

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)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Академия Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий»
на кафедре инженерной теплофизики и гидравлики
(Академия ГПС МЧС России)

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

Официальные оппоненты: **Хасанов Ирек Равильевич,**
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, ФГБУ ВНИИПО МЧС России,
научно-исследовательский центр
нормативно-технических проблем
пожарной безопасности (НИЦ НТП ПБ),
главный научный сотрудник

Гарелина Светлана Александровна,
кандидат технических наук, ФГБВОУ ВО
«Академия гражданской защиты МЧС
России», кафедра механики и инженерной
графики, доцент

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»**

Защита состоится «26» ноября 2021 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 205.002.02 в Академии ГПС МЧС России по адресу: 129366, г. Москва, ул. Бориса Галушкина д. 4.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Академии ГПС МЧС России и на сайте:

<https://academygps.ru/upload/iblock/1d3/1d3dbb8403e6e37164ca3b73bdd7ab5d.pdf>

Автореферат разослан «29» сентября 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук, профессор



А.Б. Сивенков

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Из-за значительного экономического развития Вьетнама, количество электростанций быстро растет, чтобы удовлетворить потребности потребления в электроэнергии в промышленных зонах и общественном секторе.

В период с 2011 по 2020 гг. спрос потребления электроэнергии во Вьетнаме продолжает расти со средней скоростью 25,43 % в год. Всего за этот промежуток времени было введено в эксплуатацию 156 электростанций, из которых гидроэлектростанции (ГЭС) составляют – 43 %, тепловые электростанций (ТЭС) – 45 %, ветряные электростанции (ВЭС) и другие – 12 %.

Большое количество существующих и строящихся электростанций, подстанций, 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 с 2011 по 2020 гг. произошло 3043 лесных пожаров, которые привели к полному уничтожению 19620 га леса. В результате ущерб превысил 58 млн. дол. США. Большое количество людей было эвакуировано, а многие из них были госпитализированы из-за шока и вдыхания дыма.

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. 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 такие российские и зарубежные ученые как 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., Фурьев В.В., Курбатский Н.П., Матвеев П.М., Davis K.P., Вырам G.M. и др.

Математическое моделирование лесного пожара представляет собой крайне сложную и в полном виде нерешенную проблему.

В общем виде для определения характеристик природных пожаров решаются трехмерные нестационарные дифференциальные уравнения газодинамики и тепломассообмена. 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 достоверное прогнозирование развития лесного пожара в трехмерной нестационарной постановке задачи. В этой связи, разрабатываются полуэмпирические и эмпирические инженерные методы расчета, 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 для условий Вьетнама.

Таким образом, для разработки метода расчета теплового воздействия лесного пожара на ОЭ Вьетнама необходимо учитывать теплофизические и химические свойства лесных массивов, в которых находятся 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 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 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 учетом их объемно-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 научно-практической 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 4-х изданиях, рекомендованных ВАК).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы и приложения. Работа изложена на 172 страницах текста, включает в себя 54 рисунка, 22 таблицы. Список литературы состоит из 132 литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, проанализированы объект и предмет исследования, сформулированы цель и задачи исследования, изложены научная новизна работы и ее научная и практическая значимость, положения, выносимые на защиту, приведено краткое содержание работы.

В первой главе «Современное состояние проблемы обеспечения пожарной безопасности объектов энергетики Вьетнама от воздействия лесных пожаров» проведен анализ литературных источников, посвященных рассматриваемой проблеме.

Выполнен анализ классификации лесных пожаров, являющейся одной из основополагающих сторон при разработке противопожарных мероприятий по защите ОЭ Вьетнама, а также при выборе методики тушения лесного пожара вблизи вышеуказанных объектов.

По характеру возгорания, в зависимости от того, какие уровни леса, а также участки территории участвуют в распространении огня, лесные пожары делятся на низовые, верховые, полевые и подземные.

Показано, что наиболее интенсивное тепловое воздействие на ОЭ Вьетнама оказывают устойчивые (повальные) верховые лесные пожары. При этом наибольшей скоростью распространения обладают беглые (ураганные) верховые лесные пожары.

Лесные пожары имеют три основные характеристики, которые учитывают все влияния на развитие пожара: пирологическая, метеорологическая и поражающая.

Пирологическая характеристика лесных пожаров определяется двумя основными факторами: тип горючей нагрузки (растительности) и влажность горючего материала. Поэтому, 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.

Проанализированы условия, способствующие возникновению и распространению лесных пожаров. Отмечено, что основной причиной загорания лесов в 90 – 97 % случаев оказывается человек.

Возникновению ситуаций, при которых пожары становятся неуправляемыми и катастрофическими (приводят к гибели людей, уничтожению техники и других материальных ценностей), способствуют чрезвычайная пожарная опасность по условиям погоды, наличие перед фронтом пожара легковоспламеняющегося горючего материала (сухая трава и т.п.), порывистый ветер с меняющимся направлением и силой и слияние мелких очагов горения в один и образование крупных пожаров.

Выделены особенности лесных пожаров во Вьетнаме. Лесам Вьетнама присущи эколого-географические особенности, обусловленные природно-климатическими, лесорастительными, социальными и экономическими факторами.

Показано, что, 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 с учетом конкретных характеристик растительности и климата определенной местности.

Проведен анализ климатических условий в местах расположения ОЭ Вьетнама (в основном трансформаторных подстанций), находящихся в лесных массивах.

Проанализированы существующие нормативные противопожарные мероприятия по защите ОЭ Вьетнама от воздействия лесных пожаров. Показано, что для предотвращения теплового воздействия лесного пожара на ОЭ Вьетнама нет научно-обоснованных рекомендаций по эффективным противопожарным мероприятиям. Кроме того, в современных базах данных по параметрам пожарной нагрузки отсутствуют величины удельной массовой скорости выгорания и удельного коэффициента выделения СО (и других токсичных газов) при горении стволов и кроны основных пород деревьев Вьетнама, что не позволяет задавать достоверные исходные данные для расчета теплового и токсического воздействия лесного пожара на ОЭ Вьетнама с использованием математических моделей термогазодинамики пожара.

В выводах к первой главе сформулирована цель диссертации и задачи исследований, необходимые для ее достижения.

Во второй главе «Математическая модель расчета параметров лесных пожаров» представлены математические модели и методика расчета теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама.

Рассмотрена полевая модель расчета тепломассообмена при пожаре, ее основные уравнения, дополнительные соотношения, а также принятые основные особенности и упрощения термогазодинамической картины лесного пожара.

Все основные дифференциальные уравнения приведены к виду, удобному для численного решения:

$$\frac{\partial}{\partial \tau}(\rho\Phi) + \text{div}(\rho w\Phi) = \text{div}(\Gamma \text{grad } \Phi) + S, \quad (1)$$

где Φ – зависимая переменная (энтальпии газовой смеси и материала стен и перекрытия, проекции скорости на координатные оси, концентрации компонентов газовой смеси, кинетическая энергия турбулентности и скорость её диссипации, массовая концентрация и оптическая плотность дыма); Γ – коэффициент диффузии для Φ ; S – источниковый член; ρ – плотность, кг/м³; w – скорость, м/с; τ – время, с.

Все величины в уравнениях (1) являются осредненными по времени.

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

Разработана математическая модель расчета параметров движения кромки низового лесного пожара.

Схема распространения лесного низового пожара, используемая в модели, представлена на рисунке 1.

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), а учитывает конкретное состояние атмосферы и основных особенностей растительности и ландшафта местности.

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

$$W_{\text{кр}} = W_{\text{кр},0} K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8, \quad (2)$$

где $W_{\text{кр}}$ – скорость распространения кромки лесного пожара, м/с; $W_{\text{кр},0}$ – 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.

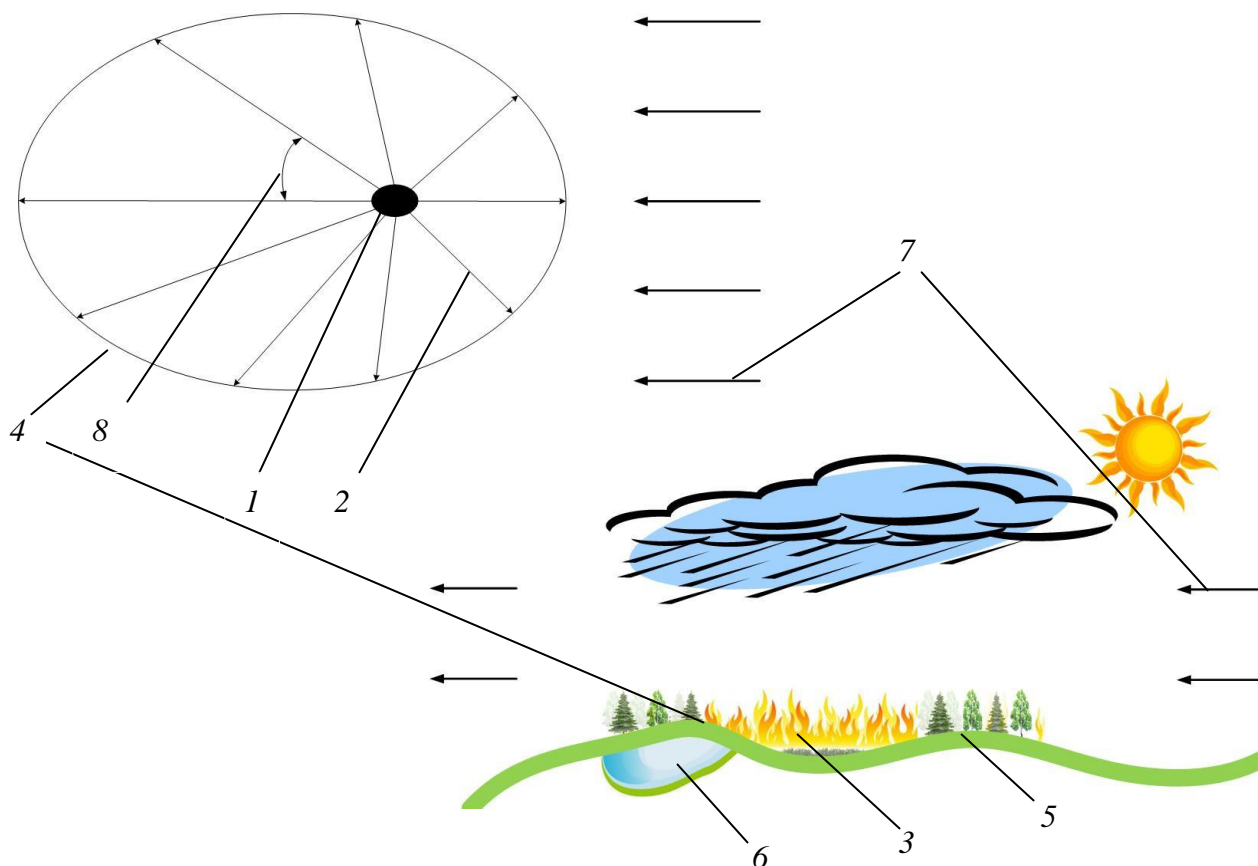


Рисунок 1 – Схема распространения лесного пожара: 1 – начальный очаг возгорания; 2 – направления распространения пожара; 3 – область лесного низового пожара; 4 – кромка лесного низового пожара; 5 – участки местности с горючей нагрузкой; 6 – «негорючие» участки местности; 7 – направление ветра; 8 – угол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

Величины коэффициентов, входящих в выражение (2), получены на основе аппроксимации экспериментальных и теоретических данных, приведенных в литературных источниках:

$$K_1 = \left(\frac{p_B}{760} \right)^{0,7} \left(\frac{T_B + 273}{293} \right), \quad (3)$$

$$K_2 = \min(K_2' K_2''), \quad (4)$$

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

при $\varphi_d \leq 30\%$:

$$K_2'' = 2 \cdot 10^{-7} \varphi_d^4 - 5 \cdot 10^{-5} \varphi_d^3 + 0,0042 \varphi_d^2 - 0,1444 \varphi_d + 2,0081, \quad (6)$$

при $\varphi_d > 30\%$:

$$K_2'' = 0,254, \quad (7)$$

направление по ветру:

$$K_3 = -1,1481 w_B^2 + 0,6439 w_B + 0,9527, \quad (8)$$

направление поперек ветра:

$$K_3 = 0,3607 w_B^2 + 0,1473 w_B + 1,0397, \quad (9)$$

направление против ветра:

$$K_3 = 0,119 w_B^2 - 0,4143 w_B + 0,9454, \quad (10)$$

$$K_4 = 1 - \frac{G}{G_{кр}}, \quad (11)$$

$$K_5 = W_{кр.1}/W_{кр.0}, \quad (12)$$

вверх по склону:

$$K_6 = 6 \cdot 10^{-6} \gamma^5 - 0,0005 \gamma^4 + 0,0159 \gamma^3 - 0,2081 \gamma^2 + 0,9727 \gamma + 0,9921, \quad (13)$$

поперек склона:

$$K_6 = 0,8564 e^{0,0229\gamma}, \quad (14)$$

вниз по склону:

$$K_6 = 1, \quad (15)$$

$$K_7 = 1 - \frac{G_T}{G_{кр}}, \quad (16)$$

где p_B – атмосферное давление воздуха, мм. рт. ст.; T_B – температура воздуха, °С; K_2' – коэффициент, учитывающий влажность воздуха; K_2'' – коэффициент, учитывающий влажность пожарной нагрузки; ϕ_B – влажность воздуха, %; ϕ_d – влажность древесины, %; w_B – скорость ветра, м/с; $W_{кр.1}$ – скорость распространения кромки устойчивого низового пожара по его фронту для конкретного типа растительности, м/с; γ – угол крутизны склона, град; G – интенсивность выпадения осадков, кг/(м²с); $G_{кр}$ – критическая интенсивность выпадения осадков, кг/(м²с); G_T – интенсивность подачи воды на тушение, кг/(м²с); $G_{кр}$ – критическая интенсивность воды, подаваемой на тушение, кг/(м²с).

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

Тип низового пожара выбираем по характеру возгорания и скорости распространения. Рассматриваются устойчивый низовой пожар, беглый низовой пожар и подстилочный пожар.

В случае устойчивого низового пожара, возникающего на сосняках лишайниковых и лишайниково-мшистых, принимаем в формуле (2): $K_8 = 1$.

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

$$K_8 = W_{кр}/W_{кр.0}/K_5, \quad (17)$$

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 в данной работе не рассматривается.

Особенности применения предложенной математической модели заключаются в следующем:

- 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);

- 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, распространение пожара от которых также принимается круговым.

Таким образом, принят источниково-лучевой принцип распространения пожара.

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

$$q = \varepsilon_{пр} c_0 \left[\left(\frac{T_{и}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_о}{100} \right)^4 \right] \psi, \quad (18)$$

где q – плотность теплового потока, падающего на облучаемую поверхность, Вт/м², $T_{и}$ – эффективная температура излучающей поверхности пламени, К, $T_о$ – температура на облучаемой поверхности, К, $\varepsilon_{пр}$ – приведенная степень черноты системы «излучаемая поверхность – облучаемая поверхность»; $c_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ψ – коэффициент облученности между излучающей и облучаемой поверхностями, в которой входит расстояние между излучающей и облучаемой поверхностями.

Разработана методика расчета теплового воздействия лесного пожара на ОЭ Вьетнама, позволяющая учесть климатические условия и пирологические характеристики лесных горючих материалов Вьетнама.

В третьей главе «Экспериментальное исследование характеристик процесса горения лесных материалов Вьетнама» для получения исходных данных для математического моделирования параметров и теплового воздействия верховых лесных пожаров на объекты энергетики Вьетнама выполнены экспериментальные исследования параметров процесса горения образцов кроны наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама.

Схема экспериментальной установки (Пузач С.В., Акперов Р.Г., Сулейкин Е.В., 2016) приведена на рисунке 2.

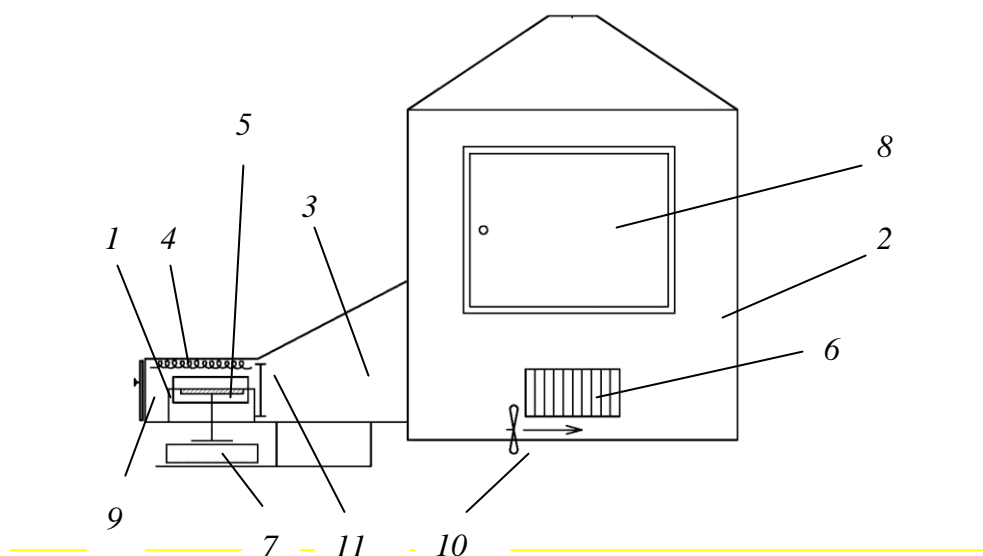


Рисунок 2 – Схема экспериментальной установки: 1 – камера сгорания; 2 – экспозиционная камера; 3 – переходной рукав; 4 – электроннагревательный излучатель; 5 – держатель образца; 6 – шибберные отверстия; 7 – столик для весов; 8 – дверца экспозиционной камеры; 9 – дверца камеры сгорания; 10 – вентилятор;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

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 $\pm 10\%$, кислорода с диапазоном измерений от 0 до 21 % об и допустимой погрешностью $\pm 10\%$ об.

Образцы древесной массы и кроны (лиственно-древесной массы) испытывались в режиме пламенного горения, который обеспечивался при температуре испытания $750\text{ }^\circ\text{C}$ (плотность падающего теплового потока 60 кВт/м^2).

В процессе испытаний фиксируются показания концентраций CO (% об), O_2 (% об), температуры и изменение массы образца.

Удельная массовая скорость газификации стволов и кроны деревьев определяется по формуле:

$$\psi_{\text{уд}} = \frac{1}{F} \frac{dM}{d\tau}, \quad (19)$$

где $\psi_{\text{уд}}$ – удельная массовая скорость газификации, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; M – текущая масса образца, кг ; τ – время, с ; F – площадь поверхности образца, м^2 .

Удельный коэффициент образования CO (L_{CO}) находится в каждый момент времени по следующей формуле:

$$L_{\text{CO}} = \frac{V}{\psi_{\text{уд}} F} \frac{d\rho_{\text{CO}}}{d\tau}, \quad (20)$$

где V – внутренний объем установки, м^3 ; ρ_{CO} – среднеобъемная плотность CO внутри установки, $\text{кг}/\text{м}^3$.

В таблице 1 приведены измерения удельной массовой скорости газификации образцов наиболее распространенных пород деревьев Вьетнама.

Таблица 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> , xoan	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 равны 0,1×0,1×0,02 м, образцов кроны деревьев (листья и ветви – листовенно – древесная масса) – 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.

Влажность образцов измерялась влагомером ZNT 125 Electronic с диапазоном измерений 5 – 50 % и погрешностью измерений ±2 %. Влажность образцов была менее 8 % (таблица 1), что соответствует влажности деревьев Вьетнама в наиболее пожароопасный засушливый период времени.

На рисунке 3 представлены экспериментальные зависимости от времени удельной скорости газификации образцов, а на рисунке 4 приведены экспериментальные зависимости от времени удельных массовых коэффициентов образования CO.

Рисунок 3 показывает, что:

- локальные величины $\psi_{уд}$ после 2 мин испытаний для древесины находятся в диапазоне от $\psi_{уд} = 0,0063 \div 0,014$ кг/(м²·с), где нижний предел соответствует горению хвойных пород деревьев, а верхний – листовенных (Кошмаров Ю.А., 2000);

- зависимости удельной массовой скорости газификации древесины от времени имеют максимум в начале процесса газификации; время выхода на максимальные значения не превышает 0,5 – 2 мин в зависимости от породы дерева; после этого происходит относительная стабилизация процесса газификации древесины.

Удельные массовые коэффициенты образования CO, согласно рисунку 4, примерно до 2 мин от начала горения пренебрежимо малы. После этого момента времени происходит резкий рост вышеуказанных коэффициентов до их максимальных значений в течение 1 – 2 мин в зависимости от породы дерева. Это объясняется тем, что с течением времени происходит уменьшение кислорода в камере сгорания и не весь монооксид углерода окисляется до двуоксида углерода.

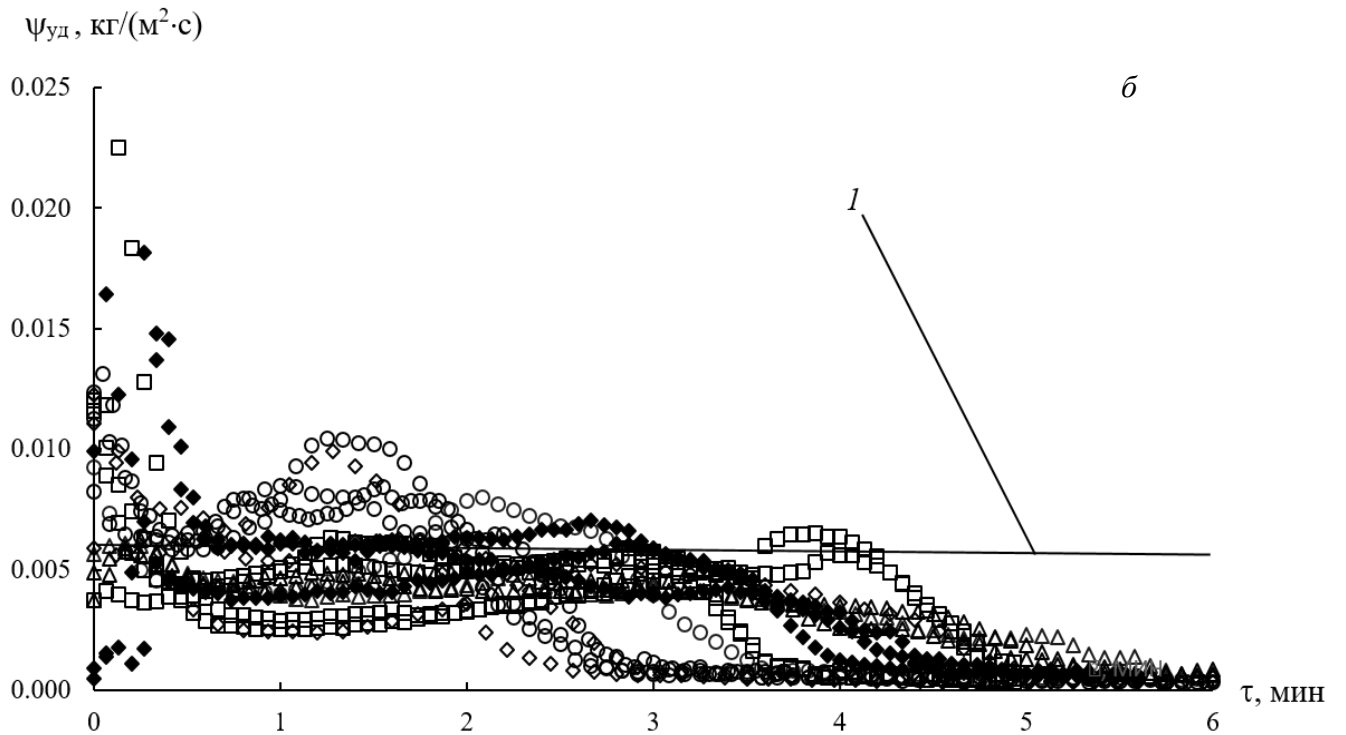
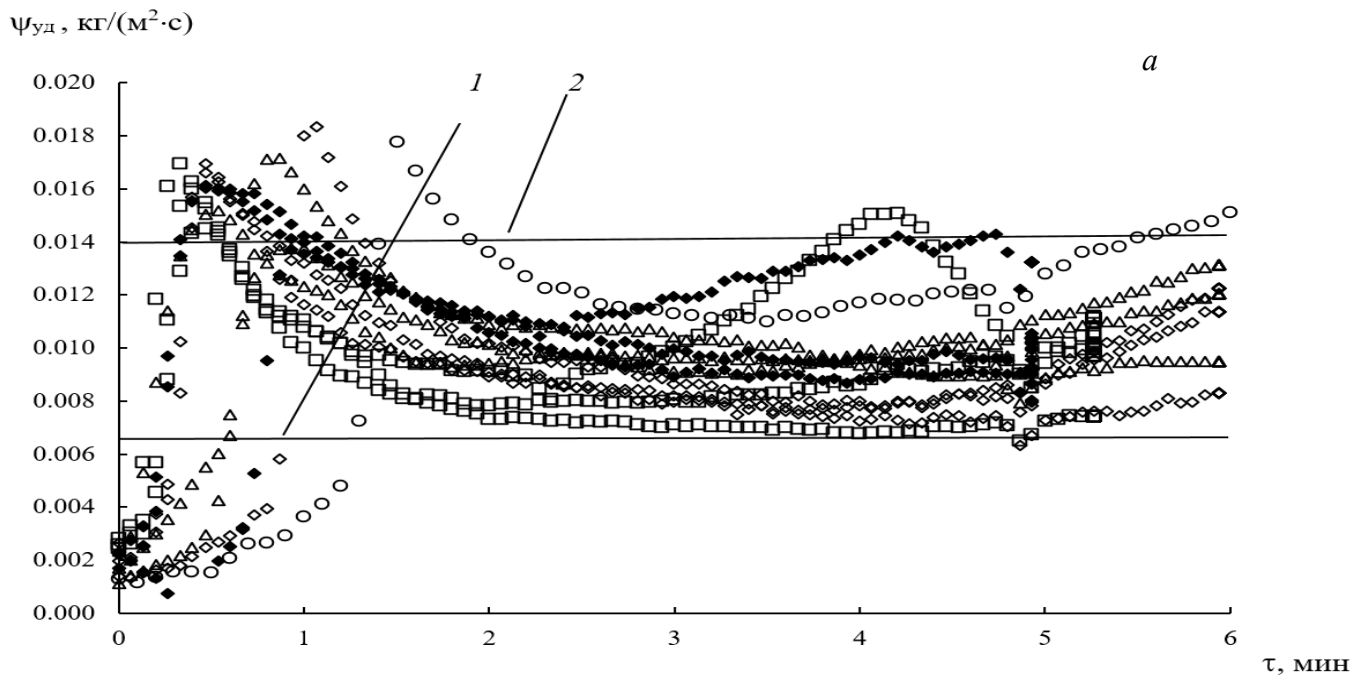


Рисунок 3 – Зависимости удельной массовой скорости газификации от времени с начала горения образцов древесной (а) и лиственно-древесной массы (б): □ – образец №1; Δ – №2; ◆ – №3; о – №4; ◇ – №5; 1 – $\Psi_{уд} = 0,0063$ кг/(м²·с) (хвойные породы); 2 – $\Psi_{уд} = 0,014$ кг/(м²·с) (лиственные).

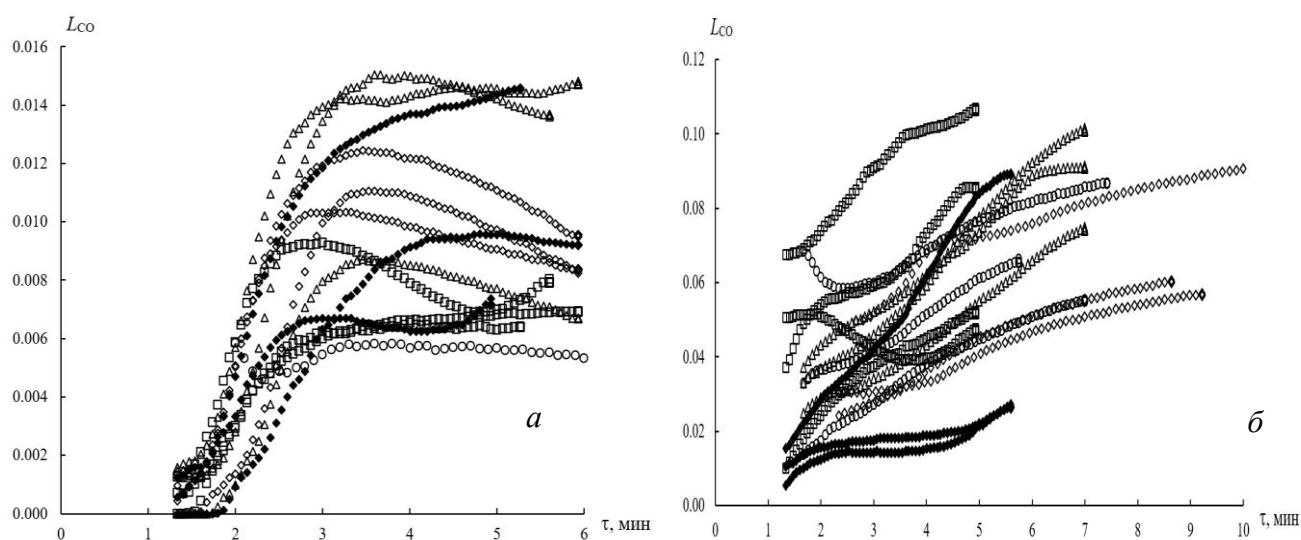


Рисунок 4 – Зависимости удельных массовых коэффициентов образования СО от времени с начала горения образцов древесной (а) и лиственно-древесной массы (б):

□ – образец №1; Δ – №2; ◆ – №3; о – №4; ◇ – №5.

Средние за время проведения экспериментов значения $\psi_{уд}$ и L_{CO} представлены в таблице 2. Из таблицы 2 видно, что:

- экспериментальные средние величины $\psi_{уд}$ для всех рассматриваемых пород деревьев находятся в диапазоне от $\psi_{уд} = 0,0063$ кг/(м²·с) (хвойные породы) (Кошмаров Ю.А., 2000) до $\psi_{уд} = 0,014$ кг/(м²·с) (лиственные) (Кошмаров Ю.А., 2000);

- экспериментальные средние опытные значения L_{CO} существенно меньше (более, чем в 2 раза) величины, приведенной в базе данных горючей нагрузки (Кошмаров Ю.А., 2000).

Полученные средние экспериментальные значения удельных величин массовой скорости газификации и массового коэффициента образования СО для образцов древесной массы наиболее распространенных лиственных и хвойных пород деревьев Вьетнама могут быть использованы при расчете характеристик лесных пожаров.

Таблица 2 – Средние за время проведения экспериментов значения $\psi_{уд}$ и L_{CO}

№ образца	$\psi_{уд}$, кг/(м ² ·с)			L_{CO}		
	лиственно-древесный образец	древесный образец	по [14]	лиственно-древесный образец	древесный образец	по [14]
1	0,0032	0,0093	0,014	0,0565	0,0052	0,024
2	0,0027	0,0102		0,0587	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	

В выводах к третьей главе отмечена научная и практическая новизна, а

также значимость полученных результатов.

В четвертой главе «Моделирование теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама» приведены результаты практического применения разработанной математической модели расчета термогазодинамики лесного пожара на конкретные ОЭ Вьетнама.

Пожарная нагрузка поверхностного слоя лесных массивов во Вьетнаме может достигать 5 кг/м^2 и более, что в несколько раз больше, чем в лесах России. Поэтому одним из наиболее опасных типов лесных пожаров для ОЭ являются пятнистые возгорания, которыми называются высокоинтенсивные лесные пожары с возникающими над ними мощными конвекционными потоками нагретого воздуха и продуктов сгорания.

Проведено сопоставление результатов численного расчета с экспериментальными данными по пятнистому возгоранию: горение древесной стружки на площади $70 \times 70 \text{ м}$ (Гусев В.Г., Колонов Е.В., 1986).

Конечно-разностная сетка для решения системы уравнений (1) с использованием компьютерной программы (Пузач С.В., 2006) имела размеры по количеству ячеек $101 \times 101 \times 51$ вдоль соответствующих координатных осей. Шаг по пространственным координатам был переменным с минимальной величиной в области горючего материала, равной $0,5 \text{ м}$.

Анализ результатов показал, что отличие в превышении температуры газовой смеси над температурой окружающей среды, полученное с использованием системы уравнений (1) и из эксперимента, меньше 26% на высоте от уровня земли $z = 20 \text{ м}$ и менее $5,6 \%$ при $z < 10 \text{ м}$ (таблица 3).

На рисунке 5 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 6.

Таблица 3 – Величины температур и скоростей на различных высотах внутри конвективной колонки

Высота от поверхность и земли, м	Превышение температуры газовой смеси над температурой окружающей среды, °С				Вертикальная составляющая скорости газового потока, м/с			
	Эксперимент *	Расчет т *	Расчет по уравнения м (1) при $\psi=0,01 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$	Расчет по уравнения м (1) при $\psi=0,05 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$	Эксперимент *	Расчет *	Расчет по уравнения м (1) при $\psi=0,01 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$	Расчет по уравнения м (1) при $\psi=0,05 \text{ кг/(с}\cdot\text{м}^2)$
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

Примечание: * – Гусев В.Г., Колонов Е.В., 1986

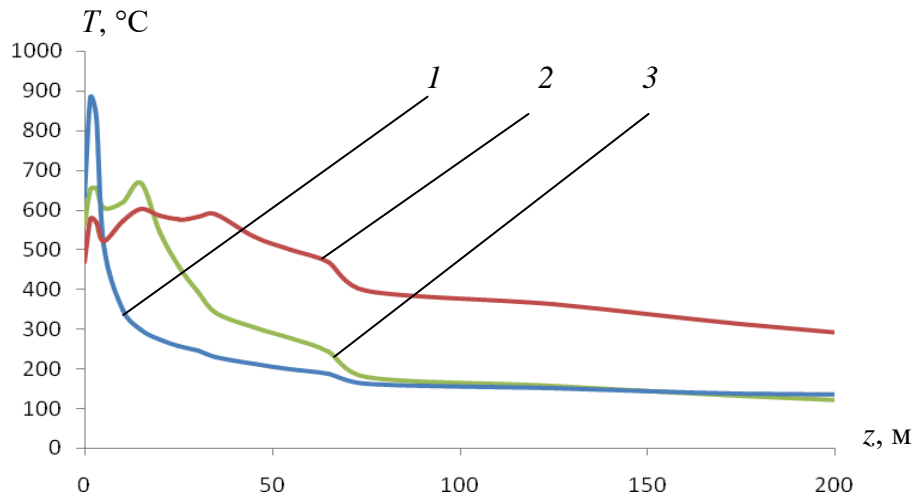


Рисунок 5 – Распределения температур по высоте конвективной колонки в геометрическом центре прямоугольника горючего материала при различных удельных массовых скоростях выгорания горючего материала: 1 – $\psi=0,01$ кг/(с·м²); 2 – $\psi=0,05$; 3 – $\psi=0,1$.

На рисунке 7 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.

Анализ рисунков 6 и 7 показывает, что критическая величина плотности лучистого теплового потока для человека $q_{кр1} = 1400$ Вт/м² достигается на расстояниях от центра стороны прямоугольника горючего материала, равных $x_{кр} = 49$ м при $\psi = 0,05$ кг/(с·м²) и $x_{кр} = 105$ м в случае $\psi = 0,1$ кг/(с·м²).

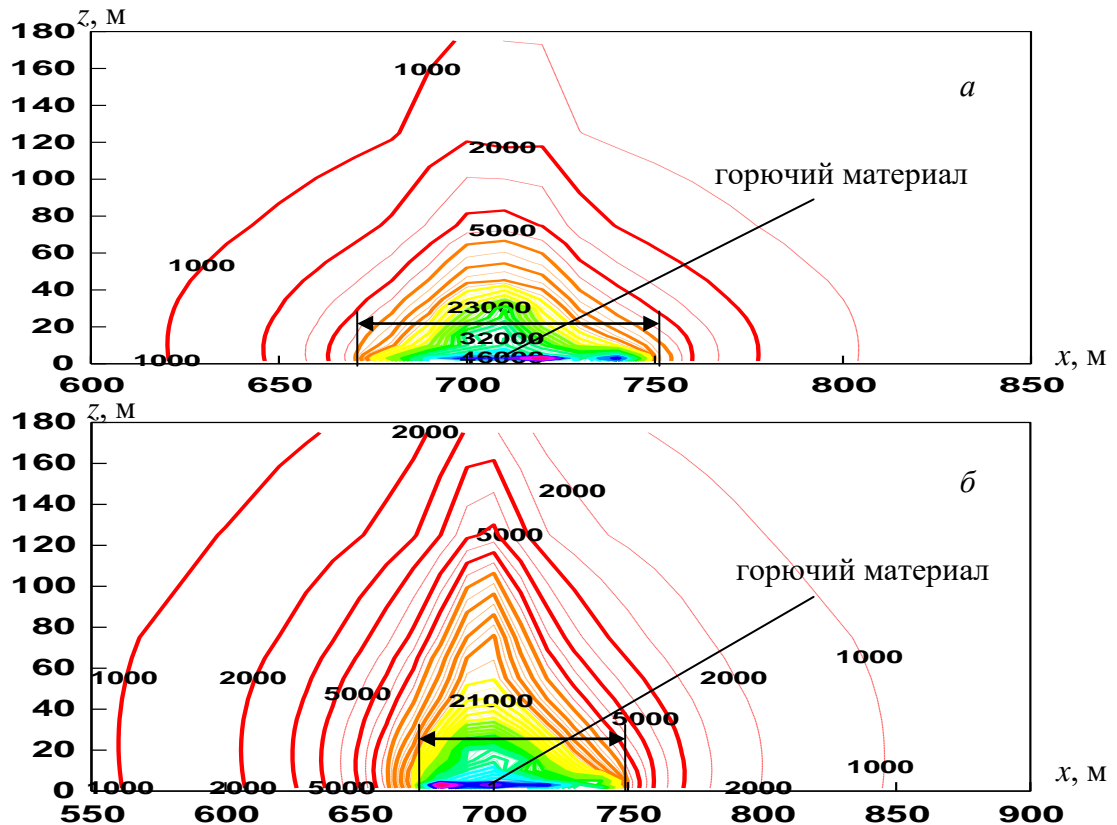


Рисунок 6 – Поля плотностей лучистых тепловых потоков в продольном разрезе конвективной колонки, образующейся над горючим материалом, при повышенной массовой скорости выгорания: а – $\psi = 0,05$ кг/(с·м²); б – $\psi = 0,1$ кг/(с·м²).

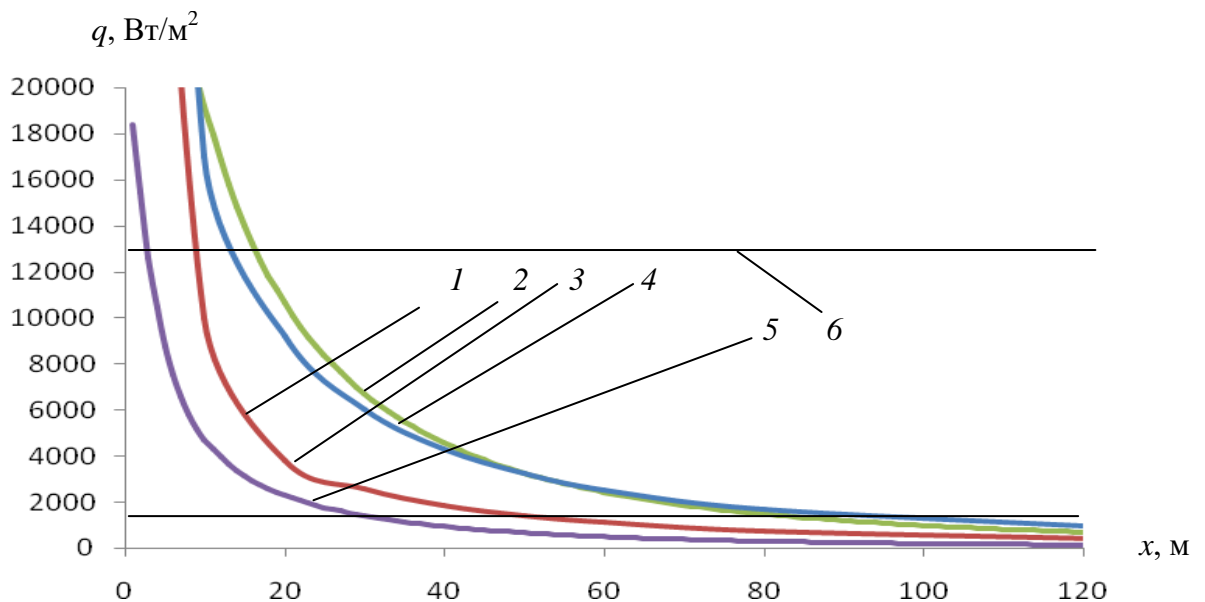


Рисунок 7 – Зависимости плотностей лучистых потоков от расстояния от центра стороны прямоугольника горячего материала на высоте 2 м от уровня земли: полевая модель (уравнения (1)): 1 – $\psi = 0,05 \text{ кг}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$; 2 – $\psi = 0,1$; выражение (18): 3 – $\psi = 0,05$; 4 – $\psi = 0,1$; 5 – $q_{\text{кр}1}$; 6 – $q_{\text{кр}2}$.

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

Результаты численных экспериментов показали, что пожарная опасность пятнистого возгорания в добавление к переносу горящих и тлеющих частиц лесных горючих материалов для объектов энергетики Вьетнама заключается в повышенных лучистых тепловых потоках, возникающих при повышенной удельной (по площади пожара) массовой скорости выгорания, характерной для условий Вьетнама.

При рассмотренном модельном пятнистом возгорании безопасная зона от кромки пожара до места нахождения персонала объекта превысила 100 м, что существенно больше нормативного значения 20 м.

Проведены численные эксперименты по воздействию лесного верхового пожара на типовые ОЭ Вьетнама, расположенные рядом или внутри лесных массивов: трансформаторные подстанции с масляными трансформаторами Вунг-Анг района Ха-Тинь, Тхань-Ми района Коанг-Нам и Хоа-Бинь района Хоа-Бинь.

На рисунке 8 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 скорости его распространения 3 м/мин.

На рисунке 9 показаны зависимости от времени температуры стенки емкости с трансформаторным маслом, нагреваемой лучистым потоком от фронта верхового пожара (кромка лесного массива напротив рассматриваемого объекта) при скорости его распространения 100 м/мин.

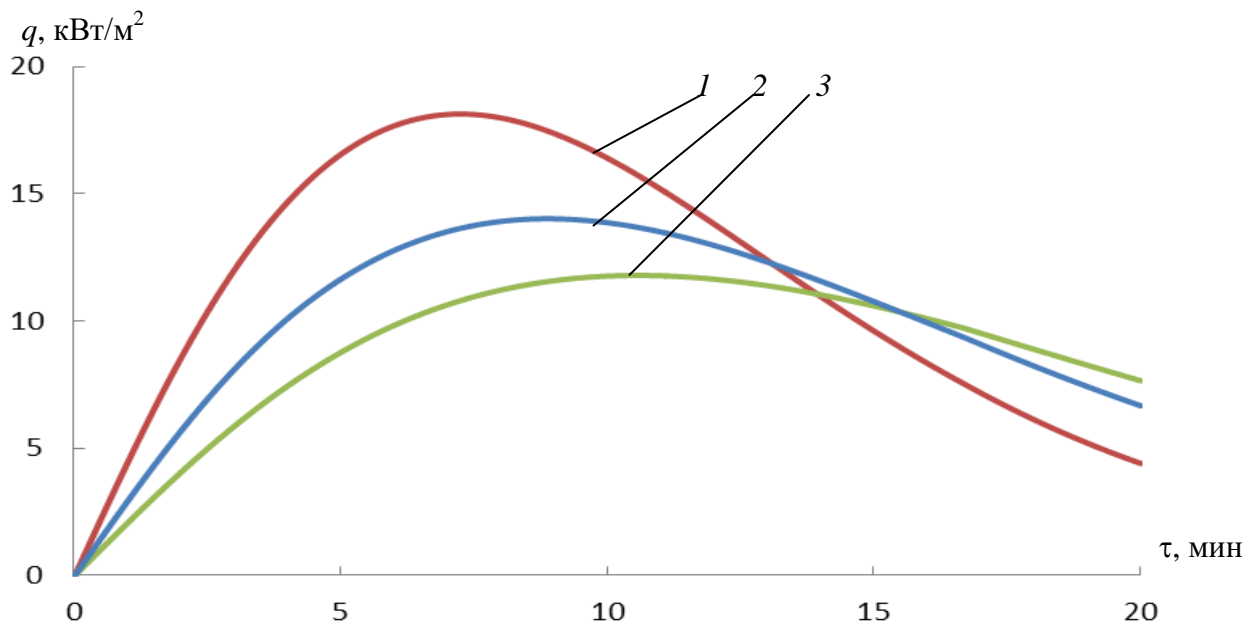


Рисунок 8 – Зависимость плотности теплового потока, падающего на поверхность емкости с трансформаторным маслом объекта, от времени с начала верхового пожара при скорости его распространения 3 м/мин: 1 – трансформаторная подстанция Вунг-Анг района Ха-Тинь; 2 – трансформаторная подстанция Тхань-Ми района Коанг-Нам; 3 – трансформаторная подстанция Хоа-Бинь района Хоа-Бинь.

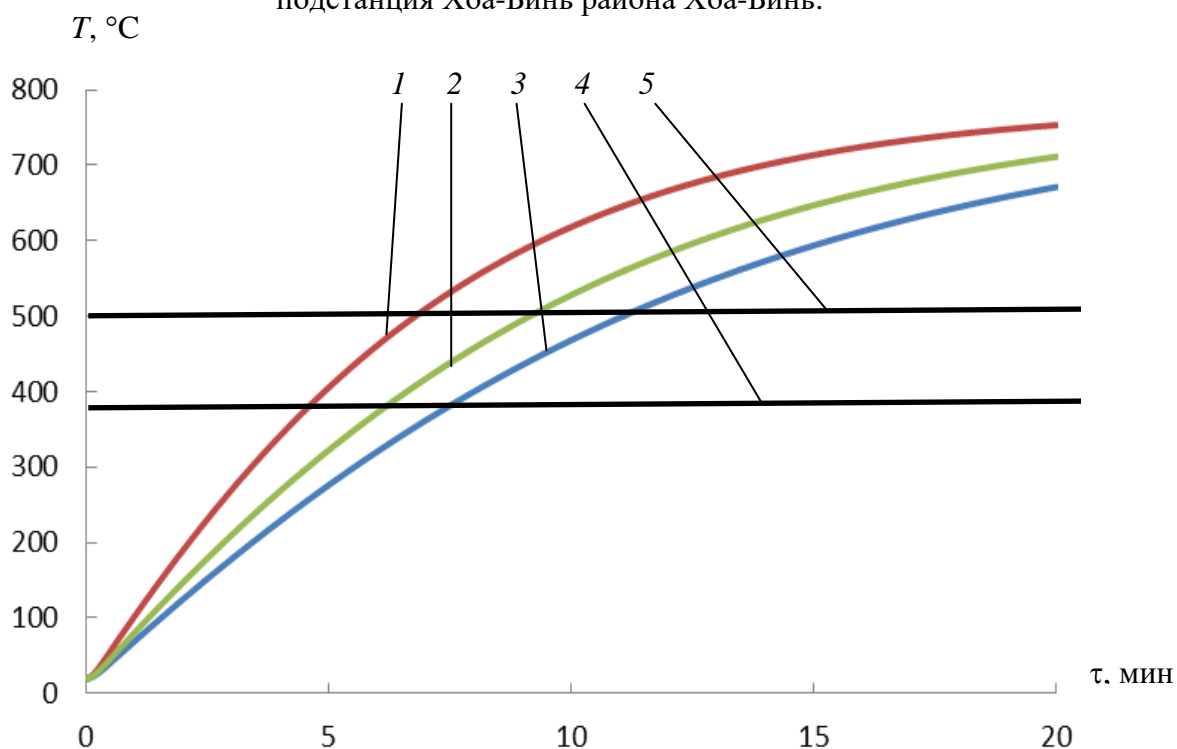


Рисунок 9 – Зависимости средней температуры стенки емкости с трансформаторным маслом в наиболее нагретом сечении от времени с начала верхового пожара при скорости его распространения 100 м/мин: 1 – трансформаторная подстанция Вунг-Анг района Ха-Тинь; 2 – трансформаторная подстанция Тхань-Ми района Коанг-Нам; 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 $T_{св} = 500^{\circ}\text{C}$.

В таблице 4 приведены результаты численных экспериментов.

Таблица 4 – Результаты численных экспериментов

№ п/п	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 таблицы 4 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.

На основе проведенных расчетов разработаны 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 $V_{п} = 30$ м с 2-х сторон ограничительной стены, граничащей с лесом;

трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Тхань-Ми района Коанг-Нам: полоса шириной $V_{п} = 30$ м по всему периметру ограничительной стены;

трансформаторная подстанция с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь: полоса шириной $B_n = 100$ м с 3-х сторон ограничительной стены, граничащей с лесом;

- обустройство пожарных водоемов на всех трансформаторных подстанциях;

- создание отдельного поста пожарной охраны на трансформаторной подстанции с масляными трансформаторами Хоа-Бинь района Хоа-Бинь.

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

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 (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. Предложенная математическая модель и методика расчета теплового воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама позволяет учесть природно-климатические условия и пирологические характеристики лесных горючих материалов Вьетнама.

4. Проведенные экспериментальные исследования процесса горения образцов древесной и листовенно-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. Выполненные численные эксперименты по определению теплового воздействия верхового лесного пожара на характерные объекты энергетики Вьетнама (трансформаторные подстанции с масляными трансформаторами) показали, что существующая противопожарная защита вышеуказанных объектов недостаточна для предотвращения выхода их из строя.

6. Разработаны научно-обоснованные рекомендации по предотвращению воздействия лесного пожара на объекты энергетики Вьетнама с учетом природно-климатических условий и пирологических характеристик лесных горючих материалов Вьетнама, а также объемно-планировочных и конструктивных решений объектов.

Основные научные результаты работы опубликованы в следующих рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК:

1. 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. DOI: 10.25257/FE.2018.2.64-70

2. 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. DOI: 10.25257/FE.2019.4.7-15

3. 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

4. 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

Остальные публикации по теме диссертации:

5. Ле, А.Т. Причины изменения площади тропических лесов Вьетнама и лесопожарная проблема во Вьетнаме за последние годы / А.Т. Ле, С.В. Пузач // Системы обеспечения техносферной безопасности – 2018: Материалы V Всероссийской научной конференции и школы для молодых ученых (с международным участием). – Южный федеральный университет (г. Таганрог), 2018. – С. 293-295.

6. Ле, А.Т. Развитие пожара электрической подстанции в лесной кромке во Вьетнаме / А.Т. Ле // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций – 2018: Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции для молодых ученых (с международным участием). – Воронеж.: Воронежский институт ГПС МЧС России, 2018. – С. 266-268.

7. Ле, А.Т. Экспериментальное исследование параметров горения древесной массы деревьев Вьетнама / А.Т. Ле, С.В. Пузач // Системы безопасности – 2018: Материалы 27 международной научно-технической конференции (с международным участием). – М.: Академия ГПС МЧС России, –

2018. –С. 112-115.

8. Ле, А.Т. Особенности пожарной опасности пятнистого возгорания для объектов энергетики / А.Т. Ле, С.В. Пузач // Исторический опыт, современные проблемы и перспективы образовательной и научной деятельности в области пожарной безопасности - 2018: Сборник тезисов докладов материалов международной научно-практической конференции, Москва, 18–19 октября 2018 года. – Москва, Академия ГПС МЧС России, 2018. – С. 304-308.

9. Ле, А.Т. Математическая модель расчета тепломассообмена при верховом лесном пожаре энергетики / А.Т. Ле, С.В. Пузач, К.М. Чу // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2019: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). Воронеж.: Воронежский институт ГПС МЧС России, 2019. – С. 217-219.

10. Ле, А.Т. Объекты энергетики Вьетнама, расположенные в лесных массивах / А.Т. Ле, С.В. Пузач // Системы обеспечения техносферной безопасности – 2019: Материалы VI Всероссийской научной конференции и школы для молодых ученых (с международным участием) – Институт нанотехнологий, электроники и приборостроения Южного федерального университета (г. Таганрог), 2019. – С. 192-194.

11. Ле, А.Т. Методы обеспечения безопасности для высоковольтных линий и трансформаторных станций в лесу Вьетнама / А.Т. Ле, Т.Т. До // Надежность и долговечность машин и механизмов – 2020: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 387-389.

12. Ле, А.Т. Методика проведения экспериментов исследования характеристик процесса горения лесных материалов Вьетнама / А.Т. Ле, С.В. Пузач // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов – 2020: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 342-344.

13. Ле, А.Т. Система исследования процесса горения типических деревьев Вьетнама / А.Т. Ле, К.М. Чу // Надежность и долговечность машин и механизмов – 2020: Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 389-391.

14. Ле, А.Т. Обеспечение пожарной безопасности для энергетических объектов, расположенных в лесу во Вьетнаме / А.Т. Ле, Т.Т. До // Надежность и долговечность машин и механизмов - 2020: Материалы VII Всероссийской научно-практической конференции. – Иваново: Ивановская пожарно-спасательная Академия ГПС МЧС России, 2020. – С. 212-214.

Подписано в печать 21.09.2021. Формат 60×84 ¹/₁₆.

Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 268

Академия ГПС МЧС России. 129366, г. Москва, ул. Б. Галушкина, 4