

3. Шидловский А. А. Основы пиротехники.— М.: Машиностроение, 1973.— 320 с.
4. Бажанов С. П., Гидасова Е. Х., Муратов С. М. Чувствительность к удару смесей металл-окислитель // ФГВ.— 1988.— 24, № 5.— С. 106—110.
5. Hariwing T. Quantification of the degree of hazard of pyrotechnic compositions // Proc. 7th Int. Pyrotechnics Seminar, Vail, Colorado, July 14—18, 1980.— P. 878—897.
6. Афанасьев Г. Т., Боболев В. К. Иницирование твердых взрывчатых веществ ударом.— М.: Наука, 1968.— 167 с.
7. Блинов И. Ф. Хлоратные и перхлоратные взрывчатые вещества.— М.: Оборонгиз, 1944.— 102 с.
8. Gordon S., Campbell C. Differential thermal analysis of the inorganic compounds. Nitrates and perchlorates of the alkali and alkaline earth and their subgroups // Analytical Chemistry.— 1955.— 27, N 7.— P. 1802—1409.
9. Есин О. А., Гульд П. В. Физическая химия пирометаллургических процессов.— М.: Металлургия, 1966.— Т. 2.— 703 с.
10. Брейтер А. А., Мальцев В. М., Попов Е. П. Модели воспламенения металлов // ФГВ.— 1977.— 13, № 4.— С. 558—570.
11. Горбунов В. В., Хромов В. Г., Шидловский А. А. Об окислительной активности водяного пара, СО и СО₂ по отношению к порошкам магния и алюминия // ЖПХ.— 1971.— Вып. 4.— С. 727—734.
12. Кондратьев Г. М. Тепловые измерения.— М.; Л.: Машгиз, 1957.— 610 с.
13. Амосов А. П., Бостанджиян С. А., Володин В. П. и др. Воспламенение твердых ВВ под действием тепловыделения на пятнах фактического касания при сухом трении // ФГВ.— 1978.— 14, № 5.— С. 114—120.
14. Кофстад П. Высокотемпературное окисление металлов.— М.: Мир, 1969.— 320 с.
15. Амосов А. П. Об условиях распространения горения за пределы очага воспламенения // Докл. АН СССР.— 1978.— 243, № 4.— С. 673—676.

г. Загорск

Поступила в редакцию 14/V 1990,
после доработки — 21/XII 1990

УДК 662.61 : 532.582 : 620.1931

А. Н. Вишняков

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВРЕМЕНИ ВОЗГОРАНИЯ ЧАСТИЦ, ОБРАЗУЮЩИХСЯ ПРИ РАЗРУШЕНИИ МЕТАЛЛА В КИСЛОРОДЕ

Для оценки порядка величины времени возгорания металлических частиц с чистой (не покрытой пленкой оксида) поверхностью, образующихся при разрушении металла в атмосфере газообразного кислорода, в одном частном случае проведены измерения интервала времени от момента образования частиц до появления заметного излучения в видимой области спектра, который в данной работе рассматривается как характерное время возгорания частиц. Исследуемые частицы создавались пробиванием листовой мишени из нержавеющей стали (12Х18Н9Т) цилиндрическим ударником из того же материала, летящим со скоростью ~640 м/с. Эксперименты проводились в кислороде при комнатной температуре и атмосферном давлении. Это давление было минимальным, при котором наблюдалось возгорание исследованных частиц. Измерения показали, что в условиях проведенных экспериментов время возгорания частиц нержавеющей стали с чистой поверхностью меньше ~1 мкс.

1. При механическом разрушении металлов могут образовываться мелкие частицы разрушаемого металла. Пример такого явления представлен на рис. 1, где приведена теневая фотография, полученная в атмосферном воздухе через 64 мкс после пробивания ударником из сплава 12Х18Н9Т листовой мишени из этого же материала. Эффективное время экспозиции ~10⁻⁷ с, скорость ударника $v = 541$ м/с. При пробивании плоской мишени 1 цилиндрический ударник 4 выбивает из нее диск 3, который летит впереди ударника. Поскольку величина v больше скорости звука c , перед ударником и диском возникает головная ударная волна 2, отражение которой 6 вместе с другими возмущениями наблюдается справа от мишени. В кольцевой зоне разрушения мишени образуется большое количество мелких частиц металла, разлетающихся в обе стороны от мишени. На фотографии они наблюдаются в виде темных зон 5 с переменной плотностью почернения. В областях этих зон, где плотность почернения достаточно мала, частицы невозможно отличить друг от дру-

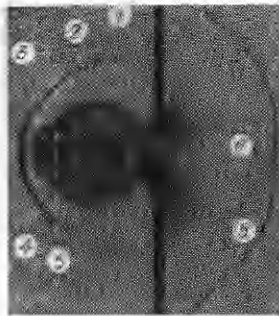


Рис. 1.

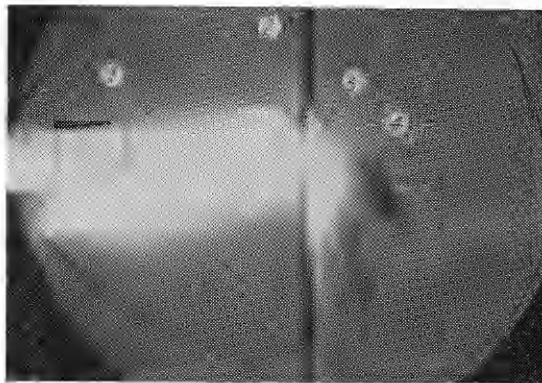


Рис. 2.

га, следовательно, их размеры меньше разрешающей способности снимка ($\sim 0,1$ мм).

Частицы первоначально имеют чистую поверхность, не защищенную оксидной пленкой. В кислороде на их поверхности начинается интенсивный экзотермический процесс окисления, который может завершиться образованием защитной оксидной пленки или возгоранием (в зависимости от размеров частицы и условий в окружающей среде). При одинаковых условиях более мелкие частицы возгораются, а на поверхности более крупных возникает защитная оксидная пленка.

Процесс возгорания иллюстрируется рис. 2, где представлена теневая фотография, полученная с помощью теневого прибора ИАБ-454 с импульсным (искровым) источником света в затемненном помещении при постоянно открытом затворе фотоприставки. Эксперимент проведен в камере, заполненной кислородом ($p_k = 0,3$ МПа). Мелкие частицы горят, поэтому фотография представляет собой практически мгновенную теневую картину, зафиксированную через 158 мкс после пробивания мишени 1 ударником 2, с наложенной на эту картину суммарной по времени фотографией светящихся частиц.

В начальный момент частицы имеют различные скорости: от 0 до v . При движении в окружающем газе их скорость относительно газа уменьшается вследствие аэродинамического сопротивления. Замедление частиц пропорционально баллистическому коэффициенту

$$\alpha = c_x \rho \cdot S/2m \sim 1/D,$$

где c_x — коэффициент сопротивления; ρ — плотность газа; S — площадь мишени частицы; m — масса частицы; D — характерный размер частицы. Поэтому в неподвижном газе должно происходить расслоение по размерам: вблизи мишени увеличивается относительная концентрация более мелких частиц, а вдали — более крупных. Этот процесс виден на рис. 2 справа от мишени, где скорость кислорода мала; здесь расслоение частиц по размерам вследствие действия аэродинамического сопротивления настолько велико, что наблюдается отдельно область более мелких самовозгорающихся частиц 3 вблизи мишени и затемненная область 4 более крупных негорящих частиц. На фотографии видны также следы отдельных горящих и негорящих частиц.

Образование мелких самовозгорающихся частиц может быть одной из причин возгорания конструкции вследствие их соударения с поверхностью конструкционного материала. Для анализа возможных последствий соударения в окислительной среде необходимо знать характерное время процесса возгорания мелких частиц, образующихся при разрушении металла.

В настоящей работе рассматривается характерное время возгорания частиц, под которым подразумевается время, измеренное от момента

образования частиц с поверхностью, не имеющей защитной оксидной пленки, до возникновения заметного излучения в видимой области спектра. Эксперименты проведены с частицами никелевых сплавов, широко используемых в кислородных системах.

2. Измерения основаны на баллистическом эксперименте, в котором частицы металла с первоначально чистой поверхностью создаются посредством пробивания листовой мишени толщиной 1 мм цилиндрическим ударником, выстреливаемым из пороховой метательной системы калибром 57 мм.

Предварительно было показано, что частицы нержавеющей стали 12X18H9T с чистой поверхностью возгораются при давлении кислорода, равном атмосферному и выше. Опыты (рис. 3) проводили в открытой атмосфере, но на передней стороне мишени 1 (обращенной к метательной системе) с помощью перфорированной, заглушенной на конце трубки 3 создавалась кислородная газовая завеса. Поэтому с одной стороны мишени был практически чистый кислород при атмосферном давлении, а с другой — воздух с незначительной примесью кислорода, в котором частицы, образующиеся при пробивании мишени ударником 2, не возгораются.

Излучение контролировалось в видимой области спектра, регистрировалось посредством фотографирования два положения ударника до соударения с мишенью и измерялись два интервала времени, необходимые для определения времени возгорания. Схема регистрации излучения представлена на рис. 4. После пробивания мишени 1 ударником 2 частицы, оказавшиеся в области кислородной завесы 3, возгораются. Излучение, ослабленное нейтральным фильтром 4, попадает на фотодиод 6 (ФД-9Э111), включенный по схеме делителя напряжения гальванического элемента (4,5 В). При освещении фотодиода его сопротивление падает, поэтому напряжение на постоянном сопротивлении возрастает. Осциллограф 7 регистрирует импульс напряжения на этом сопротивлении, который соответствует световому импульсу, воспринимаемому фотодиодом. Развертка осциллографа запускается внешним импульсом. Последний формируется в идентичном делителе напряжения под действием светового импульса, попадающего в момент фотографирования ударника на второй фотодиод через конденсор 5 от искрового источника света осветительной трубы теневого прибора ИАБ-454. Искровой источник света теневого прибора управляется синхронизатором с плоским инфракрасным фотоблокировочным лучом, установленным в таком положении, чтобы ударник фотографировался за 5—10 мкс до касания мишени. С таким же опережением запускается и развертка осциллографа.

Метод экспериментальной оценки времени возгорания частиц заключается в определении расстояния L от края пробоины мишени, т. е. от сечения, в котором образуются частицы, до плоскости, где находится передний торец ударника в момент возгорания, и средней скорости ударника на этом участке траектории. Если известны L и $v_{\text{ср}}$, то время возгорания $T = L/v_{\text{ср}}$. Для упрощения эксперимента использовался ударник с относительно большой массой ($M = 704$ г), чтобы скорость его движения можно было считать постоянной.

Величина v определялась методом теневого фотографирования с эффективным временем экспозиции порядка 10^{-7} с в двух сечениях до соударения с мишенью и измерением интервала времени между моментами фотографирования. По двум фотографиям с помощью существующей системы координат (инварные мерные штанги и проволочные отвесы) находилось расстояние L , пройденное ударником за интервал времени между двумя моментами фотографирования. Погрешность измерения ($L \approx 3$ м) не превышала $\Delta x = \pm 0,5$ мм.

На рис. 5 представлена схема измерения интервалов времени. Два зеркала 2 отражают на фотоприемный блок 1, состоящий из фотоэлектронного умножителя и формирователя, небольшую часть каждого из двух импульсных световых пучков осветителей теневых приборов

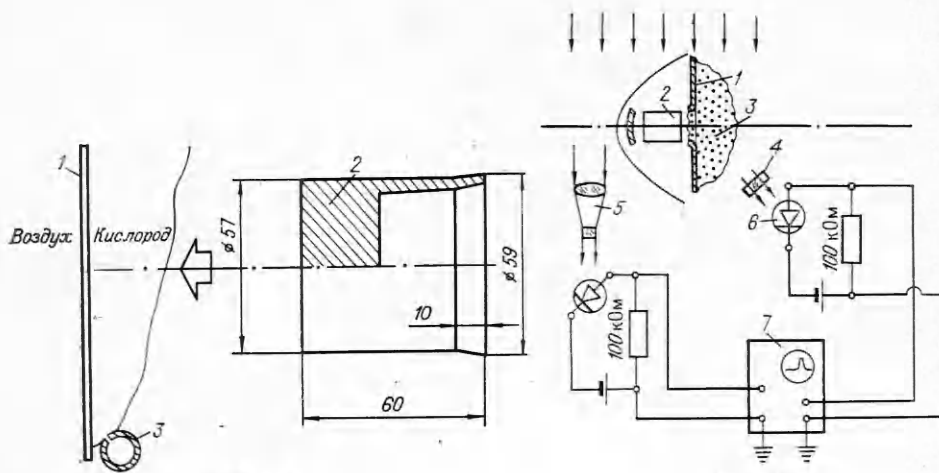


Рис. 3.

Рис. 4.

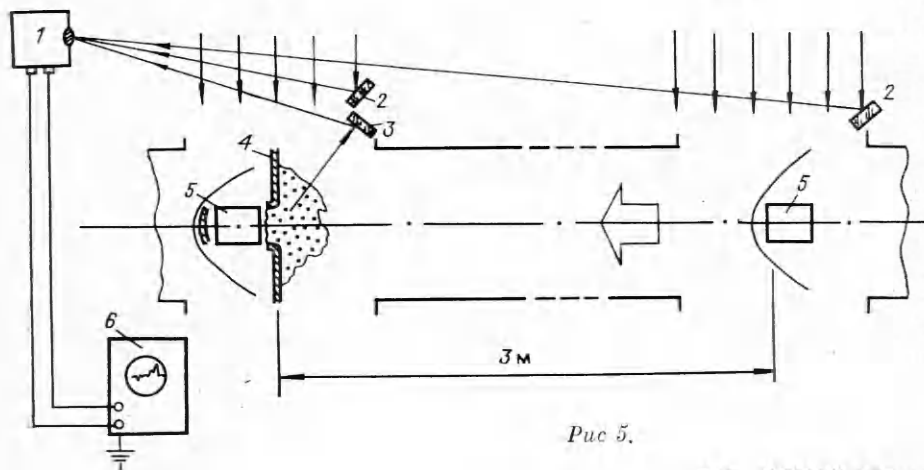


Рис. 5.

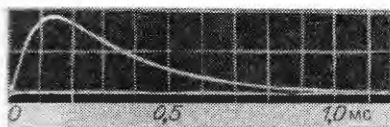


Рис. 6.

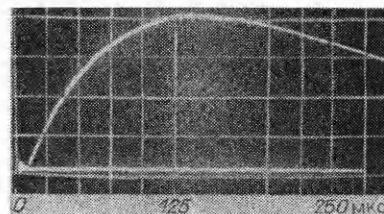


Рис. 7.

ИАБ-454, с помощью которых летящий ударник 5 фотографируется в двух сечениях траектории полета. Зеркало 3 отражает на фотоприемный блок свет, излучаемый горящими частицами, образовавшимися в процессе пробивания мишени 4. Фотоблок формирует три последовательных импульса времени: два импульса, по которым находится интервал времени между моментами фотографирования, и третий, определяющий конец интервала времени от момента фотографирования во втором сечении (за 5—10 мкс до касания ударником мишени) до возникновения заметного излучения возгоревшихся частиц. Импульсы времени подаются на вход измерителя временных интервалов 6 (ИВИ-8 [1]). Погрешность измерения $\Delta T = \pm 0,5$ мкс.

Продольная координата переднего торца ударника x_1 в момент фотографирования во втором сечении трассы, где располагается мишень (см. рис. 5), определялась по теневой фотографии, полученной в этом се-

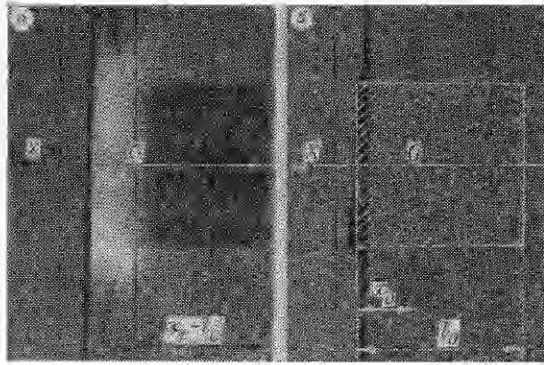


Рис. 8.

излучения (рис. 6), полученная при скорости соударения 642 м/с, показывает, что полное время горения частиц сплава 12Х18Н9Т, образующихся при пробивании листовой мишени цилиндрическим ударником, составляет ~ 1 мс.

На рис. 7 и 8 представлена информация, относящаяся к одному эксперименту, по результатам которого проведена количественная оценка времени возгорания. Скорость соударения здесь равна 643 м/с. На осциллограмме излучения (см. рис. 7) видно, что максимум излучения наблюдается приблизительно через 125 мкс после возгорания частиц. На рис. 8 приведены фотография, полученная за 10 мкс до соударения, и фотография мишени после пробивания ее ударником; показана также схема измерения координаты переднего торца ударника x_1 и способа определения положения ударника в момент возгорания частиц.

На второй фотографии рис. 8 изображено положение ударника в момент возгорания частиц, рассчитанное по измеренным скорости полета до соударения и интервалу времени ($T - 10$ мкс) от момента, в который была получена первая фотография, до возникновения распознаваемого фотоприемных блоком излучения возгоревшихся частиц. Суммарное по времени излучение возгоревшихся частиц наблюдается на рис. 8, а в виде светлой области справа от мишени, на стороне кислородной завесы. Торцы ударника в момент возгорания частиц находится в плоскости, проходящей через ближайшую по направлению полета точку края пробойны, образующейся на мишени, что свидетельствует о малости времени возгорания.

4. В соответствии с формулой (1) абсолютная погрешность определения положения ударника в момент возгорания определяется погрешностями измерения координаты переднего торца ударника (на рис. 8, а $\Delta x = \pm 0,1$ мм), интервала времени $\Delta T = \pm 0,5$ мкс и скорости ударника Δv . Поскольку база измерения скорости $L = \sim 3$ м определялась с точностью $\Delta L = \pm 0,5$ мм, а интервал времени движения ударника на этой базе $T = 4666$ мкс измерялся с $\Delta T = \pm 0,5$ мкс, точность определения скорости до соударения не превышала 0,03%. Эта величина пренебрежимо мала по сравнению с погрешностью измерения второго интервала времени $T = 10$ мкс, составляющей 5%.

Помимо рассмотренной выше инструментальной погрешности определения $v_{ср}$, соотношение (1) содержит также методическую погрешность, поскольку вместо $v_{ср}$ в это соотношение необходимо подставлять среднюю скорость для второго интервала времени T от момента получения фотографии ударника перед соударением до возгорания частиц. Эта скорость отличается от ее значения на базе L , так как ударник тормозится вследствие аэродинамического сопротивления и взаимодействия с мишенью в процессе пробивания.

Замедление ударника под действием аэродинамического сопротивления определяется величиной баллистического коэффициента $\alpha =$

чении, а в момент возгорания частиц (x_0) рассчитывалась по измеренному второму интервалу времени T и измеренной $v_{ср}$ на базе $L \approx 3$ м до соударения:

$$x_0 = x_1 + v_{ср}T. \quad (1)$$

Профиль края пробойны и ее продольные координаты фиксировались на дополнительной теневой фотографии, полученной после эксперимента.

3. Типичная осциллограмма сигнала суммарного

$= 0,002 \text{ м}^{-1}$. Изменение скорости на базе L при $\alpha L < 1$ с точностью до величин третьего порядка малости относительно αL определяется соотношением

$$\Delta v_{\text{ср}}/v_{\text{ср}} = \alpha L < 0,006.$$

Разность между средней скоростью на базе L и $v_{\text{ср}}$ для второго интервала T , обусловленная аэродинамическим сопротивлением, находится из выражения:

$$\Delta v/v_{\text{ср}} = \alpha L/2 < 0,003.$$

Эта величина также мала по сравнению с относительной погрешностью измерения интервала времени T .

Замедление ударника вследствие взаимодействия с мишенью можно оценить, сравнив энергию, затрачиваемую на пробивание мишени, с кинетической энергией ударника. Определение минимальной скорости пробивания мишени ударником меньшей массы показали, что энергия, необходимая для пробивания, $\Delta W_1 = 3,8 \pm 0,4$ кДж. Кроме того, в процессе пробивания часть кинетической энергии ударника расходуется на кинетическую энергию диска массой $m = 20,4$ г, выбиваемого из мишени ($\Delta W_2 \approx 4,2$ кДж). Замедлением ударника, обусловленным повышением давления (в 2,5—3 раза) вследствие отражения головной ударной волны от мишени, можно пренебречь, как показывает приведенная выше оценка замедления за счет аэродинамического сопротивления. Следовательно, максимальное изменение кинетической энергии ударника после пробивания мишени в рассматриваемом эксперименте может составлять $\Delta W \approx 8$ кДж при исходной энергии ударника $W = 146$ кДж.

Максимальное относительное изменение скорости ударника

$$\left(\frac{\Delta v}{v}\right)_{\text{max}} \approx \frac{1}{2} \frac{\Delta W}{W} = 2,74\%.$$

Это изменение скорости происходит на малом отрезке траектории (приблизительно 3 мм), поэтому погрешность определения положения ударника в момент возгорания частиц, обусловленная взаимодействием ударника с мишенью, не превышает $\sim 0,05$ мм. Эта величина меньше погрешности определения координаты точки на фотографии ($\Delta x = \pm 0,1$ мм), поэтому при определении положения ударника относительно мишени в момент возгорания частиц взаимодействием ударника с мишенью можно пренебречь. Пренебрежение замедлением ударника приводит к увеличению оцениваемой величины времени возгорания частиц.

Таким образом, погрешность расчета положения ударника в момент возгорания частиц по формуле (1) определяется главным образом погрешностью измерения второго интервала времени T и не превышает $\pm 0,5$ мм. Начальное положение частиц, образовавшихся в процессе пробивания мишени, также имеет неопределенность порядка $\pm 0,5$ мм, поскольку толщина мишени равна 1 мм. Эта неопределенность характеризует разрешающую способность использованного метода измерения времени возгорания.

Приведенные результаты и оценки возможных погрешностей показывают, что время возгорания частиц сплава 12Х18Н9Т с чистой, не защищенной пленкой оксида поверхностью, образующихся при пробивании листовой мишени толщиной 1 мм цилиндрическим ударником, летящим со скоростью 643 м/с, в кислороде с $p = 1$ атм меньше разрешающей способности данных экспериментов по времени, которая составляет ~ 1 мкс.

5. Выше изложены результаты измерений в одном частном случае, но в действительности проведено большое количество аналогичных экспериментов в диапазоне скоростей соударения 200—1000 м/с и $p_{\text{O}_2} \leq 1$ МПа. Во всех опытах суммарное время горения частиц было также порядка 1 мс, а время возгорания меньше разрешающей способности по времени. Максимальная разрешающая способность измерения времени достигнута в описанном выше опыте. Аналогичные результаты получены

также и для частиц алюминиевых сплавов. Поэтому приведенные результаты измерений в частном случае, по-видимому, дают достаточно общую оценку порядка величин времен горения и возгорания самовозгорающихся частиц металла с чистой поверхностью, образующихся при разрушении металлов в кислороде.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пелых А. Н., Пронюшкин А. В. Прибор для измерения интервалов времени // Приборы и техника эксперимента.— 1961.— № 4.

г. Москва

Поступила в редакцию 6/XII 1989

УДК 532.529.5 + 541.126

А. В. Федоров, Е. В. Тетенев, Б. Вессьер

ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ГАЗОВЗВЕСИ ЧАСТИЦ МЕТАЛЛОВ ПРИ РЕАЛЬНОМ ВЗРЫВЕ.

I. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И РЕШЕНИЕ В АВТОМОДЕЛЬНОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Дана постановка задачи о воспламенении частиц металлов в затухающих ударных волнах для одномерного нестационарного течения газа (с различными видами симметрии), которое возникает от взрыва центрального заряда. Обсуждаются данные расчетов этой проблемы в случае автомодельного движения газа при сильном взрыве. Выявлено три типа динамики частиц в зависимости от их радиуса; существование двух областей — в первой частицы запасают тепло, во второй передают его газу (вариант без воспламенения частиц). Определено влияние характерных параметров задачи на время воспламенения, когда имеет место воспламенение частиц.

Проблема распространения волн детонации в аэродисперсных смесях газа и реагирующих твердых частиц привлекла внимание исследователей в связи с широким применением в промышленности рабочих тел такого типа. При этом встает вопрос о возникновении гетерогенной детонации, ее стационарном распространении и затухании. Одной из первых проблем, возникающих при попытках физического или математического моделирования инициирования детонации, является проблема воспламенения частиц дисперсного горючего, распыленного в атмосфере окислителя. Теоретическое и экспериментальное рассмотрение данного процесса, возникающего за проходящими и отраженными ударными волнами (УВ), дано в работах [1—3] в рамках одномерного течения с плоскими волнами. В [4] теоретически исследовалось воспламенение частиц за детонационными и взрывными волнами (с затухающим профилем давления), описываемыми автомодельными решениями. Работа [5] посвящена обзору экспериментальных данных по воспламенению пылей за УВ. В [6] описываются эксперименты по инициированию сферической детонации подрывом центрального заряда ТНТ в смесях крахмала и кислорода, при этом детонационного процесса не наблюдалось.

Как теоретический, так и практический интерес представляет создание математической модели гетерогенной детонации, которая бы позволила провести расчеты воспламенения и горения смеси, переход к стационарному процессу, а в дальнейшем и возможного затухания. Остановимся здесь на первом этапе исследования: воспламенение мелких частиц в УВ, возникающих под действием взрыва центрального заряда ВВ. Изучение проведем в рамках двух подходов. В первом определим движение и нагрев частицы в поле течения газа, возникающего при точечном взрыве (см. также [4, 7]), а во втором — решим задачу об эволюции и разогреве частицы в поле течения газа, возникающего при взрыве центрального заряда, с реальными уравнениями состояния сред.