

На правах рукописи



Захаревич Аркадий Владимирович

**ЗАЖИГАНИЕ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ КОНДЕНСИРОВАННЫХ
ВЕЩЕСТВ ОДИНОЧНЫМИ НАГРЕТЫМИ ДО ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУР ЧАСТИЦАМИ.**

Специальности: 01.04.14 – Теплофизика и
теоретическая теплотехника
01.04.17 – Химическая физика, в том
числе физика горения и взрыва

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск 2008

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Томский политехнический университет»

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Трофимов Вячеслав Федорович

доктор физико-математических наук
профессор, Ципилёв Владимир Папилович

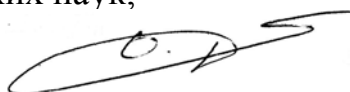
Ведущая организация : Федеральный научно-производственный
центр «Алтай».

Защита состоится «23» декабря 2008 г. в 14³⁰ часов в 228 аудитории 10 учебного корпуса на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций ДС 212.025.01 при Томском политехническом университете (634050, г. Томск, пр. Ленина, 30).

С диссертацией можно ознакомиться в научно – технической библиотеке Томского политехнического университета.

Автореферат разослан «22» ноября 2008 г.

Ученый секретарь
совета по защите докторских
и кандидатских диссертаций,
кандидат физико – математических наук,
доцент



О.Ю. Долматов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

В настоящее время все большую актуальность приобретают прогнозы пожарной опасности жидких и твердых топлив, применяющихся в энергетических установках различного назначения. В современных методах прогноза обычно используются модели, в которых источником нагрева является или поток высокотемпературных газов, или достаточно масштабный объемный источник высоких температур. Но источники воспламенения, встречающиеся в производственных условиях, весьма разнообразны как по природе своего возникновения, так и по запасу энергии. Многие пожары возникают в результате воздействия на способные гореть вещества (в том числе жидкости) частиц металлов или их окислов, нагретых до высоких температур. Одиночные частицы достаточно малых размеров часто являются источниками возникновения пожаров на промышленных и гражданских объектах (в том числе объектов энергетики).

Несмотря на то, что механизм зажигания конденсированных веществ (КВ) одиночными нагретыми до высоких температур частицами известен достаточно давно, до настоящего времени отсутствуют экспериментальные данные об основных закономерностях этого процесса. Теоретические результаты получены с использованием математических моделей, базирующихся на допущении об идеальном контакте нагретой частицы с поверхностью КВ. Такое допущение обосновано только для гомогенных КВ (нитроклетчатка, порох и др.). Для гетерогенных композиций, имеющих в своем составе частицы окислителя и металла, такое допущение не может быть полностью обоснованным. Кроме того представляет интерес анализ особенностей механизма зажигания КВ одиночными нагретыми частицами и его соответствие общей теории зажигания конденсированных веществ.

К настоящему времени разработаны физические и теоретические основы зажигания твердых КВ при нагреве за счет конвекции, излучения, а также за счет теплопередачи от массивного твердого тела. Но физические основы зажигания жидких и твердых КВ локальными источниками энергии относительно малой энергоёмкости пока не разработаны. Не опубликовано также экспериментальных данных об основных закономерностях этого процесса.

Поэтому экспериментальное изучение закономерностей и механизма зажигания КВ «горячими» частицами являются актуальной, нерешенной до настоящего времени задачей.

Объектами исследования в диссертации являются типичные жидкие и твердые топлива, использующиеся в различных энергетических установках для выработки электрической и тепловой энергии. Использование этих топлив при решении задач теплотехники связано со многими проблемами. Одной из основных является проблема пожароопасности при хранении, транспорте и перегрузке таких топлив. Особое значение в теплотехнике имеет также проблема запуска котельных агрегатов на жидком и твердом топливах. Поэтому

экспериментальное изучение закономерностей зажигания используемых в теплоэнергетике топлив (или модельных топливных композиций) и создание физических основ этих процессов является проблемой теоретической теплотехники. Кроме того, как показали результаты проведенных исследований, механизмы воспламенения изучавшихся топлив одиночными нагретыми частицами являются по существу тепловыми, и основными параметрами определяющими условия зажигания является температура или теплосодержание частиц – источников нагрева топлив.

Работа выполнялась при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 06-08-00366) «Математическое моделирование тепломассообмена при воспламенении пожароопасных жидкостей нагретыми до высоких температур частицами и каплями в условиях фазовых превращений».

Целью работы является экспериментальное изучение основных закономерностей зажигания жидких и твердых конденсированных веществ одиночными нагретыми до высоких температур частицами.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Разработка методики экспериментальных исследований процессов зажигания твердых и жидких конденсированных веществ одиночными нагретыми до высоких температур частицами.
2. Разработка методики регистрации параметров, обеспечивающей высокую точность определения регистрируемых характеристик.
3. Разработка плана проведения экспериментов.
4. Проведение экспериментальных исследований.
5. Анализ и обобщение результатов эксперимента.
6. Разработка физических моделей зажигания типичных жидких и твердых конденсированных веществ одиночными горячими частицами в условиях инерционного осаждения.

Научная новизна исследований диссертации заключается в том, что впервые разработана методика, создана экспериментальная установка и система регистрации параметров, проведены эксперименты и разработаны физические модели зажигания жидких и твердых конденсированных веществ одиночными нагретыми до высоких температур частицами.

Практическая значимость работы. Полученные экспериментальные результаты можно использовать при разработке регламентов проведения специальных работ, в результате выполнения которых образуются нагретые до высоких температур частицы. Так, в частности, на основании представленных в диссертации результатов можно обоснованно выбирать безопасные расстояния от источников образования горячих частиц до резервуаров или емкостей с жидкими топливами в условиях их интенсивного испарения.

Достоверность полученных результатов подтверждается оценками систематических и случайных ошибок выполненных при проведении экспериментов измерений, системой повторяемости опытов при

фиксированных значениях основных факторов, использованием малоинерционных средств измерений времени задержки зажигания.

Личный вклад автора.

Состоит в постановке и планировании экспериментальных исследований, разработке и изготовлении экспериментальной установки, проведении экспериментов, анализе и обобщении полученных результатов, формулировке физических моделей зажигания жидких и твердых конденсированных веществ, формулировке выводов и заключения по диссертации.

Автор защищает:

1. Новый подход к экспериментальному изучению физики процесса зажигания жидких и твердых КВ одиночными частицами.
2. Методику экспериментальных исследований основных закономерностей зажигания жидких и твердых конденсированных веществ одиночными нагретыми до высоких температур частицами.
3. Результаты экспериментальных исследований процессов зажигания большой группы типичных жидких и твердых конденсированных веществ одиночными горячими частицами.
4. Установленные в результате проведенных экспериментов особенности механизмов зажигания жидких топлив и твердых конденсированных веществ одиночными частицами.
5. Сформулированные на основании анализа и обобщения результатов выполненных экспериментов физические модели зажигания жидких топлив и твердых топливных композиций одиночными частицами.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 12-ой Всероссийской научно-технической конференции «Энергетика: экология, надежность, безопасность». (Томск, 2006); Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых «Энерго-ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии» - Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ-УПИ, 2007.

Публикации.

По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ: 8 статей, 2 доклада.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка используемой литературы, включающего 83 наименования, содержит 41 рисунок и 1 таблицу – всего 117 страниц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулирована цель исследований, показана новизна и практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современных представлений о механизмах зажигания твердых и жидких конденсированных веществ.

Во **второй главе** представлена методика экспериментального исследования процесса зажигания жидких и твердых конденсированных веществ.

Основной характеристикой процесса зажигания конденсированных веществ является время задержки зажигания τ_{ind} . Факторами, определяющими величину τ_{ind} на основании результатов известных теоретических исследований можно выбирать значение начальной температуры частицы и её размеры.

Размеры образующихся при сварке металлов частиц составляют обычно несколько миллиметров. Но основной проблемой является то, что такие частицы (часто капли) являются неправильными многогранниками или несимметричными телами вращения. Поэтому целесообразным являются исследования с частицами различной формы. В этом случае можно сделать заключение о масштабах влияния формы частицы на параметры зажигания.

При планировании экспериментов уделялось особое внимание выполнению условий хорошего контакта частицы с жидким топливом или твердым КВ. В случае жидкости это условие обеспечивалось с меньшими проблемами. Размеры частиц выбирались, так чтобы можно было варьировать площадью поверхности контакта частицы с жидкостью. Предварительные эксперименты с твердыми КВ показали, что наилучшие по стабильности воспроизведения условия достигаются при экспериментах с частицами в форме цилиндра малой высоты (диска), падающего плашмя на поверхность КВ. Поэтому диаметр (d), а также соотношение высота/диаметр выбирались из условий устойчивости диска (условие непереворачиваемости при падении).

При проведении исследований обеспечивалось неизменность внешних условий по другим менее значимым факторам с целью минимизации случайных ошибок. Так, например, обеспечивались условия отсутствия направленного движения воздуха над поверхностью КВ. Это достигалось использованием стеклянных сосудов, в которые помещалось жидкое топливо, и в случае твердых КВ, отсутствием открытых проемов в помещении для экспериментов. Также поддерживалась постоянной начальная температура жидких и твердых веществ. Все эксперименты проводились в закрытых отапливаемых помещениях при температуре воздуха 293 – 295 К. Эксперименты с жидкими топливами проводились, как правило, в течение максимально сжатых сроков. Целью такого уплотнения серий опытов для одной жидкости являлось стремление сохранить во всех экспериментах идентичный состав топлива.

Для проведения эксперимента была разработана экспериментальная установка (рис.1), основными элементами которой являлись нагревательная печь и контрольно - измерительный блок.

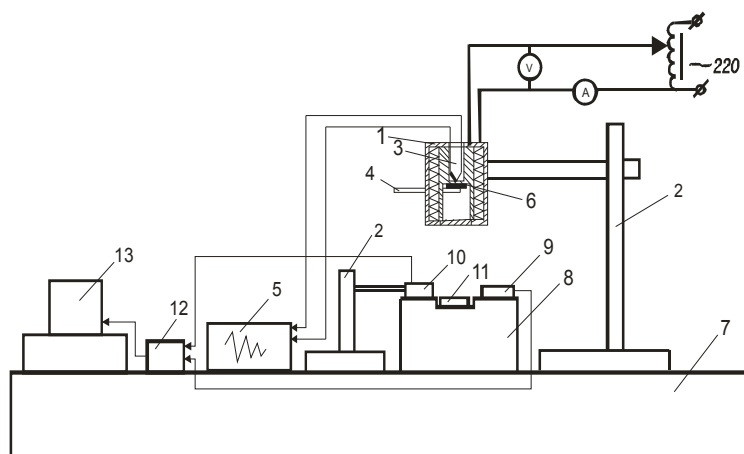


Рис. 1. Принципиальная схема экспериментальной установки:

1) нагревательный прибор; 2) штатив; 3) хромель-алюмелевая термопара; 4) керамический стержень; 5) устройство для измерения и контроля температуры УКТ-Щ4-ТП; 6) металлическая частица; 7) рабочая поверхность экспериментальной установки; 8) огнестойкая площадка; 9) приемник излучения и регистратор пламени; 10) излучатель; 11) образец КВ; 12) аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 13) персональный компьютер

При проведении экспериментов с образцами твердых КВ использовались три модельные топливные композиции №1, №2 и №3 приведенные в таблице.

Модельные составы КВ	Название компонентов	Содержание %
№1	Перхлорат аммония Бутилкаучук Хиоловый эфир	80 14 6
№2	Перхлорат аммония Бутилкаучук АСД-4 Хиоловый эфир	75 14 5 6
№3	Перхлорат аммония УДПАС - получен пере кристаллизацией в пла зменной струе Бутилкаучук Хиоловый эфир	75 5 14 6

Таблица. Модельные составы твердотопливных композиций

Нагрев металлического диска до заданной температуры осуществлялся в нагревательной печи (рис.2), обеспечивающей стабильную температуру рабочего объёма (до 1473 K) в течение продолжительного времени. Нагревательная печь, представляла собой стальной цилиндр (диаметр $75 \cdot 10^{-3}$ м и высота $100 \cdot 10^{-3}$ м), отверстия которого закрывались теплоизолирующими крышками 1, 2 с целью минимизации теплотерь в окружающую среду. В стальном цилиндре находилась конструкция из жаростойкой стали 3. Она представляла собой полый цилиндр, со сквозными отверстиями на внутренней поверхности в которые укладывался нагревательный элемент 5 (спираль из нихрома). Спираль была изолирована от короткого замыкания бусинками из

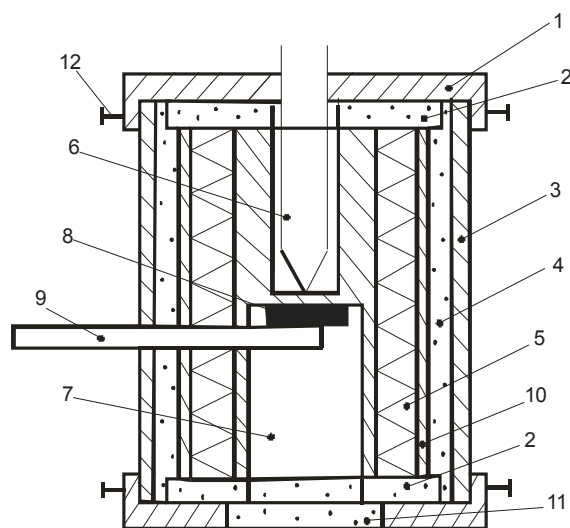


Рис. 2. Нагревательная печь.

1) теплоизолирующая крышка (2 шт); 2) теплоизолятор (шамот); 3) стальной цилиндр; 4) прокладка из шамота; 5) нихромовая спираль; 6) хромель-алюмелевая термопара; 7) отверстие для вывода частиц; 8) стальная частица; 9) держатель из керамики; 10) конструкция из жаростойкой стали; 11) цилиндрическая задвижка (шамот); 12) винт

керамики. Между стенками внутренней стальной конструкции и внешней конструкции из жаростойкой стали находился изолятор 4 (шамот). Такая схема нагревательной печи обеспечивала получение равномерной температуры металлической частицы. Значение её температуры фиксировалось прибором УКТ38-Щ4-ТП 5 (рис.1), первичным преобразователем которой являлась хромель-алюмелевая термопара 3. Нижняя часть хромель-алюмелевой термопары по оси стальной конструкции упиралась в стальную жаростойкую перегородку толщиной $1 \cdot 10^{-3}$ м, снизу к которой в свою очередь прижималась металлическая частица. Это позволяло достаточно точно измерять температуру «горячей» частицы (T_q). При достижении заданного значения температуры металлического диска открывалась задвижка 11 на нижней крышке печи и отодвигался керамический держатель 9, нагретая частица падала на образец КВ. Момент соприкосновения «горячей» частицы с образцом КВ фиксировался датчиком 1. Он состоял из: излучателя 10 (рис.1) и приемника излучения (фотоэлемент 9). Падая «горячая» частица перекрывала тонкий световой луч между излучателем и приемником излучения. Сигнал через аналого-цифровой преобразователь (АЦП) 12 поступал на персональный компьютер (ПК) 13. При соприкосновении с образцом «горячей» частицы через определенное время происходило зажигание КВ, которое регистрировалось датчиком 2 (фотоэлементом 9 (рис.1)). При появлении вспышки пламени фотоэлемент формировал сигнал. Этот сигнал через АЦП фиксировался на ПК. Время задержки зажигания определялось от момента падения частицы для твердого топлива на его поверхность, для жидкого в само вещество, находящееся в стеклянном сосуде ($d=4 \cdot 10^{-2}$, $h=5 \cdot 10^{-2}$), до момента появления пламени. Для увеличения достоверности измерений опыты проводились 6-8 раз подряд в идентичных условиях.

Также проведение экспериментов сопровождалось видеосъемкой с целью выделения деталей механизмов зажигания исследовавшихся жидких и твердых топлив.

В третьей главе приведены результаты экспериментальных исследований зажигания твердых КВ и жидких топлив «горячей» частицей.

Результаты экспериментального исследования закономерностей зажигания конденсированных веществ (модельных твердотопливных композиций) «горячей» одиночной частицей металла представлены на рис.3-6. Аппроксимационные кривые получены методом наименьших квадратов. Левое предельное значение температуры на каждом рисунке соответствует минимальному значению T_q , при котором еще происходило зажигание. При дальнейшем снижении T_q зажигание исследуемых композиций не происходило.

Сопоставление рис.3, 4 позволяет сделать вывод о том, что уменьшение характерного поперечного размера частицы в диапазоне от $3 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-3}$ м не приводит к заметному изменению значения τ_{ind} . Видно, что рассеяние экспериментальных данных при постоянной температуре составляет $\pm 24\%$. Причиной зафиксированного в экспериментах рассеяния величины τ_{ind}

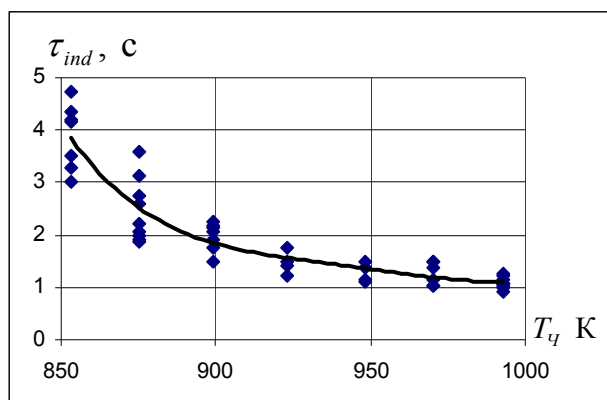


Рис. 3. Экспериментальная зависимость времени задержки зажигания металлизированного состава с включением АСД-4 от температуры частицы (диаметр $d=5 \cdot 10^{-3}$ м, высота $h=2 \cdot 10^{-3}$ м)

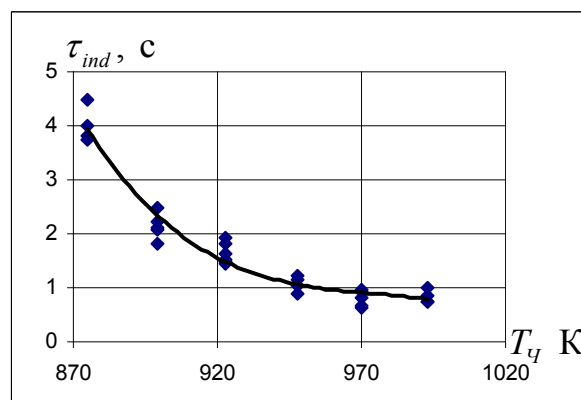


Рис. 4. Экспериментальная зависимость времени задержки зажигания металлизированного состава с включением АСД-4 от температуры частицы (диаметр $d=3 \cdot 10^{-3}$ м, высота $h=2 \cdot 10^{-3}$ м)

при постоянной T_q у металлизированной композиции №2 являются шероховатость поверхности и неоднородность по теплофизическим характеристикам приповерхностных слоев материала от образца к образцу. Наличие частиц порошка АСД – 4 в приповерхностном слое приводит к тому, что некоторые такие частицы могут выступать над поверхностью образца. Соответственно между частицей – источником зажигания и КВ может образоваться зазор в несколько микрометров. И этого может быть достаточно для того, чтобы значительно ухудшить условия теплопередачи от частицы.

Результаты экспериментов с топливной композицией №1, в которой отсутствовал металл, приведены на рис.5. Видно, что рассеяние значений времени задержки зажигания при постоянной температуре частицы составляет не более 15%.

Кроме того, сравнение рис.3-5 показывает, что введение Al в структуру КВ приводит к заметному увеличению времени задержки зажигания (на 20÷25%). Последнее, очевидно обусловлено увеличением эффективного коэффициента теплопроводности композиции при прочих адекватных условиях. Соответственно металлизированная композиция поглощает больше теплоты и прогревается на большую глубину по сравнению с неметаллизированной.

Результаты экспериментов для топливной композиции №3 с ультрадисперсным порошком алюминия, приведен на рис.6. Можно отметить, что погрешность значений τ_{ind} составляет $\pm 25\%$ при относительно низких температурах частицы (до 870 K) и соизмерима с разбросом τ_{ind} у композиции №2. Кроме того, начальная температура зажигания топливной композиции №3 ниже на 20 градусов чем у неметаллизированной и на 70 градусов состава №2. Это связано с наличием в топливе алюминиевого порошка, полученного путем перекристаллизации в плазменной струе. Такое включение приводило к более быстрому зажиганию при меньшей температуре частицы. Причиной такого эффекта является очевидно меньшая затрата энергии (теплоты) для зажигания данного топлива. Масштабы выделенных эффектов достаточно значимы для оценки как характерных значений τ_{ind} , так и предельных температур зажигания.

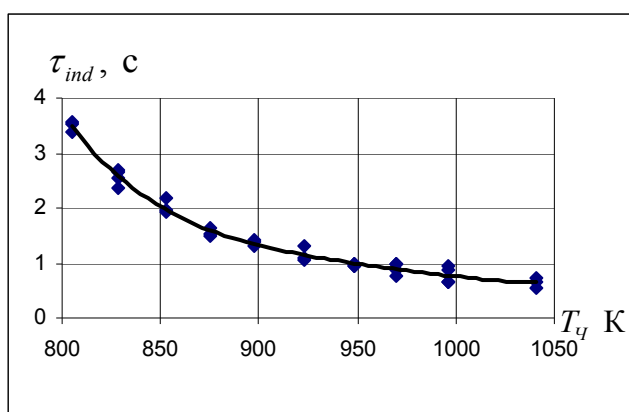


Рис. 5. Экспериментальная зависимость времени задержки зажигания неметаллизированного топлива от температуры частицы (диаметр $d=5\cdot 10^{-3}$ м, высота $h=2\cdot 10^{-3}$ м)

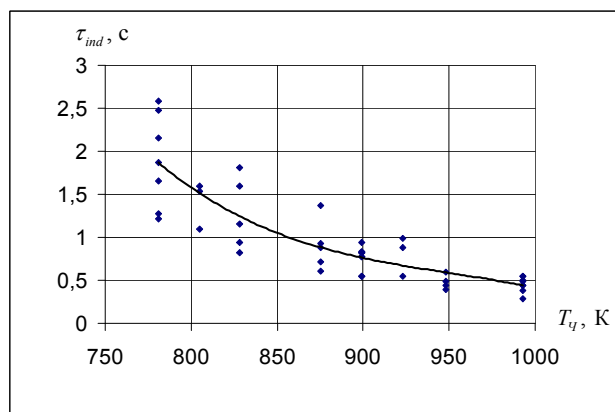


Рис. 6. Экспериментальная зависимость времени задержки зажигания топлива на основе ультрадисперсного порошка алюминия от температуры частицы ($d=5\cdot 10^{-3}$ м, $h=2\cdot 10^{-3}$ м)

На основании анализа результатов выполненных экспериментов можно сформулировать физическую модель зажигания модельных смесевых

топливных композиций одиночными нагретыми до высоких температур частицами.

Частица – источник зажигания при попадании на поверхность КВ интенсивно охлаждается за счет теплоотвода как в конденсированное вещество, так и в воздух с боковой и верхней поверхностями. В результате температура частицы падает и, соответственно, снижается тепловой поток в зону реакции. Процесс остывания является существенно нестационарным, и в результате механизм процесса зажигания КВ одиночной частицей существенно отличается от аналогичных механизмов для конвективного, лучистого и кондуктивного (массивное тело) источников нагрева. Это отличие наиболее ярко проявляется в том, что времена задержки зажигания КВ одиночными частицами не могут составлять (как для массивного тела) десятков секунд при относительно низких температурах. Если зажигание КВ массивным телом может реализоваться и при $T < 780 \text{ K}$, то в условиях частицы это невозможно. Соответственно, на время задержки зажигания влияют и размеры частицы. Чем больше ее поперечный характерный размер, тем меньше τ_{ind} .

Следует особо подчеркнуть, что в проведенных опытах если происходило зажигание исследованных составов, то в дальнейшем имело место устойчивое горение до полного выгорания экспериментального образца независимо от уровня начальных температур и размеров частиц. На основании вышеизложенного можно сделать вывод о том, что одиночные нагретые до высоких температур частицы являются эффективными источниками зажигания твердотопливных композиций. Это следствие позволяет сделать также заключение о том, что возможно создание специальных систем воспламенения конденсированных веществ, в основе которых лежит использование одиночных горячих частиц, осаждающихся на поверхности КВ с малыми скоростями.

Впервые были проведены исследования процесса зажигания бензина одиночной частицей. Эксперименты показали, что воспламенение бензина происходит в паровой фазе до попадания частицы на поверхность этой горючей жидкости при температуре частицы более 1353 K . Если T_q меньше этой величины, то воспламенения не происходит, даже если частица погружается в бензин полностью или частично. Типичные варианты воспламенения и невоспламенения иллюстрируются видеogramмами на рис.7, 8, соответственно. Дальнейшее повышение T_q обеспечивает безусловное воспламенение бензина в паровой фазе. При этом время воспламенения составляет не более 0.01 с при любом значении T_q до $T_q = 1473 \text{ K}$ и при начальной температуре топлива 293 K .

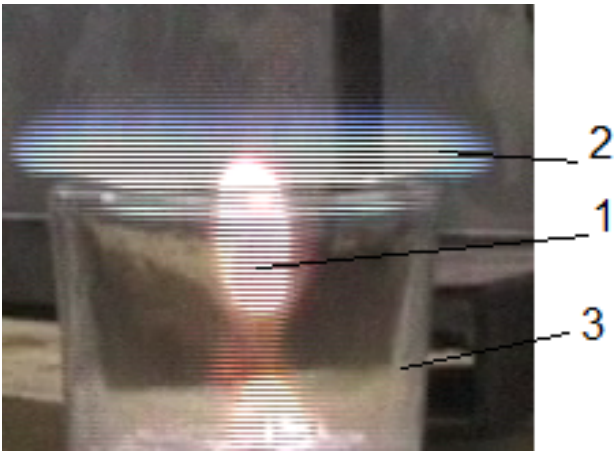


Рис. 7. Кадр видеogramмы эксперимента с воспламенением бензина ($d=6 \cdot 10^{-3}$ м, $h=5 \cdot 10^{-3}$ м):
1) стальная частица; 2) пламя; 3) стеклянный сосуд

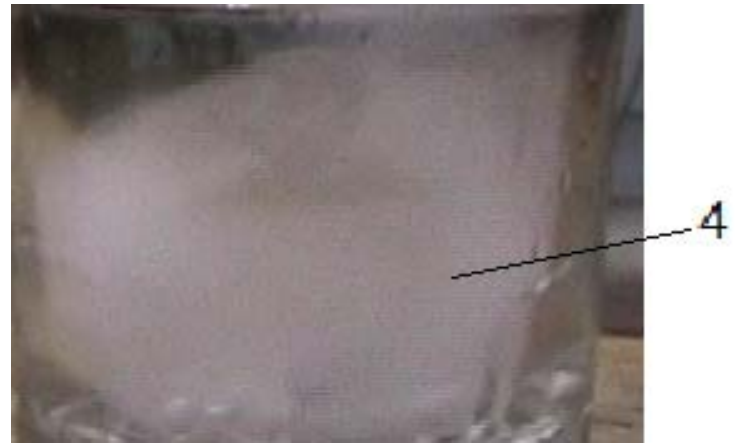


Рис. 8. Кадр видеogramмы эксперимента без воспламенения бензина ($d=6 \cdot 10^{-3}$ м, $h=5 \cdot 10^{-3}$ м):
4) пары бензина высокой концентрации

Проведены экспериментальные исследования процесса зажигания керосина (рис.9). Установлено, что только при больших T_q процесс зажигания топлива происходил при практически одинаковом времени задержки зажигания для стальных частиц различных размеров. Рассеяние величины времени задержки зажигания при постоянной температуре частицы для кривой 1(рис.9) составляет не более 33%, для кривой 2 не более 30% и кривой 3 не более 20%. Увеличение T_q приводит к значительному уменьшению времени задержки зажигания.

Анализ полученных результатов показывает, что размеры частиц, определяющих их теплосодержание, играют большую роль в иницировании зажигания керосина. Т.е можно сделать вывод, что этот процесс является существенно неоднородным и, кроме того, предельные условия зажигания лимитируются запасом тепла, аккумулированного в частице.

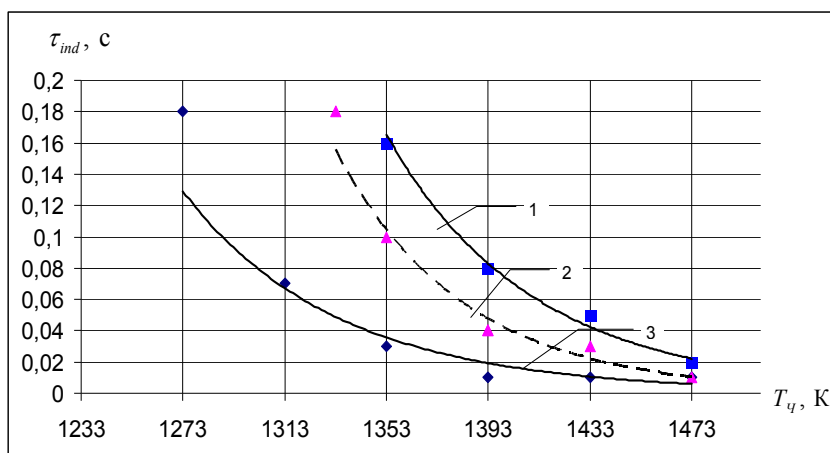


Рис. 9. Экспериментальные зависимости времени задержки зажигания керосина от начальной температуры частицы (1 – $h=3 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $h=5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $h=7 \cdot 10^{-3}$ м)

Дизельное топливо является одной из широко используемых пожароопасных жидкостей. В то же время до настоящего времени недостаточно проработаны научно-технические вопросы, связанные с проблемой воспламенения этого топлива при хранении, перегрузке и использовании. В частности не установлены предельные условия его зажигания одиночными нагретыми до высоких температур частицами. Такие режимы зажигания возможны на практике достаточно редко, но именно они являются причиной большинства пожаров, связанных с возгоранием дизельного топлива.

Результаты экспериментального исследования закономерностей зажигания дизельного топлива «горячей» одиночной стальной частицей представлены на рис.10, 11.

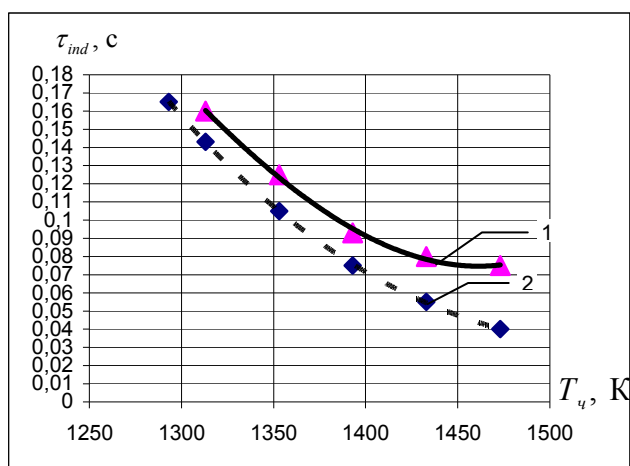


Рис. 10. Экспериментальные зависимости времени задержки зажигания дизельного топлива от начальной температуры частицы (1 – $h=3 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $h=5 \cdot 10^{-3}$ м)

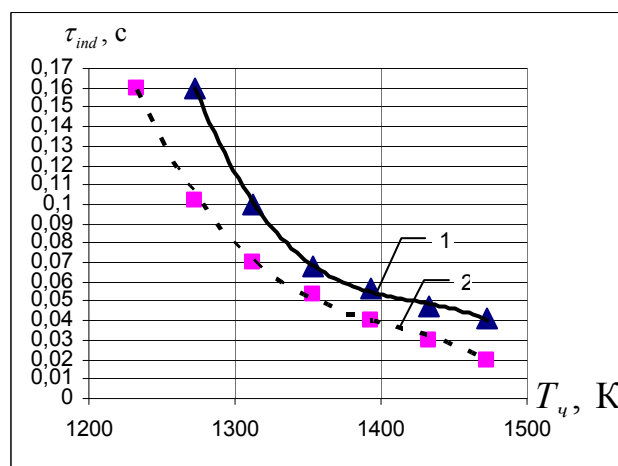


Рис. 11. Экспериментальные зависимости времени задержки зажигания дизельного топлива от начальной температуры частицы (1 – $h=7 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $h=9 \cdot 10^{-3}$ м)

Проведенные впервые экспериментальные исследования позволяют сформулировать физическую модель зажигания жидких веществ одиночными нагретыми до высоких температур частицами. При этом механизм процесса зажигания существенно отличается от аналогичных механизмов для твердых и газообразных веществ. Инициирование реакции горения жидкостей является следствием существенно более сложного комплекса совместно протекающих физико-химических процессов, чем характерных для твердых веществ и газов.

Полученные результаты позволяют также сделать вывод, что бензин является существенно более опасной в пожарном отношении жидкостью, т.к его воспламенение может происходить и при пролете нагретой частицы над поверхностью испарения. Дизельное же топливо или керосин при малом времени задержки зажигания воспламеняется только при погружении частицы в приповерхностный слой. Соответственно механизм воспламенения топлив существенно отличается от механизма зажигания бензина.

Результаты проведенных исследований также создают определенные предпосылки для развития общей теории зажигания конденсированных веществ на процессы зажигания жидких топлив.

Наибольший интерес для теплоэнергетики представляют исследования зажигания мазута. На рис.12. представлены результаты экспериментов, иллюстрирующие закономерности процесса зажигания мазута одиночной нагретой до высоких температур частицей.

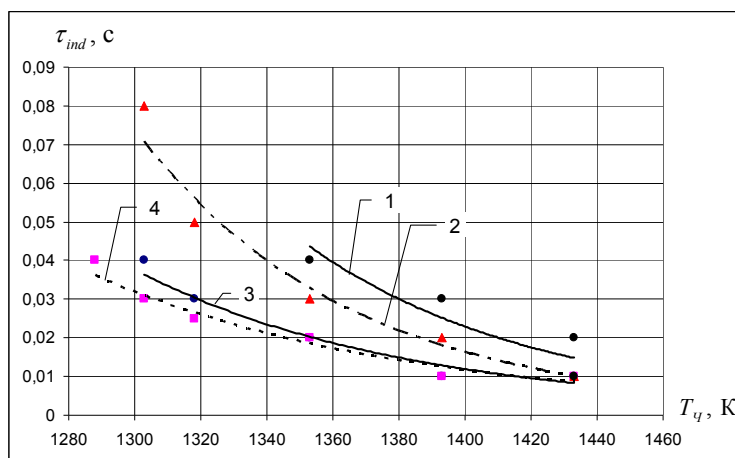


Рис. 12. Экспериментальные зависимости времени задержки зажигания мазута от температуры частицы (1 – $h=3 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $h=5 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $h=7 \cdot 10^{-3}$ м; 4 – $h=9 \cdot 10^{-3}$ м)

При оценке численных значений времени задержки зажигания жидких топлив актуальным является анализ масштабов влияния формы частиц на величину τ_{ind} . Также этот фактор оказывает влияние и на механизм зажигания жидкостей. С этой целью были проведены специальные экспериментальные исследования.

Частицы, образующиеся при проведении сварочных работ собирались, измерялись и отбирались по характерному размеру. В проводимых в дальнейшем экспериментах использовались частицы, характерные размеры которых были равны или близки к диаметрам частиц в форме сферы. Пористая частица была соизмерима по миделеву сечению с частицей в форме сферы.

На рис.13, 14 представлены результаты проведенных экспериментов по определению времени задержки зажигания дистиллятных топлив (дизельного топлива и керосина) одиночными нагретыми частицами.

Полученные результаты наглядно демонстрируют влияние пористости частиц на закономерности зажигания жидкостей. Механизм этого влияния достаточно сложен и многогранен. Прежде всего, следует отметить то, что пористые частицы при попадании в жидкое топливо осуществляют его нагрев по поверхности большей площади по сравнению с монолитными частицами. Увеличение количества теплоты, передаваемое в зону испарения горючего с постоянной площади, приводит к росту величины теплового потока в эту зону. Последнее адекватно увеличению температуры при той же площади контакта частицы с жидким топливом.

Но кроме этого влияет на процесс воспламенения исследовавшихся жидкостей и находящийся в порах воздух. Т.к частица нагрета до высокой температуры, то газы в порах также имеют повышенную температуру. Её величина конечно ниже температуры плавления стали, но, в то же время,

существенно выше температуры жидкого топлива. Поэтому в приповерхностной пористой структуре создаются условия для локального воспламенения горючего. Также следует отметить, что плотность (реальная) пористых частиц заметно меньше плотности монолитных. Поэтому скорость осаждения пористой

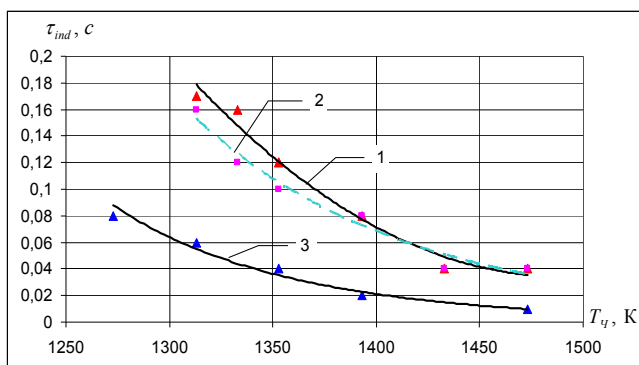


Рис. 13. Экспериментальные зависимости времени задержки зажигания дизельного топлива от температуры частицы (1 – сфера $d=6 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – диск $d=6 \cdot 10^{-3}$ м, $h=3 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – пористая частица)

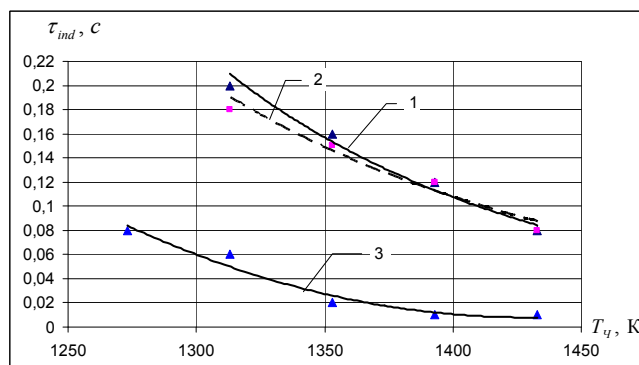


Рис. 14. Экспериментальные зависимости времени задержки зажигания керосина от температуры частицы (1 – сфера $d=6 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – диск $d=6 \cdot 10^{-3}$ м, $h=3 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – пористая частица)

частицы в горючем много меньше аналогичной величины для монолитной частицы. Соответственно больше время нагрева топлива частицей. В итоге совместное влияние этих факторов приводит к существенному снижению времен задержки воспламенения керосина и дизельного топлива пористыми частицами, образующимися при сварке, по сравнению со стальными частицами с близкими значениями характерных размеров.

На основании выполненного анализа можно сделать вывод о том, что полученные для монолитных стальных частиц численные значения времен задержки воспламенения являются нижними оценками τ_{ind} для керосина и дизельного топлива.

На основании полученных в результате экспериментальных исследований зависимостей τ_{ind} от T_q можно сделать вывод о возможности использования полученных результатов для частиц определенной формы при анализе времен задержки воспламенения жидких топлив частицами другой формы при идентичном характерном размере. Масштабы отклонений τ_{ind} от истинного значения при этом по крайней мере не будут превышать погрешность экспериментальных методик определения времен задержки воспламенения в рассматриваемых условиях.

Более сложен механизм зажигания мазута пористыми частицами. Полученные экспериментальные зависимости τ_{ind} от T_q показывают (рис.15), что для этого жидкого топлива характерен сдвиг предельных режимов зажигания в область менее высоких температур. Но при этом в диапазоне изменения T_q , соответствующем условия зажигания мазута стальными монолитными частицами, отклонения по τ_{ind} нельзя назвать значительными.

Сдвиг предельных режимов зажигания в область меньших температур обусловлен очевидно ростом площади контакта поверхности частицы с мазутом и соответствующим увеличением теплового потока в зону испарения. Но с другой стороны по этому топливу оценки величин τ_{ind} можно достаточно точно проводить по результатам экспериментов со стальными монолитными частицами.

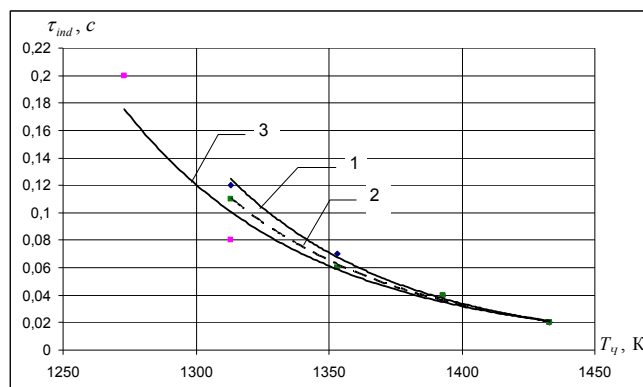


Рис. 15. Экспериментальные зависимости времени задержки зажигания мазута от температуры частицы (1 – сфера $d=6 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – диск $d=6 \cdot 10^{-3}$ м, $h=3 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – пористая частица)

Полученные результаты создают предпосылки для вывода, имеющего важное практическое значение. Экспериментальное определение времени задержки воспламенения жидкого топлива является, возможно, самым простым, надежным и экономичным способом определения качества этого топлива.

Характерным признаком топлива низкого качества, как правило, является наличие примесей – некоторых органических веществ. Наличие этих веществ, имеющих существенно меньшую теплоту сгорания, но близкую к настоящему топливу плотность после хорошего перемешивания (даже в условиях обычной перевозки) практически невозможно выделить при визуальном осмотре. Можно найти органическую жидкость или не имеющую специфического запаха, или со слабым запахом. В последнем случае выделить наличие такой примеси, например в бензине или керосине почти невозможно. Химический анализ продуктов испарения жидкого топлива также может не привести к точным оценкам количества инертных примесей в связи с тем, что многие компоненты паров могут содержаться как в жидком топливе, так и в его инертном разбавителе. Кроме того химический анализ дорог, трудоемок и требуется использование сложного специального оборудования.

Определение же времени задержки зажигания жидкого топлива одиночной частицей и сравнение его с эталонным позволяет дать быструю точную оценку наличия инертных примесей с минимальными затратами материальных ресурсов. В этом случае наличие инертных органических примесей будет приводить к росту величины τ_{ind} , потому что концентрация паров горючего в зоне зажигания будет ниже критической. Чем больше будет

массовая доля примеси, тем масштабнее будет отличаться значение τ_{ind} от эталонного.

В четвертой главе представлены результаты численного анализа масштабов изменения температуры частиц, образующихся при сварке, за время их движения в воздухе до выпадения на поверхность жидкого топлива. Решена задача теплопроводности для частицы в форме сферы с учетом конвективного и радиационного механизмов теплообмена с воздухом. Рассматривались частицы с различной начальной температурой и скоростью движения. Установлено, что при максимальной длительности движения частицы в воздухе, при минимальной температуре внешней среды и максимальной скорости движения температура частицы снижается не более чем на 300 К. Если учесть, что из ванны расплава при сварке частицы вылетают при температуре большей температуры плавления, то можно сделать вывод, что все образующиеся при сварке металлов частицы являются потенциальными источниками зажигания всех исследованных жидких топлив. Поэтому любые открытые поверхности этих топлив должны находиться от места сварки на расстоянии большем максимального расстояния полета частицы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Основные результаты и выводы выполненной диссертационной работы заключается в следующем.

1. Разработана методика экспериментального изучения закономерностей зажигания жидких и твердых конденсированных веществ одиночными нагретыми до высоких температур частицами.
2. Впервые проведены экспериментальные исследования основных закономерностей зажигания трех модельных топливных композиций и четырех жидких топлив одиночными горячими частицами.
3. Установлены зависимости времени задержки зажигания исследованных конденсированных веществ от начальной температуры и размеров частиц.
4. Сформулированы физические модели зажигания жидких топлив (бензина, керосина, дизельного топлива, мазута) и модельных топливных композиций одиночными нагретыми до высоких температур частицами.
5. Показаны существенные отличия механизмов зажигания различных жидких топлив одиночными частицами.
6. Проведен анализ влияния формы частицы на закономерности зажигания типичных жидких топлив.
7. Показаны особенности зажигания жидких топлив пористыми частицами, образующимися при сварке металлов.
8. Выделен характерный для специфического механизма зажигания жидких топлив одиночной частицей диапазон изменения температур источника нагрева.
9. Выработаны рекомендации по практическому использованию результатов исследований.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Захаревич А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Зажигание модельных смесевых композиций одиночной нагретой до высоких температур частицей // Энергетика: экология, надёжность, безопасность: Материалы докладов двенадцатой Всероссийской научно-технической конференции – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – С. 175-178.
2. Захаревич А.В. Экспериментальные исследования процесса зажигания конденсированных веществ одиночной «горячей» металлической частицей // Теплотехника, экологические проблемы теплоэнергетики, теплофизика: Сборник статей студентов и аспирантов теплоэнергетического факультета Томского политехнического университета. – Томск: ТУСУР, 2007. – С. 36-41.
3. Захаревич А.В., Максимов В.И. Методика экспериментального исследования зажигания конденсированных веществ одиночной «горячей» частицей // Теплотехника, экологические проблемы теплоэнергетики, теплофизика: Сборник статей студентов и аспирантов теплоэнергетического факультета Томского политехнического университета. – Томск: ТУСУР, 2007. – С. 65-70.
4. Захаревич А.В., Максимов В.И. Экспериментальное исследование процесса зажигания жидкого веществ одиночной «горячей» металлической частицей // Теплотехника, экологические проблемы теплоэнергетики, теплофизика: Сборник статей студентов и аспирантов теплоэнергетического факультета Томского политехнического университета. – Томск: ТУСУР, 2007. – С. 75-79.
5. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Максимов В.И. Зажигание жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» металлической частицей // Известия высших учебных заведений. Физика, – 2007. – № 9/2. – С. 90-95.
6. Захаревич А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. Зажигание жидкого пожароопасного вещества одиночной нагретой до высоких температур частицей // Энерго-ресурсосбережение. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: Сборник материалов Всероссийской студенческой олимпиады, научно-практической конференции и выставки студентов, аспирантов и молодых ученых - Екатеринбург, УГТУ, 17-21 дек. 2007. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2007. – С. 99-102
7. Захаревич А. В., Кузнецов В. Т., Кузнецов Г. В., Максимов В. И. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44, № 5. с. 10-15.
8. Кузнецов Г.В., Захаревич А.В., Максимов В.И. Зажигание дизельного топлива одиночной «горячей» металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность, 2008 – т. 17, – № 4. – С. 28-30.
9. Захаревич А.В., Кузнецов Г.В., Максимов В.И. О механизме зажигания бензина одиночной нагретой до высоких температур металлической частицей // Пожаровзрывобезопасность, 2008 – т. 17, – № 5. – С. 39-42.
10. Захаревич А. В., Кузнецов Г. В., Максимов В. И., Панин В. Ф., Равдин Д. С. Оценка пожарной опасности мазута в условиях перегрузки, хранения и транспорта на тепловых электрических станциях // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313, № 3. – С. 30-33.