

На правах рукописи

Стрижак Павел Александрович

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ЗАЖИГАНИИ
ПОЖАРООПАСНЫХ ЖИДКОСТЕЙ ОДИНОЧНОЙ
НАГРЕТОЙ ДО ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР ЧАСТИЦЕЙ**

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико–математических наук

Томск – 2008

Работа выполнена на кафедре «Атомные и тепловые электрические станции» Теплоэнергетического факультета Томского политехнического университета

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук,
профессор Кузнецов
Гений Владимирович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
Смоляков Виктор Кузьмич

доктор физико-математических наук
Крайнов Алексей Юрьевич

Ведущая организация:

ЦНИИ специального машиностроения,
Московская область.

Защита состоится «23» сентября 2008 г. в 14³⁰ в ауд. 228 10 уч. корпуса ТПУ на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «25» июня 2008 г.

Ученый секретарь совета ДС 212.025.01
кандидат физико-математических наук,
доцент

_____ О.Ю. Долматов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

Несмотря на большую профилактическую работу, направленную на повышение пожарной безопасности промышленных предприятий, жилых зданий и сооружений, ежедневно в мире происходят сотни небольших и десятки крупных пожаров. В большинстве случаев наибольшую пожароопасность представляют возгорания жидких нефтепродуктов. Проблема безопасного хранения и использования пожароопасных жидкостей является особо острой для теплоэнергетики, химической, нефтехимической и ряда других отраслей промышленности. Нередко из-за разгерметизации аппаратов, трубопроводов, резервуаров с горючими жидкостями происходят аварии технологического оборудования. Образующиеся при этом неконтролируемые объёмы жидких нефтепродуктов испаряются, пары горючего перемешиваются с газами окислителя в окружающем воздухе. При наличии источника зажигания различной физической природы химические реакции окисления паров горючего в окружающем воздухе ускоряются, следствием этого может стать пожар или взрыв.

К числу таких источников зажигания относятся одиночные нагретые до высоких температур частицы, образующиеся в ходе технологических процессов на производстве и неконтролируемых техногенных и природных процессов (например, пожары и взрывы). На первый взгляд эти частицы не представляют серьёзной пожароопасности. Однако на практике источниками локальных очагов пожаров очень часто выступают «искры» от костров, частицы металла, образующиеся при резке, сварке, шлифовании металлов, заточке инструментов и других технологических процессах.

В связи с этим возникает необходимость исследования закономерностей процессов взаимодействия жидких горючих веществ с нагретыми до высоких температур частицами малых размеров. Экспериментальное изучение этих процессов крайне сложно и достаточно трудно реализуемо на практике.

По этим причинам теоретическое исследование основных закономерностей процессов тепло – и массопереноса при зажигании пожароопасных жидкостей одиночной нагретой до высоких температур частицей является актуальной, не решенной до настоящего времени, задачей.

Цель диссертационной работы.

Численное исследование закономерностей процессов тепло – и массопереноса при газофазном зажигании жидких горючих веществ одиночной нагретой до высоких температур частицей малых размеров в рамках математической модели, учитывающей двумерный теплоперенос, испарение жидкости, диффузию и конвекцию паров горючего в среде окислителя, кристаллизацию источника зажигания, кинетику процессов испарения и воспламенения жидкостей.

При теоретическом анализе процессов тепло – и массопереноса при зажигании жидкостей одиночными частицами задачи исследования состояли в определении численных значений времён задержки воспламенения, влияния на них начальной температуры, размеров и теплофизических характеристик источника зажигания, теплофизических и термохимических характеристик воспламеняемой жидкости, кристаллизации источника зажигания, паровой прослойки между частицей и поверхностью жидкости, частичного погружения источника зажигания в жидкость, в установлении механизма зажигания паров жидкого топлива одиночной разогретой частицей при отсутствии непосредственного контакта между частицей и жидким топливом.

Научная новизна работы.

Впервые поставлена и решена задача газофазного зажигания жидкого горючего вещества одиночной нагретой до высоких температур частицей малых размеров в рамках двумерной модели, учитывающей теплоперенос, диффузию, конвекцию, испарение, кинетику процессов испарения и воспламенения. Задача не имеет аналогов по постановке, методу решения и полученным результатам.

В работе выполнено численное моделирование процессов тепло – и массопереноса при воспламенении широко распространенных жидких топлив (бензин, керосин, дизельное топливо) горячими углеродистыми и металлическими (сталь, алюминий) частицами. Теоретический анализ установил влияние ряда факторов на процесс воспламенения жидкого горючего вещества, таких как размеры, начальная температура и теплофизические характеристики частицы, теплофизические и термохимические характеристики жидкого вещества, процесс кристаллизации источника зажигания, наличие паровой прослойки между частицей и жидкостью, положение частицы (частичное погружение в жидкость, нахождение на поверхности жидкости).

Практическая значимость работы.

Созданные математические модели и методы численного решения задач зажигания могут быть использованы для оценки пожарной опасности процессов взаимодействия типичных жидких топлив с одиночными горячими частицами различной физической природы. Полученные результаты исследований создают объективные предпосылки для прогнозирования возникновения и объяснения механизмов локальных очагов пожаров на практике. Представленные в работе численные значения характеристик зажигания служат дополнительной основой для построения и апробации моделей воспламенения жидких конденсированных веществ.

Достоверность полученных результатов.

Достоверность полученных результатов и выводов подтверждается результатами тестирования выбранных методов и разработанного алгоритма на решении менее сложных задач тепломассообмена и гидродинамики, а также проверкой консервативности разностной схемы.

Защищаемые положения.

1. Постановка задачи, численные результаты исследования основных закономерностей процесса газофазного зажигания жидкого горючего вещества одиночной нагретой до высоких температур частицей малых размеров в рамках модели, учитывающей двумерный теплоперенос, кристаллизацию частицы, диффузию, конвекцию, испарение, кинетику процессов испарения и воспламенения жидкостей.
2. Результаты численного исследования влияния ряда факторов (начальная температура, размеры, теплофизические характеристики материала частицы, теплофизические и термохимические характеристики жидкого вещества, кристаллизация частицы, формирование парового зазора между частицей и жидкостью, частичное погружение частицы в жидкость) на основные закономерности процессов тепло – и массопереноса при зажигании жидких топлив одиночными частицами.
3. Результаты численного моделирования процесса зажигания интенсивно испаряющегося жидкого топлива одиночной частицей при отсутствии непосредственного контакта между ними.
4. Результаты численного моделирования процесса зажигания смеси окислителя с парами жидкого топлива, поступающими в окружающий воздух, с поверхности участка ткани, содержащей фиксированную объёмную долю компонентов жидкости.

Личный вклад автора.

Состоит в постановке задачи газофазного зажигания жидкого горючего вещества одиночной нагретой до высоких температур частицей, выборе методов и разработке алгоритма её решения, проведения теоретических исследований влияния различных факторов на характеристики процессов зажигания горючих жидкостей, обработке и анализе полученных результатов, формулировке основных выводов диссертационной работы.

Апробация работы.

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на конференции молодых ученых в рамках IX международной конференции «Средства и системы автоматизации» (Томск, 2007), на XIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надёжность, безопасность» (Томск, 2007), на международной научно-технической конференции «Современные техника и технологии – 2008» (Томск, 2008), на V международной конференции студентов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2008).

Публикации.

Основные результаты диссертации представлены в 9 работах, список которых приведен в конце автореферата.

Структура и объём работы.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 92 наименования, содержит 38 рисунков, 36 таблиц, 165 страниц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель и основные решаемые задачи, отражена практическая значимость и новизна полученных численных результатов, представлены защищаемые автором положения.

Первая глава отражает современное состояние теоретического и экспериментального исследования процессов зажигания пожароопасных жидкостей. В ней рассмотрены результаты немногочисленных работ по зажиганию и горению капель жидких топлив, газовых смесей,

диффузионному горению жидкостей, которые отражают основные положения теории воспламенения и горения жидкостей и разъясняют отдельные механизмы этих процессов. Установлено отсутствие результатов теоретического и экспериментального исследования процессов тепло – и массопереноса при зажигании жидких горючих веществ одиночными горячими частицами малых размеров.

Во **второй главе** представлена постановка задачи о зажигании пожароопасной жидкости одиночной нагретой до высоких температур частицей. Приведено описание используемых численных методов и алгоритма решения задачи. Для оценки достоверности получаемых результатов при решении системы дифференциальных уравнений, описывающих исследуемый процесс, приведен алгоритм проверки консервативности разностной схемы.

Рассматривалась следующая последовательность стадий исследуемого процесса. Частица, нагретая до температуры, существенно превышающей температуру жидкого горючего вещества, выпадает на его поверхность (рис. 1, а).

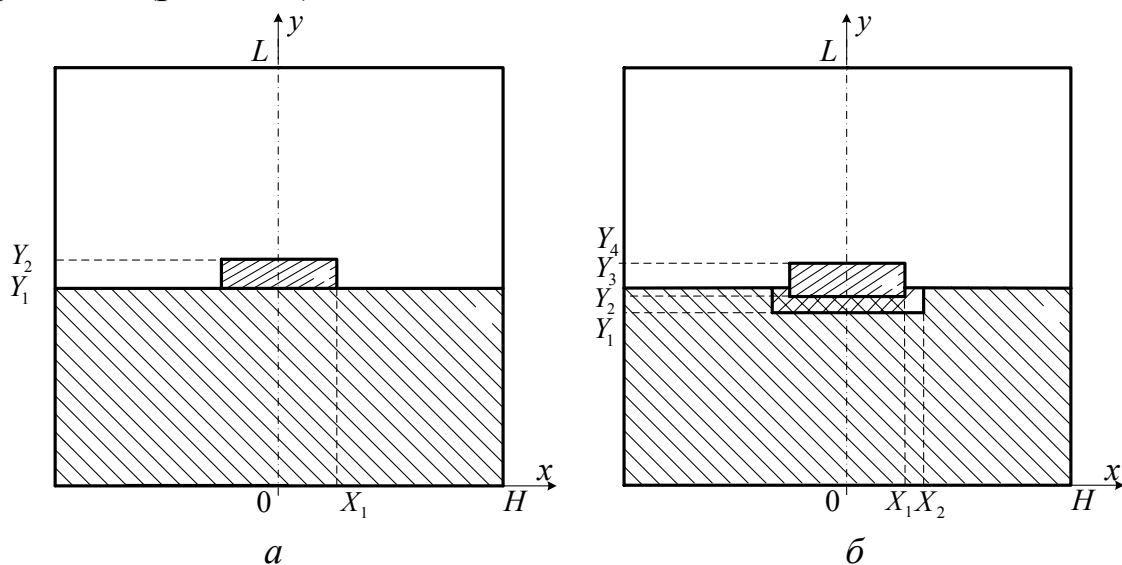


Рис. 1. Схема области решения задачи в начальный момент времени ($t=0$) (а) и при $0 < t < t_3$ (б): 1) воздух, 2) частица, 3) жидкое горючее вещество, 4) слой паров горючего, 5) парогазовая смесь

За счет тепла, передаваемого от частицы в жидкость, последняя нагревается и происходит её испарение. Между частицей и жидкостью образуется паровая прослойка (рис. 1, б), характерные размеры которой зависят от теплофизических характеристик, размеров и начальной температуры источника зажигания. В зависимости от материала частицы она может погружаться частично (рис. 1, б) или полностью в жидкое вещество, либо удерживаться на его поверхности. В результате

интенсивного испарения жидкости пары горючего удаляются от её поверхности, диффундируют в воздух, окружающий частицу, и перемешиваются с ним. При достижении значений концентрации горючего в воздухе и температуры парогазовой смеси, достаточных для её зажигания, происходит воспламенение.

Рассматривалась осесимметричная задача (рис. 1), которая решена в безразмерном виде в декартовой системе координат. В качестве источника воспламенения приняты одиночные частицы различной физической природы в форме параллелепипеда малых размеров ($H_ч=(0,5\div 4)\cdot 10^{-3}$ м, $L_ч=(0,5\div 2)\cdot 10^{-3}$ м). В жидком веществе и воздухе выделены области, существенно превышающие размеры частицы ($L=20\cdot 10^{-3}$ м, $H=10\cdot 10^{-3}$ м).

Численный анализ исследуемого процесса выполнен при следующих допущениях:

1. В результате испарения горючего образуется одно вещество с известными характеристиками.
2. Теплофизические характеристики материала частицы и жидкости не зависят от температуры.
3. Не учитываются возможные процессы выгорания горючей жидкости и кристаллизации источника зажигания.

Факторы, обозначенные в выше перечисленных допущениях, отдельно исследованы, в результате чего сделан вывод о правомерности принятых допущений.

В качестве условий воспламенения для рассматриваемой газофазной модели приняты:

1. Тепло, выделяемое в результате химической реакции паров горючего с окислителем, больше тепла, передаваемого от частицы жидкому горючему веществу.
2. Температура смеси паров горючего и окислителя превышает начальную температуру частицы.

Система нестационарных дифференциальных уравнений, соответствующая сформулированной физической постановке задачи, имеет следующий вид:

$$\frac{Y_1}{L} < Y < \frac{Y_2}{L}, \quad 0 < X < \frac{X_2}{H}; \quad \frac{Y_2}{L} < Y < \frac{Y_3}{L}, \quad \frac{X_1}{H} < X < \frac{X_2}{H}; \quad \frac{Y_3}{L} < Y < \frac{Y_4}{L},$$

$$\frac{X_1}{H} < X < 1; \quad \frac{Y_4}{L} < Y < 1, \quad 0 < X < 1$$

$$\frac{1}{\text{Sh}} \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re}} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Y^2} \right) + \frac{\text{Gr}}{\text{Re}^2} \cdot \frac{\partial \Theta}{\partial X}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Y^2} = \Omega, \quad (2)$$

$$\frac{1}{\text{Sh}} \cdot \frac{\partial \Theta_5}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Theta_5}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial \Theta_5}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Pr}} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Theta_5}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_5}{\partial Y^2} \right) + \frac{Q_0 \cdot W_0 \cdot H}{\rho_5 \cdot C_5 \cdot \Delta T \cdot V_0}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{\text{Sh}} \cdot \frac{\partial C_r}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial C_r}{\partial X} + V \cdot \frac{\partial C_r}{\partial Y} = \frac{1}{\text{Re} \cdot \text{Sc}} \cdot \left(\frac{\partial^2 C_r}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 C_r}{\partial Y^2} \right) - \frac{H \cdot W_0}{\rho_5 \cdot V_0}; \quad (4)$$

$$\frac{Y_2}{L} < Y < \frac{Y_4}{L}, \quad 0 < X < \frac{X_1}{H}$$

$$\frac{1}{\text{Fo}_2} \cdot \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Y^2}; \quad (5)$$

$$0 < Y < \frac{Y_1}{L}, \quad 0 < X < \frac{X_2}{H}; \quad 0 < Y < \frac{Y_3}{L}, \quad \frac{X_2}{H} < X < 1$$

$$\frac{1}{\text{Fo}_3} \cdot \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial Y^2}. \quad (6)$$

Здесь T – температура; T_0 – начальная температура воздуха и жидкости; $T_{\text{ч}}$ – начальная температура частицы; ΔT – разность температур ($\Delta T = T_{\text{ч}} - T_0$); C_r – концентрация паров жидкого горючего вещества ($0 < C_r < 1$); Θ – безразмерная температура; Ω – безразмерный аналог вектора вихря; Ψ – безразмерный аналог функции тока; X и Y – безразмерные составляющие координат декартовой системы координат, соответствующие x и y ; U и V – безразмерные составляющие скорости паров горючего в проекции на ось x и y соответственно; C – удельная теплоёмкость; Q_0 – тепловой эффект реакции окисления паров горючего; W_0 – массовая скорость окисления паров горючего; V_0 – масштаб скорости конвекции паров горючего вблизи поверхности жидкости; t_0 – масштаб времени; t_3 – время задержки воспламенения; τ – безразмерное время; Sh, Re, Gr, Pr, Sc, Fo – число Струхала, Рейнольдса, Грасгофа, Прандтля, Шмидта, Фурье соответственно; индексы «1», «2», «3», «4», «5» соответствуют воздуху, частице, горючей жидкости, парам горючего вещества, смеси паров жидкого топлива с воздухом (рис. 1).

Уравнения (1)–(4) описывают процессы тепло – и массопереноса в газовой фазе. Уравнения (5), (6) описывают теплоперенос в частице и жидкости соответственно.

Начальные условия (рис. 1, *a*) ($\tau=0$):

$$0 < Y < \frac{Y_1}{L}, \quad 0 < X < 1 \quad \Theta_3 = \Theta_0; \quad (7)$$

$$\frac{Y_1}{L} < Y < \frac{Y_2}{L}, \quad 0 < X < \frac{X_1}{H} \quad \Theta_2 = \Theta_{\text{ч}}; \quad (8)$$

$$\frac{Y_1}{L} < Y < \frac{Y_2}{L}, \quad \frac{X_1}{H} < X < 1; \\ \frac{Y_2}{L} < Y < 1, \quad 0 < X < 1 \quad \Theta_1 = \Theta_0, \quad C_T = 0, \quad \Psi = 0, \quad \Omega = 0. \quad (9)$$

Граничные условия (рис. 1, *б*) ($0 < \tau < \frac{t_3}{t_0}$):

на границах «частица – пары горючего» ($Y = \frac{Y_2}{L}, 0 < X < \frac{X_1}{H}; X = \frac{X_1}{H},$

$\frac{Y_2}{L} < Y < \frac{Y_3}{L}$), «частица – парогазовая смесь» ($Y = \frac{Y_4}{L}, 0 < X < \frac{X_1}{H};$

$X = \frac{X_1}{H}, \frac{Y_3}{L} < Y < \frac{Y_4}{L}$) граничные условия IV рода для уравнения энергии

и уравнений теплопроводности, условие равенства нулю градиента соответствующих функций – для уравнения диффузии, движения,

Пуассона; на границах «жидкость – пары горючего» ($Y = \frac{Y_1}{L},$

$0 < X < \frac{X_2}{H}; X = \frac{X_2}{H}, \frac{Y_1}{L} < Y < \frac{Y_3}{L}$), «парогазовая смесь – жидкость»

($Y = \frac{Y_3}{L}, \frac{X_2}{H} < X < 1$) для уравнения энергии заданы граничные условия

IV рода с учетом испарения жидкости, для уравнений диффузии, движения, Пуассона заданы граничные условия второго рода; на оси

симметрии и границах ($Y = 0, Y = 1, 0 < X < 1; X = 1, 0 < Y < 1; Y = \frac{Y_3}{L},$

$\frac{X_1}{H} < X < \frac{X_2}{H}$) для всех уравнений задано условие равенства нулю градиента соответствующих функций.

Для решения системы уравнений (1)–(6) использован метод конечных разностей. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решены локально одномерным методом. Система одномерных разностных уравнений решена методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы. Для решения нелинейных одномерных уравнений применен метод итераций.

Из-за отсутствия экспериментальных данных оценка достоверности полученных в ходе вычислений результатов проводилась проверкой консервативности разностной схемы. На каждом шаге по времени вычислялась точность выполнения закона сохранения энергии в выделенной области решения. При численном моделировании исследуемых процессов установлены зависимости точности вычислений от шага по времени Δt и координатам $h_x=h_y$. Установлено, что погрешность вычислений уменьшается с увеличением числа узлов пространственной сетки и уменьшением Δt . Численный анализ показал, что точность вычислений в большей степени определяется выбором шага по времени и в меньшей степени от шагов по координатам.

В третьей главе представлены результаты решения тестовых задач теплопроводности с учетом фазовых переходов при испарении на границе и химической реакции в материале, гидродинамики и конвективного тепло – и массообмена для верификации используемых методов и разработанного алгоритма. Решение тестовых задач показало удовлетворительное соответствие полученных теоретических следствий с результатами других авторов.

В четвертой главе приведены результаты численного моделирования зажигания типичных жидких топлив одиночными горячими частицами и выполнен анализ зависимостей времени задержки воспламенения t_3 от размеров, начальной температуры и материала частицы, теплофизических и термохимических свойств жидкости, определено влияние процесса кристаллизации источника зажигания, наличия парового зазора между частицей и жидкостью, частичного погружения частицы в жидкость на t_3 .

Рассмотрена задача о зажигании типичного жидкого топлива (бензина) одиночной горячей углеродистой частицей, находящейся на его поверхности (рис. 1, а), в рамках диффузионной модели воспламенения. При решении задачи предполагалось, что перенос паров горючего в среде

окислителя (воздуха) происходит за счет диффузии (не учитывается конвекция парогазовой смеси).

Математическая постановка задачи включает для твердой (частицы) и жидкой (жидкости) фаз уравнения теплопроводности, для газовой области уравнения энергии и диффузии.

В табл. 1, 2 приведены типичные результаты численного исследования процесса зажигания в рамках решаемой задачи. Видно, что с уменьшением размеров и начальной температуры частицы время задержки воспламенения увеличивается, что объясняется существенным снижением теплосодержания источника зажигания в этих случаях.

Таблица 1. Времена задержки воспламенения в системе «углеродистая частица – бензин – воздух» в зависимости от начальной температуры частицы при размерах $H_q=L_q=2$ мм

T_q , К	1000	975	950	925	900	875	850	800
t_z , с	0,151	0,278	0,456	0,523	0,618	0,915	1,271	нет воспла - менения

Таблица 2. Времена задержки воспламенения в системе «углеродистая частица – бензин – воздух» в зависимости от размеров частицы при начальной температуре $T_q=1000$ К

$H_q=L_q$, мм	2	1,6	1,2	0,8	0,6	0,4
t_z , с	0,151	0,187	0,383	0,816	1,623	нет воспламенения

Ниже представлены распределение температур (рис. 2, а) и положение характерных изотерм (рис. 2, б) в области решения в момент воспламенения.

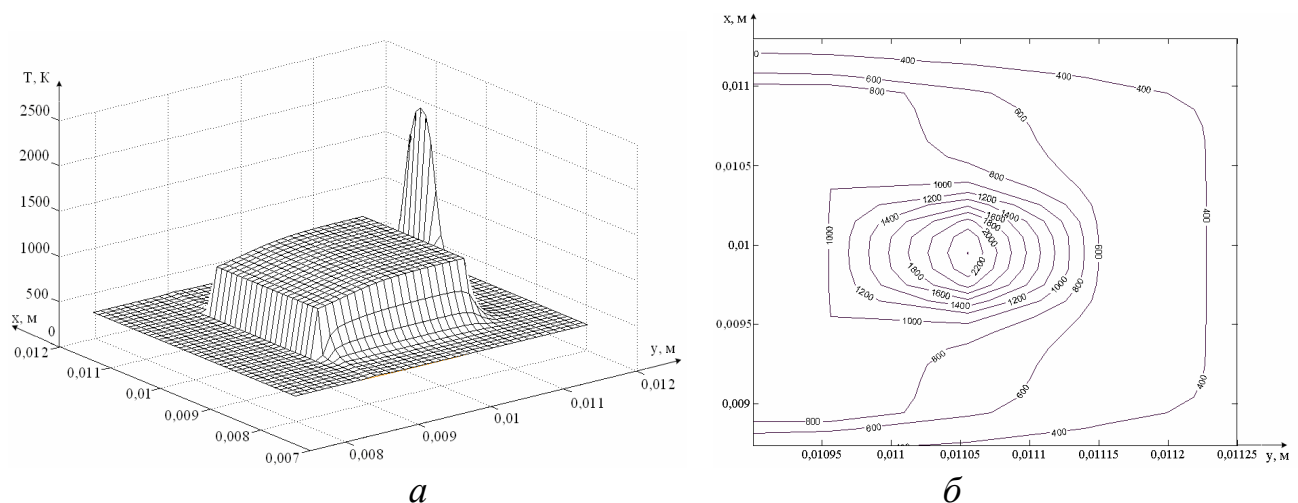


Рис. 2. Распределение температур (а) и положение характерных изотерм (б) в момент воспламенения при $H_q=L_q=0,002$ м, $T_q=1000$ К

На приведенных иллюстрациях отчетливо выделена зона воспламенения, которая располагается в малой по размерам газовой области над частицей в районе оси симметрии.

С целью установления влияния конвекции на интенсивность исследуемого процесса зажигания решена осесимметричная задача о зажигании керосина одиночной углеродистой частицей, находящейся на его поверхности, с учетом диффузии и конвекции при переносе паров горючего в среде окислителя (рис. 1, а).

В результате численного анализа выявлены зависимости времени задержки воспламенения от начальной температуры $T_ч$ и размеров частицы $H_ч=L_ч$, которые качественно соответствуют аналогичным зависимостям предыдущей задачи. Однако численные значения t_3 для модели, учитывающей совместное действие конвекции и диффузии при переносе паров горючего в среде окислителя, превышают t_3 из табл. 1, 2.

Полученные результаты можно объяснить тем, что в рамках диффузионно-конвективной модели воспламенения исследуемый процесс существенно усложняется, большую роль играют процессы тепло – и массопереноса при движении парогазовой смеси.

На рис. 3 представлены распределение температур и положение характерных изотерм в расчетной области в момент воспламенения.

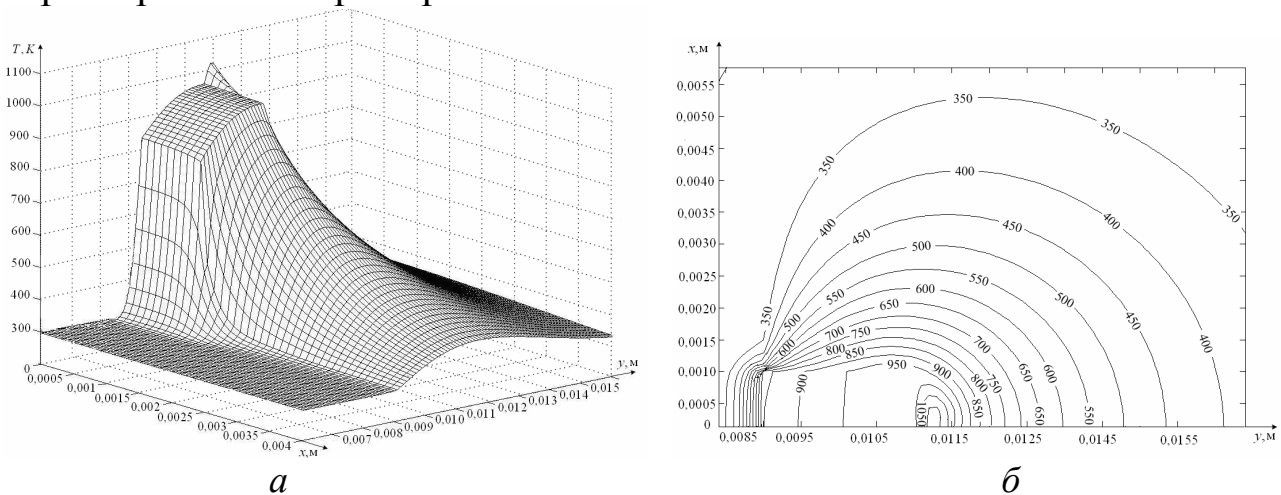


Рисунок 3. Распределение температур (а) и положение характерных изотерм (б) в момент воспламенения при $H_ч=L_ч=0,002$ м, $T_ч=1000$ К

На примере следующей модели воспламенения выполнен анализ влияния парового зазора между частицей и жидкостью на характеристики зажигания трех широко распространенных жидких топлив (керосина, бензина, дизельного топлива) углеродистыми и металлическими (сталь, алюминий) частицами. В табл. 3 приведены

значения времени задержки воспламенения бензина в зависимости от размеров и теплофизических характеристик источника зажигания.

Таблица 3. Времена задержки воспламенения в системе «одионочная частица – бензин – воздух» в зависимости от размеров и материала частицы при $T_q=1000$ К

Размеры частицы	H_q , мм	2	2	2	3	4	4	4	4
	L_q , мм	1	0,8	0,6	1	1	0,8	0,6	0,5
		t_3 , с							
Материал частицы	Углерод	2,827	3,312	3,876	2,339	1,442	1,749	2,147	2,923
	Алюминий	2,519	2,915	3,427	1,943	1,349	1,572	1,903	2,297
	Сталь	2,264	2,641	3,182	1,421	1,202	1,236	1,376	1,545

Сравнение численных значений t_3 (табл. 3) с табл. 2 показало, что при образовании парового зазора между частицей и жидкостью, представляющего собой зону с более низким коэффициентом теплопроводности по сравнению с жидкостью, меньше тепла передается от частицы к жидкости, процессы тепло – и массопереноса проходят менее интенсивно и время задержки воспламенения увеличивается.

Зависимости времен задержки воспламенения жидкости от теплофизических свойств материала частицы (табл. 3) показывают, что процессы взаимодействия металлических частиц с горючими жидкостями происходят более интенсивно, чем с углеродистыми частицами. Это объясняется тем, что у металлов теплопроводность и плотность существенно превышают аналогичные показатели для углерода. В случае алюминиевых частиц время задержки воспламенения горючих жидкостей больше по сравнению со стальными частицами, так как у стали в несколько раз больше объёмная теплоемкость по сравнению с алюминием.

В рамках следующей модели воспламенения исследовано влияние частичного погружения источника нагрева в жидкость на характеристики зажигания (рис. 1, б). Установлены зависимости времени задержки воспламенения от начальной температуры, размеров и теплофизических характеристик материала частицы.

Таблица 4. Времена задержки воспламенения в системе «стальная частица – бензин – воздух» в зависимости от температуры T_q при $H_q=4$ мм, $L_q=1$ мм

T_q , К	1000	975	950	925	900	875	850
t_3^* , с	1,202	1,365	1,634	1,918	2,301	2,825	нет воспламенения
t_3^{**} , с	1,545	1,721	1,969	2,317	2,845	3,217	нет воспламенения

* без учета частичного погружения частицы в жидкость; **с учетом

Полученные результаты объясняются тем, что при частичном погружении источника нагрева в жидкость большая часть теплосодержания частицы расходуется на разогрев воспламеняемого жидкого вещества, частица быстрее остывает и меньше тепла поступает на нагрев формирующейся парогазовой смеси. Численный анализ установил увеличение области прогрева жидкости и небольшое удаление зоны воспламенения от поверхности частицы по сравнению с вышеприведенными результатами.

На примере керосина и алюминиевой частицы исследовано влияние процесса кристаллизации источника нагрева на характеристики зажигания. Установлено, что численные значения времен задержки воспламенения в системе (рис. 1) с учетом кристаллизации частицы меньше аналогичных показателей без учета кристаллизации. Однако это снижение незначительно, что позволяет сделать вывод о возможности пренебрежения кристаллизацией источника зажигания при моделировании исследуемого процесса.

Отдельно исследовано влияние зависимости теплофизических характеристик взаимодействующих веществ от температуры на характеристики зажигания. Выявлено несущественное отклонение результатов решения задачи от аналогичных показателей для задачи зажигания при допущении постоянных значений теплофизических характеристик взаимодействующих веществ.

С целью исследования процессов зажигания жидких веществ одиночными частицами при отсутствии непосредственного контакта между ними решена задача зажигания жидкого топлива одиночной частицей, находящейся на некотором расстоянии от его поверхности. Физическая постановка задачи предусматривала следующее. При достаточно низкой (комнатной) температуре окружающего воздуха $T_{\text{окр}}$ горючая жидкость испаряется, на некотором расстоянии от поверхности жидкости ΔZ находится одиночная горячая частица, при взаимодействии с которой смесь паров горючего и воздуха воспламеняется.

В результате решения задачи установлено, что при увеличении расстояния от частицы до поверхности жидкости и уменьшении температуры окружающего воздуха интенсивность процессов тепло – и массопереноса в системе снижается и время задержки воспламенения увеличивается. Определено, что при выбранных масштабах области решения задачи и $\Delta Z = 7$ мм минимальной температурой $T_{\text{окр}}$, при которой возможно воспламенение, является – 10°C . Это показывает, что при высоком теплосодержании частицы возможно воспламенение

парогазовой смеси даже при отрицательных температурах. При $T_{\text{окр}}=35^{\circ}\text{C}$ максимальное значение ΔZ , при котором возможно воспламенение, равно 11 мм. При начальной температуре источника зажигания около 1500 К воспламенение может происходить на расстоянии $2\div 3$ см от поверхности испарения бензина.

Так как расстояние ΔZ , на котором происходит воспламенение относительно не велико, то этот механизм зажигания достаточно трудно зафиксировать в случаях возникновения пожаров. Но высокая вероятность реализации этого механизма воспламенения жидкостей является основанием для вывода о том, что воспламенение может происходить при движении нагретой до высоких температур частицы параллельно поверхности испарения.

Установлено, что зона воспламенения имеет место в малой по размерам газовой области под частицей, а не над ней, как во всех ранее представленных задачах, что объясняется спецификой рассматриваемого механизма зажигания. Полученные результаты создают объективные предпосылки для объяснения причин многих пожаров, возникающих при локальном воспламенении паров жидкого горючего с окислителем.

В рамках следующей модели воспламенения численно исследован широко распространенный на практике механизм зажигания паров горючего, поступающих в окружающий воздух с поверхности пропитанной пожароопасной жидкостью ткани. Установлены зависимости времени задержки воспламенения от начальной температуры частицы, объёмной доли жидкости в материале влажной ткани. Исследования выполнены для трех широко распространенных материалов тканей (шерсть, шелк, лён) и трех типичных пожароопасных жидкостей (бензин, керосин, дизельное топливо).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Впервые поставлена и решена нелинейная нестационарная задача тепломассопереноса при газофазном зажигании жидкого горючего вещества нагретой до высоких температур одиночной частицей малых размеров в рамках модели, учитывающей двумерный теплоперенос, испарение жидкости, диффузию и конвекцию паров горючего, процесс кристаллизации источника тепла, кинетику процессов испарения и воспламенения жидкостей.
2. Проведен анализ влияния на величину времени задержки воспламенения:

- размеров частицы;
- начальной температуры частицы;
- теплофизических характеристик материала частицы;
- неидеальности контакта частицы и жидкости (наличие парового зазора между частицей и жидкостью);
- частичного погружения источника тепла в жидкость;
- процесса кристаллизации частицы;
- зависимости теплофизических характеристик взаимодействующих веществ от температуры.

3. Установлено, что время задержки воспламенения существенно зависит от глубины погружения частицы в жидкость и величины парового зазора между частицей и жидкостью. Численно определено, что наилучшие условия зажигания реализуются при положении горячей частицы на поверхности жидкости.

4. Полученные зависимости времени задержки воспламенения от теплофизических характеристик материала частицы показали, что наилучшие характеристики зажигания наблюдаются при взаимодействии жидких топлив со стальными частицами.

5. Определено расположение зоны воспламенения в газовой области над верхней гранью горячей частицы. Этот неочевидный при первичном рассмотрении проблемы результат обусловлен спецификой механизма воспламенения жидкости.

6. Исследован процесс воспламенения интенсивно испаряющегося жидкого топлива одиночной частицей при отсутствии непосредственного контакта между ними. Выявлена зона воспламенения, которая имеет место в газовой фазе вблизи нижней поверхности частицы. Установлены зависимости времени задержки воспламенения от начальной температуры частицы, величины расстояния между частицей и жидкостью, температуры окружающего воздуха. Предложен механизм воспламенения жидких топлив, который может быть реализован во многих случаях на практике.

7. Выполнено численное исследование процесса зажигания смеси окислителя с парами жидкого топлива, поступающими в окружающий воздух, с поверхности участка ткани, содержащей фиксированную объёмную долю компонентов жидкости. Установлены зависимости времени задержки воспламенения от начальной температуры частицы, объёмной доли жидкости в материале влажной ткани. Определено, что даже при относительно небольшой объёмной доле жидкого топлива в материале ткани возможно воспламенение парогазовой смеси.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Математическое моделирование зажигания жидкого горючего вещества нагретой до высоких температур частицей // Изв. вузов. Физика. – 2007. – №9/2. – С. 103–112.
2. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Воспламенение жидкого пожароопасного вещества одиночной, нагретой до высоких температур, частицей // Материалы тринадцатой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – С. 144–147.
3. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Воспламенение пожароопасной жидкости одиночной «горячей» частицей // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – № 6. – С. 13–20.
4. Стрижак П.А. Численное моделирование процессов воспламенения жидких нефтепродуктов одиночными «горячими» частицами // Сборник трудов конференции молодых ученых в рамках IX международной конференции «Средства и системы автоматизации». – Томск: Изд-во ТУСУР, 2007. – С. 89–92.
5. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Моделирование воспламенения горючих жидкостей одиночной горячей частицей. ТПУ. – Томск. – 22 с. Деп. в ВИНТИ 25.03.08, № 244 – В2008.
6. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Зажигание накалиной одиночной частицей жидких углеводородных топлив // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – № 4. – С. 5–9.
7. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Особенности зажигания парогазовой смеси нагретой до высоких температур металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – № 3. – С. 25–33.
8. Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Тепломассоперенос при зажигании паров жидкого топлива одиночной разогретой частицей. ТПУ. – Томск. – 20 с. Деп. в ВИНТИ 04.05.08, № 376 – В2008.
9. Стрижак П.А. Программа расчета времени зажигания углеводородного топлива одиночной нагретой до высоких температур частицей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008612477. – Бюлл. прогр. № 2, 2008.