

На правах рукописи

**Стрижак Павел Александрович**

**ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС ПРИ ЗАЖИГАНИИ  
ЖИДКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ ВЕЩЕСТВ И  
ПАРОГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ ЛОКАЛЬНЫМИ  
ИСТОЧНИКАМИ ЭНЕРГИИ**

01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени доктора  
физико–математических наук

Томск – 2011

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»

**Научный консультант:** доктор физико-математических наук, профессор  
Кузнецов Гений Владимирович

**Официальные оппоненты:**

доктор физико-математических наук, профессор, академик РАН  
Ребров Алексей Кузьмич

доктор физико-математических наук, профессор  
Борzych Владимир Эрнестович

доктор физико-математических наук, профессор  
Шрагер Эрнст Рафаилович

**Ведущая организация:** Всероссийский научно-исследовательский институт противопожарной обороны МЧС РФ, Московская область.

Защита состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г. в 14<sup>30</sup> на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634050, г. Томск, пр. Ленина, 2, корпус 10, ауд. 228.

С диссертацией можно ознакомиться в Научно-технической библиотеке ГОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2011 г.

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

О.Ю. Долматов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

Многие высокотемпературные рабочие и технологические процессы в различных технических системах (ракетная техника, энергетика, машиностроение, химическая промышленность, строительство), а также аварии, взрывы и пожары приводят к формированию локальных источников энергии малых размеров, например, разогретых до высоких температур металлических и неметаллических частиц. Исследование закономерностей тепломассопереноса при реализации таких процессов представляет крупное научное направление, включающее задачи взаимодействия разрозненных локальных источников ограниченной энергоемкости (одиночных металлических и неметаллических разогретых до высоких температур частиц, проволок, стержней и т.д.) с конденсированными веществами.

Процессы взаимодействия конденсированных веществ с локальными источниками энергии характеризуются высокой пожаро- и взрывоопасностью. Особенно следует отметить жидкие горючие и легковоспламеняющиеся вещества. Проблема безопасного хранения, переработки и использования пожароопасных жидкостей является наиболее острой для энергетики, нефтедобывающей, химической и нефтеперерабатывающей отраслей промышленности. Нередко из-за разгерметизации аппаратов, трубопроводов, резервуаров с горючими жидкостями происходят аварии технологического оборудования. Образующиеся при этом неконтролируемые объемы жидких нефтепродуктов испаряются, пары горючего перемешиваются с окислителем в окружающем воздухе. При наличии источника нагрева скорости химических реакций окисления паров горючего могут достигать больших значений. Следствием этого может стать возгорание, пожар или взрыв.

Для разработки технических решений по предотвращению таких пожароопасных процессов необходимы прогностические модели и рекомендации, создание которых возможно только при наличии соответствующей теории.

Экспериментальному и теоретическому исследованию закономерностей взаимодействия масштабных источников нагрева (массивные разогретые тела, потоки высокотемпературных газов и т.д.) с конденсированными веществами посвящены работы Н.Н. Семенова, Я.Б. Зельдовича, А.А. Ковальского, Д.А. Франк-Каменецкого, О.М. Тодеса, В.Н. Вилюнова, В.В. Барзыкина, А.Э. Аверсона, А.Г. Мержанова, У.И. Гольдшлегера, В.Е. Зарко, В.Т. Кузнецова, В.А. Архипова, Б.В. Новожилова, Р.С. Буркиной и др. На основе результатов этих исследований В.Н. Вилюновым и В.Е. Зарко сформулированы основные положения современной теории зажигания конденсированных веществ (*Ignition of Solids*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989). Проанализированы механизмы (конвективный, кондуктивный и лучистый) и режимы (индукционный и вырожденный) зажигания твердых конденсированных веществ при различных способах подвода энергии, в частности, при нагреве массивной поверхностью. Теории зажигания жидких веществ, адекватной по своему прогностическому

потенциалу, нет. Очевидно, это связано с существенно большей сложностью механизмов зажигания жидкостей по сравнению с твердыми конденсированными веществами, в частности, совместным протеканием группы физико-химических процессов: испарение жидкости с поглощением энергии, теплопроводность, диффузия и конвекция паров горючего в среде окислителя, радиационный теплоотвод, формирование парового зазора между источником и жидкостью, погружение нагретого тела ограниченной энергоемкости в жидкость, кристаллизация материала источника нагрева с выделением тепла, химическое реагирование паров жидкого вещества и др.

Анализ известных механизмов зажигания твердых и жидких конденсированных веществ показывает, что основную роль при прогреве вещества и формировании зоны ведущей реакции окисления играют инерционные процессы тепломассопереноса в малой окрестности площади контакта горючего вещества и источника энергии, а не высокоскоростные химические реакции. Экспериментальное изучение особенностей таких процессов крайне сложно. В частности, трудно исследовать относительно малые энергетические эффекты фазовых переходов и химических реакций, особенности тепломассопереноса (роли диффузионного и конвективного механизмов массопереноса, процессов остывания источника энергии и нагрева вещества) в окрестности зоны контакта источника с веществом в условиях небольших (менее 0,1 с) времен протекания процессов.

Актуальность темы диссертационных исследований обусловлена необходимостью создания общей теории тепломассопереноса при зажигании жидких веществ и парогазовых смесей в условиях локального нагрева, учитывающей основные процессы тепломассопереноса с фазовыми переходами и химическим реагированием.

Актуальность темы работы также подтверждается статистикой чрезвычайных ситуаций на территории Российской Федерации (Акинин Н.И., Булхов Н.Н., Гериш В.А. Статистический анализ причин аварий и травматизма на опасных производственных объектах // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 10. – С. 53–55) – с 1999 г. по 2009 г. число пожаров и взрывов на производствах с использованием горючих и легковоспламеняющихся жидкостей увеличилось почти в 15 раз.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

Целью диссертационной работы является построение теории тепломассопереноса при зажигании жидких конденсированных веществ и парогазовых смесей источниками нагрева с ограниченным запасом энергии на базе математических моделей, впервые учитывающих совместное протекание основных процессов тепломассопереноса с фазовыми переходами и химическими реакциями (теплоперенос в твердой, жидкой и газовой фазах, испарение горючей жидкости с поглощением энергии, диффузионно-конвективный массоперенос паров горючего в среде окислителя, радиационный теплоотвод от источника энергии, формирование парового зазора между жидкостью и источником энергии, погружение

источника в жидкость, химическая реакция окисления паров горючего в воздухе с выделением энергии, кристаллизация материала источника тепла при остывании).

Численные исследования выполнены для большой группы наиболее типичных и широко распространенных систем: «нагретая частица – жидкое горючее вещество – окислитель», «нагретая частица – пленка жидкого вещества – окислитель», «неподвижная разогретая проволочка – смесь паров жидкого вещества с окислителем», «разогретая частица – ткань, пропитанная жидким горючим веществом – окислитель», «движущаяся разогретая частица – смесь паров жидкого вещества с окислителем», «сфокусированный поток излучения – жидкое горючее вещество – окислитель», «капля жидкости – массивное нагретое тело – окислитель».

Достижение поставленной цели предполагает решение следующих задач:

1. Построение моделей тепломассопереноса при зажигании жидких конденсированных веществ и парогазовых смесей разогретыми до высоких температур частицами, проволочками, стержнями и сфокусированными потоками излучения.
2. Разработка алгоритмов численного моделирования и оценки достоверности полученных результатов.
3. Выделение масштабов влияния большой группы значимых факторов (температура, размеры, конфигурация поверхностей, форма и теплофизические характеристики источников энергии, процессы кристаллизации материала источника при остывании, смешанной конвекции паров горючего и окислителя, неидеальный контакт на границе «частица – жидкость» (наличие парового зазора между частицей и жидкостью, частичное или полное погружение источника тепла в жидкое горючее вещество), соотношение площадей контакта источника с жидкостью и парогазовой смесью, «совместное» влияние нескольких локальных источников нагрева, параметры внешней среды (температура, влажность и скорость воздуха) и др.) на характеристики процессов тепломассопереноса.
4. Определение режимов зажигания жидкостей при локальном нагреве, а также установление предельных условий, при которых энергии источника недостаточно для зажигания.

### **Научная новизна работы**

1. Предложен новый подход к теоретическому анализу закономерностей тепломассопереноса при зажигании жидких конденсированных веществ и парогазовых смесей источниками ограниченной энергоемкости, отличающийся от известных учетом полного комплекса взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, фазовых превращений, химического реагирования, гидродинамических процессов, применением новых алгоритмов численного моделирования и оценки достоверности полученных результатов.
2. Впервые поставлена и решена группа задач тепломассопереноса при зажигании жидких конденсированных веществ и парогазовых смесей в условиях локального подвода энергии с учетом основных процессов тепломассопереноса,

фазовых переходов и химического реагирования в малой окрестности остывающего источника ограниченной энергоемкости. Сформулированы системы нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных с соответствующими начальными и граничными условиями. При постановке задач впервые учтено совместное протекание большой группы процессов: нагрев и испарение жидкости с поглощением тепла, диффузионно-конвективный перенос паров горючего в среде окислителя, остывание и кристаллизация материала источника энергии с выделением тепла, радиационный теплоотвод от источника, формирование парового зазора между источником и жидкостью, погружение источника в жидкое вещество. Решенные задачи тепломассопереноса не имеют аналогов по постановке, алгоритмам и методам решения, а также полученным результатам.

3. Разработанные математические модели позволили впервые установить роль диффузионного и конвективного механизмов массопереноса, фазовых переходов (испарение жидкого вещества, кристаллизация материала источника нагрева) при химических превращениях, а также выделить несколько режимов зажигания жидкостей при локальном нагреве, отличающихся диапазонами времен задержки зажигания, положением зоны локализации ведущей химической реакции и закономерностями прогрева жидкого вещества.

4. Установлены масштабы влияния большой группы значимых факторов (начальная температура, размеры, форма, конфигурация поверхности и теплофизические характеристики источников энергии, теплофизические и термохимические характеристики жидких горючих веществ, процесс кристаллизации материала источника нагрева, наличие парового зазора между источником тепла и жидкостью, положение источника (на поверхности жидкости, частичное или полное погружение в вещество), «совместное» действие нескольких источников нагрева) на условия протекания процессов тепломассопереноса при локальном подводе энергии к жидкому веществу.

5. Группа разработанных математических моделей также может быть использована при решении новых задач механики, тепломассопереноса, гидродинамики и химической физики, возникающих при анализе закономерностей взаимодействия веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях, с локальными источниками ограниченной энергоемкости.

### **Практическая значимость работы**

1. Разработанные модели и алгоритмы решения задач тепломассопереноса могут быть использованы для оценки пожарной опасности процессов взаимодействия типичных горючих и легковоспламеняющихся жидкостей с источниками нагрева малых размеров различной физической природы. Результаты выполненных исследований создают объективные предпосылки для прогнозирования условий возникновения локальных очагов пожаров.

2. Получены аппроксимационные выражения, связывающие времена задержки зажигания больших массивов и тонких пленок жидких конденсированных ве-

ществ, а также смесей их паров и окислителя с параметрами локальных источников энергии (температура, размеры, конфигурация). Применение этих выражений позволяет оценить возможность реализации условий зажигания при различных определяющих параметрах исследуемых процессов.

3. Установленные особенности процессов тепломассопереноса, фазовых переходов и химического реагирования служат дополнительной основой для построения и апробации моделей тепломассопереноса при зажигании жидких конденсированных веществ, а также могут быть использованы при проведении испытаний горючести и пожарной опасности различных технических систем.

4. Выявленные закономерности (влияние фазовых переходов на условия зажигания, изменение положения зоны интенсивного химического реагирования в зависимости от условий взаимодействия источника нагрева и горючего вещества, зависимости времени задержки зажигания от температуры источника и условий теплообмена, влияние конфигурации источника нагрева на условия зажигания и т.д.) позволяют определить оптимальные условия для эффективного применения исследуемых процессов в специализированных установках и аппаратах.

5. Получены 6 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ и патент на изобретение способа быстрого определения качества жидких нефтепродуктов по временам задержки их зажигания (№ 2381492).

### **Связь работы с научными программами**

Диссертационная работа выполнена в рамках научно-технической программы «Теплофизика и теплоэнергетика» по направлению научной деятельности Национального исследовательского Томского политехнического университета «Разработка методов и средств повышения надежности и эффективности эксплуатации энергетических объектов». Результаты выполненных исследований используются в Национальном исследовательском Томском политехническом университете при подготовке магистров техники и технологии по направлениям «Теплоэнергетика» и «Машиностроение», а также кандидатов наук по специальностям «01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы», «01.04.07 – Физика конденсированного состояния», «01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника», «01.04.17 – Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества», «05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Тема диссертации соответствует приоритетным направлениям развития науки в Российской Федерации: «Энергетика и энергосбережение», «Безопасность и противодействие терроризму», «Перспективные вооружения, военная и специальная техника», «Транспортные, авиационные и космические системы».

Исследования проведены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-08-00366-а), гранта Президента Российской Федерации (МК-330.2010.8) и федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 г. (госконтракты № П2225, № П357).

### **Достоверность полученных результатов**

Оценка достоверности полученных при численном моделировании результатов проводилась сравнением с известными экспериментальными данными и проверкой консервативности используемых разностных схем. Тестирование использованных численных методов и разработанных алгоритмов решения систем нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных выполнено на примере менее сложных задач теплопроводности, гидродинамики и конвективного теплопереноса.

### **Защищаемые положения**

1. Новый подход к теоретическому анализу теплопереноса при зажигании жидких конденсированных веществ и парогазовых смесей локальными источниками энергии, отличающийся от известных учетом полного комплекса взаимосвязанных процессов теплопереноса, фазовых превращений, химического реагирования, гидродинамических процессов, применением новых алгоритмов численного моделирования и оценки достоверности полученных результатов.
2. Математическая модель теплопереноса с фазовыми переходами (испарение жидкости, кристаллизация материала источника нагрева) и химическим реагированием (окисление паров жидкости) при зажигании жидкого конденсированного вещества типичным источником ограниченной энергоемкости – разогретой частицей малых размеров.
3. Физические закономерности диффузионно-конвективного массопереноса паров жидкого вещества в среде окислителя, теплопереноса в горючей жидкости при ее испарении, а также в источнике нагрева малых размеров при его кристаллизации и погружении в конденсированное вещество (влияние фазовых переходов на условия зажигания, изменение положения зоны интенсивного химического реагирования в зависимости от условий взаимодействия источника нагрева и горючего вещества, условия теплообмена между локальным источником нагрева, жидким веществом и формирующейся парогазовой смесью и т.д.).
4. Количественные оценки масштабов влияния большой группы значимых факторов (энергетический запас, форма и теплофизические характеристики источника, теплофизические и термохимические характеристики жидкого горючего вещества) и процессов (кристаллизация материала источника энергии, погружение источника и формирование парового зазора между ним и жидкостью, «совместное» действие нескольких источников, смешанная конвекция паров вещества и окислителя) на условия теплопереноса и характеристики зажигания жидкого вещества.
5. Результаты теоретических исследований теплопереноса при зажигании смеси паров жидкого вещества и окислителя в условиях перемещения в ней источника с конечным запасом энергии, сопровождающегося изменением положения зоны локализации ведущей химической реакции.
6. Результаты численного анализа процессов теплопереноса при зажигании капель жидких веществ массивным нагретым телом на основе созданных мате-



матических моделей, впервые учитывающих деформацию и растекание капель по горячей поверхности в условиях фазового перехода и химического реагирования.

### **Личный вклад автора**

Состоит в выборе научного направления исследований, постановке новых задач теплопереноса при газофазном зажигании типичных жидких горючих веществ и парогазовых смесей локальными источниками нагрева (нагретыми до высоких температур неметаллическими и металлическими частицами, проволочками, сфокусированными потоками излучения), выборе методов и разработке алгоритмов решения задач, проведении теоретических исследований влияния большой группы значимых факторов на характеристики процессов теплопереноса, сопоставлении полученных результатов с известными экспериментальными данными, обобщении теоретических следствий, формулировке основных положений и выводов диссертационной работы.

### **Апробация работы**

Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на XIII Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надёжность, безопасность» (г. Томск, 2007 г.), IX международной конференции «Средства и системы автоматизации» (г. Томск, 2007 г.), XIV международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2008 г.), V международной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2008 г.), XIV симпозиуме по горению и взрыву (г. Черноголовка, 2008 г.), VI Всероссийской конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы современной механики» (г. Томск, 2008 г.), XIV Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надёжность, безопасность» (г. Томск, 2008 г.), XV международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2009 г.), VI международной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2009 г.), международной научно-технической конференции «Безопасность. Технологии. Управление» (г. Тольятти, 2009 г.), региональной научно-практической конференции «Теплофизические основы энергетических технологий» (г. Томск, 2009 г.), международной научно-практической конференции «Химическая и радиационная физика» (г. Москва, 2009 г.), Всероссийской конференции «Современная баллистика и смежные вопросы механики» (г. Томск, 2009 г.), V Российской национальной конференции по теплообмену (г. Москва, 2010 г.), VII международной конференции «Перспективы развития фундаментальных наук» (г. Томск, 2010 г.), Международной конференции «Передовые технические системы и технологии» (г. Севастополь, 2010 г.), XVI международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2010 г.), II конференции по фильтрационному горению (г. Черноголовка, 2010 г.), Всероссийской конференции «XXIX Сибирский теп-

лофизический семинар» (г. Новосибирск, 2010 г.), XVI Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надёжность, безопасность» (г. Томск, 2010 г.), XI Всероссийской конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики» (г. Новосибирск, 2010 г.).

### **Публикации**

Основные результаты диссертационных исследований представлены в 78 работах, включающих 1 монографию и 40 статей в журналах, рекомендованных ВАК для публикации научных результатов диссертации на соискание ученой степени доктора наук. Список основных публикаций приведен в автореферате.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы из 258 наименований, содержит 99 рисунков, 56 таблиц, 393 страницы.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражена практическая значимость и научная новизна полученных результатов, представлены защищаемые автором положения.

**Первая глава** отражает современное состояние теоретических и экспериментальных исследований процессов тепломассопереноса при зажигании жидких горючих веществ и парогазовых смесей в условиях локального подвода энергии. В ней описаны результаты немногочисленных работ по диффузионному горению жидкостей и газовых смесей, зажиганию смесей паров жидких топлив с окислителем металлическими стержнями и шарами, а также капель жидкостей при контакте с массивным нагретым телом. Проанализированы основные положения общей теории зажигания твердых конденсированных веществ, которые используются при построении теории тепломассопереноса для описания процессов зажигания жидких горючих веществ. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований особенностей тепломассопереноса (прогрева поверхностного слоя вещества и остывания источников) при зажигании твердых конденсированных веществ одиночными разогретыми до высоких температур частицами и дисперсным потоком частиц.

**Во второй главе** представлены созданные общие модели тепломассопереноса при зажигании больших массивов и тонких пленок жидких конденсированных веществ типичными локальными источниками энергии – одиночными разогретыми до высоких температур частицами в форме параллелепипеда, цилиндрического диска и полусферы. Описан разработанный новый подход к теоретическому анализу процессов тепломассопереноса при зажигании жидких конденсированных веществ источниками ограниченной энергоёмкости, отличающийся от известных тем, что впервые рассмотрен весь комплекс взаимосвязанных физических, химических и гидродинамических процессов, протекающих

при зажигании жидкостей в условиях локального подвода энергии. Представлены разработанные алгоритмы сопряжения декартовой, цилиндрической и сферической координатных разностных сеток. Приведены одномерные, двумерные и пространственные постановки задач тепломассопереноса при зажигании больших массивов и тонких пленок жидких горючих веществ. На примере наиболее общей модели, включающей сложную систему нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений, описаны созданный алгоритм и использованные методы численного решения приведенных в диссертационной работе задач тепломассопереноса.

Выполнена верификация созданных моделей тепломассопереноса на базе разработанного алгоритма проверки консервативности применяемых разностных схем. Для тестирования созданного алгоритма решения задач тепломассопереноса и использованных численных методов решены три нестационарные, нелинейные задачи теплопроводности с учетом фазовых переходов и выделения энергии при химическом реагировании. Также решены две задачи гидродинамики и конвективного тепломассообмена, в которых рассматривались процессы течения жидкости в полости с подвижной крышкой и тепловая конвекция в замкнутой плоской области соответственно.

Типичная схема области решения, используемая при теоретическом анализе процессов тепломассопереноса в условиях взаимодействия жидкого вещества с одиночной разогретой частицей, приведена на рис. 1.

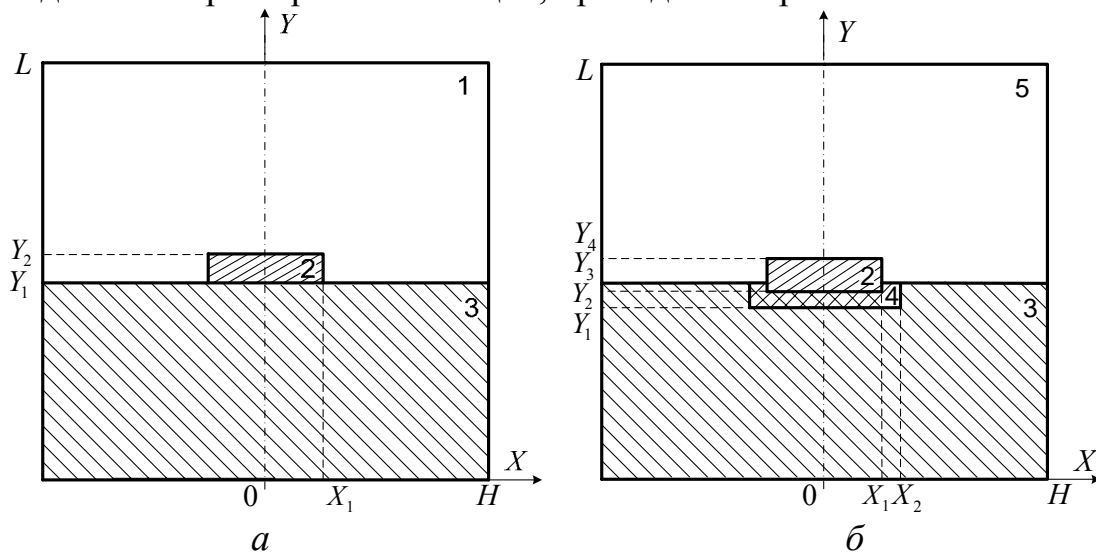


Рис. 1. Схема области решения задачи в начальный ( $\tau=0$ ) момент времени (*а*) и при  $0 < \tau < \tau_3$  (*б*): 1 – воздух, 2 – частица, 3 – жидкое горючее вещество, 4 – пары горючего, 5 – парогазовая смесь

При постановке наиболее общей задачи принималось, что частица, нагретая до температуры, существенно превышающей температуру жидкого горючего вещества, выпадает на его поверхность (рис. 1, *а*) и погружается. За счет тепла источника энергии жидкость нагревается и происходит её испарение. Между «горячей» частицей и жидким веществом образуется паровой зазор (рис. 1, *б*). Размеры этого зазора, а также глубина погружения частицы в жидкость опреде-

ляются теплофизическими характеристиками и энергетическим запасом источника. При испарении жидкости пары горючего диффундируют в воздух и перемешиваются с ним. Формируется парогазовая смесь. При достижении значений температуры и концентрации горючего в смеси, достаточных для её зажигания, происходит воспламенение.

В качестве источников нагрева рассматривались типичные одиночные разогретые до высоких температур частицы различной физической природы (сталь, алюминий, углерод) с варьируемыми размерами  $h_ч=0,5\div 4\cdot 10^{-3}$  м,  $l_ч=0,5\div 2\cdot 10^{-3}$  м. Характерные размеры области решения составили  $l=20\cdot 10^{-3}$  м,  $h=10\cdot 10^{-3}$  м. Исследования выполнены для типичных жидких топлив (бензин, керосин, мазут, дизельное топливо).

В наиболее общей постановке принимались следующие допущения:

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

Результаты анализа обоснованности этих допущений представлены в третьей и четвертой главах. Сделан вывод об их правомерности.

В качестве условий воспламенения приняты:

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

Система нестационарных нелинейных дифференциальных уравнений тепло-массопереноса, соответствующая сформулированной физической постановке задачи, в декартовой системе координат в безразмерных переменных имеет вид: при  $Y_1 < Y < Y_2$ ,  $0 < X < X_2$ ;  $Y_2 < Y < Y_3$ ,  $X_1 < X < X_2$ ;  $Y_3 < Y < Y_4$ ,  $X_1 < X < H$ ;  $Y_4 < Y < 1$ ,  $0 < X < H$ :

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

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

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

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

при  $Y_2 < Y < Y_4$ ,  $0 < X < X_1$ :

$$\frac{1}{Fo_2} \frac{\partial \Theta_2}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_2}{\partial Y^2}; \quad (5)$$

при  $0 < Y < Y_1$ ,  $0 < X < X_2$ ;  $0 < Y < Y_3$ ,  $X_2 < X < H$ :

$$\frac{1}{Fo_3} \frac{\partial \Theta_3}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Theta_3}{\partial Y^2}. \quad (6)$$

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

$$\begin{array}{ll} 0 < Y < Y_1, 0 < X < H & \Theta_3 = \Theta_0; \\ Y_1 < Y < Y_2, 0 < X < X_1 & \Theta_2 = \Theta_4; \\ Y_1 < Y < Y_2, X_1 < X < H; Y_2 < Y < 1, 0 < X < H & \Theta_1 = \Theta_0, C_r = 0, \Psi = 0, \Omega = 0. \end{array}$$

Граничные условия (рис. 1, *b*) при  $0 < \tau < \tau_3$ :

на границах «частица – пары горючего» ( $Y=Y_2$ ,  $0 < X < X_1$ ;  $X=X_1$ ,  $Y_2 < Y < Y_3$ ), «частица – парогазовая смесь» ( $Y=Y_4$ ,  $0 < X < X_1$ ;  $X=X_1$ ,  $Y_3 < Y < Y_4$ ) 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» ( $Y=Y_1$ ,  $0 < X < X_2$ ;  $X=X_2$ ,  $Y_1 < Y < Y_3$ ), «парогазовая смесь – жидкость» ( $Y=Y_3$ ,  $X_2 < X < H$ ) для уравнения энергии заданы граничные условия IV рода с учетом испарения жидкости, для уравнений диффузии, движения, Пуассона заданы граничные условия второго рода с учетом вдува паров горючего в газовую область; на оси симметрии и границах ( $Y=0$ ,  $Y=1$ ,  $0 < X < H$ ;  $X=H$ ,  $0 < Y < 1$ ;  $Y=Y_3$ ,  $X_1 < X < X_2$ ) для всех уравнений задано условие равенства нулю градиента соответствующих функций.

Обозначения:  $\Omega$  – безразмерный аналог вектора вихря;  $\tau$  – безразмерное время;  $\tau_3$  – безразмерное время задержки зажигания;  $t_0$  – масштаб времени;  $X$  и  $Y$  – безразмерные составляющие координат декартовой системы, соответствующие  $x$  и  $y$ ;  $L$  – размер области решения (масштаб по координате);  $U$  и  $V$  – безразмерные составляющие скорости паров горючего в проекции на ось  $x$  и  $y$  соответственно;  $\Theta$  – безразмерная температура;  $\Theta_0$  – безразмерная начальная температура жидкости и воздуха;  $\Theta_4$  – безразмерная начальная температура частицы;  $\Psi$  – безразмерный аналог функции тока;  $Q_0$  – тепловой эффект реакции окисления паров горючего;  $W_0$  – массовая скорость окисления паров горючего;  $\rho$  – плотность;  $C$  – удельная теплоёмкость;  $\Delta T$  – разность температур ( $\Delta T = T_4 - T_0$ );  $T_4$  – начальная температура частицы (масштаб температуры);  $T_0$  – начальная температура воздуха и жидкости;  $V_0$  – масштаб скорости конвекции паров горючего вблизи поверхности жидкости;  $C_r$  – концентрация паров жидкого горючего вещества ( $0 < C_r < 1$ );  $Sh$ ,  $Re$ ,  $Gr$ ,  $Pr$ ,  $Sc$ ,  $Fo$  – 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.

Для решения системы уравнений (1)–(6) с начальными и граничными условиями использован метод конечных разностей. Разностные аналоги дифференциальных уравнений решены локально-одномерным и методом переменных

направлений. Система одномерных разностных уравнений решена методом прогонки с использованием неявной четырехточечной разностной схемы. Для решения нелинейных одномерных уравнений применен метод итераций.

**Третья глава** содержит результаты численных исследований процессов тепломассопереноса при зажигании больших массивов типичных жидких топлив (бензин, керосин, дизельное топливо, мазут) одиночными частицами (в частности, зависимости времен задержки зажигания от размеров, начальной температуры и теплофизических характеристик материала частиц, теплофизических и термодимических свойств жидкостей).

Применение нового подхода позволило впервые проанализировать масштабы влияния условий погружения источника ограниченной энергоемкости в вещество, формирования парового зазора между частицей и жидкостью, а также фазовых переходов при испарении вещества и кристаллизации материала остывающего источника на характеристики зажигания.

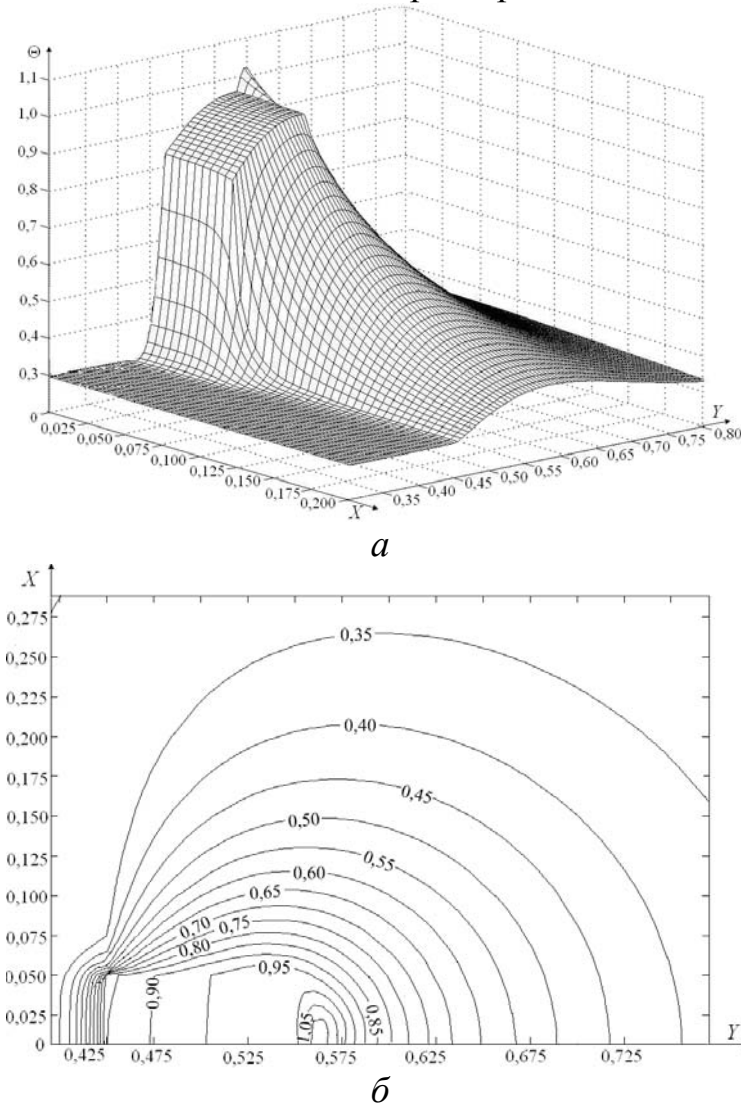


Рис. 2. Распределение температур (а) и положение характерных изотерм (б) в момент воспламенения при  $H_ч=L_ч=0,1$ ,  $\Theta_ч=1$

По результатам численного анализа впервые установлено неочевидное положение зоны локализации ведущей химической реакции для системы «разогретая частица – жидкое горючее вещество – окислитель» (рис. 2) в малой по размерам газовой области над верхней гранью частицы, внедренной в жидкость. Выявленная особенность объясняется спецификой тепломассопереноса при зажигании жидкости остывающим источником тепла. Пары горючего перемещаются от поверхности жидкости, нагреваются за счет теплообмена с боковыми поверхностями погружающейся частицы и смешиваются над ней. Градиенты температур смеси паров горючего с воздухом и концентраций горючего в этой области существенно превышают значения градиентов в других областях.

Проведенный численный анализ процессов тепломассопереноса в системе «разогретая частица – жидкость – окислитель» показал, что определяющую роль играют внедрение источника энергии в поверхностный слой вещества и формирование парового зазора между жидкостью и источником. Установлено, что при образовании парового зазора меньше тепла источника передается жидкому веществу, процессы тепломассопереноса проходят менее интенсивно и время задержки зажигания увеличивается. В случае инерционного осаждения на поверхность жидкости металлических частиц происходит погружение источника в вещество. При частичном погружении источника большая часть его энергии расходуется на разогрев поверхностного слоя жидкости. Частица быстрее остывает и меньше тепла поступает на нагрев формирующейся парогазовой смеси.

Из результатов выполненных численных исследований следует, что в системе «разогретая частица – жидкость – окислитель» возможна реализация трех режимов зажигания, отличающихся интервалами времен  $\tau_3$  и положением зоны локализации ведущей химической реакции (рис. 3).

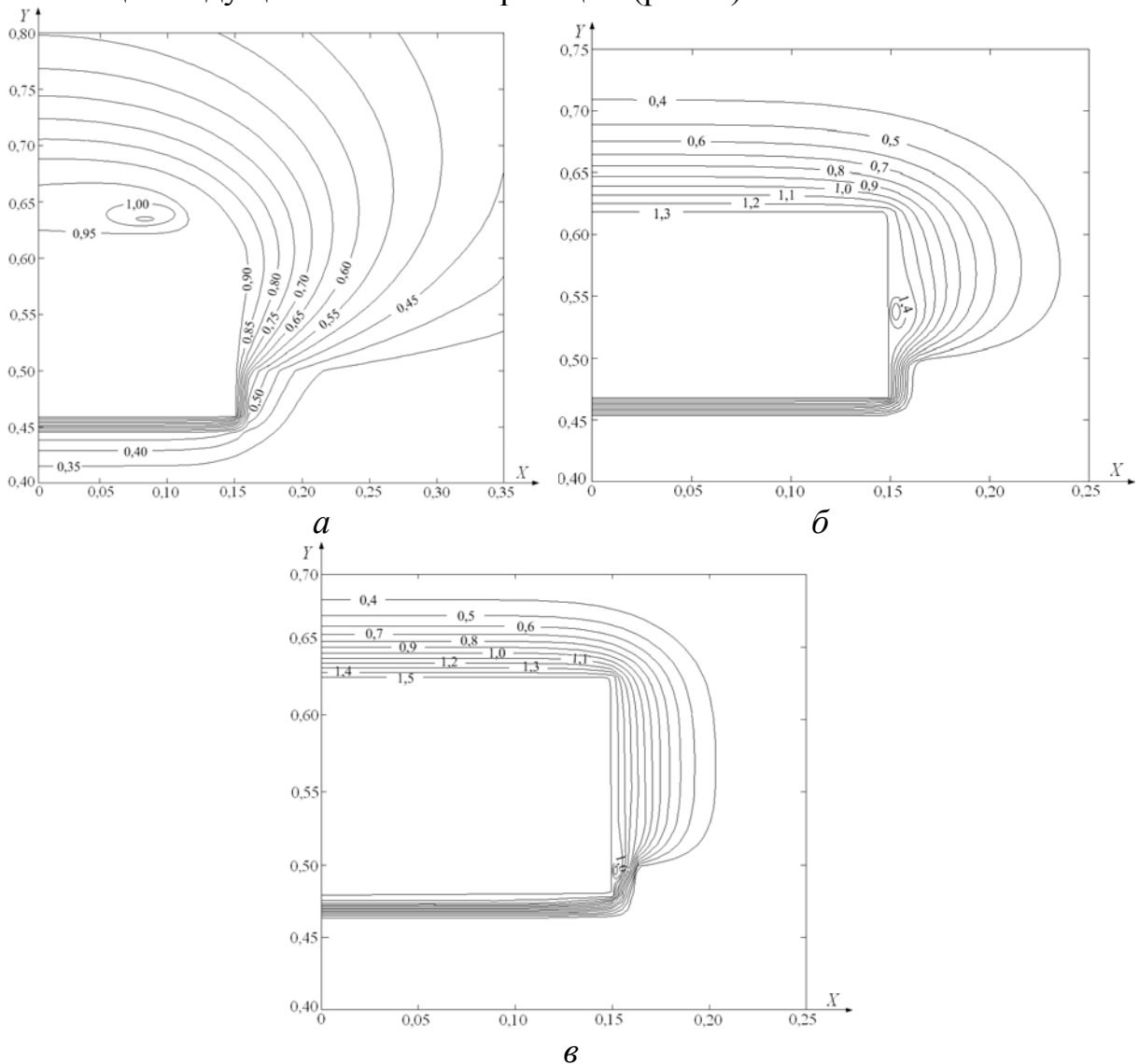


Рис. 3. Изотермы ( $\Theta$ ) системы «жидкое топливо – частица – окислитель» при  $\Theta_q=1$  ( $\tau_3=0,915$ ),  $\Theta_q=1,3$  ( $\tau_3=0,304$ ),  $\Theta_q=1,7$  ( $\tau_3=0,016$ )

Зона воспламенения располагается: в газовой области над частицей (первый режим (рис. 3, *a*)), вблизи боковой грани частично погруженного в вещество источника нагрева (второй режим (рис. 3, *б*)), а также в паровом зазоре между погружающейся частицей и жидкостью (третий режим (рис. 3, *в*)).

Установлено, что при повышении температуры источника нагрева  $\Theta_{\text{ч}}$  размеры парового зазора между ним и жидкостью увеличиваются (рис. 3) за счет подвода большей доли энергии и, как следствие, более интенсивного испарения горючего. При понижении  $\Theta_{\text{ч}}$  увеличивается глубина погружения частицы в жидкость. Размеры области прогрева жидкого вещества возрастают. Однако в таких условиях большая часть энергии источника расходуется на нагрев и испарение жидкости. За счет оставшейся аккумулированной в частице энергии разогревается парогазовая смесь. Так как при понижении  $\Theta_{\text{ч}}$  величина этой доли энергии уменьшается, то вероятность зажигания также снижается. Показано, что при  $\Theta_{\text{ч}} < 0,9$  и остальных адекватных условиях разогретые стальные частицы погружаются в жидкость без реализации условий воспламенения.

На примере стальной и алюминиевой частиц впервые исследовано влияние процесса кристаллизации материала источника нагрева, находящегося в расплавленном состоянии, на условия тепломассопереноса. Полученные в результате численного анализа теоретические следствия показывают, что значения времен задержки зажигания жидкостей расплавленными частицами с учетом их кристаллизации при остывании меньше аналогичных показателей для систем с твердыми частицами (при кристаллизации выделяется дополнительная энергия). Однако следует особо подчеркнуть, что это снижение значительно (20÷25 %) только в области очень высоких температур (более 1800 К) частиц.

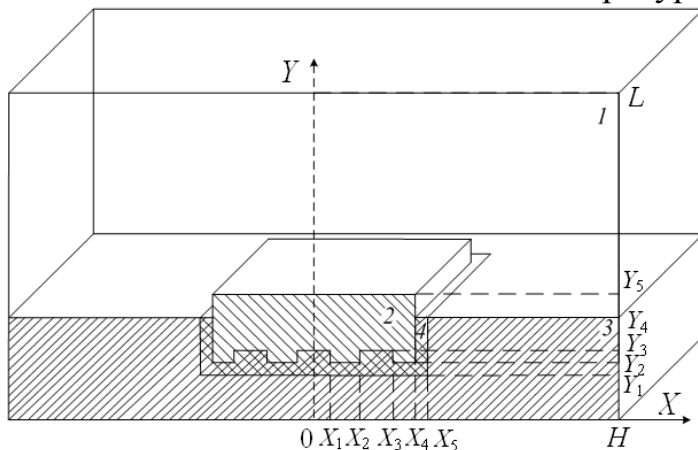


Рис. 4. Схема области решения задачи при  $0 < \tau < \tau_3$ : 1 – парогазовая смесь, 2 – частица, 3 – жидкость, 4 – слой паров горючего

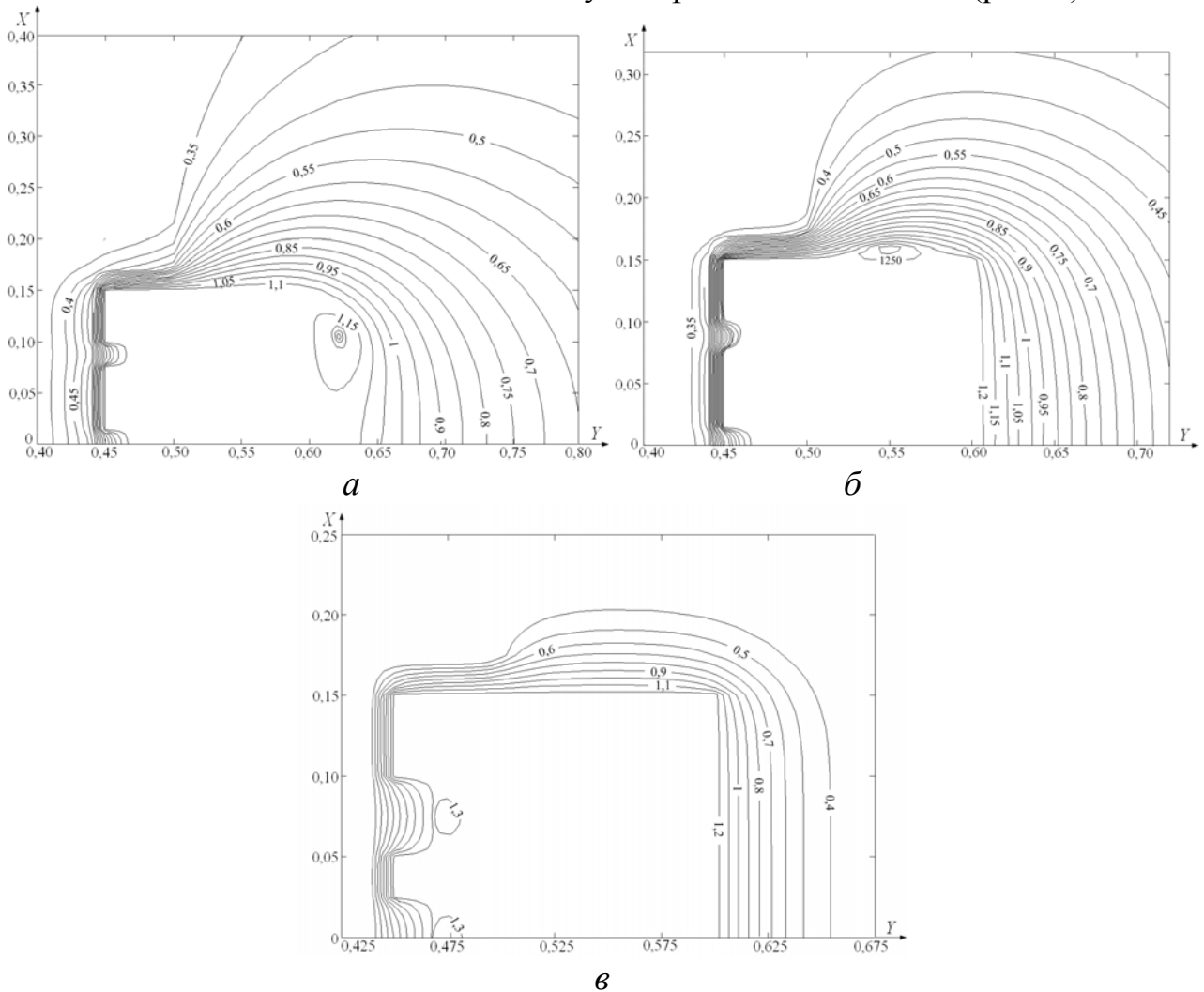
ницы источника нагрева с жидкостью отражает наиболее общие признаки известных элементов шероховатости. Результаты проведенных теоретических исследований позволяют утверждать, что процессы тепломассопереноса при зажигании жидкостей шероховатыми частицами протекают за меньшие интервалы времени по сравнению с гладкими источниками энергии. С увеличением разме-

Как правило, разогретые неметаллические и металлические частицы, образующиеся в результате технологических процессов, имеют шероховатые поверхности и пористую структуру. Численный анализ этих факторов выполнен в системе «шероховатая частица, погружающаяся в жидкость – жидкое горючее вещество – окислитель» (рис. 4). Выбранная при моделировании конфигурация гра-



ров элементов шероховатости поверхности источника энергии (при неизменных внешних размерах) и соответствующим уменьшением его массы возрастает площадь контакта жидкости с нижней гранью частицы. В таких условиях процесс испарения жидкого вещества интенсифицируется, больше подогретых паровых масс выходит из-под частицы, источник нагрева погружается на меньшую глубину, больше тепла передается формирующейся парогазовой смеси. Как следствие, зажигание происходит при меньших значениях  $\tau_3$  по сравнению с гладкими источниками.

Установлено, что варьирование размеров элементов шероховатости поверхности частицы  $H_{ш}$ ,  $L_{ш}$  и ее начальной температуры  $\Theta_ч$  приводит к изменению положения зоны локализации ведущей реакции окисления (рис. 5).



$\Theta_{\text{ч}} < 1,2$  энергетического запаса частицы недостаточно для разогрева парогазовой смеси вблизи границы испарения до критических температур, при которых происходит ускорение реакции окисления паров горючего. Только после дополнительного подогрева паровых масс, движущихся вдоль боковых граней частицы, и их смешения над источником нагрева увеличивается температура смеси, возрастает концентрация паров горючего и происходит воспламенение. При более интенсивном нагреве топлива ( $\Theta_{\text{ч}} \geq 1,2$ ) реализуется второй режим зажигания (рис. 5, б). В этом случае энергии разогретой частицы достаточно для воспламенения парогазовой смеси вблизи границы испарения в малой окрестности боковой поверхности источника нагрева. Этот режим аналогичен второму режиму для гладких частиц (рис. 3, б). При повышении температуры ( $\Theta_{\text{ч}} \geq 1,2$ ) источника и увеличении размеров элементов шероховатости до  $H_{\text{ш}}=0,2$ ,  $L_{\text{ш}}=0,4$  зона воспламенения смещается вдоль боковой грани частицы в область парового зазора между нижней поверхностью источника нагрева и испаряющейся жидкостью. Формируется несколько зон локализации ведущей химической реакции в элементах шероховатости нагретой частицы (рис. 5, в). Этот результат обусловлен поступлением дополнительного разогретого воздуха, содержащегося в элементах шероховатости, к границе испарения. В таких условиях смешение компонентов и разогрев формирующейся смеси проходят быстрее, как следствие, уменьшается инерционность зажигания.

Достаточно часто для анализа процессов тепломассопереноса в различных системах необходимы упрощенные модели, не требующие применения мощных вычислительных комплексов и больших ресурсов времени. В тоже время следует отметить, что наиболее полную информацию об особенностях процессов переноса тепла и массы можно получить при использовании пространственных постановок. В третьей главе приведены результаты проведенных впервые численных исследований для одномерных, двумерных и пространственных моделей тепломассопереноса при зажигании жидкостей в условиях локального нагрева. Установлено, что при варьировании энергетического запаса источника нагрева в достаточно широком диапазоне отклонения характеристик процессов тепломассопереноса для одномерных и двумерных моделей достигают 30 %. При этом для пространственных и двумерных постановок такие отклонения составляют менее 10 %. Это обусловлено тем, что использование одномерных моделей не позволяет учесть в полном объеме вдув паров горючего и их разогрев за счет теплообмена с боковыми гранями частицы. Результаты проведенного теоретического анализа дают основание утверждать, что в области высоких температур (более 1400 К) источников нагрева процессы тепломассопереноса протекают настолько интенсивно, что роль многих факторов становится незначительной. В таких условиях одномерные, двумерные и пространственные постановки дают достаточно близкие результаты. Например, полученные численно температурные поля (рис. 6) на базе одномерной и пространственной постановок задач тепломассопереноса хорошо соответствуют рис. 3.

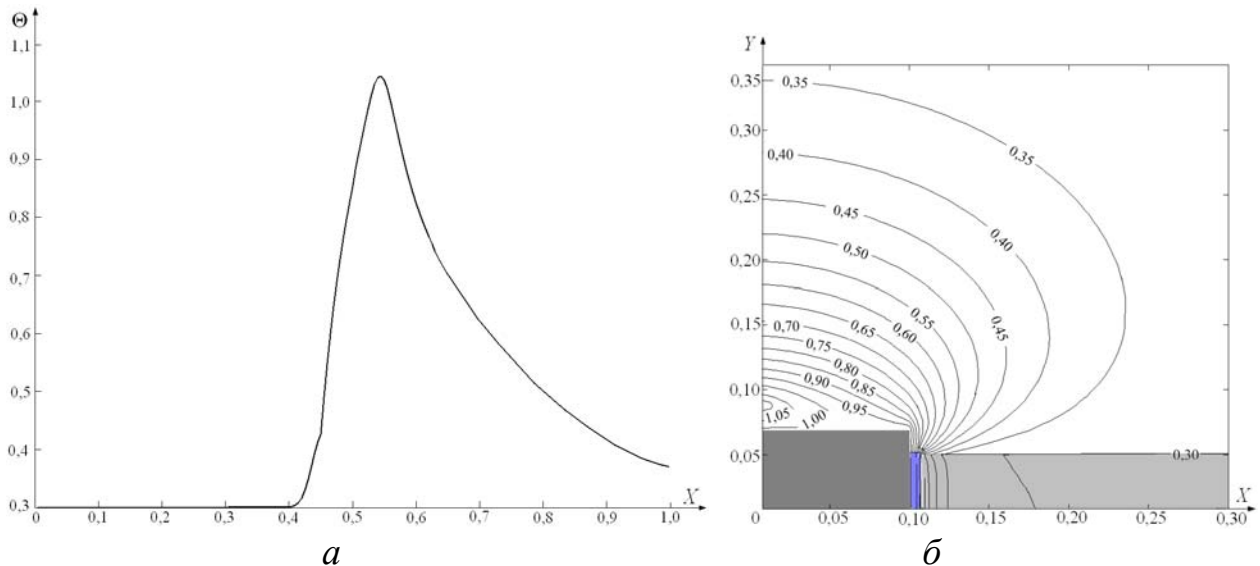


Рис. 6. Распределение температуры для одномерной (а) и изотермы ( $\Theta$ ) для пространственной (б) моделей в момент воспламенения при  $\Theta_q=1$

Следует подчеркнуть, что смоделировать точно форму реальных частиц достаточно сложно. Как правило, металлические и неметаллические частицы, образующиеся в ряде технологических процессов (сварка, резка, шлифование металлов) и являющиеся продуктами сгорания типичных горючих материалов (древесина, уголь), имеют форму неправильных многогранников с характерными размерами от  $1 \cdot 10^{-6}$  м до  $1 \cdot 10^{-2}$  м и находятся в твердом, реже в жидком агрегатном состоянии. Поэтому особый интерес представляет анализ влияния конфигурации локального источника нагрева на условия тепломассопереноса.

**В четвертой главе** приведены результаты численного исследования процессов тепломассопереноса при зажигании пленок жидких горючих веществ разогретыми частицами в форме полусферы, цилиндрического диска и параллелепипеда неограниченной длины. Толщина пленок принималась сопоставимой с размерами источников энергии. Проанализированы масштабы влияния конфигурации частиц на характеристики зажигания жидкостей (рис. 7).

Полученные в результате выполненных численных исследований теоретические следствия показывают, что при относительно невысоких температурах источника нагрева ( $\Theta_q < 1,2$ ) значения  $\tau_z$  для частиц в форме полусферы, диска и параллелепипеда существенно (более 30 %) отличаются. Это вызвано тем, что стадия прогрева парогазовой смеси при  $\Theta_q < 1,2$  играет главную роль в общем комплексе процессов тепломассопереноса в малой окрестности источника нагрева. Тела в форме полусферы быстрее остывают согласно общей теории теплотеноса по сравнению с дисками и параллелепипедами, так как им свойственны наименьшие отношения площадей поверхности к занимаемому объему.

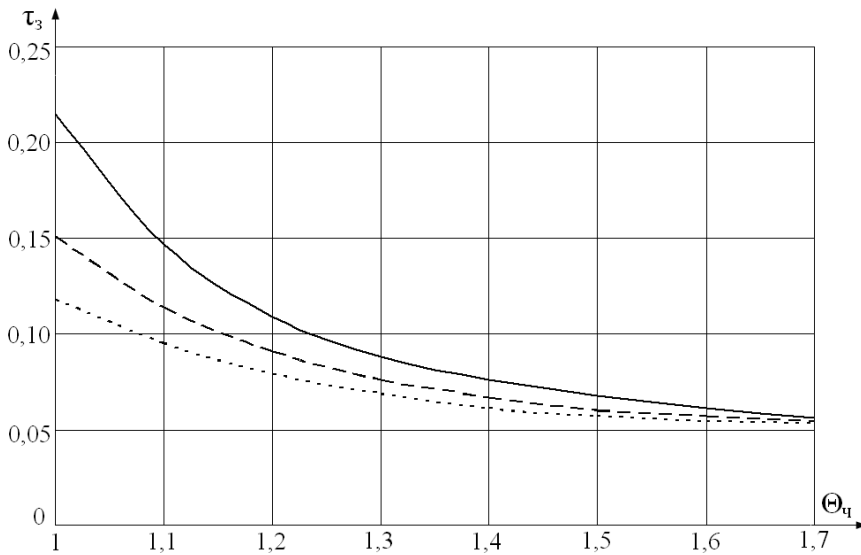


Рис. 7. Зависимость времени задержки зажигания от начальной температуры частицы  $\Theta_n$  (— полусфера радиусом  $R_n=0,15$ ; - - диск размерами  $R_n=Z_n=0,15$ ; - - - параллелепипед размерами  $H_n=L_n=0,15$ )

При повышении  $\Theta_n$  увеличивается запас энергии источников. В таких условиях прогрев смеси реализуется быстрее и уменьшается влияние этой стадии на значения времен задержки зажигания. При высоких температурах ( $\Theta_n > 1,7$ ) влияние конфигурации источника нагрева не существенно (отклонения значений  $\tau_3$  для частиц в форме полусферы, диска и параллелепипеда не превышают 1 %).

Для зависимостей времен задержки зажигания от температуры частиц различной конфигурации (рис. 7) получено общее аппроксимационное выражение (при  $1 < \Theta_n < 1,7$ ):  $\tau_3 = 0,332 - 3,661\Theta_n + 17,029\Theta_n^2 - 26,667\Theta_n^3$ .

Также получены аппроксимационные выражения, связывающие характерный размер источника и время задержки зажигания при постоянной температуре частицы ( $\Theta_n = 1,3$ ):

полусфера радиусом  $R_n$ :  $\tau_3 = 1,085 - 14,587R_n + 69,467R_n^2 - 109,631R_n^3$ ,

цилиндрический диск при  $R_n = Z_n$ :  $\tau_3 = 0,332 - 3,661R_n + 17,029R_n^2 - 26,667R_n^3$ ,

параллелепипед неограниченной длины при  $H_n = L_n$ :

$\tau_3 = 0,231 - 2,341H_n + 11,086H_n^2 - 17,778H_n^3$ .

По результатам анализа впервые выделены особенности взаимодействия разогретых частиц с пленками жидкостей, толщина которых сопоставима с размерами источников энергии. Установлено, что доминирующую роль в таких системах играет отношение площадей контакта частицы с жидкостью и парогазовой смесью ( $S^* = S_{чж}/S_{чс}$ ). Показано (рис. 8), что масштабы влияния  $S^*$  на условия тепломассопереноса при варьировании энергетического запаса источника тепла существенно меняются.

Установлено, что при  $S^* = 0,5$  и  $S^* = 2$  значения  $\tau_3$  отличаются в несколько раз. Минимальное время задержки зажигания  $\tau_3$  соответствует  $S^* = 0,5$ . Этот результат позволяет сделать обоснованное заключение о том, что для минимизации инерционности зажигания площадь  $S_{чс}$  должна превышать площадь контакта частицы с жидкостью  $S_{чж}$  в два раза. При уменьшении  $S^*$  относительно  $S^* = 0,5$  значения  $\tau_3$  увеличиваются, а при  $S^* < 0,125$  зажигание не происходит.

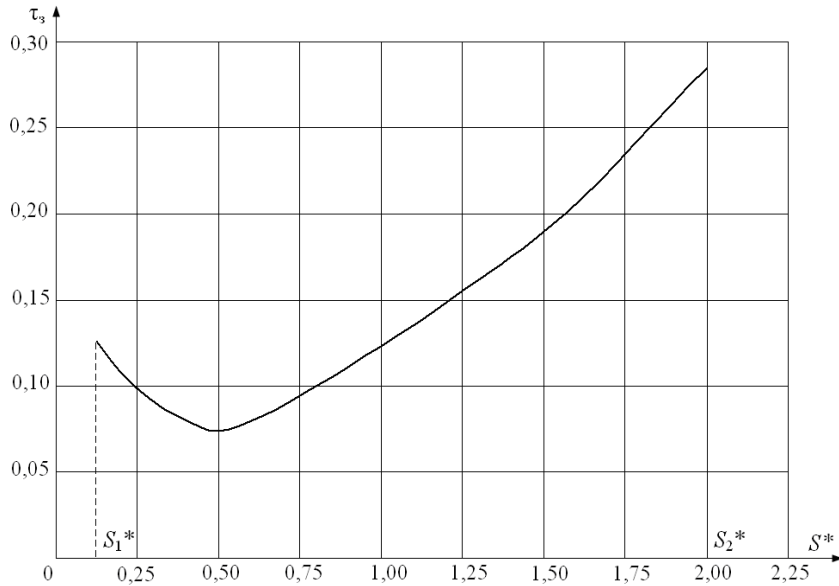


Рис. 8. Зависимость времени задержки зажигания  $\tau_3$  от отношения  $S^*$  при  $\Theta_4=1,2$  ( $S_1^*=0,125$ ,  $S_2^*=2$ )

ется массовая скорость испарения, и концентрация горючего в газовой области в малой окрестности частицы возрастает медленно, то значения  $\tau_3$  увеличиваются. При повышении  $S^*$  увеличивается площадь контакта разогретой частицы с жидкостью. В таких условиях увеличивается доля энергии источника, расходуемая на нагрев и испарение вещества. Как следствие, частица быстрее отдает тепло жидкости, меньше энергии остается на разогрев формирующейся парогазовой смеси. При  $S^*>2$  условия воспламенения не реализуются (происходит полное погружение частицы в жидкое вещество).

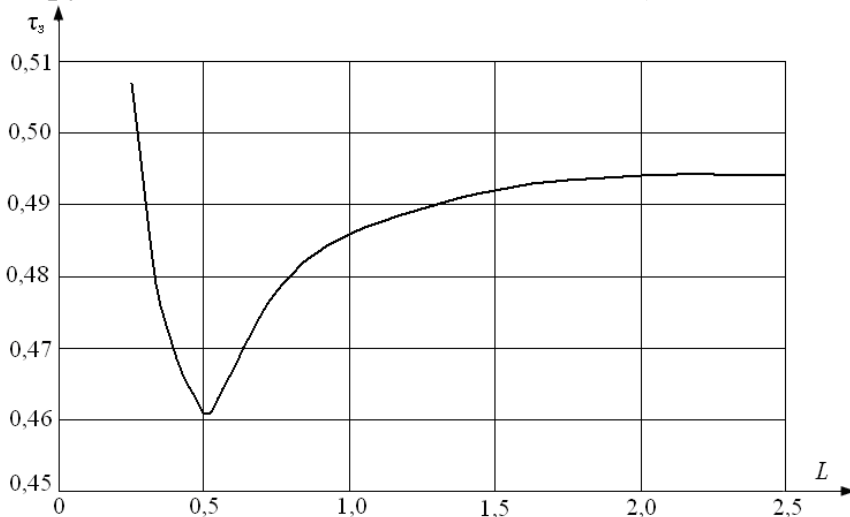


Рис. 9. Зависимость времени задержки зажигания от величины  $L$  при  $\Theta_4=1$

зующего расстояние между частицами (рис. 9). Показано, что в зависимости от величины  $L$  реализуются три режима зажигания (1 – при  $L < L^*$ , 2 – при  $L = L^*$ , 3 – при  $L > L^*$ ). Символом  $L^*$  обозначено значение  $L$ , при котором достигается минимальное  $\tau_3$ . При  $\Theta_4=1$  параметр  $L^*$  составляет 0,5.

Установленная закономерность объясняется тем, что при понижении  $S^*$  за счет уменьшения толщины пленки увеличивается время прогрева и испарения жидкости. При высокой температуре воздуха у боковой грани частицы вблизи поверхности жидкого вещества разогрев парогазовой смеси проходит интенсивно. Но так как при понижении  $S^*$  уменьшается

На базе системы «две разогретые частицы – пленка жидкого вещества – окислитель» впервые выполнен анализ «совместного» влияния на условия тепломассопереноса нескольких источников ограниченной энергоемкости. Установлена зависимость времени задержки зажигания от безразмерного параметра  $L$ , характери-

Выполненные теоретические исследования показали, что при повышении температуры частицы значение параметра  $L^*$  увеличивается. Это обусловлено тем, что с повышением  $\Theta_{\text{ч}}$  возрастает теплосодержание источников и усиливается влияние соседних частиц на процессы нагрева пленки жидкого вещества и парогазовой смеси. При уменьшении температуры источников относительно  $\Theta_{\text{ч}}=1$  величина  $L^*$  уменьшается и влияние  $L$  на  $\tau_3$  усиливается.

В результате анализа полученных теоретических следствий установлена важная особенность тепломассопереноса в системе «две разогретые частицы – пленка жидкого вещества – окислитель», которая заключается в том, что вне зависимости от расстояния между источниками энергии формируются две зоны ведущей химической реакции окисления. Полученный результат позволяет сделать обоснованное заключение о том, что для численного исследования тепломассопереноса при зажигании жидких горючих веществ несколькими разогретыми до высоких температур частицами при расстоянии между ними больше некоторого критического  $L^*$  можно использовать модель одиночной частицы.

Также показано, что действие внешнего потока воздуха (вынужденной конвекции окислителя) является достаточно важным фактором в системах с пленками жидкостей и источниками ограниченной энергоемкости. На рис. 10 представлена зависимость времени задержки зажигания  $\tau_3$  от скорости воздуха  $U_0$  и температуры  $\Theta_{\text{ч}}$  в виде поверхности, разделяющей области изменения этих параметров, при которых реализуются условия зажигания (ниже поверхности) и не реализуются (выше ее).

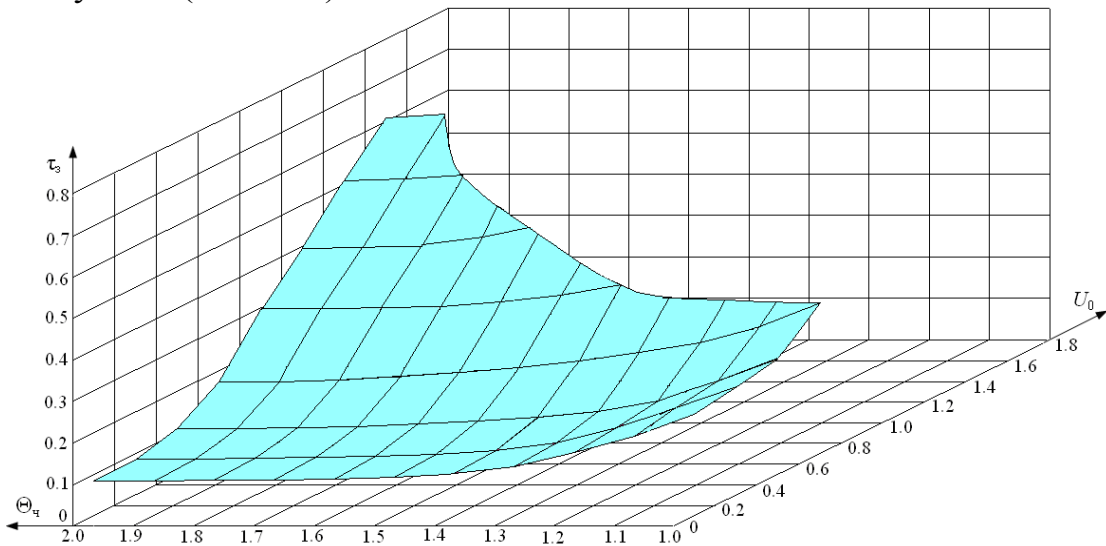


Рис. 10. Зависимость времени задержки зажигания от начальной температуры источника энергии и скорости воздушных масс

Результаты проведенных теоретических исследований дают основание отметить, что при увеличении скорости движения воздушных масс и уменьшении температуры частицы вынужденная конвекция окислителя интенсифицируется, а диффузионно-конвективный перенос паров горючего замедляется. Вследствие этого инерционность зажигания возрастает. При уменьшении же скорости движения воздушных масс и увеличении температуры частицы диффузионно-

конвективный перенос паров горючего интенсифицируется. Это приводит к уменьшению времен задержки зажигания. Установлено, что в достаточно широком диапазоне изменения скоростей воздуха и температур частиц вынужденная конвекция окислителя и диффузионно-конвективный перенос паров горючего оказывают противоположное влияние.

На базе вычисленных предельных скоростей окислителя  $U_{п}$ , при которых зажигание не происходит, определены критические значения числа Рейнольдса для потока воздуха. Для частиц с начальной температурой, близкой к максимально возможной ( $\Theta_{ч}=2$ ), и размерами  $R_{ч}=Z_{ч}=0,1$  зажигание жидкого вещества происходит только при  $Re < 1,3 \cdot 10^3$ . В условиях относительно невысоких температур ( $\Theta_{ч}=1,3$ ) частиц предельное значение числа Рейнольдса составляет  $8 \cdot 10^2$ .

Также установлены масштабы влияния радиационного теплоотвода от нагретой до высоких температур частицы на условия тепломассопереноса при зажигании жидкостей. Показано, что роль этого фактора при  $\Theta_{ч} > 1,5$  мала. При снижении  $\Theta_{ч}$  влияние радиационного теплоотвода на характеристики зажигания усиливается. Установленная особенность обусловлена тем, что при понижении  $\Theta_{ч}$  уменьшается энергетический запас частиц. Как следствие, уменьшается доля энергии источника, расходуемая при разогреве жидкости и прогреве формирующейся парогазовой смеси. Это приводит к увеличению инерционности зажигания. Дополнительная энергия, отводимая от разогретой частицы за счет лучистого теплообмена, приводит к ускорению процессов тепломассопереноса и химического реагирования. При высоких температурах в силу малой длительности процессов зажигания этот эффект практически незаметен.

По результатам выполненных теоретических исследований сформулированы аппроксимационные выражения для зависимости времени задержки зажигания от температуры частицы при типичных характерных размерах:

$$\text{при } R_{ч}=Z_{ч}=0,15 \quad \tau_3 = 93,851 - 194,671\Theta_{ч} + 134,771\Theta_{ч}^2 - 31,134\Theta_{ч}^3,$$

$$\text{при } R_{ч}=Z_{ч}=0,2 \quad \tau_3 = 52,906 - 111,321\Theta_{ч} + 78,155\Theta_{ч}^2 - 18,302\Theta_{ч}^3,$$

$$\text{при } R_{ч}=Z_{ч}=0,25 \quad \tau_3 = -10,288 + 23,762\Theta_{ч} - 18,078\Theta_{ч}^2 + 4,543\Theta_{ч}^3.$$

**В пятой главе** приведены результаты численного моделирования процессов тепломассопереноса при зажигании парогазовой смеси неподвижной разогретой проволокой, движущимися по различным траекториям нагретыми частицами и сфокусированным потоком излучения. Проанализированы выявленные зависимости времени задержки зажигания парогазовой смеси от влажности и температуры воздуха, расстояния между источником нагрева и поверхностью жидкости, температуры, размеров, скорости и траектории движения источника.

В результате выполненных теоретических исследований впервые установлены особенности тепломассопереноса, связанные с изменением положения зоны локализации ведущей химической реакции в зависимости от скорости и траектории движения разогретой частицы. На рис. 11 представлены температурное поле и изотермы при зажигании парогазовой смеси движущейся параллельно поверхности жидкости частицей с постоянной скоростью  $U_{ч}$ . Зона ведущей химической реакции окисления локализуется в «следе» частицы. Это обусловле-

но тем, что достаточные для воспламенения значения температуры смеси и концентрации в ней паров горючего достигаются через определенный интервал времени после контакта частицы с парогазовой смесью, в течение которого источник нагрева удаляется от зоны воспламенения.

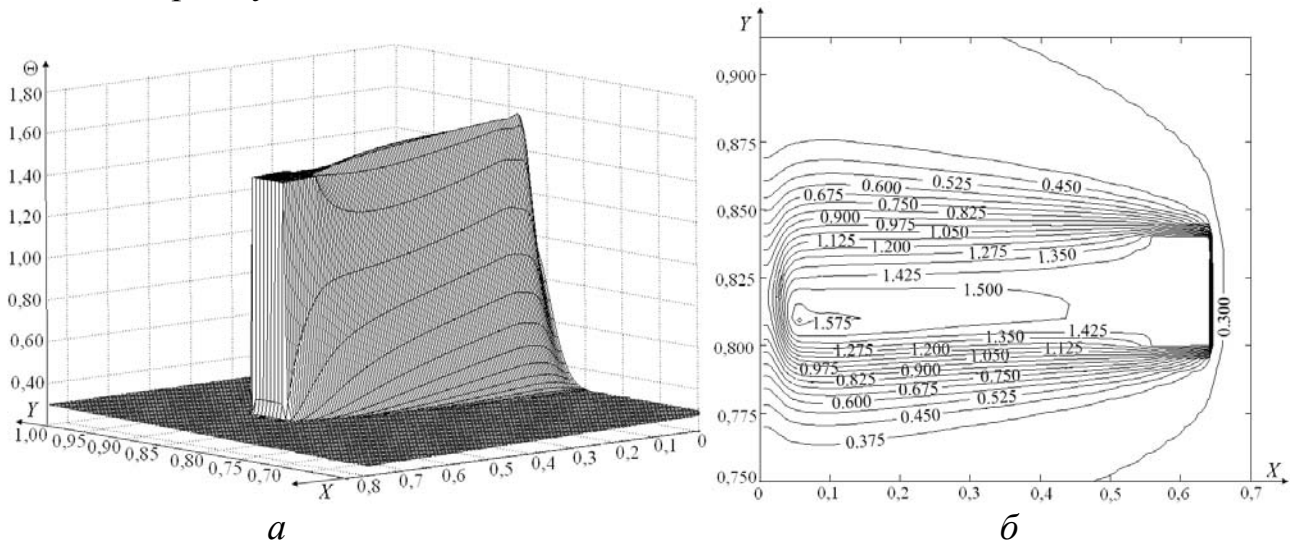


Рис. 11. Распределение температур (а) и положение характерных изотерм (б) в момент воспламенения при  $\Theta_q=1,5$ ,  $U_q=0,5$  м/с

По результатам численного анализа определены условия, при которых зона ведущей химической реакции окисления формируется вблизи нижней и торцевой поверхностей движущейся частицы, а также критические условия, при которых зажигание парогазовой смеси не происходит.

В пятой главе также представлены результаты численных исследований процессов тепломассопереноса при зажигании смеси паров жидкого горючего вещества и окислителя сфокусированным потоком излучения. Выполнен анализ масштабов влияния энергетического запаса и площади зоны действия потока излучения на условия тепломассопереноса. Для определения критических условий зажигания потоком излучения пленки жидкого конденсированного вещества при испарении последнего введен параметр  $\chi$  (рис. 12). Этот параметр характеризует отношение энергии, подведенной к пленке жидкости в зоне действия излучения, и энергии, затраченной на испарение жидкого вещества на этом участке. В итоге проведенных численных исследований сделано обоснованное заключение о том, что для реализации условий воспламенения в системе «пленка жидкого топлива – поток излучения – парогазовая смесь» при выбранных параметрах процесс подводимая к веществу энергия должна более, чем в 8 раз ( $\chi_{пр}=8$ ) превышать долю энергии, расходуемую при испарении жидкости.

Впервые выявлены специфические особенности тепломассопереноса при поглощении энергии излучения формирующейся парогазовой смесью. Установлено, что при поглощении энергии излучения в газовой фазе инерционность процессов тепломассопереноса вблизи поверхности жидкости возрастает. Это обусловлено уменьшением доли энергии, подводимой к жидкому топливу, как следствие, понижением массовой скорости испарения вещества. В таких услови-



ях скорость вдува паров горючего в газовую фазу снижается и замедляется их смешение с окислителем.

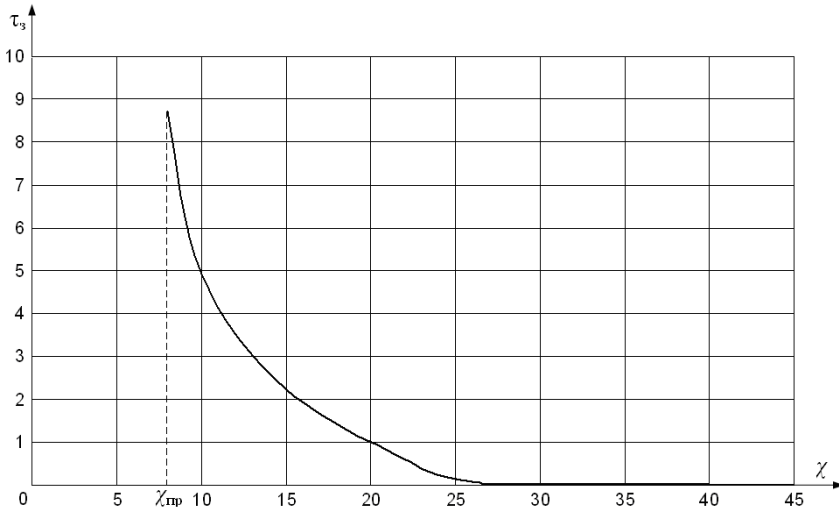


Рис. 12. Зависимость времени задержки зажигания от параметра  $\chi$

Показано, что при незначительном поглощении энергии излучения в газовой фазе механизм зажигания несколько меняется. Жидкое топливо интенсивно испаряется за счет энергии излучения. Пары горючего вдуваются в газовую фазу непрерывно и вступают в реакцию с окислителем. Однако пары не подогреваются дополнительно за счет

поглощения энергии излучения. В этом случае зажигание происходит при превышении критических концентраций компонентов смеси в условиях относительно невысоких температур.

**Шестая глава** посвящена анализу процессов тепломассопереноса при деформации и растекании капель горючих жидкостей по поверхности массивного нагретого тела (рис. 13), сравнению режимов зажигания жидкостей источниками ограниченной энергоемкости малых размеров и капель горячей массивной поверхностью.

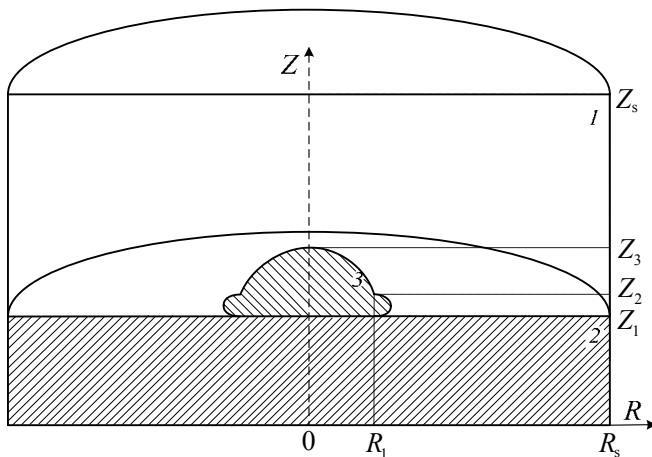


Рис. 13. Схема области решения задачи тепломассопереноса в системе «капля жидкого топлива – металлическая подложка – воздух»:

1 – парогазовая смесь, 2 – стальная подложка, 3 – капля жидкого топлива

Результаты проведенных теоретических исследований позволяют утверждать, что при близких по математическому описанию моделях тепломассопереноса в системах «капля жидкости – горячая подложка – окислитель» времена  $\tau_3$  на несколько порядков меньше аналогичных параметров для систем «жидкое вещество – разогретая частица – окислитель». Это обусловлено существенными отличиями скоростей процессов тепломассопереноса и химических реакций.

Численный анализ показал, что растекание замедляет прогрев и испарение капли. Это обусловлено тем, что времена прогрева, испарения жидкости, окисления формирующейся парогазовой смеси, много меньше гидродинамического времени (растекания). При деформации и растекании капли жидкости по нагретой поверхности увеличиваются радиус контактного пятна и площадь испарения жидкости. Но совместно с возрастанием площади испарения увеличивается площадь капли, которая «блокирует» выход паров горючего. При малых скоростях растекания и высоких температурах подложки скорость выхода паров горючего превышает гидродинамические скорости течения слоев капли. Разогретые пары горючего вступают в химическую реакцию с окислителем, которая ускоряется при достижении критических температур и концентраций.

Установлено, что при высоких скоростях растекания ( $V_{\text{кап}} > 0,25$ ) слои капли «закрывают» площадь испарения. Формирующиеся пары горючего создают контуры завихрений вблизи основания капли. Лишь малая доля этих паров выходит в газовую фазу и вступает в химическую реакцию с окислителем. При снижении скорости вдува паров горючего в парогазовую смесь увеличивается инерционность зажигания.

Впервые получены аппроксимационные выражения для времен задержки зажигания при различных скоростях растекания капель ( $0 < V_{\text{кап}} < 0,5$ ) и температурах подложки  $\Theta_{\text{п}}$ :

$$\begin{aligned} \text{при } \Theta_{\text{п}}=0,7 \quad \tau_3 &= 0,044 - 0,012V_{\text{кап}} + 1,321V_{\text{кап}}^2, \\ \text{при } \Theta_{\text{п}}=1 \quad \tau_3 &= 0,019 + 0,118V_{\text{кап}} - 1,628V_{\text{кап}}^2 + 7,252V_{\text{кап}}^3, \\ \text{при } \Theta_{\text{п}}=1,5 \quad \tau_3 &= 0,004 + 0,031V_{\text{кап}} - 0,335V_{\text{кап}}^2 + 1,184V_{\text{кап}}^3. \end{aligned}$$

Результаты выполненных теоретических исследований позволяют сделать обоснованный вывод о том, что реализация условий зажигания капли жидкости определяется достаточно сложным совместным влиянием теплосодержания горячей металлической подложки и динамики растекания капли.

В **заключении** подведены основные итоги выполненных исследований и обобщены теоретические следствия.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложен новый подход к теоретическому анализу тепломассопереноса при зажигании жидких конденсированных веществ и парогазовых смесей источниками ограниченной энергоемкости, отличающийся от известных учетом полного комплекса взаимосвязанных процессов тепломассопереноса, фазовых превращений, химического реагирования, гидродинамических процессов, применением новых алгоритмов численного моделирования и оценки достоверности полученных результатов.
2. Впервые сформулированы физические модели тепломассопереноса при зажигании жидкостей и парогазовых смесей для большой группы наиболее типичных и широко распространенных систем: «нагретая частица – жидкое горючее вещество – окислитель», «нагретая частица – пленка жидкого горючего вещества – окислитель», «неподвижная разогретая проволока – смесь паров жидкого ве-

щества с окислителем», «разогретая частица – ткань, пропитанная жидким горючим веществом – окислитель», «движущаяся разогретая частица – смесь паров жидкого вещества с окислителем», «сфокусированный поток излучения – жидкое вещество – окислитель», «капля жидкого вещества – массивное нагретое тело – окислитель». Это позволяет использовать полученные результаты для анализа закономерностей взаимодействия жидкостей и локальных источников энергии в различных условиях.

3. Впервые поставлены и решены нелинейные нестационарные задачи тепло-массопереноса при газофазном зажигании жидких конденсированных веществ одиночной нагретой до высоких температур частицей малых размеров с учетом основных физико-химических процессов: теплоперенос в твердой, жидкой и газовой фазах, испарение жидкости, диффузионно-конвективный массоперенос паров горючего в среде окислителя, радиационный теплоотвод энергии и кристаллизация материала источника нагрева, формирование парового зазора между частицей и поверхностью жидкости, погружение источника в жидкость.

4. Впервые выявлены масштабы влияния условий контакта источника нагрева с испаряющейся жидкостью и формирующейся парогазовой смесью на характеристики процессов тепло-массопереноса. Проанализированы гидродинамические процессы формирования парового зазора между источником и жидким веществом, внедрения нагретого тела в жидкость в условиях фазовых переходов, а также отношения площадей погруженной и открытой поверхностей источника. Определены роли теплоотвода в жидкость и смесь при инициировании реакции окисления паров вещества. Впервые показано, что условия тепло-массопереноса, характеризующиеся минимальной инерционностью, реализуются при положении источника энергии на поверхности жидкости.

5. Впервые установлены особенности (несколько режимов тепло-массопереноса с последующим зажиганием) тепло-массопереноса при зажигании жидкостей несколькими источниками ограниченной энергоемкости, внедренными в жидкое вещество. Определены условия, при которых «совместное» действие источников мало и описание таких процессов возможно в рамках системы «одиночный источник нагрева – жидкость – окислитель».

6. Установлено, что в отличие от твердых конденсированных веществ при зажигании жидкостей источниками ограниченной энергоемкости возможны условия, при которых конфигурация источника играет определяющую роль. Для анализа этого фактора впервые решена группа задач тепло-массопереноса при взаимодействии пленок жидкостей с горячими частицами в форме параллелепипеда, цилиндрического диска и полусферы.

7. Показано, что при контакте источника энергии, находящегося в расплавленном состоянии, процессы прогрева и испарения жидкости протекают быстрее. Это обусловлено выделением дополнительной энергии при кристаллизации материала источника в процессе его остывания.

8. Впервые установлены масштабы влияния шероховатости поверхности погруженного в жидкое вещество источника нагрева на характеристики зажигания.

В зависимости от размеров элементов шероховатости и энергетического запаса источника – разогретой частицы выделены три режима зажигания. Аналогичные режимы установлены при контакте жидкостей с гладкими источниками. Показано, что при погружении разогретых гладких частиц в отличие от шероховатых зажигание ни при каких условиях не происходит в паровом зазоре под источником.

9. Установлено, что при совместном влиянии естественной конвекции и диффузии интенсивность химической реакции окисления паров жидкого вещества с окислителем характеризуется в большей степени не диффузионным переносом, а переносом тепла вместе с парами горючего за счет конвекции. Впервые исследован сложный процесс смешанной конвекции паров горючего и окислителя в малой окрестности испаряющейся жидкости и остывающего источника нагрева. Установлены условия, при которых вынужденная конвекция окислителя играет доминирующую роль при зажигании парогазовой смеси.

10. Впервые сформулированы упрощенные одномерные модели тепломассопереноса в системах «локальный источник нагрева – жидкое топливо – окислитель». Определены условия, при которых возможно их использование.

11. Впервые поставлены и решены задачи тепломассопереноса при зажигании разогретой частицей смесей окислителя и паров жидких веществ, поступающих с поверхности ткани, пропитанной горючим веществом. Установлены зависимости времен задержки зажигания от начальной температуры источника и объёмной доли жидкости в материале ткани, теплофизических характеристик взаимодействующих веществ. Определено, что даже при относительно небольшой объёмной доле жидкости возможно возгорание.

12. Впервые установлены масштабы влияния на условия тепломассопереноса и реакций окисления группы факторов (энергетический запас, траектория, скорость движения и удаленность источника нагрева от поверхности жидкости, температура и влажность воздуха) при зажигании смесей паров жидких веществ и окислителя движущимися по различным траекториям локальными источниками нагрева – разогретыми частицами.

13. Впервые поставлена и решена задача тепломассопереноса при зажигании пленки жидкого топлива непрерывно действующим сфокусированным потоком излучения. Установлены масштабы влияния поглощения энергии излучения формирующейся парогазовой смесью, а также соотношения между подводимой и расходуемой при испарении энергиями на условия разогрева жидкого вещества. Показано, что при поглощении энергии смесью времена задержки зажигания увеличиваются. Это обусловлено уменьшением доли энергии, подведенной к жидкости, и снижением массовой скорости испарения вещества.

14. Разработаны модели тепломассопереноса в системе «массивная разогретая подложка – капля жидкого топлива – окислитель», впервые учитывающие деформацию и растекание капли по нагретой поверхности с формированием парового зазора. Проведено сравнение условий тепломассопереноса при зажигании капель жидкостей массивными нагретыми телами и жидких горючих веществ

локальными источниками энергии. Определены масштабы влияния этих факторов на условия тепломассопереноса. Изучена сложная морфология капли (комбинация торообразного диска вблизи основания и сфероидального сегмента) при ее контакте с твердой подложкой. Установлены особенности формирования парового зазора под каплей, при котором она «блокирует» выход паров и их смешение с окислителем.

15. Впервые создана общая теория тепломассопереноса при зажигании жидких конденсированных веществ и парогазовых смесей в условиях локального подвода энергии, фазовых переходов и химического реагирования. Совокупность теоретических положений и выводов можно квалифицировать как новые крупные достижения в развитии теории тепломассопереноса при физико-химических превращениях.

16. Сформулированные теоретические следствия являются основой прогностического моделирования пожарной опасности технологических процессов, технических систем и условий работы различных специальных объектов с использованием, транспортировкой, хранением, добычей и переработкой горючих и легковоспламеняющихся жидкостей. Впервые получены аппроксимационные выражения, связывающие времена задержки зажигания жидких веществ с основными параметрами локальных источников энергии.

#### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Математическое моделирование зажигания жидкого горючего вещества нагретой до высоких температур частицей // Известия вузов. Физика. – 2007. – №9/2. – С. 103–112.
2. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Воспламенение пожароопасной жидкости одиночной «горячей» частицей // Пожаровзрывобезопасность. – 2007. – № 6. – С. 13–20.
3. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Зажигание накаливаемой одиночной частицей жидких углеводородных топлив // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – № 4. – С. 5–9.
4. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Особенности зажигания парогазовой смеси нагретой до высоких температур металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – № 3. – С. 25–33.
5. Kuznetsov G.V., **Strizhak P.A.** Heat and mass transfer at the ignition of a liquid substance by a single «hot» particle // Journal of Engineering Thermophysics. – 2008. – № 3. – P. 244–252.
6. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Влияние фазового состояния частиц металлов на условия зажигания пожароопасных жидкостей // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – № 4. – С. 17–21.
7. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Пожароопасность процессов взаимодействия разогретых до высоких температур частиц с тканями, пропитанными горючими жидкостями // Пожаровзрывобезопасность. – 2008. – № 5. – С. 16–22.

8. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Нагретые до высоких температур частицы металла, как источники локальных возгораний жидких веществ // *Пожарная безопасность.* – 2008. – № 4. – С. 72–76.
9. Kuznetsov G.V., **Strizhak P.A.** 3D Problem of heat and mass transfer at the ignition of a combustible liquid by a heated metal particle // *Journal of Engineering Thermophysics.* – 2009. – № 1. – P. 72–79.
10. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Пожарная опасность формирования разогретых до высоких температур частиц металлов в непосредственной близости от участков испарения горючих жидкостей // *Пожарная безопасность.* – 2009. – № 1. – С. 67–71.
11. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Тепломассоперенос при зажигании горячей частицей паров жидкого топлива, поступающих в воздух с поверхности пропитанной им ткани // *Инженерно-физический журнал.* – 2009. – № 3. – С. 454–460.
12. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Моделирование воспламенения жидкого вещества горячей частицей // *Химическая физика.* – 2009. – № 5. – С. 91–98.
13. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Особенности зажигания пленки жидкого топлива двумя разогретыми до высоких температур металлическими частицами // *Пожарная безопасность.* – 2009. – № 2. – С. 60–64.
14. **Стрижак П.А.** Анализ условий и характеристик пожароопасных процессов зажигания пленок жидких нефтепродуктов нагретыми до высоких температур металлическими частицами // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук.* – 2009. – № 9. – С. 236–240.
15. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Зажигание пленки дизельного топлива частицей расплавленного металла в форме полусферы // *Пожаровзрывобезопасность.* – 2009. – № 3. – С. 39–43.
16. Kuznetsov G.V., **Strizhak P.A.** The influence of heat transfer conditions at the hot particle–liquid fuel interface on the ignition characteristics // *Journal of Engineering Thermophysics.* – 2009. – № 2. – P. 162–167.
17. Kuznetsov G.V., **Strizhak P.A.** On peculiarities of heat and mass transfer in a hot metal particle–liquid fuel condensed substance–air system // *Journal of Engineering Thermophysics.* – 2009. – № 3. – P. 241–248.
18. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Численное исследование процесса зажигания парогазовой смеси движущейся разогретой металлической частицей // *Пожаровзрывобезопасность.* – 2009. – № 5. – С. 7–14.
19. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Влияние формы разогретой металлической частицы на характеристики процесса зажигания горючей жидкости // *Пожаровзрывобезопасность.* – 2009. – № 6. – С. 20–24.
20. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Влияние скоростей воздушных масс на характеристики зажигания пленок горючих жидкостей разогретыми частицами // *Пожарная безопасность.* – 2009. – № 3. – С. 96–100.
21. Kuznetsov G.V., **Strizhak P.A.** On the Scale of «Simultaneous» Influence of Several «Hot» Particles on the Conditions of Heat and Mass Transfer at Ignition

- of Liquid Condensed Substance // Journal of Engineering Thermophysics. – 2009. – № 4. – P. 263–270.
22. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Численное решение задачи воспламенения жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» частицей // Физика горения и взрыва. – 2009. – № 5. – С. 42–50.
  23. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Пожарная опасность процессов взаимодействия разогретых частиц с пленками горючих жидкостей // Безопасность труда в промышленности. – 2009. – № 10. – С. 54–58.
  24. Кузнецов Г.В., Панин В.Ф., **Стрижак П.А.** Прогностический анализ пожарной опасности возгораний жидких топлив при проведении ремонтных работ на тепловых электрических станциях // Безопасность жизнедеятельности. – 2009. – № 12. – С. 32–36.
  25. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Определение кинетики зажигания типичных жидких топлив источниками нагрева с конечным запасом энергии // Пожаровзрывобезопасность. – 2009. – № 7. – С. 35–40.
  26. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Особенности газофазного зажигания смеси паров керосина с воздухом нагретой до высоких температур стальной проволокой // Инженерно-физический журнал. – 2009. – № 6. – С. 1046–1051.
  27. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Газофазное зажигание пленки жидкого конденсированного вещества нагретой до высоких температур металлической частицей в условиях смешанной конвекции // Инженерно-физический журнал. – 2009. – № 6. – С. 1052–1058.
  28. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Численный анализ вероятности возгорания мазута на тепловых электрических станциях // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2009. – № 6. – С. 7–12.
  29. Kuznetsov G.V., **Strizhak P.A.** Transient heat and mass transfer at the ignition of vapor and gas mixture by a moving hot particle // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2010. – V. 53, Issues 5–6, – P. 923–930.
  30. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Зажигание парогазовой смеси движущимся источником нагрева малых размеров // Химическая физика. – 2010. – № 2. – С. 29–37.
  31. Kuznetsov G.V., **Strizhak P.A.** The Influence of Radiation Heat Exchange on Characteristics of Liquid Fuel Ignition by a Heated Metal Particle // Journal of Engineering Thermophysics. – 2010. – № 1. – P. 1–8.
  32. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Влияние формы нагретой до высоких температур частицы на газофазное зажигание пленки жидкого конденсированного вещества // Химическая физика. – 2010. – № 3. – С. 1–8.
  33. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Численное моделирование лазерного зажигания пленки жидкого топлива // Химическая физика. – 2010. – № 8. – С. 60–66.
  34. Vysokomornaya O.V., Kuznetsov G.V., **Strizhak P.A.** Numerical Analysis of Heat-Mass Transfer Mechanisms in Gas-Phase Ignition of Films of Liquid

- Condensed Substances by a Laser Beam // Journal of Engineering Thermophysics. – 2010. – № 2. – P. 85–93.
35. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Тепломассоперенос при локальном нагреве и зажигании жидкого топлива сфокусированным потоком излучения // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – № 4. – С. 29–33.
  36. Высокоморная О.В., Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Зажигание жидкого топлива сфокусированным потоком светового излучения // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 3. – С. 9–13.
  37. Kuznetsov G.V., **Strizhak P.A.** Heat and Mass Transfer at the Ignition of Liquid Fuel Droplet Spreading on the Hot Surface // Journal of Engineering Thermophysics. – 2010. – № 2. – P. 75–84.
  38. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** О возможности использования одномерной модели при численном анализе процесса зажигания жидкого конденсированного вещества одиночной нагретой частицей // Физика горения и взрыва. – 2010. – № 6. – С. 78–85.
  39. **Стрижак П.А.** Численный анализ влияния выгорания жидкого топлива на характеристики его зажигания источником ограниченной энергоемкости // Пожаровзрывобезопасность. – 2010. – № 12. – С. 4–8.
  40. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Зажигание конденсированных веществ при локальном нагреве. – Новосибирск: Издательство СО РАН, 2010. – 269 с.
  41. Кузнецов Г.В., **Стрижак П.А.** Способ определения качества жидких нефтепродуктов // Патент на изобретение № 2381492. – Бюлл. № 4, 2010.
  42. **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.
  43. **Стрижак П.А.** Программа вычисления параметров процесса зажигания парогазовой смеси накаливаемой проволокой // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009610529. – Бюлл. прогр. № 1, 2009.
  44. **Стрижак П.А.** Программа расчета характеристик газофазного зажигания жидкого конденсированного вещества каплей расплавленного металла // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2009612150. – Бюлл. прогр. № 2, 2009.
  45. **Стрижак П.А.** Программа расчета характеристик зажигания смеси паров жидкого топлива с воздухом движущейся разогретой металлической частицей // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010610554. – Бюлл. прогр. № 1, 2010.
  46. **Стрижак П.А.** Программа расчета характеристик зажигания пленки жидкого топлива лазером малой мощности // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010610555. – Бюлл. прогр. № 1, 2010.