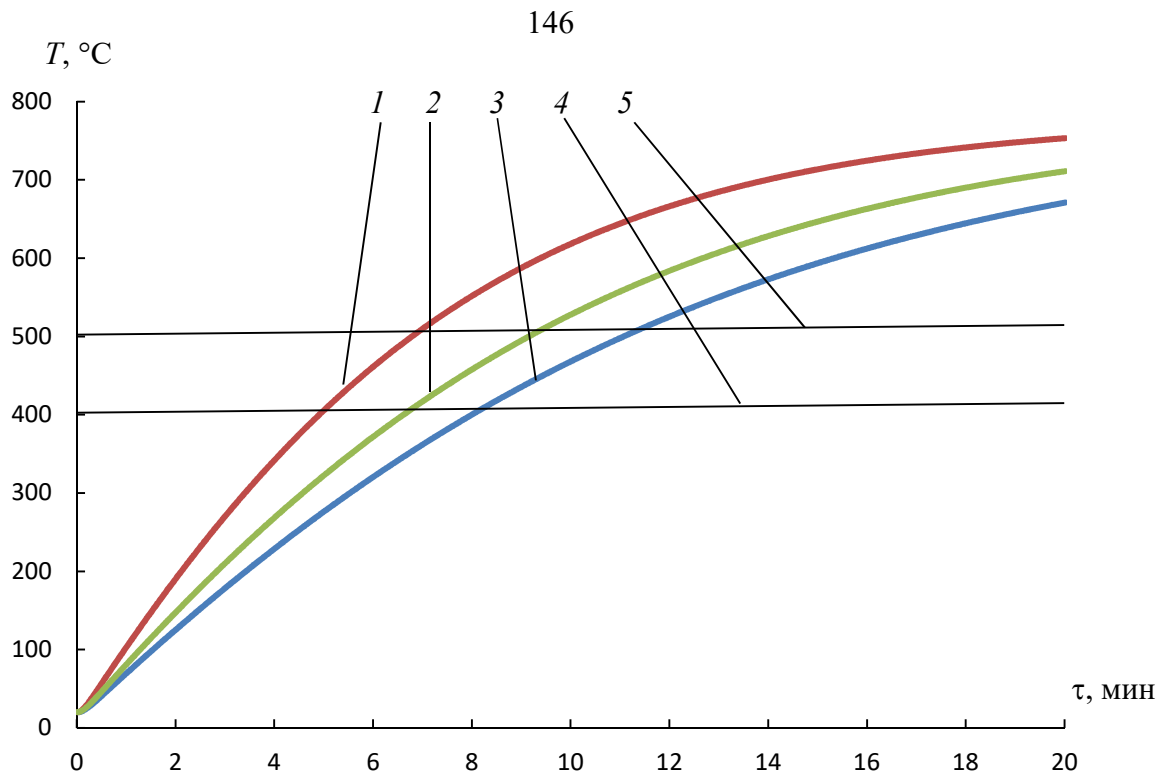


Рисунок 4.19 – Зависимости средней температуры стенки емкости с трансформаторным маслом в наиболее нагретом сечении от времени с начала верхового пожара при скорости его распространения 100 м/мин: 1 – трансформаторная подстанция Вунг-Анг района Ха-Тинь; 2 – трансформаторная подстанция Тхань-Ми района Коанг-Нам; 3 – трансформаторная подстанция Хоа-Бинь района Хоа-Бинь; 4 – температура самовоспламенения трансформаторного масла  $T_{св} = 380^{\circ}\text{C}$ ; 5 – температура потери несущей способности стальной стенки  $T_{св} = 500^{\circ}\text{C}$

#### 4.4. Практические рекомендации по обеспечению безопасности объектов энергетики Вьетнама от воздействия лесных пожаров

Полученные в п. 4.4 результаты позволили разработать дополнительные противопожарные мероприятия по защите действующих трансформаторных подстанций с масляными трансформаторами от теплового воздействия верховых и низовых лесных пожаров:

- Минерализованная полоса (в качестве основного мероприятия):

Трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Вунг-Анг района Ха-Тинь: полоса шириной  $B_{\text{п}} = 30$  м с 2-х сторон ограничительной стены, граничащей с лесом (рисунок 4.20);

Трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Тхань-Ми района Коанг-Нам: полоса шириной  $B_{\text{п}} = 30$  м по всему периметру ограничительной стены (рисунок 4.21);

Трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь: полоса шириной  $B_{\text{п}} = 100$  м с 3-х сторон ограничительной стены, граничащей с лесом (рисунок 4.22);

- Обустройство пожарных водоемов на всех трансформаторных подстанциях;
- Создание отдельного поста пожарной охраны на трансформаторной подстанции с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь.

Существующие противопожарные барьеры следует систематически очищать от сухостоя, пожароопасного подроста, подлеска и валежника, а противопожарные минерализованные полосы в пределах барьеров - ежегодно подновлять до наступления пожароопасного периода в течение пожароопасного сезона.

Таким, образом, по предупреждению распространения лесных пожаров на территориях, остальных существующих и проектируемых ОЭ Вьетнама, в том числе, от воздействия лучистого теплового потока от кромки лесного пожара на горючие вещества, находящиеся на ОЭ, можно предложить следующие противопожарные мероприятия:

- Создание искусственных противопожарных барьеров (минерализованные полосы, противопожарные разрывы, противопожарные заслоны, пожароустойчивые опушки и противопожарные канавы);
- Создание пожарных водоемов или обустройство имеющихся на территории – в пожарные водоемы;
- Создание отдельных постов пожарной охраны.

Каждое противопожарное мероприятие требует отдельного обоснования с использованием математических моделей, разработанных в главе 3 данной диссертации.



Рисунок 4.20 – Схема организации минерализованной полосы на действующей трансформаторной подстанции с масляными трансформаторами Вунг-Анг района Ха-Тинь



Рисунок 4.21 – Схема организации минерализованной полосы на действующей трансформаторной подстанции с масляными трансформаторами Тхань-Ми района Коанг-Нам



Рисунок 4.22 – Схема организации минерализованной полосы на действующей трансформаторной подстанции с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь

## Выводы по четвертой главе

1. Пожарная опасность пятнистого возгорания в добавление к переносу горящих и тлеющих частиц лесных горючих материалов для ОЭ Вьетнама заключается в повышенных лучистых тепловых потоках, возникающих при удельной (по площади пожара) массовой скорости выгорания, существенно превышающей соответствующее значение для поверхности древесины.

При рассмотренном модельном пятнистом возгорании безопасная зона от кромки пожара до места нахождения персонала объекта (без учета коэффициента запаса по точности расчетов) превысила 100 м, что значительно превышает требуемую (20 м) в соответствии с «Постановлением Правительства РФ от 26.08.2013 № 736».

2. Математическое моделирование теплового воздействия лесного пожара на три характерных ОЭ Вьетнама показало, что при наиболее опасных сценариях развития лесного пожара вблизи этих объектов распространение пожара на их территорию (возгорание горючих материалов под воздействием лучистого теплового потока) происходит до прибытия ближайших пожарных подразделений. Это может привести к гибели обслуживающего персонала и огромному материальному ущербу.

3. Существующие противопожарные мероприятия не в полной мере обеспечивают защиту ОЭ от лесных пожаров. Поэтому необходима разработка дополнительных противопожарных мероприятий с использованием разработанных в данной работе математических моделей с учетом конкретных метеорологических условий, характеристик лесных массивов и объемно-планировочных и конструктивных решений ОЭ.

4. Существующие методы противопожарной защиты от лесных пожаров необходимо адаптировать к конкретным ОЭ Вьетнама с учетом их объемно-

планировочных и конструктивных решений, а также конкретных метеорологических условий и характеристик прилегающих лесных массивов.

5. Необходимо проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований для совершенствования нормативных документов по определению безопасных расстояний от ОЭ до кромки лесного массива.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ литературных источников по математическому моделированию параметров лесных пожаров с учетом особенностей климатических условий Вьетнама показал, что:

- современные математические модели расчета термогазодинамики лесного пожара, а также скорости движения его кромки не учитывают в полной мере реальные пирологические и метеорологические характеристики лесных пожаров;

- в современных базах данных по параметрам пожарной нагрузки отсутствуют величины удельной массовой скорости выгорания и удельного коэффициента выделения CO (и других токсичных газов) при горении стволов и кроны основных пород деревьев Вьетнама, что не позволяет задавать достоверные исходные данные для расчета теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама с использованием математических моделей термогазодинамики пожара.

2. Разработана математическая модель и методика расчета скорости распространения и теплофизических параметров кромки низового лесного пожара, которая позволяет учесть совместное влияние основных пирологических и метеорологических характеристик лесного пожара во Вьетнаме (давление, температура и влажность атмосферы, скорость и направление ветра, неоднородность растительности (а также негорючие участки поверхности) и ландшафт местности, влажность лесных горючих материалов, интенсивность и продолжительность осадков).

3. Предложена математическая модель и методика расчета теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама, которая позволяет учесть климатические условия и пирологические характеристики лесных горючих материалов Вьетнама.



4. Проведенные экспериментальные исследования процесса горения образцов древесной и лиственно-древесной массы наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама позволяют обосновать выбор значений удельной массовой скорости газификации и удельного коэффициента образования CO, необходимых для математического моделирования параметров и теплового воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики Вьетнама.

5. Проведенные численные эксперименты по определению теплового воздействия верхового лесного пожара на характерные объекты энергетики Вьетнама показали, что существующие противопожарные мероприятия не в полной мере обеспечивают защиту ОЭ от лесных пожаров.

6. Полученные в работе результаты позволили предложить научно-обоснованные рекомендации по разработке дополнительных противопожарных мероприятий, а также по адаптации существующей противопожарной защите на конкретных ОЭ Вьетнама с учетом их объемно-планировочных и конструктивных решений, а также конкретных метеорологических условий и характеристик прилегающих лесных массивов.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Ву, Т.Д. Статистика по электроэнергетике / Т.Д. Ву // «VNCS Research Center». – 2020. – 9 с.
2. Ле, Т.Х. EVN: Производство электроэнергии в 2020 во Вьетнаме / Т.Х. Ле // «Petro Times». – 2020. – 19 с.
3. Нгуен, Н.Х. Статистика по электроэнергетике / Н.Х. Нгуен // «Fpt Securities». – 2020. – 13 с.
4. Доклад Вьетнамской Администрации лесного хозяйства Вьетнама о лесных изменениях на протяжении многих лет. – Ханой, 2019. – 11 с.
5. Доклад начальника УПО МОБ СРВ о количестве лесных пожарных во Вьетнаме. – Ханой, 2020. – 5 с.
6. Гришин, А.М. О математическом моделировании природных пожаров и катастроф / А.М. Гришин // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2008. – № 2(3). – С. 105 - 114.
7. Гришин, А.М. Физическое моделирование огненных смерчей / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Я.В. Суков // Докл. РАН. – 2004. – № 2 (395). – С. 196 - 198.
8. Гришин, А.М. Общие математические модели лесных и торфяных пожаров, и их приложения / А.М. Гришин // Успехи механики. – 2002. – № 4. – С. 41 - 89.
9. Гришин, А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 1. / А.М. Гришин. – Томск: Изд-во Том, ун-та, 2003. – 524 с.
10. Доррер, Г.А. Динамика лесных пожаров / Г.А. Доррер. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. – 403 с.
11. Steven, P.I. Wildfire modeling. NIST GCR 11-953 / P.I. Steven, K. Krueger. – National Institute of Standards and Technology, 2011. – 46 p.
12. Sullivan, A.L. Wildland surface fire spread modelling / A.L. Sullivan // Int. J. Wildland Fire. – 2009. – №. 4 (18). – pp. 387 - 403.

13. Щетинский, Е.А. Спутник руководителя тушения пожара / Е.А. Щетинский. – М.: ЗАО «Спецтехника», 2001. – 75 с.
14. Гришин, А.М. Физическое моделирование огненных смерчей / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Я.В. Суков // Докл. РАН. – 2004. – № 2 (395). – С. 196 - 198.
15. Friedrich, J. The Fire. The bombing of Germany, 1940 – 1945 / J. Friedrich. – New York: Columbia University Press, 2007. – 558 p.
16. Иванов, А.В. Лесная пирология. Конспект лекций / А.В. Иванов. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2010. – 276 с.
17. Цветков, П.А. Очерк истории отечественной лесной пирологии / П.А. Цветков // Сибирский лесной журнал. – 2015. – № 5. – С. 3 - 25.
18. Курбатский, Н.П. Лесная пирология и важнейшие этапы ее развития / Н.П. Курбатский // Достижения лесной науки за 50 лет. – 1967. – С. 122 - 137.
19. Андреев, Ю.А. Профилактика, мониторинг и борьба с природными пожарами (на примере Алтае – Саянского экорегиона) / Ю.А. Андреев, А.В. Брюханов. – Красноярск: Изд-во «Город», 2011. – 271 с.
20. Валендик, Э.Н. Борьба с крупными лесными пожарами / Э.Н. Валендик. – Новосибирск: Наука, 1990. – 193 с.
21. Дорогов, Б.И. Пространственная интерполяция показателей пожарной опасности в лесу по условиям погоды / Б.И. Дорогов // Вопросы лесной пирологии. – 1974. – С. 211 - 225.
22. Гришин, А.М. Об определении скорости распространения степных пожаров / А.М. Гришин, Д.М. Бурасов // Вычислительные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании (материалы международной конференции). – Алматы : Изд-во Казахского национального университета им. Аль-Фараби, 2002. – С. 208 - 215.
23. Гришин, А.М. Физика лесных пожаров / А.М. Гришин. – Томск: Изд-во Том, ун-та, 1994. – 207 с.
24. Гришин, А.М. Математические модели лесных пожаров / А.М. Гришин. – Томск: Изд-во Том, ун-та, 1981. – 277 с.

25. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1992. – 407 с.
26. Grishin, A.M. Mathematical modeling of forest fire and new methods of fighting them / A.M. Grishin. – Publishing House of the Tomsk State University (Edited by Frank Albin), 1997. – 390 p.
27. Гришин, А.М. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. / А.М. Гришин, А.Я. Кузин, В.Л. Миков и др. – Томск: Изд-во Том, ун-та, 1987. – 246 с.
28. Гришин, А.М., Фомин, В.М. Нестационарные и сопряженные задачи механики реагирующих сред. / А.М. Гришин, В.М. Фомин. – Новосибирск: Наука, 1984. – 318 с.
29. Гришин, А.М. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения / А.М. Гришин, В.Н. Берцун, В.И. Зинченко. – Томск: Изд-во Том, ун-та, 1981. – 160 с.
30. Гришин, А. М. Об определении скорости распространения степных пожаров / А.М. Гришин, Д.М. Бурасов // Вычислительные технологии и математическое моделирование в науке, технике и образовании (Материалы Международной конференции). – Алматы: Изд-во Казахского национального университета им. Аль-Фараби, 2002. – С. 208 - 215.
31. Гришин, А.М. О возникновении колебаний элементов лесных горючих материалов и их влияние на режимы воспламенения и горения / А.М. Гришин, А.Н. Голованов // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – № 4 (42). – С. 127 - 135.
32. Гришин, А.М. О сушке слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Л.Ю. Катаева, Е.Л. Лобода // Инженерно – физический журнал. – Минск: Национальная академия наук Беларуси АНК ИТМО им. А.В. Лыкова, 2001. – № 4 (74). – С. 58 - 64.
33. Гришин, А.М. Постановка и решение задачи о сушке слоя лесных горючих материалов / А.М. Гришин, А.Н. Голованов, Л.Ю. Катаева, Е.Л. Лобода // Физика горения и взрыва, 2001. – № 1 (37). – С. 65 - 66.
34. Гришин, А.М. Об одной модели прогноза лесной пожарной опасности / А.М. Гришин, А.И. Фильков // Инж. – физ. журж. – 2003. – № 5 (76). – С. 154 - 158.

35. Гришин, А.М. Аналитические решения задач о прогреве и зажигании слоя торфа / А.М. Гришин, П.В. Гришин, А.Я. Кузин // Сб. избр. докл. Междунар. конф. «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии». – Томск: Изд-во Том, ун-та, 2007. – С. 95 -107.
36. Гришин, А.М. Математическое моделирование процесса зажигания торфа / А.М. Гришин, А.С. Якимов // Инж. – физ. журж. – 2008. – № 1 (81). – С. 191 - 199.
37. Гришин, А.М. Аналитическое решение задачи о возникновении огненного смерча / А.М. Гришин // Экологические системы и приборы. – 2006. – № 6. – С. 50 – 51.
38. Гришин, А.М. Влияние взаимодействия огненных смерчей друг с другом на их распространение / А.М. Гришин // Докл. РАН. Физика. – 2007. – № 4 (416). – С. 465 - 466.
39. Гришин, А.М. Ретроспективный анализ системы прогноза лесной пожарной опасности / А.М. Гришин, А.И. Фильков // Экологические системы и приборы. – 2005. – № 8. – С. 29 - 35.
40. Гришин, А.М. Детерминированно-вероятностные модели некоторых природных и техногенных катастроф / А.М. Гришин // Сб. избр, док. Междунар. конф. «Сопряженные задачи механики реагирующих сред, информатики и экологии». – Томск: Изд-во Том, ун-та, 2007. – С. 84 - 95.
41. Гришин, А.М. Математическая модель взаимодействия лесной растительности с атмосферой / А.М. Гришин // Сб. статей: «Проблема мониторинга и моделирование динамики лесных экосистем». – М.: Международный институт леса; Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, 1995. – С. 104 - 128.
42. Гришин, А.М. Методика определения и расчета выбросов загрязняющих веществ от лесных пожаров / А.М. Гришин, А.А. Долгов, А.Ф. Цимбалюк. – М.: Государственный комитет Российской Федерации по охране окружающей среды, 1997. – 26 с.
43. Гришин, А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 2. / А.М. Гришин. – Кемерово: Практика, 2005. – 560 с.
44. Гришин, А.М. Моделирование и прогноз катастроф. Ч. 3. / А.М. Гришин, С.В. Петрин, Л.С. Петрина. – Томск: Изд-во Том, ун-та., 2006. – 576 с.

45. Гришин, А.М. Итерационно-интерполяционный метод и его приложения / А.М. Гришин, В.И. Зинченко, К.Н. Ефимов и др. – Томск: Изд-во Том, ун-та, 2004. – 320 с.
46. Гришин, А.М. Решение некоторых обратных задач механики реагирующих сред. / А.М. Гришин, В.И. Зинченко, А.Я. Кузин и др. – Томск: Изд-во Том, ун-та, 2006. – 418 с.
47. Гришин, А.М. Прогноз возникновения и распространения лесных пожаров / А.М. Гришин, А.И. Фильков. – Кемерово: Практика, 2005. – 201 с.
48. Бурасов, Д.М. Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров / Д.М. Бурасов, А.М. Гришин. – Кемерово: Практика, 2006. – 134 с.
49. Гришин, А.М. Общая математическая модель лесных пожаров и ее приложения для охраны и защиты лесов / А.М. Гришин // Сопряженные задачи механики и экологии: Избранные доклады международной конференции. – Томск: Изд-во Том, ун-та, 2000. – С. 88 - 137.
50. Гришин, А.М. Общие математические модели природных пожаров / А.М. Гришин // XII Симпозиум по горению и взрыву. – 2005. – С. 1 - 25.
51. Гришин, А.М. Математическое моделирование процесса распространения верховых лесных пожаров / А.М. Гришин, В.Г. Зверев, А.Д. Грузин // ДАН СССР. – 1983. – № 4 (269) – С. 822 - 826.
52. Гришин, А.М. Математическая теория верховых лесных пожаров / А.М. Гришин, В.Г. Зверев, А.Д. Грузин. – Новосибирск: ИТФ СО АН СССР, 1984. – С. 38 - 75.
53. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров / А.М. Гришин. – Численные методы механики сплошной среды. – 1978. – № 4 (9). – 264 с.
54. Пузач, С.В. Методы расчета тепломассообмена при пожаре в помещении и их применение при решении практических задач пожаровзрывобезопасности / С.В. Пузач. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. – 336 с.
55. Кошмаров, Ю.А. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
56. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 152 с.

57. Лойцянский, Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1987. – 840 с.
58. Кошмаров, Ю.А. Теплотехника / Ю.А. Кошмаров. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2006. – 501 с.
59. Оцисик, М.Н. Сложный теплообмен / М.Н. Оцисик. – М.: Мир, 1976. – 616 с.
60. Пузач, С.В. Математическая модель распространения кромки природного пожара с учётом основных особенностей растительности, ландшафта местности и состояния атмосферы / С.В. Пузач, А.В. Ярошенко, С.Л. Кузнецов // Материалы двадцатой научно-технической конференции «Системы безопасности». – М.: Академия ГПС МЧС РФ, 2011. – С. 195 - 197.
61. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования. Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements. ОКСТУ 0012. – М.: Стандартинформ, 2006. – 236 с.
62. Пузач, С.В. Новый теоретико-экспериментальный подход к расчету распространения токсичных газов при пожаре в помещении / С.В. Пузач, Е.В. Сулейкин // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – № 2 (25). – С. 13 - 20. DOI:10.18322/PVB.2016.25.02.13-20
63. Пузач, С.В. Экспериментальное определение удельного коэффициента образования монооксида углерода при пожаре в помещении / С.В. Пузач, Р.Г. Акперов // Пожаровзрывобезопасность. – 2016. – №5 (25). – С. 18 - 25. DOI: 10.18322/PVB.2016.25.05.18-25
64. Гусев, В.Г., Коленов, Е.В. Оценка параметров конвективной колонки, возникающей при пятнистых загораниях от верхового пожара / В.Г. Гусев, Е.В. Коленов // Лесные пожары и борьба с ними. Сборник научных трудов. – Ленинград: ЛенНИИЛХ, 1986. – С. 54 - 66.
65. Пузач, С.В. Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара. Свидетельство об официальной регистрации программы № 2006614238 в / С.В. Пузач. – М.: Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам, 2006. – 1 с.
66. Кошмаров, Ю.А. Теплотехника / Ю.А. Кошмаров. – М.: Академия ГПС МЧС России, 2006. – 501 с.

67. Ле, Д.Х. Лесоводственно-экологическая оценка последствий лесных пожаров в лесах из мелалеуки белодревесной (*Melaleuca Cajuputi Powell*) на юге Вьетнама. дис. ... канд. биол. наук. 06.03.03 / Ле Дык Хунь. – СПб., 2013. – 136 с.
68. Martin, J. The Spotting Distribution of Wildfires / J. Martin, T. Hillen. – *Appl. Sci.*, 2016. – № 6 (6). – pp. 177
69. Kaur, I. Turbulence and fire-spotting effects into wildland fire simulators / I. Kaur, A. Mentrelli, F. Bosseur, J.B. Filippi, G. Pagnini // *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulations*. – 2016. – № 39. – pp. 300 - 320.
70. Sardoy, N. Modeling transport and combustion of firebrands from burning trees / N. Sardoy, J.L. Consalvi, B. Porterie, A.C. Fernandez-Pello // *Combustion and Flame*. – 2007. – № 150. – pp. 151 - 169.
71. Cunningham, P. Coherent vertical structures in numerical simulations of buoyant plumes from wildland fires / P. Cunningham, S.L. Goodrick, M.Y. Hussaini, R.R. Linn // *International Journal of Wildland Fire*. – 2005. – № 14. – pp. 61 - 75.
72. Пузач, С.В. Оценка теплового воздействия лесного пожара на электрическую подстанцию с масляными трансформаторами / С.В. Пузач, С.С. Горюшкин // *Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация*. – 2017. – № 3. – С. 79 - 83.
73. Васильев, А.С. Математическая модель лесного пожара как источника инфракрасного излучения / А.С. Васильев, А.В. Краснящих, В.В. Коротаев, О.Ю. Лашманов, Д.Ю. Лысенко, А.С. Широков // *Известия ВУЗов. Приборостроение*. – 2013. – № 7 (56). – С. 44 - 49.
74. Щетинский, Е.А. Тушение лесных пожаров / Е.А. Щетинский – М.: ВНИИЛМ, 2002. – 104 с.
75. Кулешов, А.А. Математические модели лесных пожаров / А.А. Кулешов // *Математическое моделирование*. – 2002. – № 11 (14). – С. 33 - 42.
76. Гришин, А.М. Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск: Наука СО, 1992. – 404 с.



77. Morvan, D. Physical Phenomena and Length Scales Governing the Behaviour of Wildfires: A Case for Physical Modelling / D. Morvan // *Fire Technology*. – 2011. – Vol. 47. – Issue 2. – pp. 437 - 460.

78. Mandel, J.A Wildland fire model with data assimilation / J. Mandel, L.S. Bennethum, J.D. Beezley, J.L. Coen, C.C. Douglas, M. Kim, A. Vodacek // *Mathematics and Computers in Simulation*. – 2008. – Vol. 79. – pp. 584 - 606.

79. Rochoux, M.C. Towards predictive data-driven simulations of wildfire spread – Part II: Ensemble Kalman Filter for the state estimation of a front-tracking simulator of wildfire spread / M.C. Rochoux, C. Emery, S. Ricci, B. Cuenot, A. Trouve // *Natural Hazards and Earth System Science*. – 2015. – Vol. 15. – pp. 17 - 21.

80. Rochoux, M.C. Towards predictive data-driven simulations of wildfire spread – Part I: Reduced-cost Ensemble Kalman Filter based on a Polynomial Chaos surrogate model for parameter estimation / M.C. Rochoux, S. Ricci, D. Lucor, B. Cuenot, A. Trouve // *Natural Hazards and Earth System Science*. – 2014. – Vol. 14. – pp. 29 - 51.

81. Tymstra, C. Development and structure of Prometheus: The Canadian Wildland Fire Growth Simulation Model / C. Tymstra, R.W. Bryce, B.M. Wotton, S.W. Taylor, O.B. Armitage. – Canada: Canadian Forest Service – 2010. – pp. 102.

82. Софронов, М.А. Огонь в лесу / М.А. Софронов, А.Д. Вакуров. – Новосибирск, 1981. – 124 с.

83. Мелехов, И.С. Лесная пирология / И.С. Мелехов. – М.: МЛТИ, 1978. – 71 с.

84. Белов, С.В. Лесная пирология / С.В. Белов. – Л.: ЛТА, 1982. – 68 с.

85. Валендик, Э.Н. Крупные лесные пожары / Э.Н. Валендик, П.М. Матвеев, М.А. Софронов. – М.: Наука, 1979. – 198 с.

86. Арцыбашев, Е.С. Лесные пожары и борьба с ними / Е.С. Арцыбашев. – М.: Лесная промышленность, 1974. – 149 с.

87. Федеральный закон «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» от 22.07.2008г. № 123-ФЗ – М.: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2008. – 156 с.

88. Горбенко, О.Н. Проблемы моделирования распространения пожаров / О.Н. Горбенко, А.А. Макарова. – Воронеж: Воронежский институт высоких технологий, 2013. – 16 с.
89. Калиновский, А.Я. Модель распространения ландшафтного пожара с учетом изменения влажности горючего материала / А.Я. Калиновский, А.П. Созник, Л.Н. Куценко // Проблемы пожарной безопасности. – 2011. – С. 55 - 59.
90. Вдовенко, М.С. Моделирование процессов распространения лесных пожаров на основе параллельных алгоритмов: автореф. дис. ... канд. тех. наук: 05.13.18 / М.С. Вдовенко. – Красноярск, – 2009. – 25 с.
91. Созник, А.П. Глобальная и локальная модели распространения ландшафтного пожара / А.П. Созник, И.К. Кириченко, А.Я. Калиновский, С.В. Гайдым // Проблемы пожарной безопасности. – 2010. – С.162 - 166.
92. Телицын, Г.П. Зависимость скорости распространения низовых пожаров от условий погоды / Г.П. Телицын // Сб. тр. ДальНИИЛХ. – 1965. – С. 390 - 405.
93. Коровин, Г.Н. Методы расчета некоторых параметров низовых лесных пожаров / Г.Н. Коровин // Сб. научн. - исслед. работ по лесн. хоз-ву. – М.: Лесная промышленность, 1969. – С. 244 - 262.
94. Гундар, С.В. Обоснование нормативной интенсивности подачи воды на тушение кромки низового лесного пожара [Электронный ресурс]/ С.В. Гундар, А.Н. Денисов // Технологии техносферной безопасности. – 2014. – № 4 (56). Режим доступа: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2014-4/18-04-14.ttb.pdf>
95. Ha, C.T. Vietnam National Forest Status of 2012 / C.T. Ha. – Hanoi: Annually report of Ministry of Agriculture and Rural Development, 2013. – 3 с.
96. Hoang, M.H. Status of Forest Fire Management and Control in Vietnam / M.H. Hoang. – Tokyo: GEOSS AP Symposium Integrated Observation for Sustainable Development in the Asia-Pacific Region, 2007. – pp. 5.
97. ГОСТ 982-80. Масла трансформаторные. Технические условия. Межгосударственный стандарт. – М.: Стандартинформ, 2011. – 250 с.

98. Яковлев, А.Я. Расчет огнестойкости строительных конструкций / А.Я. Яковлев – М.: Стройиздат, 1988. – 143 с.

99. Ле, А.Т. Особенности пожарной опасности пятнистого возгорания для объектов энергетики / С.В. Пузач, А.Т. Ле // Материалы международной научно-практической конференции «Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области обеспечения пожарной безопасности». – М.: Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 142 - 146.

100. Ле, А.Т. Причины изменения площади тропических лесов Вьетнама и лесопожарная проблема во Вьетнаме в последние годы / А.Т. Ле, С.В. Пузач // Материалы V Всероссийской научной конференции и школы для молодых преподавателей (с международным участием). – Таганрог: ЮФУ, 2018. – С. 293 - 295.

101. Ле, А.Т. Пожарная опасность пятнистого возгорания при верховом лесном пожаре для объектов энергетики / А.Т. Ле, С.В. Пузач, Т.Х. Нгуен // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2018. – № 2. – С. 64 - 70.

102. Ле, А.Т. Обоснование выбора параметров горения древесной массы деревьев для расчета воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики Вьетнама / А.Т. Ле, С.В. Пузач // Пожаровзрывобезопасность. – 2018. – № 11 (27). – С. 5 - 14. DOI: 10.18322/PVB.2018.27.11.5-14

103. Кутателадзе, С.С. Основы теории теплообмена / С.С. Кутателадзе. – М.: Атомиздат, 1979. – 416 с.

104. Драйздейл, Д. Введение в динамику пожаров / Д. Драйздейл. – М.: Стройиздат, 1988. – 340 с.

105. Доклад УПО МОБ СРВ «Лесные ресурсы и лесное хозяйство Вьетнама». – Ханой: МОБ Вьетнама, 2020. – 19 с.

106. Отчет о социально-экономической ситуации в 2020 году. Центр статистических материалов и услуг 172/GP-ТТДТ. – Ханой.: Управление общей статистики, 2020. – 3 с.

107. Буй, Н.Л. Большой лесной пожар одновременно в 4 районах Тхья Тхиен-Хюэ [Электронный ресурс] / Н.Л. Буй // Thanhnien. – 2019. – Режим доступа:

<https://thanhnien.vn/thoi-su/cap-nhat-rung-dang-chay-lon-cung-luc-4-khu-vuc-o-thua-thien-hue-1097844.html>.

108. Вьетнамский Стандарт TCVN 4088:1985 от 27.04.2011г. Климатические данные, используемые при проектировании строительства Вьетнама. – Ханой: TCVN, 2011. – 267 с.

109. Вьетнамский стандарт TCVN 2737:1995 от 15.04.2011г. Данные о ветровом давлении на территории Вьетнама из Нормы расчета нагрузок и ударов Вьетнама. – Ханой: TCVN, 2011. – 278 с.

110. Доклад НЦМГ СРВ «Необычное погодное явление во Вьетнаме». – Ханой: МПРОС Вьетнама, 2018. – 15 с.

111. Годовой доклад ЭК СРВ. – Ханой: ЭК Вьетнама, 2020. – 4 с.

112. Доклад АЛХ СРВ «Цифра лесных изменений на протяжении многих лет». – Ханой. – 2020. – 6 с.

113. Доклад начальника ГУПО МОБ СРВ о состоянии лесных пожаров в 2020 – Ханой. – 2020. – 10 с.

114. Фам, Н.Х. Борьба с лесными пожарами во Вьетнаме / Н.Х. Фам – Нгеан: Издательство Нгеан, 2016. – 231 с.

115. Нгуен, К.З. EVN: Производство электроэнергии в 2019 во Вьетнаме / К.З. Нгуен. – Ханой: Газета Petro Times, 2019. – 22 с.

116. Пункт 12 Постановления Правительства Вьетнама №14/2014/NĐ-CP от 15.04.2014 Положения и руководящие указания Закона об электроэнергетике «О безопасности и защите высоковольтных сетей». – Ханой: СР, 2014. – 15 с.

117. Уведомление № 94/ТВ-VPCP от 12.05.2005г. Аппарата правительства о направлении Заместителя Премьер-Министра Нгуен Тан Зунга «Осуществление мер по предотвращению обезлесения и предотвращения лесных пожаров». – Ханой: VPCP, 2005. – 5 с.

118. Постановление №57/QĐ-TTg Премьер-министра от 09.01.2012г. «Утверждении плана охраны и развития лесов на период 2011-2020 гг». – Ханой. – 2012. – 3 с.

119. Постановление Премьер-министра № 07/2012/QĐ-TTg от 8 февраля 2012 года «Принятия ряда мер по усилению защиты лесов». – Ханой. – 2012. – 46 с.

120. Постановление Премьер-министра № 24/2012/QĐ-TTg от 1 июня 2012 года о политике инвестиций и развития в лесах специального назначения на период 2011 –2020 годов. – Ханой. – 2012. – 15 с.

121. Постановление Премьер-министра №157/2013/NĐ-CP от 25.12.2013г. «Санкция административных нарушений в области управления лесами, разработки лесов, защиты лесов и управления лесной продукцией». – Ханой: CP. – 2013. – 29 с.

122. Постановление правительства № 01/NQ-CP от 07.01.2013г. «Об основных решениях для руководства реализацией плана социально-экономического развития и сметы государственного бюджета на 2013 год». – Ханой: CP. – 2013. – 45 с.

123. Циркуляр № 10/2013 / TTLT-BNNPTNTVКНЃT от 1 февраля 2013 г. Министерства сельского хозяйства и развития сельских районов и Министерства планирования и инвестиций «О управлении и использовании инвестиционного капитала из государственного бюджета. План охраны и развития лесов на период 2011 - 2020 гг. В соответствии с Решением премьер-министра № 57 / QĐ-TTg от 9 января 2012 года. – Ханой. – 2013. – 86 с.

124. Закон Национального собрания социалистическая республика Вьетнам № 29/2004/QН11 от 3 декабря 2004 г. «О защите и развитии лесов». – Ханой: QН – 2004. – 127 с.

125. Постановление Правительства №35/2003/NĐ-CP от 4 апреля 2003 года «Подробные положения по реализации ряда статей закона о пожарной безопасности и борьбе с пожарами». – Ханой: CP – 2003. – 57 с.

126. Директива Премьер-министра № 21/2002/CT-TTg от 12 декабря 2002 года «Об усилении неотложных мер по предотвращению и борьбе с лесными пожарами». – Ханой: QН – 2002. – 95 с.

127. Горюшкин, С.С. Последствия воздействий лесных пожаров на объекты энергетики / С.С. Горюшкин, С.В. Пузач // Материалы VII Всероссийской с международным участием научно-практической конференции «Современные технологии обеспечения

гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций». – В.: ФГБОУ ВО Воронежский институт ГПС МЧС России, 2016. – С. 216 - 218.

128. Горюшкин, С.С. Особенности воздействия лесных пожаров на объекты энергетики / С.С. Горюшкин, С.В. Пузач // Вестник Воронежского института ГПС МЧС России – В.: ФГБОУ ВО Воронежский институт ГПС МЧС России, 2016. – С. 86 - 93.

129. Горюшкин, С.С. Обоснование безопасного расстояния от кромки лесного массива до емкостей хранения трансформаторного масла на электрических подстанциях / С.С. Горюшкин, С.В. Пузач // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – №2. – С. 16 - 22.

130. Горюшкин, С.С. Экспериментальная оценка последствий воздействия теплового потока на фланцевое соединение между расширительным баком и радиаторами масляных трансформаторов на электрических подстанциях / С.С. Горюшкин, С.В. Пузач // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2020. – №4. – С. 35 - 42.

131. Ле, А.Т. Экспериментальное исследование параметров горения кроны наиболее распространенных пород деревьев Вьетнама / А.Т. Ле, С.В. Пузач // Пожаровзрывобезопасность. – 2019. № 6 (28). – С. 10 - 17. DOI: 10.18322/PVB.2019.28.06.10-17

132. Ле, А.Т. Многофакторная математическая модель расчета скорости распространения кромки лесного низового пожара / А.Т. Ле, С.В. Пузач, К.Е. Сафошкина // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2019. – № 4. – С. 7 - 15.

## Приложение

### Акты внедрения результатов диссертационной работы

«УТВЕРЖДАЮ»

Начальника института пожарной  
безопасности МОБ СРВ

к.т.н., генерал-майор милиции



Ле Куанг Бон

24 Август 2020 г.

АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы адъюнкта Академии  
ГПС МЧС России Ле Ань Туан, представленной к защите по специальности  
05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность  
(технические науки, отрасль энергетика)

Комиссия в составе:

Председатель – подполковник милиции, доцент Нгуен Туан Ань,  
заместитель начальника кафедры пожарной тактики ИПБ Вьетнама.

Члены комиссии:

майор милиции, к.т.н., Чу Куок Минь, сотрудник учебного отдела ИПБ  
МОБ Вьетнама;

майор милиции, к.т.н., Фан Ань, начальник кафедры пожарной  
безопасности в строительстве ИПБ МОБ Вьетнама


составили настоящий АКТ о том, что результаты диссертационного  
исследования старшего лейтенанта милиции Ле Ань Туана на тему  
«Предотвращение воздействия лесного пожара на объекты энергетики  
Вьетнама» внедрены на кафедре пожарной профилактики, а именно:

- при проведении лекционных занятий; в научных исследованиях;
- при создании новой учебной дисциплины «Прогнозирование динамики опасных факторов пожара», которая будет использоваться в образовательном процессе высших учебных заведений в ИПБ Вьетнама для обучения магистров.

Заместитель начальника факультета пожарной  
тактики, к.т.н, доцент  
подполковник милиции

Нгуен Туан Ань

Сотрудник учебного отдела, к.т.н  
майор милиции

 Чу Куок Минь

Начальник кафедры ПБС, к.т.н  
майор милиции

 Фан Ань



УТВЕРЖДАЮ  
 Заместитель начальника ГУПО  
 и АСС МОБ СРВ  
 к.т.н., старший полковник



Нгуен Минь Хьонг  
 «17» Августа 2020 г.

#### АКТ

о внедрении результатов диссертационной работы адъюнкта Академии  
 ГПС МЧС России Ле Ань Туан, представленной к защите по специальности  
 05.26.03 – Пожарная и промышленная безопасность  
 (технические науки, отрасль энергетика)

Комиссия в составе:

Председателя - майор милиции Нгуен Минь Тиен, заместитель  
 начальника отдела проверки и подтверждения в области пожарной  
 безопасности ГУПО и АСС Вьетнама,

Членов комиссии:

к.т.н., майор милиции Нгуен Тхань Туан, сотрудник отдела проверки и  
 подтверждения в области пожарной безопасности ГУПО и АСС Вьетнама,

к.т.н., капитан милиции До Тхань Тунг, сотрудник отдела проверки и  
 подтверждения в области пожарной безопасности ГУПО и АСС Вьетнама,

составили настоящий акт о том, что результаты диссертационного  
 исследования старшего лейтенанта Ле Ань Туана на тему «Предотвращение  
 воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама» использованы  
 при разработке нормативных документов для противопожарных требований  
 Вьетнама и исследовании воздействия лесного пожара на объекты  
 энергетики Вьетнама.

Председатель комиссии:

Заместитель начальника отдела проверки  
и подтверждения в области пожарной  
безопасности ГУПО и АСС Вьетнама  
майор милиции



Нгуен Минь Тиен

Члены комиссии:

Сотрудник отдела проверки и  
подтверждения в области пожарной  
безопасности ГУПО и АСС Вьетнама  
майор милиции



Нгуен Тхань Туан

Сотрудник отдела проверки и  
подтверждения в области пожарной  
безопасности ГУПО и АСС Вьетнама  
капитан милиции



До Тхань Тунг

«УТВЕРЖДАЮ»  
ТЭК ЗУЕН ХАЙ 3



Нгуен Вьет Зунг

« 18/05/2020 г.

### АКТ

На внедрение результатов исследований, полученных при выполнении  
диссертационной работы Ле Ань Туана.

Настоящий акт составлен о том, что результаты диссертационной работы Ле Ань Туана использованы при:

- разработке и совершенствовании нормативных документов по определению безопасных расстояний от объектов энергетики в ТЭК ЗУЕН ХАЙ 3 до кромки лесного массива;
- предотвращение человеческого и материального ущерба на территории объектов энергетики от теплового воздействия лесного пожара;

Главного инженера по  
техническому надзору

Нгуен Куок Дэ  
Нго Куок Чинх

  
 УТВЕРЖДАЮ  
 Заместитель начальника Академии  
 ГПС МЧС России по учебной работе  
 кандидат военных наук, доцент

М.В. Бедило

«07» сентября 2021 г.

### АКТ

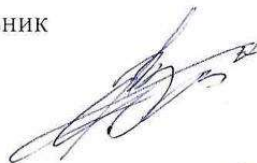
внедрения результатов диссертационной работы на соискание ученой степени кандидата технических наук адъюнкта очного обучения кафедры инженерной теплофизики и гидравлики Академии ГПС МЧС России,  
капитана милиции Ле Ань Туана

Комиссия в составе: заместителя начальника УМЦ - начальника учебного отдела полковника внутренней службы Колесникова В.В., заместителя заведующего кафедрой инженерной теплофизики и гидравлики полковника внутренней службы Болдырева Е.Н., доцента кафедры инженерной теплофизики и гидравлики, к.т.н., доцента Лимонова В.Г., профессора кафедры процессов горения в составе УНК процессов горения и экологической безопасности, д.т.н., профессора Бегишева И.Р. подтверждает, что результаты диссертационного исследования Ле Ань Туана внедрены в учебный процесс кафедры инженерной теплофизики и гидравлики при подготовке фондовых лекций и практических занятий:

- на факультете техносферной безопасности по дисциплине «Теплотехника и прогнозирование опасных факторов пожара» по теме «Полевая математическая модель пожара»;

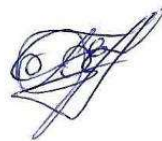
- на факультете пожарной безопасности по дисциплине «Прогнозирование опасных факторов пожара» по теме «Дополнительные соотношения полевой математической модели пожара».

Заместитель начальника УМЦ - начальник  
учебного отдела  
полковник внутренней службы



Колесников В.В.

Заместитель заведующего кафедрой  
инженерной теплофизики и гидравлики  
полковник внутренней службы



Болдырев Е.Н.

Профессор кафедры процессов горения  
в составе УНК процессов горения  
и экологической безопасности  
д.т.н., профессор



Бегишев И.Р.

Доцент кафедры инженерной  
теплофизики и гидравлики,  
к.т.н., доцент



Лимонов В.Г.