

Высокоморная Ольга Валерьевна

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ИЗМЕНЕНИЯ ФАЗОВОГО
СОСТОЯНИЯ И ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ В
ЖИДКИХ ТОПЛИВАХ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ
ПОТОКОВ СВЕТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

01.04.07 – Физика конденсированного состояния
01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата
физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре теоретической и промышленной теплотехники Энергетического института ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

Научные руководители: доктор физико-математических наук,
профессор **Кузнецов Гений Владимирович**

кандидат физико-математических наук,
доцент **Стрижак Павел Александрович**

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор **Катаева Лилия Юрьевна**

доктор физико-математических наук,
профессор **Арефьев Константин Петрович**

Ведущая организация: ГОУ ВПО «Томский государственный
университет»

Защита состоится 29 декабря 2010г. в 15.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.02 при Национальном исследовательском Томском политехническом университете в аудитории 217 учебного корпуса № 8 по адресу: 634050, г. Томск, ул. Усова, 7.

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

Автореферат разослан «28» ноября 2010 г.

Ученый секретарь совета Д 212.269.02
доктор физико-математических наук



М.В. Коровкин

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Воздействие различных видов излучения на конденсированные вещества всегда привлекало внимание исследователей. Судя по публикациям, наибольший интерес вызывало воздействие светового излучения (в том числе и лазерного) на вещества, находящиеся в твёрдом состоянии. По результатам экспериментальных и теоретических исследований большой группой учёных установлены основные закономерности физико-химических превращений, протекающих на поверхности и приповерхностных слоях различных веществ (прежде всего горючих) при воздействии концентрированных потоков светового излучения (в основном лазерного). Наиболее значимые результаты в этой области получены И.Г. Ассовским, Е.В. Дугиновым, А.В. Ханефтом, В.П. Ципилёвым, В.В. Медведевым, В.М. Лисицыным, В.И. Олешко, В.И. Корепановым.

Но исследований изменения фазового состояния и физико-химических превращений, протекающих при воздействии на жидкости концентрированных потоков светового излучения, практически не проводилось. Следует отметить, что физико-химические процессы, являющиеся следствием воздействия интенсивного светового излучения на жидкости и протекающие как в самой жидкости, так и вблизи её поверхности, характеризуются гораздо более сложными по сравнению с твёрдыми веществами механизмами реализации. При этом все значимые физические и химические процессы протекают в областях с очень малыми характерными размерами, что значительно осложняет измерение основных характеристик процессов и анализ их изменений во времени.

Практическая значимость исследуемой в диссертации проблемы обусловлена следующим. Во всех развитых странах проводится большая профилактическая работа с целью повышения пожарной безопасности проведения технологических процессов, эксплуатации промышленных и бытовых зданий и сооружений. Но, не смотря на это, ежедневно в мире происходят сотни небольших и десятки крупных пожаров и взрывов. Как известно, возгорания жидких конденсированных веществ представляют большую пожарную опасность. Наиболее остро проблема обеспечения пожарной безопасности стоит в отраслях промышленности, где используются большие объёмы жидких нефтепродуктов и других горючих материалов: нефтедобывающей, химической, нефтехимической, нефтеперерабатывающей, энергетике. Если в ходе технологического процесса существует возможность непосредственного контакта пожароопасной жидкости с воздухом, то вероятность возгорания увеличивается, поскольку в

этом случае пожар или взрыв может возникнуть внутри технологического аппарата, трубопровода, резервуара. Помимо прочих факторов риска, на предприятиях вышеуказанного профиля обычно есть достаточное количество различных потенциальных источников зажигания.

Одними из таких источников зажигания являются концентрированные потоки светового излучения, например, солнечного. Кроме того, в последнее время всё более широкое применение в технологических процессах (например, при обработке и резке металлов) получает лазерное излучение, которое характеризуется высокой концентрацией энергии в малом объёме.

Всё это обуславливает актуальность исследований процессов, являющихся следствием воздействия на жидкие конденсированные вещества концентрированных потоков светового излучения.

Цель диссертационной работы – исследование процессов изменения фазового состояния и физико-химических превращений в жидких топливах при воздействии на них концентрированных потоков светового излучения.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Создание модели зажигания жидкого конденсированного вещества концентрированным потоком светового излучения, учитывающей двумерный теплоперенос, испарение жидкости, диффузию и конвекцию паров горючего в среде окислителя, поглощение энергии излучения парогазовой смесью и жидкостью, кинетику процессов испарения и зажигания жидкостей.

2. Определение масштабов влияния на времена задержки зажигания таких факторов, как интенсивность воздействия на жидкость источника излучения, поглощение энергии излучения в газовой фазе, начальные параметры жидкого топлива и окружающего воздуха, характер распределения энергии по сечению светового пучка.

Научная новизна работы. Впервые исследованы основные закономерности реализации процессов изменения фазового состояния и физико-химических превращений в жидких конденсированных веществах под действием концентрированных потоков светового излучения в рамках созданной модели, учитывающей двумерный теплоперенос, испарение жидкости, диффузию и конвекцию паров горючего в среде окислителя, поглощение энергии излучения парогазовой смесью и жидкостью, кинетику процессов испарения и воспламенения жидкостей. Задача не имеет аналогов по постановке, методу решения и полученным результатам.

В диссертации выполнено численное исследование процессов, протекающих при воздействии на широко распространённые жидкие топлива (бензин, керосин) концентрированных потоков светового излучения. Теоретический анализ позволил установить влияние ряда факторов: значения мощности и площади зоны действия излучения, поглощения энергии излучения в газовой фазе и в жидкости, начальной температуры воспламеняемой жидкости, параметров окружающего воздуха, характера распределения мощности потока излучения по его сечению, а также формы сечения светового пучка на основные закономерности физико-химических процессов, протекающих в жидкости, на её поверхности и в малой окрестности зоны фазового перехода.

Практическая значимость работы. Разработанные модели, алгоритмы и методы численного решения могут быть использованы для прогнозирования изменения физических свойств жидкостей при воздействии на них концентрированных потоков светового излучения различного происхождения. Результаты исследований позволят, в частности, оценить степень пожарной опасности воздействия на жидкие конденсированные вещества концентрированных потоков светового излучения и объяснить механизмы возникновения 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 и выводов подтверждается проверкой консервативности разностной схемы, а также результатами тестирования выбранных методов и разработанного алгоритма на решении группы менее сложных задач тепломассопереноса и гидродинамики.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Поглощение энергии излучения формирующейся парогазовой смесью увеличивает инерционность процессов, протекающих в жидком конденсированном веществе при воздействии концентрированных потоков светового излучения (время задержки зажигания увеличивается в среднем на 20%). В условиях поглощения энергии оптического излучения в газовой фазе возможно определение критических условий зажигания.

2. При воздействии на жидкое топливо концентрированного потока светового излучения место локализации зоны химической реакции всегда расположено вблизи границы испарения в отличие от системы «одинокая разогретая до высоких температур частица – жидкое топливо – воздух».

3. На основной параметр исследуемого процесса – время задержки зажигания – значительное влияние оказывает начальная температура горючего (при изменении Θ_2^{st} в диапазоне $0,39 \div 0,44$ К τ_d снижается в среднем более чем на 20%). Массовая доля паров воды в окружающем воздухе и его температура, а также характер распределения плотности энергии излучения по сечению светового пучка практически не влияют на условия реализации фазового перехода и физико-химических превращений в жидких конденсированных веществах при воздействии концентрированных потоков светового излучения (при увеличении C_w от 0 до 0,35 и Θ_o^{st} от 0,39 до 0,44 К τ_d изменяется не более, чем на 4%; при зажигании жидкого топлива потоком светового излучения, плотность энергии которого максимальна на оси, времена задержки зажигания отличаются от τ_d при зажигании световым пучком с постоянным распределением энергии лишь при $H_{las} < 0,4$).

Личный вклад автора состоит в выборе методов и разработке алгоритмов решения поставленных при выполнении работы задач, установлении основных закономерностей протекания физико-химических превращений при воздействии на жидкие конденсированные вещества концентрированных потоков светового излучения, обработке и анализе полученных результатов, формулировке основных выводов диссертационной работы.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на XVI Международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии», (Томск, 2010), на VII Международной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук», (Томск, 2010), Международной конференции «Теплофизические основы энергетических технологий» (Томск, 2010), Международной конференции «Передовые технические системы и технологии» (Севастополь, 2010), V Российской национальной конференции по теплообмену (Москва, 2010), XXIX Сибирском теплофизическом семинаре (Новосибирск, 2010).

Публикации. Основные результаты диссертации представлены в 10 работах, список которых приведён в конце автореферата.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 102 наименования, содержит 34 рисунка, 6 таблиц, 120 страниц.

Краткое содержание работы

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

Первая глава отражает современное состояние теоретического и экспериментального исследования физико-химических процессов в конденсированных веществах при воздействии концентрированных потоков светового излучения и в жидких топливах под действием локальных источников энергии. Проведён анализ немногочисленных работ по зажиганию пожароопасных жидкостей одиночными горячими частицами, каплей жидких топлив и парогазовых смесей массивными горячими поверхностями, различными металлическими предметами. Рассмотрены работы по зажиганию твёрдых горючих материалов различного состава под действием оптического излучения. Установлено отсутствие результатов экспериментальных и теоретических исследований закономерностей фазового перехода и физико-химических превращений в жидкостях под действием концентрированных потоков светового излучения.

Во **второй главе** представлена постановка задачи исследования физико-химических процессов, являющихся следствием воздействия интенсивного светового излучения на жидкое конденсированное вещество. Приведено описание выбранных численных методов и алгоритма решения задачи. Для оценки достоверности полученных результатов при решении системы уравнений, описывающих физико-химические процессы, протекающие в жидкости, на её поверхности и в малой окрестности зоны фазового перехода, приведён алгоритм проверки консервативности разностной схемы.

Принята следующая физическая модель исследуемого процесса (рис. 1). На поверхность жидкого конденсированного вещества непрерывно воздействует концентрированный поток светового излучения. За счёт подводимой энергии поверхностные слои жидкого топлива прогреваются. Начинается процесс испарения. Пары горючего диффундируют от поверхности жидкости в воздух и начинают с ним взаимодействовать. При этом увеличивается доля энергии, поглощаемой в газовой фазе при прохождении потока излучения. Вследствие этого формирующаяся парогазовая смесь разогревается, а интенсивность испарения жидкости снижается. При достижении пороговых значений концентрации паров горючего в воздухе и температуры парогазовой смеси происходит зажигание.

Рассматривалась осесимметричная задача, которая решена в безразмерной постановке в цилиндрической системе координат.

Численный анализ исследуемого процесса выполнен при следующих допущениях:

1. В результате испарения жидкости образуется одно вещество с известными характеристиками.
2. Не учитываются возможные процессы выгорания жидкости.
3. Теплофизические свойства жидкого конденсированного вещества и парогазовой смеси не зависят от температуры.

В качестве условий воспламенения для рассматриваемой газофазной модели приняты следующие:

1. Тепло, выделяемое в результате химической реакции паров горючего с окислителем, больше тепла, передаваемого от источника зажигания жидкому веществу.
2. Температура смеси паров горючего с окислителем превышает температуру воспламенения жидкости.

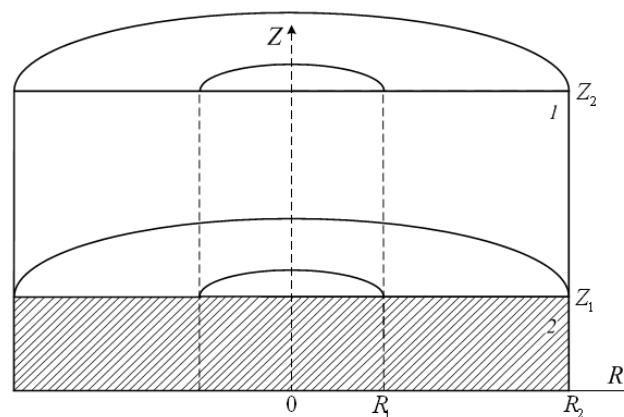


Рис. 1. Схема области решения задачи ($0 < \tau < \tau_d$):

1 – смесь паров жидкого топлива с воздухом, 2 – жидкость

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

$0 < R < R_2$, $Z_1 < Z < Z_2$:

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial R^2} - \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \Psi}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial Z^2} = -R \cdot \Omega, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \Omega}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial R} + V \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial Z} - U \cdot \frac{\Omega}{R} = \sqrt{\frac{\text{Pr}_1}{\text{Ra}_1}} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Omega}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Omega}{\partial Z^2} - \frac{\Omega}{R^2} \right) + \frac{\partial \Theta_1}{\partial R}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C_f}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial C_f}{\partial R} + V \cdot \frac{\partial C_f}{\partial Z} = \frac{1}{Sc_3} \cdot \sqrt{\frac{Pr_3}{Ra_3}} \cdot \left(\frac{\partial^2 C_f}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial C_f}{\partial R} + \frac{\partial^2 C_f}{\partial Z^2} \right) - \frac{z_2 \cdot W_o}{V_m \cdot p_3}, \quad (3)$$

$$C_f + C_o = 1; \quad (4)$$

$$0 < R < R_1, Z_1 < Z < Z_2:$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + V \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial Z} = & \frac{1}{\sqrt{Ra_1} \cdot Pr_1} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Z^2} \right) + \frac{z_2}{\rho_1 \cdot C_1 \cdot V_m} \cdot \Delta T \times \\ & \times \left(Q_o \cdot W_o + \frac{\partial H(z)}{\partial z} \right); \end{aligned} \quad (5)$$

$$R_1 < R < R_2, Z_1 < Z < Z_2:$$

$$\frac{\partial \Theta_1}{\partial \tau} + U \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + V \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial Z} = \frac{1}{\sqrt{Ra_1} \cdot Pr_1} \cdot \left(\frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \Theta_1}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_1}{\partial Z^2} \right) + \frac{z_2 \cdot Q_o \cdot W_o}{\rho_1 \cdot C_1 \cdot V_m \cdot \Delta T}; \quad (6)$$

$$0 < R < R_1, 0 < Z < Z_1:$$

$$\frac{1}{Fo_2} \cdot \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Z^2} + \frac{z_2}{\lambda_2 \cdot \Delta T} \cdot \frac{\partial H(z)}{\partial z}; \quad (7)$$

$$R_1 < R < R_2, 0 < Z < Z_1:$$

$$\frac{1}{Fo_2} \cdot \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \cdot \frac{\partial \Theta_2}{\partial R} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Z^2}. \quad (8)$$

Здесь T – температура, К; T_0 – начальная температура воздуха и жидкости, К; ΔT – разность температур ($\Delta T = T_m - T_0$); $T_m = 1000$ К – масштаб температуры; C – удельная теплоёмкость, Дж/(кг·К); Q_o – тепловой эффект реакции окисления паров горючего в воздухе, МДж/кг; W_o – массовая скорость окисления паров горючего в воздухе, кг/(м³·с); C_f – доля паров жидкого горючего вещества ($0 \leq C_f \leq 1$); C_o – доля окислителя; λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); ρ – плотность, кг/м³; $H(z)$ – плотность энергии потока излучения, Вт/м²; U, V – безразмерные составляющие скорости конвекции в проекции на ось r и z соответственно; Θ – безразмерная температура; Ψ – безразмерный аналог функции тока; Ω – безразмерный аналог вектора вихря; R, Z – безразмерные координаты; V_m – масштаб скорости конвекции паров горючего; τ – безразмерное время; t_m – масштаб времени, с; t_d – время задержки зажигания, с; Ra, Pr, Sc, Fo – числа Рэлея, Прандтля, Шмидта, Фурье; индексы «1», «2», «3» соответствуют парогазовой смеси, жидкому топливу, парам горючего.

Уравнения (1)–(6) описывают процессы тепломассопереноса в газовой фазе. Уравнения (7), (8) описывают теплоперенос в жидкости.

Решение системы уравнений (1)–(8) проведено при следующих краевых условиях:

начальные условия ($\tau=0$):

$$0 < R < R_2, 0 < Z < Z_1: \Theta_2 = \Theta_0; \quad (9)$$

$$0 < R < R_2, Z_1 < Z < Z_2: \Theta_1 = \Theta_0, C_f = 0, \Omega = 0, \Psi = 0; \quad (10)$$

граничные условия $\left(0 < \tau < \frac{t_d}{t_m} \right)$:

на границе раздела «парогазовая смесь – жидкость» в зоне действия ($Z=Z_1, 0 < R < R_1$) и вне зоны действия излучения ($Z=Z_1, R_1 < R < R_2$) для уравнения энергии заданы граничные условия IV рода с учётом испарения жидкости; для уравнений диффузии, завихрённости, Пуассона заданы граничные условия II рода; на оси симметрии и границах ($Z=0, 0 < R < R_2$; $Z=Z_2, 0 < R < R_2$; $R=0, 0 < Z < Z_1$; $R=0, Z_1 < Z < Z_2$; $R=R_2, 0 < Z < Z_1$; $R=R_2, Z_1 < Z < Z_2$) для всех уравнений задано условие равенства нулю градиента соответствующих функций.

Для решения системы уравнений (1)–(3), (5)–(8) применён метод конечных разностей. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решены локально-одномерным методом. Система одномерных разностных уравнений решена методом прогонки с использованием неявной четырёхточечной разностной схемы. Для решения нелинейных одномерных уравнений применён метод итераций.

В связи с отсутствием экспериментальных данных по характеристикам процессов, протекающих при воздействии на жидкости концентрированных потоков светового излучения 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.

Для верификации используемых методов и разработанного алгоритма решены тестовые задачи теплопроводности с учётом фазовых переходов при испарении на границах и химической реакции в материале, гидродинамики и конвективного теплообмена. Результаты решения тестовых задач хорошо соответствуют результатам других авторов.

В **третьей главе** представлены результаты численного моделирования процессов, протекающих при воздействии на жидкие топлива концентрированных потоков светового излучения, а также показаны масштабы влияния на одну из важнейших интегральных характеристик процесса – время задержки зажигания – мощности и площади зоны действия потока оптического излучения, поглощения энергии в газовой фазе, начальных параметров жидкости и воздуха, характера распределения мощности излучения по сечению пучка, сопоставлены

результаты решения аналогичных задач в цилиндрической и декартовой системах координат.

Решена упрощенная задача моделирования физико-химических превращений в пожароопасной жидкости при воздействии концентрированного потока светового излучения (в газовой фазе отсутствует поглощение энергии).

Рисунок 2 иллюстрирует типичные результаты численного моделирования.

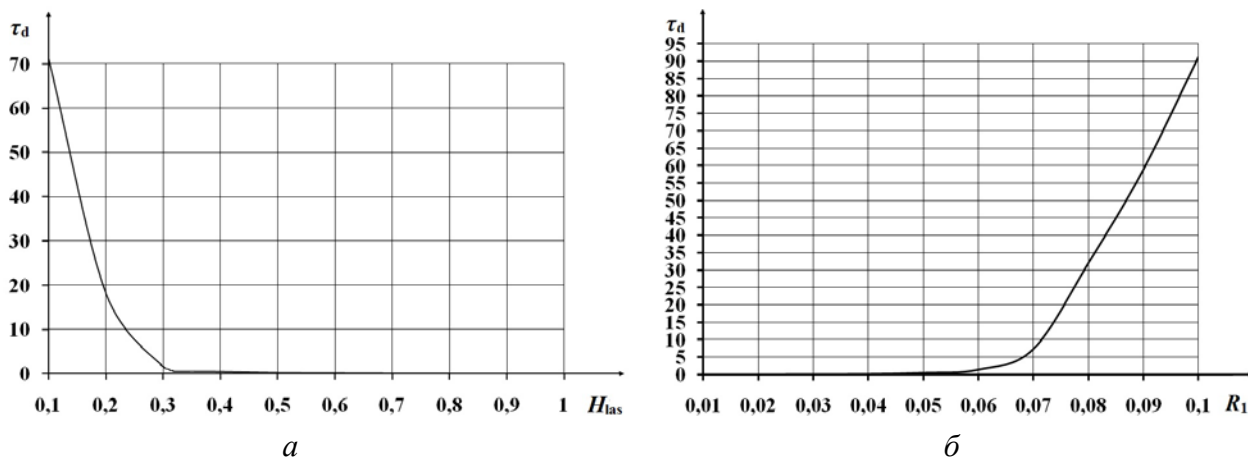


Рис. 2. Зависимость безразмерных времён задержки зажигания от безразмерной плотности энергии потока светового излучения при постоянной площади «пятна нагрева» (а) и от безразмерного радиуса «пятна нагрева» при постоянной мощности светового излучения (б)

На рисунке 3 представлены распределение температур и положение характерных изотерм в области решения в момент зажигания.

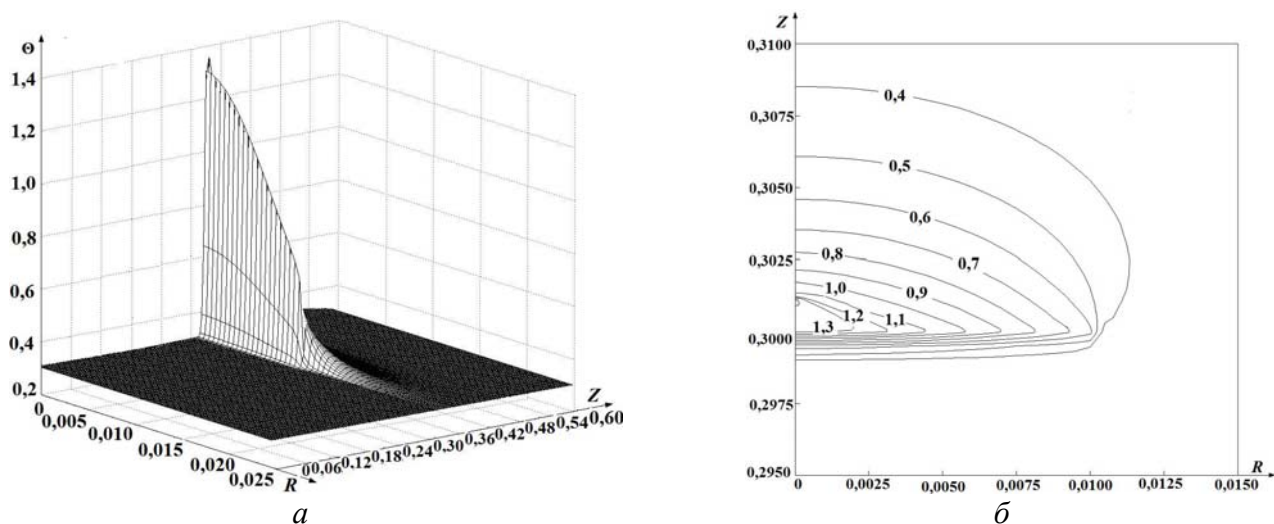


Рис. 3. Температурное поле (а) и изотермы (б) системы «концентрированный поток светового излучения – жидкость – воздух» в момент зажигания ($\tau_d=1,483$) при $H_{las}=0,4$, $R_l=0,08$

Видно, что место локализации зоны химической реакции окисления несколько удалено от границы испарения.

Для установления масштабов влияния поглощения энергии излучения в газовой фазе выполнено численное исследование процессов изменения фазового состояния и физико-химических превращений в жидком топливе при предположении, что часть энергии излучения поглощается формирующейся парогазовой смесью.

Установлено (рис. 4), что при этом инерционность зажигания возрастает по сравнению с тем случаем, когда поглощение энергии в газовой фазе не учитывается.

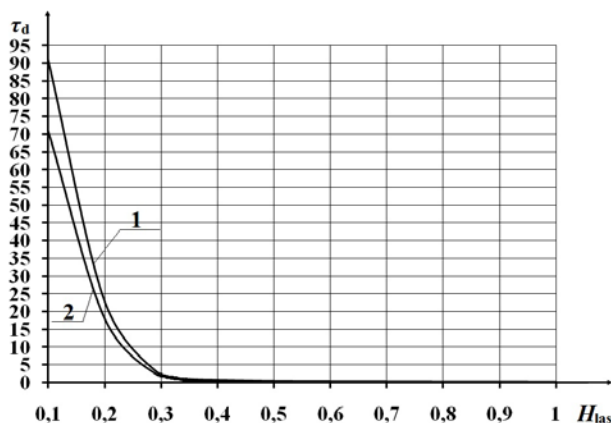


Рис. 4. Зависимость безразмерных времён задержки зажигания в системе «концентрированный поток светового излучения – жидкость – воздух» от безразмерной плотности энергии потока излучения H_{las} :

1 – с учётом поглощения энергии излучения в газовой фазе; 2 – без учёта поглощения энергии излучения в газовой фазе

Полученные результаты можно объяснить тем, что с уменьшением доли энергии, подводимой к жидкому топливу, снижается массовая скорость испарения жидкости.

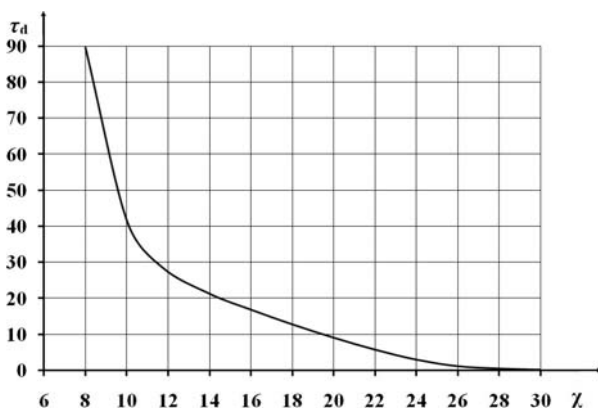


Рис. 5. Зависимость времён задержки зажигания в системе «концентрированный поток светового излучения - жидкость - воздух» от безразмерного критерия χ

Для определения критических условий зажигания в рассматриваемой системе можно использовать безразмерный критерий χ , характеризующий отноше-

ние подведённой энергии потока излучения к доле энергии, затраченной на испарение жидкого топлива:

$$\chi = \frac{H(Z_2)}{Q_e \cdot W_e}. \quad (11)$$

На рисунке 5 приведена зависимость времён задержки зажигания смеси паров керосина с воздухом τ_d от безразмерного критерия χ .

Видно, что $\chi=8$ является критическим значением безразмерного критерия, при котором осуществляется зажигание в рассматриваемой системе. При увеличении χ вероятность реализации условий зажигания возрастает, а инерционность процессов изменения фазового состояния и физико-химических превращений снижается.

Выполнен анализ влияния начальных параметров жидкости и воздуха на характеристики исследуемого процесса (рис. 6).

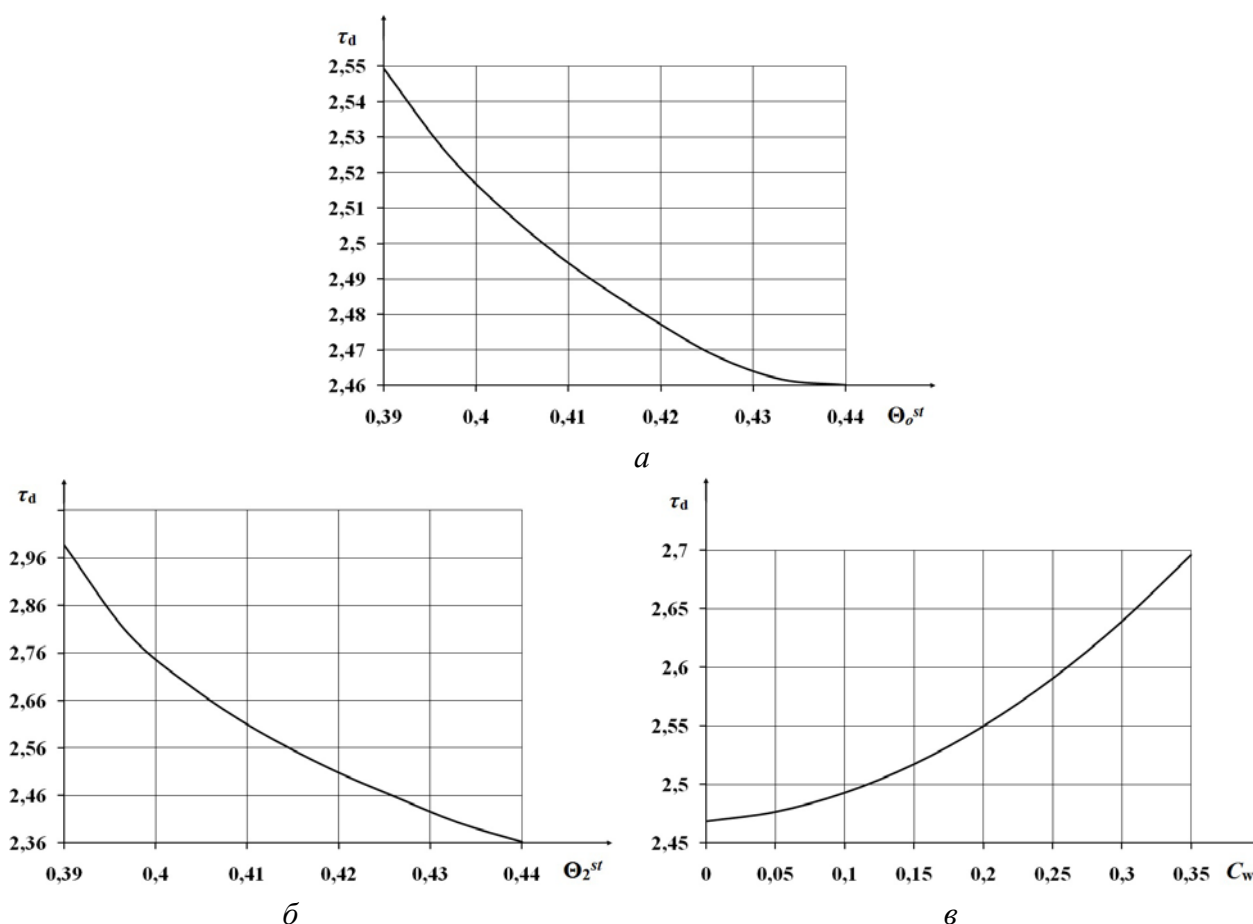


Рис. 6. Зависимость времён задержки зажигания в системе «концентрированный поток светового излучения – жидкость – воздух» от начальной температуры воздуха (а), жидкости (б) и массовой доли паров воды в воздухе (в) при $H_{las}=0,3$, $R_l=0,06$

Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что заметное влияние на величину τ_d оказывает лишь начальная температура жидкого топли-

ва. Однако при уменьшении плотности энергии потока излучения H_{las} и радиуса действия светового пучка R_1 влияние температуры окружающего воздуха и концентрации водяных паров на параметры процесса зажигания усиливается, поскольку снижается интенсивность подвода энергии к системе.

Рассмотрено влияние на значение τ_d характера распределения мощности потока светового излучения по радиусу пучка. Результаты численного анализа условий воздействия на жидкость потоков концентрированного излучения с различным распределением мощности представлены на рисунке 7.

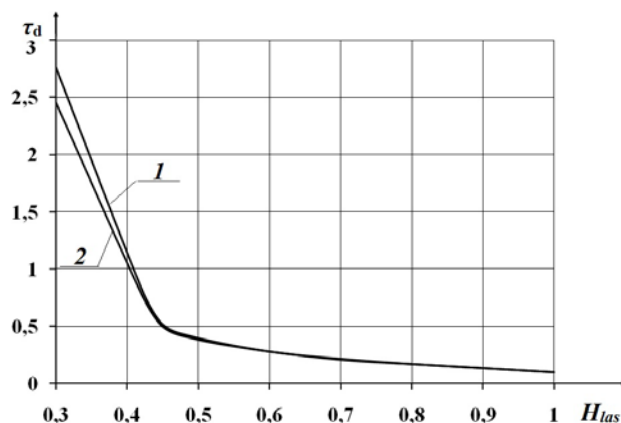


Рис. 7. Зависимость времён задержки зажигания в системе «концентрированный поток светового излучения – жидкость – воздух» от безразмерной плотности энергии потока излучения при $R_1=0,06$:

1 – плотность энергии максимальна на оси светового пучка; 2 – плотность энергии постоянна по радиусу светового пучка

Анализ рисунка 7 показывает, что распределение плотности энергии потока на границе раздела сред заметно влияет на τ_d только при относительно небольших значениях H_{las} . Полученные зависимости можно объяснить тем, что при постоянной плотности энергии потока по радиусу к жидкости подводится больше энергии, что приводит к более интенсивному испарению топлива и увеличению концентрации паров горючего в среде окислителя. Однако при увеличении мощности излучения влияние фактора постоянства H_{las} по радиусу уменьшается, поскольку энергии в центре потока излучения достаточно для разогрева и последующего зажигания жидкости практически за тот же интервал времени, что и при постоянном распределении по радиусу плотности энергии излучения.

Решена задача исследования физико-химических процессов, являющихся следствием воздействия на жидкость потока интенсивного светового излучения, имеющего прямоугольное сечение, в декартовой системе координат (рис. 8).

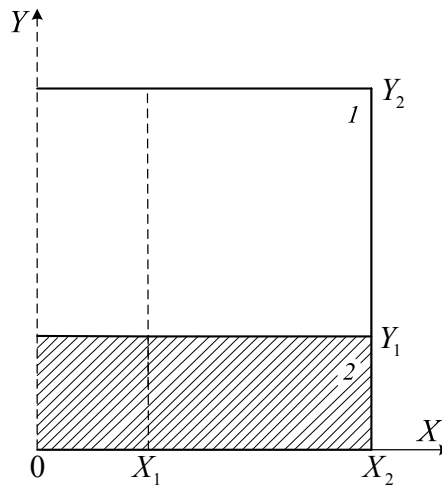


Рис. 8. Схема области решения задачи ($0 < \tau < \tau_d$):

1 – смесь паров жидкого топлива с воздухом, 2 – жидкость

Рисунок 9 иллюстрирует влияние изменения мощности концентрированного потока светового излучения на величину τ_d . Полученная зависимость качественно хорошо соответствует аналогичной зависимости, представленной на рис. 2. Однако при решении задачи в декартовой системе координат τ_d изменяется по сравнению с результатами решения в цилиндрических координатах в среднем на 10%.

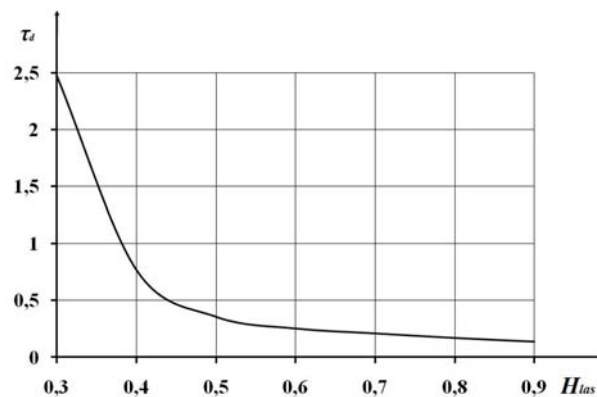


Рис. 9. Зависимость времён задержки зажигания в системе «концентрированный поток светового излучения – жидкость – воздух» от безразмерной плотности энергии излучения H_{las} при $Y_1=0,06$

На рис. 10 представлены типичные зависимости, характеризующие инерционность процесса при различных начальных параметрах жидкости и воздуха.

Анализ представленных на рисунке 10 зависимостей показывает, что значительное влияние на параметры процесса оказывает только начальная температура жидкого топлива. В целом результаты моделирования незначительно отличаются от решения аналогичной задачи в цилиндрической системе координат.

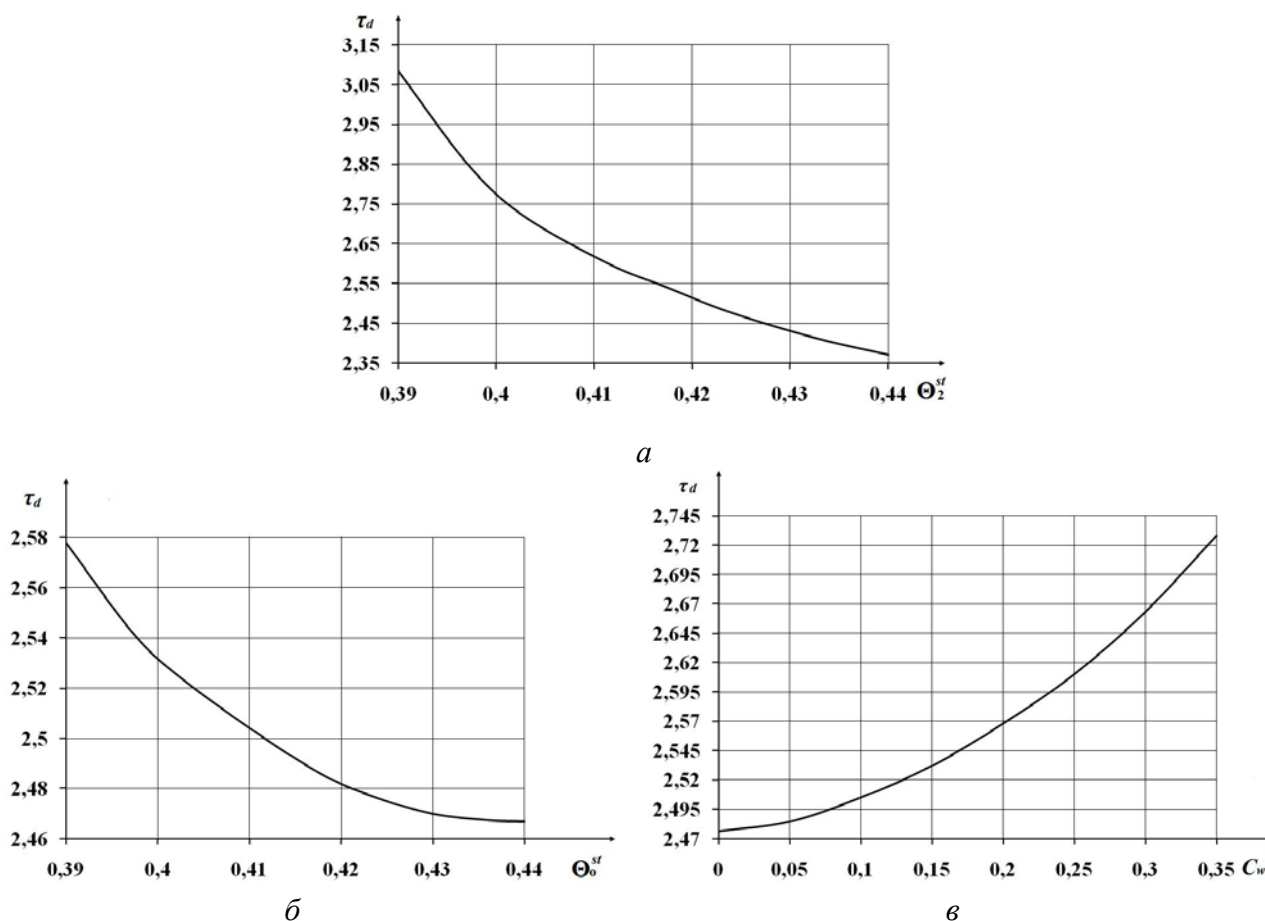


Рис. 10. Зависимости времён задержки зажигания в системе «концентрированный поток светового излучения – жидкость – воздух» от начальной температуры жидкого топлива (а), начальной температуры воздуха (б) и массовой доли паров воды в воздухе (в) при $H_{las}=0,3$, $Y_I=0,06$

Основные результаты и выводы

1. С использованием созданной модели зажигания выявлены основные закономерности изменения фазового состояния и физико-химических превращений в жидких конденсированных веществах при воздействии концентрированных потоков светового излучения.

2. Показано, что интенсифицировать физико-химические процессы при зажигании жидкости можно за счёт:

- увеличения плотности энергии излучения (при увеличении H_{las} от 0,1 до 10 τ_d снижается от 71 до 0,1);
- повышения начальной температуры жидкого конденсированного вещества (при $\Theta_2^{st} = 0,39 \div 0,44$ τ_d снижается более чем на 20%).

3. Исследовано влияние поглощения энергии излучения в газовой фазе на инерционность зажигания. В случае, когда учитывается процесс поглощения энергии излучения в газовой фазе, в среднем на 20% возрастает время задержки

зажигания, поскольку, не смотря на дополнительный разогрев парогазовой смеси за счёт поглощённой энергии, снижается интенсивность испарения жидкости и диффузии паров горючего в воздухе.

4. Показано, что в системе «концентрированный поток светового излучения – жидкость – воздух» даже при непрерывном воздействии на жидкое топливо источника энергии с неизменной мощностью возможно определение критических условий зажигания. Предельным соотношением величины энергии, подведённой к системе, к доле энергии, затраченной на испарение жидкости, является $\chi=8$.

5. Выявлено, что в отличие от систем «одиноким разогреваемая до высоких температур частица – жидкое топливо – окислитель», в рассматриваемой системе место локализации химической реакции окисления всегда расположено вблизи поверхности испарения.

6. Установлено, что начальная температура воздуха и массовая доля паров воды в окружающем воздухе, а также характер распределения мощности излучения по сечению светового пучка практически не оказывают влияния на интенсивность протекания физико-химических процессов в жидких конденсированных веществах при воздействии концентрированных потоков светового излучения (при увеличении C_w от 0 до 0,35 и Θ_o^{st} от 0,39 до 0,44 К τ_d изменяется не более, чем на 4%; при зажигании жидкого топлива потоком светового излучения, плотность энергии которого максимальна на оси, времена задержки зажигания отличаются от τ_d при зажигании световым пучком с постоянным распределением энергии лишь при $H_{las}<0,4$).

Публикации по теме диссертации

1. Высокоморная О.В. Тепломассоперенос при локальном нагреве и зажигании жидкого топлива сфокусированным потоком излучения / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 4. – С. 29–33.

2. Vysokomornaya O.V. Numerical Analysis of Heat-Mass Transfer Mechanisms in Gas-Phase Ignition of Films of Liquid Condensed Substances by a Laser Beam / O.V. Vysokomornaya, G.V. Kuznetsov, P.A. Strizhak // Journal of Engineering Thermophysics. – 2010. – Vol. 19, № 2. – P. 85–93.

3. Высокоморная О.В. Зажигание жидкого топлива сфокусированным потоком светового излучения / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – Т. 19, № 3. – С. 9–13.

4. Высокоморная О.В. Зажигание плёнки жидкости лазером в условиях поглощения излучения / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Современные техника и технологии : труды XVI Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных : в 3 т. – Томск, 2010. – Т. 3. – С. 170–171.
5. Высокоморная О.В. Численное решение задачи зажигания плёнки жидкого топлива сфокусированным потоком излучения / О.В. Высокоморная, П.А. Стрижак, Г.В. Кузнецов // Перспективы развития фундаментальных наук : труды VII Международной конференции аспирантов и молодых учёных. – Томск, 2010. – С. 458–460.
6. Высокоморная О.В. Моделирование процессов тепломассопереноса в системе «поток сфокусированного излучения – жидкое конденсированное вещество – окислитель» / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Теплофизические основы энергетических технологий : труды Всероссийской научно-практической конференции с международным участием. – Томск, 2010. – С. 70–73.
7. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., Стрижак П.А. Анализ влияния параметров системы «поток сфокусированного излучения – жидкое конденсированное вещество – окислитель» на времена задержки зажигания / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак ; НИ ТПУ. – Томск, 2010. – 19 с. – Деп. в ВИНТИ 14.07.2010, № 440.
8. Высокоморная О.В. Численное решение плоской задачи зажигания жидкого конденсированного вещества потоком излучения / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак ; НИ ТПУ. – Томск, 2010. – 18 с. – Деп. в ВИНТИ 14.07.2010, № 439.
9. Высокоморная О.В. Численное исследование особенностей тепломассопереноса при зажигании жидкого конденсированного вещества лазером / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Труды пятой Российской национальной конференции по теплообмену. – М. : ИД МЭИ, 2010. – С. 202–205.
10. Высокоморная О.В. Математическое моделирование комплекса взаимосвязанных процессов тепломассопереноса с фазовыми переходами и химическими реакциями при зажигании жидких конденсированных веществ источниками ограниченной энергоемкости / О.В. Высокоморная, Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // XXIX Сибирский теплофизический семинар : сборник тезисов докладов Всероссийской конференции. – Новосибирск: Изд-во Ин-та теплофизики СО РАН, 2010. – С. 48–49.

Тираж 120 экз.
Отпечатано в ООО «Позитив-НБ»
634050 г. Томск, пр. Ленина 34а

