УДК 536.468

ЗАЖИГАНИЕ ЖИДКОГО КОНДЕНСИРОВАННОГО ВЕЩЕСТВА ПОГРУЖАЮЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ ОГРАНИЧЕННОЙ ЭНЕРГОЕМКОСТИ

Глушков Д.О., Стрижак П.А.

Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск, Россия

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации (МК-620.2012.8)

АННОТАЦИЯ

Выполнено численное и экспериментальное исследование процесса зажигания широко распространенного жидкого конденсированного вещества погружающимся в него типичным источником ограниченной энергоемкости – разогретой до высоких температур металлической частицей малых размеров. Численные исследования проведены в рамках модели, учитывающей группу взаимосвязанных физико-химических процессов (теплопроводность, диффузия, конвекция, смешение, радиационный теплообмен, окисление) с фазовыми превращениями (испарение жидкости, кристаллизация материала частицы). Установлены предельные условия погружения источника с ограниченным теплосодержанием, при которых возгорание жидкого конденсированного вещества не происходит.

ВВЕДЕНИЕ

Процессы зажигания конденсированных веществ (КВ) различными источниками нагрева представляют интерес, в первую очередь, в связи с высокой пожаровзрывоопасностью [1] и широким использованием в специальной технике [2].

В последние годы достаточно полно исследованы условия «идеального» контакта (без шероховатостей, неровностей, каверн и т.д.) на границе «локальный источник энергии – КВ» [3,4] и частичного внедрения источника нагрева малых размеров в приповерхностный слой КВ [5,6]. В тоже время в определенных условиях возможно полное погружение локальных источников ограниченной энергоемкости в КВ (в частности, жидких и гелеобразных топлив). Представляет интерес анализ условий зажигания типичного жидкого КВ погруженным (затопленным) источником нагрева с ограниченным теплосодержанием.

Цель работы – численное и экспериментальное исследование макроскопических закономерностей процессов зажигания в условиях фазовых превращений при взаимодействии типичного жидкого КВ с погружающейся разогретой до высоких температур металлической частицей малых размеров, а также определение критических значений основных параметров локального источника нагрева, при которых зажигание не происходит.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Процессы тепломассопереноса в системе «жидкое КВ – источник нагрева малых размеров – окислитель» исследовались в рамках модели, условная схема которой представлена на рис.1.

В качестве локального источника нагрева с ограниченным теплосодержанием рассматривалась разогретая до высоких температур металлическая (сталь) частица малых размеров. Численные исследования выполнены на при-

© Глушков Д.О., Стрижак П.А.

мере типичного жидкого топлива с хорошо известными теплофизическими и термохимическими характеристиками – керосина.

Предполагалось, что разогретая частица с малой (0.5 м/с) скоростью осаждается на поверхность жидкого КВ и погружается в него (рис.1). Рассматривались типичные условия погружения частицы с формированием парового зазора между ней и жидкостью в течение времени задержки зажигания τ_d. Учитывалось, что жидкость прогревается при подводе энергии от локального источника нагрева. При достижении условий парообразования вблизи торцевой и боковых поверхностей частицы начинается процесс испарения вещества. Как следствие, формируется паровой зазор между частично погруженным источником и жидким веществом. Пары вдуваются в среду окислителя, и за счет диффузии и конвекции перемешиваются с ним. Формируется парогазовая смесь, включающая окислитель, пары горючего и пары воды, как исходные компоненты, участвующие в химической реакции. При достижении предельных значений концентрации горючего и температуры парогазовой смеси реакция окисления ускоряется и приобретает необратимый характер – происходит зажигание.

Численное моделирование выполнено при следующих допущениях, не накладывающих существенные ограничения на общность постановки задачи:

1. В результате испарения жидкости образуется одно вещество с известными характеристиками.

2. Не учитывались возможные процессы выгорания жидкости.

3. Не учитывались конвективные течения, возникающие в жидкости при нагреве ее приповерхностного слоя.

При численном и экспериментальном исследовании в качестве модельных источников зажигания приняты одиночные металлические частицы в форме цилиндрического диска малых размеров. Такая форма частиц позволяет, в частности, достаточно просто описать условия теплового контакта источника ограниченной энергоемкости и жидкого КВ (рис.1).

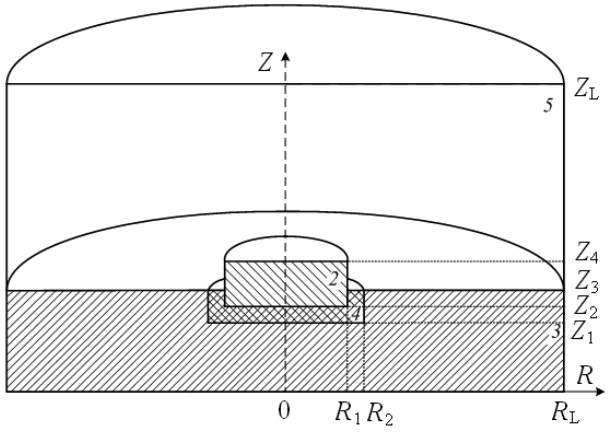

Рис.1 Схема области решения задачи зажигания при $0<\tau<\tau_d$: 1 – воздух, 2 – частица, 3 – жидкое КВ, 4 – паровой зазор, 5 – парогазовая смесь.

При численном моделировании использовались два критерия зажигания, отражающие наиболее полно макроскопические закономерности процессов тепломассопереноса в системе (рис.1):

1. Тепло, выделяемое в результате химической реакции окисления паров горючего в воздухе, больше тепла, передаваемого от источника нагрева жидкому КВ и парогазовой смеси.

2. Температура парогазовой смеси превышает начальную температуру источника энергии.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И МЕТОД РЕШЕНИЯ

Численное моделирование процесса зажигания жидкого КВ в рассматриваемой системе (рис.1) при $0<\tau<\tau_d$ сводилось к решению системы нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных аналогичной [5,6] с соответствующими начальными и граничными условиями. Процессы переноса тепла и массы описывались уравнениями неразрывности, движения, энергии для парогазовой смеси с учетом тепловыделения при окислении паров жидкого КВ; уравнениями диффузии паров горючего и воды в воздухе; уравнением баланса для парогазовой смеси; уравнением энергии для металлической частицы с учетом кристаллизации и уравнением теплопроводности для жидкости.

Система нелинейных нестационарных дифференциальных уравнений в частных производных решалась методом конечных разностей [7]. При этом разностные аналоги дифферен-

циальных уравнений решались локально–одномерным методом [7]. Уравнения эллиптического типа – неразрывности и движения решались методом переменных направлений [7]. Для решения одномерных разностных уравнений применялся метод прогонки с использованием неявной четырехточечной схемы [7]. Нелинейные уравнения решались методом итераций [8]. Для повышения точности решения системы дифференциальных уравнений устанавливалось не менее 400 узлов разностной сетки по каждой из координат (вблизи границ фазового перехода разностная сетка сгущалась) и использовался неравномерный шаг по времени $10^{-6} \div 10^{-4}$.

При решении уравнений эллиптического типа – неразрывности и движения в переменных «функция тока – вихрь скорости» использованы численные алгоритмы [9].

Достоверность полученных результатов численных исследований определялась сравнением с данными выполненных экспериментов и проверкой консервативности используемых разностных схем, алгоритм которой приведен в [5,6].

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Экспериментальные исследования были спланированы и проведены аналогично [10,11].

При планировании эксперимента была выбрана наиболее типичная схема – частица падает перпендикулярно поверхности КВ с малой скоростью (0.5 м/с). Из всего многообразия возможных форм частиц был выбран цилиндр малой высоты – диск (аналогичный представленному на рис.1).

Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка, основными элементами которой являлись нагревательная печь и контрольно – измерительный блок [4,10,11]. Эксперименты проводились с металлической частицей в форме диска фиксированного радиуса (r_p=0.003 м) и высоты (z_p=0.003÷0.007 м). Металлическая частица падала в стеклянный вертикальный сосуд размерами r_L=0.025 м, z_L=0.02 м. Температура частицы (T_p) существенно превышала начальную температуру КВ (T_0=300 К). Для обеспечения достоверности результатов измерений опыты проводились 6÷8 раз подряд в одинаковых условиях.

Нагрев металлического диска до заданной температуры осуществлялся в нагревательной печи (рис.2), обеспечивающей стабильную температуру рабочего объема в течение продолжительного времени [4].

Нагревательная печь, представляла собой стальной цилиндр (диаметр 0.075 м и высота 0.1 м), отверстия которого закрывались теплоизолирующими крышками с целью минимизации теплопотерь в окружающую среду. В стальном цилиндре находилась конструкция из жаростойкой стали. Она представляла собой полый цилиндр со сквозными отверстиями на внутренней поверхности, в которые укладывался нагревательный элемент (спираль из нихрома). Спираль была изолирована от короткого замыкания бусинками из керамики.

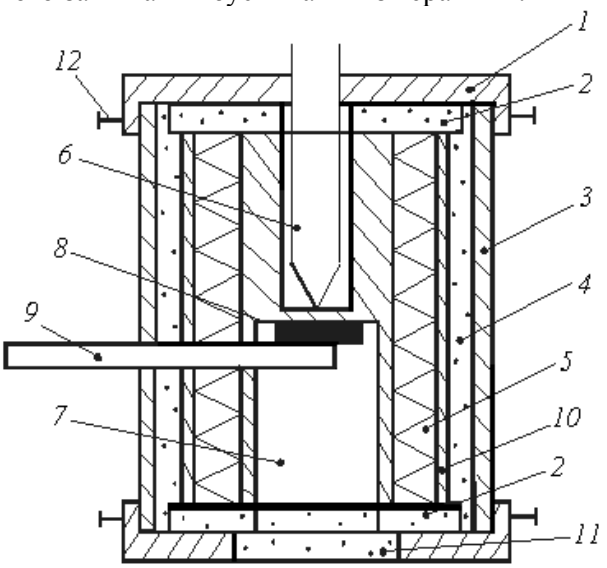

Рис.2 Нагревательная печь: 1 – теплоизолирующие крышки, 2 –теплоизолятор (шамот), 3 – стальной цилиндр, 4 – прокладка из шамота, 5 – нихромовая спираль, 6 – хромель-алюмелевая термопара, 7 – отверстие для вывода частиц, 8 – частица, 9 – держатель из керамики, 10 – конструкция из жаростойкой стали, 11 – цилиндрическая задвижка (шамот), 12 – винт.

Между стенками внутренней стальной конструкции и внешней конструкции из жаростойкой стали находился изолятор (шамот). Такая

схема нагревательной печи обеспечивала получение равномерного прогрева частицы. Значение её температуры фиксировалось прибором УКТ38-Щ4-ТП, первичным преобразователем которого являлась хромель-алюмелевая термопара. Нижняя часть хромель-алюмелевой термопары по оси стальной конструкции упиралась в стальную жаростойкую перегородку толщиной 0.001 м, снизу к которой в свою очередь прижималась металлическая частица. Это позволяло достаточно точно измерять температуру частицы. При достижении температуры металлического диска заданного значения открывалась заслонка (рис.2) на нижней крышке печи и отодвигался керамический держатель. Нагретая частица падала с фиксированной высоты 0.15 м в КВ. Высота падения частицы выбиралась такой, чтобы пары КВ не воспламенялись около основания нагревательной печи. Момент соприкосновения частицы с поверхностью жидкого КВ, находящимся в стеклянном цилиндрическом сосуде, фиксировался датчиком, который устанавливался около верхнего края стеклянного сосуда. Он состоял из излучателя и приемника излучения. При падении частица перекрывала тонкий световой луч между излучателем и приемником излучения. Сигнал через аналого-цифровой преобразователь поступал на персональный компьютер. Воспламенение паров КВ регистрировалось фотоэлементом. При появлении вспышки пламени фотоэлемент формировал повторный сигнал. Этот сигнал через аналого-цифровой преобразователь фиксировался на персональном компьютере. Время задержки зажигания определялось от момента пересечения частицей светового луча до момента появления пламени. Интервал между началом падения и зажиганием КВ также фиксировался цифровой видеокамерой.

Систематическая погрешность измерения начальной температуры частицы, оцениваемая по методике [12], не превышала 1÷2 %. Погрешность определения T_p равна ± 0.5 %. Этим отклонением при анализе можно пренебречь, так как в экспериментах температура источника нагрева составляла не менее 800 К.

По результатам проведенных экспериментов также вычислялись случайные ошибки определения t_d. При фиксированном значении T_p для каждого размера частиц проводилась серия опытов. После этого определялись средние для каждого T_p значения t_d и среднеквадратические отклонения по методике [13]. В результате анализа значений td для серии опытов установлено, что коэффициенты вариации изменялись от ± 4.5 % до ± 10 %. Полученные коэффициенты вариации можно считать приемлемыми для проведенных экспериментов в связи со сложностью механизма реализации рассматриваемого процесса зажигания.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Численное исследование процессов тепломассопереноса в условиях физико-химических превращений проводилось при следующих значениях безразмерных параметров: начальные температуры жидкого КВ и окислителя Θ_0=0.3, металлической частицы Θ_p=0.8÷2; температура плавления материала частицы Θ_c=1.4; размеры частицы Z_p=0.15, R_p=0.05÷0.3; толщина слоя жидкого КВ Z_{liq}=0.5; размеры области решения R_L=Z_L=1; начальная скорость движения частицы V_p=0.2 при погружении; коэффициент сопротивления движению для цилиндрического диска c_χ=0.82 [14]. Для вычисления тепловыделения частицы, энергии, затраченной на испарение КВ и выделяющейся при окислении и кристаллизации использованы следующие справочные [15–17] значения: тепловой эффект окисления паров горючего в воздухе Q_o=42 МДж/кг; тепловой эффект испарения жидкости Q_e=25 кДж/кг; коэффициент термического расширения β=0.00096 $К^{-1}$; молекулярная масса жидкого КВ M=166.2 кг/кмоль; энергия активации и предэкспонент реакции окисления E=193 кДж/моль, k_0=9•10^8 $с^{-1}$; тепловой эффект кристаллизации Q_c=205 кДж/кг; степень черноты для стальной частицы ε=0.6. Теплофизические характеристики взаимодействующих веществ (жидкого КВ, окислителя (воздуха), металлической частицы и паров жидкости) приведены в [15–17].

В результате проведения численных и экспериментальных исследований установлено, что в системе «жидкое КВ – локальный источник ограниченной энергоемкости – окислитель» в зависимости от теплосодержания источника возможна реализация нескольких режимов зажигания, отличающихся положением зоны ведущей реакции окисления и интервалами изменения основной интегральной характеристики – времени задержки зажигания τ_d. Выявлено, что зона ведущей реакции окисления может располагаться в газовой области

над типичным источником ограниченного теплосодержания – погружающейся частицей, вблизи боковой грани не полностью погруженного в КВ источника нагрева, в паровом зазоре между частицей и жидкостью вблизи боковой поверхности источника. Установлено, что ни при каких условиях зажигание не происходит в паровом зазоре под частицей (рис.1). Выявленная закономерность обусловлена недостаточным содержанием в этой области окислителя, существенным поглощением энергии фазового перехода при испарении жидкого горючего КВ и значительным остыванием источника ограниченной энергоемкости вблизи границы раздела «частица – жидкость».

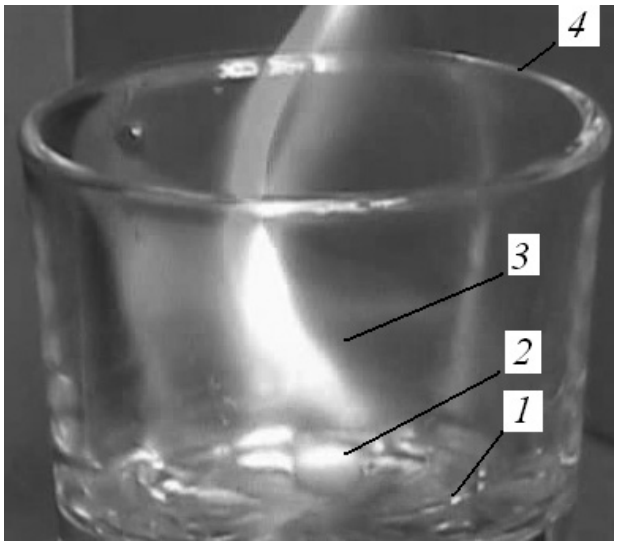

Рис.3 Кадр видеограммы опыта с зажиганием керосина одиночной стальной частицей в момент появления пламени (τ_d=0.386) при Θ_p=1.2, R_p=0.15, Z_p=0.15: 1 – жидкое КВ, 2 – металлическая частица, 3 – пламя, 4 – стеклянный сосуд.

Наиболее типичным, как показали эксперименты, при изменении температуры и размеров разогретых металлических частиц в достаточно широких диапазонах ($0.9<\Theta_p<1.4$, $0.1<R_p<0.2$) является режим, при котором зона воспламенения формируется в газовой области над погружающейся частицей (рис.3). Это можно объяснить тем, что достаточные для воспламенения концентрации компонентов парогазовой смеси и температуры достигаются именно в этой области. При испарении достаточно много энергии, аккумулированной в источнике, расходуется на прогрев приповерхностного слоя жидкости и фазовый переход. Поэтому вблизи границы вдува паров КВ концентрации горючего максимальны, но температуры недостаточны для воспламенения. Только после дополнительного прогрева поднимающихся паров за счет теплоотвода от частицы достигаются достаточные температуры и реакция окисления приобретает необратимый резко экспоненциальный характер – происходит зажигание (рис.3).

Установлено, что при повышении температуры частицы Θ_p размеры парового зазора между ее гранями и жидкостью увеличиваются за счет большего подвода энергии и, как следствие, более интенсивного испарения горючего. При понижении Θ_p увеличивается глубина погружения частицы в топливо. Размеры области прогрева жидкого топлива возрастают. В таких условиях большая часть энергии источника расходуется на нагрев и испарение жидкости. Парогазовая смесь разогревается за счет оставшейся неизрасходованной энергии. Так как при понижении Θ_p величина этой доли уменьшается, то и вероятность воспламенения также снижается. Например, выявлено, что при $\Theta_p<0.9$ и остальных адекватных условиях процесса разогретые частицы металлов полностью погружаются в жидкое КВ без реализации условий воспламенения. Это можно объяснить тем, что при погружении увеличивается площадь контакта источника с жидкостью и возрастает энергия, расходуемая на прогрев приповерхностного слоя вещества. В таких условиях источник ограниченной энергоемкости интенсивно остывает и не прогревает до достаточных для воспламенения температур формирующиеся пары. К тому же, при полном погружении частицы в жидкость нагретые до высоких температур пары горючего изолированы от окислителя слоем КВ. За счет достаточно высокого динамического давления эти пары проходят через слой жидкости и вступают в реакцию с окислителем, но температура в зоне реакции существенно меньше температуры вблизи разогретой частицы. В условиях частичного же погружения источника и формирующиеся пары горючего, и окислитель прогреваются при непосредственном контакте с разогретой частицей (рис.1). Поэтому аккумулированной в частице энергии достаточно как для прогрева жидкости, так и для смеси паров горючего с окислителем. Установленная закономерность позволяет заключить, что минимальные времена задержки зажигания жидко-

стей могут быть достигнуты при обеспечении контакта с локальными источниками энергии, близкого к «идеальному» без их внедрения в приповерхностный слой КВ.

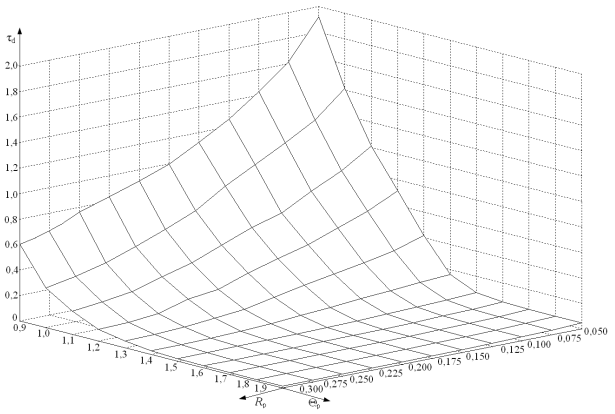

Рис.4 Зависимость времени задержки зажигания τ_d от Θ и R_p.

На рис.4 показана поверхность $\tau_d=\tau(R_p,\Theta_p)$, условно разделяющая области воспламенения (под поверхностью) и невоспламенения (над ней). Показаны предельные значения основных параметров (температура, размеры) локального источника ограниченной энергоемкости, при которых возможно зажигание. Так, например, выявлено, что в рассматриваемой системе (рис.1) температура $\Theta_p=0.9$ является (при $R_p=0.15$ и $Z_p=0.15$) нижней границей диапазона изменения температуры частицы, при которой возможно зажигание жидкого КВ. Также экспериментально и численно установлена аналогичная граница для диапазона изменения размеров частицы при фиксированной температуре. Так, например, для $\Theta_p=1$ зажигание происходит только при $R_p\geq0.05$ и $Z_p\geq0.15$.

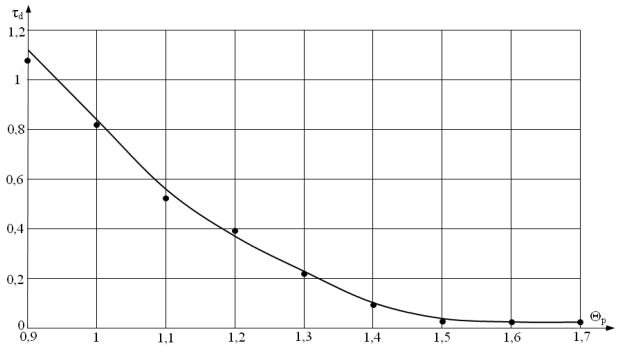

Рис.5 Зависимость времени задержки зажигания τ_d от Θ при $R_p=0.15$, $Z_p=0.15$ (• – экспериментальные значения).

На рис.5 приведена зависимость времени задержки зажигания КВ от температуры частицы в сравнении с экспериментальными значениями.

Видно, что отклонения значений времен задержки зажигания от экспериментальных τd составляют менее 5 % в достаточно широком диапазоне изменения температуры источника нагрева ($0.9<\Theta_p<1.9$). Этот результат позволяет сделать вывод об адекватности разработанной модели тепломассопереноса (рис.1) и правомерности принятых допущений. При этом помимо интегральных характеристик зажигания хорошее соответствие результатам экспериментов было получено и при сопоставлении положения зоны воспламенения, предельных температур и размеров локальных источников ограниченной энергоемкости.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально и численно показано, что возгорание жидкого КВ невозможно при полном погружении в него типичного источника ограниченной энергоемкости – разогретой до высоких температур металлической частицы. Установлено, что при затоплении частицы происходит интенсивное испарение жидкости. Однако, температура вдуваемых паров КВ и изолированного слоем жидкости окислителя недостаточна для ускорения реакции окисления. При дальнейшем погружении затопленного локального источника его температура снижается, скорость испарения уменьшается и замедляется вдув паров КВ в газовую область. Как следствие, происходит медленное остывание и погружение источника энергии. Можно заключить, что если зажигание не произошло при выпадении на поверхность горючей или легковоспламеняющейся жидкости разогретой до высоких температур частицы и последующем ее частичном погружении, то условия воспламенения не будут достигнуты при полном затоплении локального источника энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акинин Н.И. Статистический анализ причин аварий и травматизма на опасных производственных объектах / Н.И. Акинин, Н.Н. Булхов, В.А. Гериш // Пожаровзрывобезопасность.– 2010.– № 10.– С. 53 – 55.
2. Vilyunov V.N. Ignition of Solids / V.N. Vilyunov, V.E. Zarko.– Amsterdam: Elsevier Science Publishers, 1989.– 442 p.
3. Кузнецов Г.В. Численное моделирование воспламенения конденсированного вещества нагретой до высоких температур частицей / Г.В. Кузнецов, Г.Я. Мамонтов, Г.В. Таратушкина // Физика горения и взрыва.– 2004.– № 1.– С. 78 – 85.
4. Захаревич А.В. Зажигание модельных смесевых топливных композиций одиночной, нагретой до высоких температур частицей / А.В. Захаревич, В.Т. Кузнецов, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов // Физика горения и взрыва.– 2008.– № 5.– С. 54 – 57.
5. Кузнецов Г.В. Численное решение задачи воспламенения жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» частицей / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Физика горения и взрыва.– 2009.– № 5.– С. 42 – 50.
6. Кузнецов Г.В. О возможности использования одномерной модели при численном анализе процесса зажигания жидкого конденсированного вещества одиночной нагретой частицей / Г.В. Кузнецов, П.А. Стрижак // Физика горения и взрыва.– 2010.– № 6.– С. 78 – 85.
7. Самарский А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский.– М.: Наука, 1983.– 616 с.
8. Коздоба Л.А. Методы решения нелинейных задач теплопроводности / Л.А. Коздоба.– М.: Наука, 1975.– 227 с.
9. Kuznetsov G.V. Numerical simulation of turbulent natural convection in a rectangular enclosure having finite thickness walls / G.V. Kuznetsov, M.A. Sheremet // International Journal of Heat and Mass Transfer. 2010.– V. 53.– Issues 9–10.– P. 163 – 177.
10. Захаревич А.В. Зажигание жидкого пожароопасного вещества одиночной «горячей» металлической частицей / А.В. Захаревич, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов // Известия вузов. Физика.– 2007.– № 9/2.– С. 90 – 95.
11. Захаревич А.В. Зажигание дизельного топлива одиночной «горячей» металлической частицей / А.В. Захаревич, Г.В. Кузнецов, В.И. Максимов // Пожаровзрывобезопасность.– 2008.– № 4.– С. 28 – 30.
12. Полежаев Ю.В. Тепловая защита / Ю.В. Полежаев, Ф.Б. Юрьевич.– М.: Энергия, 1976.– 391 с.
13. Зайдель А.Н. Элементарные оценки ошибок измерений / А.Н. Зайдель.– Л.: Наука, 1968.– 96 с.
14. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцанский.– М.: Наука, 1970.– 736 с.
15. Варгафтик Н.Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей / Н.Б. Варгафтик.– М.: ООО «Старс», 2006.– 720 с.
16. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева.– М: Энергия, 1975. Т. 1.– 743 с.
17. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренева, П.Д. Лебедева. М: Энергия, 1975. Т. 2.– 896 с.

© Глушков Д.О., Стрижак П.А.