

**ПРОБЛЕМЫ ЯДЕРНОЙ, РАДИАЦИОННОЙ
И ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ**

УДК 532.23

**СТЕХИОМЕТРИЧЕСКАЯ СМЕСЬ АЦЕТИЛЕНА С КИСЛОРОДОМ В
МОДЕЛИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ
НЕУСТОЙЧИВОСТИ**

© 2021 С.И. Герасимов^{*,**}, И.А. Каныгин^{*}, Н.В. Невмержицкий^{*}

^{*} Саровский физико-технический институт – филиал Национального Исследовательского ядерного университета «МИФИ» Саров, Нижегородская обл., Россия

^{**} Институт проблем машиностроения РАН, Нижний Новгород, Россия

Для моделирования процессов гидродинамической неустойчивости применяются различные схемы ускорения контактных границ разноплотных сред в тех или иных конструкциях ударных труб. В таких опытах возникают свои сложности, например, связанные с влиянием тонких диафрагм, разграничивающих исследуемые среды до начала движения. В этом отношении исключительно перспективными оказываются газозрывчатые смеси с максимальной температурой продуктов реакции, позволяющие как минимизировать время деструкции тонких пленок-диафрагм, так и значительно уменьшить размеры ударных труб для проведения опытов. В работе приведены результаты расчетов термодинамических параметров продуктов взрыва стехиометрической смеси $2C_2H_2+5O_2$ при детонации в моделях идеального взрыва, идеальной детонации, химпика. Приведен пример использования продуктов взрыва этой смесей для исследования неустойчивости Рихтмайера – Мешкова.

Ключевые слова: гидродинамическая неустойчивость, термодинамическое равновесие, стехиометрическая смесь, точка Чепмена-Жуге, внутренняя энергия, детонация.

Поступила в редакцию 01.09.2021

После доработки 08.10.2021

Принята к печати 15.10.2021

Введение

Проблема получения лазерного термоядерного синтеза связана, в том числе, с развитием возмущений на контактной границе термоядерной мишени. Эта мишень – замкнутая сферическая оболочка с газообразным термоядерным горючим, схлопывается под действием лазерного импульса. Этот процесс неустойчив: сначала при ускорении растут возмущения на внешней границе оболочки (ускорение направлено от «легкого» испаренного материала к неиспаренному, а на стадии торможения развиваются возмущения на внутренней границе оболочки (ускорение направлено от «легкого» горючего к «тяжелому» материалу оболочки). Развиваемое давление значительно превосходит прочность оболочки – перемешивание материалов на границе развивается беспрепятственно, препятствуя достижению необходимых для зажигания термоядерного горючего условий. Исследование данного процесса исключительно трудоемкое (размер мишени менее миллиметра, а требуемая плотность энергии сжатия превышает, реализуемую при разлете продуктов детонации бризантного ВВ) и дорогостоящее. Поэтому для моделирования процессов гидродинамической неустойчивости применяют относительно простые и дешевые схемы ускорения контактных границ разноплотных сред в тех или иных конструкциях ударных труб. В таких опытах возникают свои сложности, например, связанные с влиянием тонких диафрагм, разграничивающих исследуемые среды до начала движения. В этом отношении исключительно перспективными оказываются

газовзрывчатые смеси с максимальной температурой продуктов реакции, позволяющие как минимизировать время деструкции тонких пленок-диафрагм, так и значительно уменьшить размеры ударных труб для проведения опытов.

Расчетно-теоретическое исследование детонационных свойств ГВС

Расчетно-теоретическое исследование детонационных свойств смеси $2C_2H_2+5O_2$ включает расчеты для идеального взрыва, для детонации по модели Чепмена-Жуге, для детонации по модели Зельдовича-Неймана [1-6].

Исходные предпосылки

Для расчетов необходимо знание термодинамических свойств смеси. Достаточно знать свободную энергию Гельмгольца F как функцию удельного объема V , абсолютной температуры T и молекулярного состава $X(i)$, где индекс i нумерует сорта молекул, которые могут образоваться из исходных атомов C , H , O . Возможны молекулы: H_2O , CO_2 , CO , H_2 , O_2 , OH , C_2H_2 , CH_4 , и т.д., а также и ионы: e (свободный электрон), H^+ , O^+ , H^- и т.д. По известной свободной энергии F вычисляются и остальные термодинамические величины: давление P как частная производная от $-F$ по V , энтропия S как частная производная от $-F$ по T , внутренняя энергия E по формуле $E=F+TS$. Такие вычисления дают правильные величины P , S , E для любого молекулярного состава (равновесного, метастабильного или совсем неустойчивого), то есть для любых значений аргументов $x(i)$.

В строгом термодинамическом равновесии концентрации $x(i)$ определяются из условия минимума свободной энергии F (при неизменности суммарного числа атомов каждого сорта в составе всех молекул), то есть равновесный молекулярный состав зависит только от параметров состояния V, T . Расчет равновесных концентраций (и термодинамических величин P , S , E) проводится на основе информации из справочника Глушко [7] и при заданном наборе сортов молекул, среди которых отыскивается минимум F . В справочниках [7, 8] имеются не все возможные молекулы, которые можно образовать из атомов C , H , O , а только более простые (например, нет большинства углеводородов). Опыт расчетов показывает, что при достаточно высоких температурах заметные концентрации имеют только достаточно простые молекулы, так что более сложные молекулы, отсутствующие в справочниках, все равно дали бы пренебрежимо малый вклад в равновесный состав продуктов взрыва. Например, в [7] имеется 40 молекул и ионов, которые образуются из атомов C , H , O . Однако в интервале температур до 6000 К заметный вклад дают только восемь молекул: H_2O , CO_2 , CO , H_2 , O_2 , OH , O , H . Ионизируются (при 5000-6000 К) не более одной миллионной доли атомов и молекул, количество атомарного углерода, как газообразного, так и в конденсированной фазе (то есть в виде сажи) ничтожно. В примерах, приводимых далее, учитывались молекулы только из приведенного выше набора.

Идеальный взрыв

Взрывом (в отличие от горения) называют процесс очень быстрого химического превращения взрывчатого вещества в продукты взрыва. В предельной ситуации – идеальный взрыв – химическое превращение происходит мгновенно и равномерно в некоторой массе M . В результате идеального взрыва в этой массе мгновенно повысятся температура T и давление P . За одно мгновение теплопроводность не успеет сработать, так что приращение тепла в массе Q равно нулю. Объем V_0 массы M не может измениться мгновенно, так что совершенная массой работа A также равна нулю. По первому началу термодинамики изменение внутренней энергии равно сумме $Q+A$, то есть равно нулю (следовательно внутренняя энергия единицы массы до идеального взрыва и после него одинакова). Это основное условие, определяющее конечное состояние продуктов взрыва (при заданном начальном состоянии). Заметим, что в термодинамике внутренняя энергия E определена с точностью до произвольного слагаемого. Выбор этого слагаемого определяет «начало отчета» E , а точнее –

указывается то состояние в переменных V , T , $X(i)$, в котором полагается $E=0$. Ниже принято такое же начало отсчета энергии, как в [7].

Естественно доопределить идеальный взрыв условием, что конечное состояние продуктов взрыва является термодинамически равновесным. При этом условия расчетное значение температуры и давления будут максимально возможными, так как в более реальных условиях некоторое количество тепла, возможно, во время взрыва успеет перейти в окружающую среду, и тогда давление и температура будет ниже.

Расчет приведен для единственного начального состояния: давление исходной смеси равно 1 атм, температура 300 К, плотность $0,00123 \text{ г/см}^3$. Этому состоянию соответствует внутренняя энергия $2,38 \text{ кДж/г}$. В таблице 1 приводятся состояния на изохоре $0,00123 \text{ г/см}^3$ в интервале температур от наивысшей 6000 К и до 2000 К. В расчете число атомов С, Н, О полагалось равным 2, 2 и 5, соответственно. Концентрации $x(i)$ равны количеству молекул, образованных из этого числа атомов. Поэтому максимально возможное число молекул H_2O равно 1, а для CO_2 оно равно 2. Только эти молекулы присутствуют при $T = 2000 \text{ К}$. В конечном состоянии идеального взрыва, когда внутренняя энергия равна начальной внутренней энергии $E=2,38 \text{ кДж/г}$, получается:

$$T=3990 \text{ К};$$

$$P=17,2 \text{ атм};$$

$$S=11,2 \text{ Дж/г/К}.$$

Таблица 1 – Параметры состояний на изохоре $0,00123 \text{ г/см}^3$ в интервале температур от наивысшей 6000 К и до 2000 К [Parameters of states on the isochore 0.00123 g/cm^3 in the temperature range from the highest 6000 K to 2000 K]

T, К	H_2O	CO_2	CO	O_2	H_2	O	H	OH	P, атм	S, Дж/г/к	E, кДж/г
6000	0,007	0,022	1,978	0,100	0,061	2,591	1,683	0,180	38,3	13,690	14,1132
5800	0,011	0,028	1,972	0,127	0,075	2,486	1,609	0,220	36,5	13,582	13,496
5600	0,018	0,038	1,962	0,162	0,091	2,355	1,517	0,266	34,6	13,452	12,757
5400	0,029	0,051	1,949	0,204	0,109	2,193	1,406	0,319	32,6	13,296	11,895
5200	0,046	0,069	1,931	0,254	0,128	2,000	1,276	0,377	30,5	13,107	10,897
5000	0,072	0,095	1,905	0,311	0,148	1,777	1,126	0,435	28,3	12,883	9,755
4800	0,111	0,130	1,870	0,371	0,165	1,531	0,963	0,486	26,0	12,622	8,477
4600	0,165	0,178	1,822	0,430	0,177	1,272	0,792	0,524	23,8	12,325	7,080
4400	0,237	0,244	1,756	0,483	0,182	1,014	0,623	0,540	21,6	11,995	5,597
4200	0,325	0,332	1,668	0,521	0,177	0,771	0,465	0,531	19,4	11,639	4,064
4000	0,426	0,449	1,551	0,538	0,163	0,556	0,329	0,493	17,4	11,263	2,523
3800	0,533	0,600	1,400	0,530	0,142	0,376	0,218	0,432	15,5	10,874	1,006
3600	0,638	0,784	1,216	0,492	0,117	0,237	0,135	0,355	13,8	10,479	-0,456
3400	0,735	0,998	1,002	0,429	0,090	0,137	0,078	0,272	12,3	10,084	-1,836
3200	0,817	1,225	0,775	0,346	0,066	0,072	0,041	0,193	10,3	9,700	-3,104
3000	0,881	1,445	0,555	0,257	0,045	0,034	0,020	0,126	9,7	9,338	-4,227
2800	0,929	1,637	0,363	0,173	0,029	0,014	0,009	0,075	8,7	9,010	-5,179
2600	0,961	1,786	0,214	0,104	0,018	0,005	0,003	0,040	7,9	8,724	-5,951
2400	0,980	1,889	0,111	0,055	0,010	0,001	0,001	0,019	7,1	8,482	-6,556
2200	0,991	1,950	0,050	0,026	0,005	0,000	0,000	0,008	6,4	8,278	-7,026
2000	0,997	1,981	0,019	0,010	0,002	0,000	0,000	0,003	5,8	8,100	-7,400

Идеальная детонация

Детонация (даже в газах) – сложный химико-газодинамический процесс, требующий в теоретических построениях сначала производства максимальных упрощений, и затем постепенно привнесения тех или иных усложнений. Главным признаком детонации является ударная волна, идущая по исходной взрывчатой смеси, и инициирующая химическую реакцию за фронтом ударной волны. Если детонация распространяется по трубе, то скорость ударного фронта возрастает с увеличением диаметра трубы, и после некоторого предельного диаметра становится постоянной величиной. Эта постоянная скорость D является основной характеристикой взрывчатой смеси. Для смеси $2C_2H_2+5O_2$, что соответствует концентрации ацетилена 28,57%, детонационная скорость оказалась равной $D \sim 2.4 \pm 0,5$ км/с. Сравним это значение с тем, что получается при использовании простейшей модели – модели Чепмена-Жуге (идеальная детонация с мгновенным завершением химических реакций во фронте).

Согласно этой модели фронт УВ рассматривается как математический разрыв, на котором выполняются известные соотношения, вытекающие из законов сохранения массы, импульса и энергии. Третье из этих уравнений имеет вид:

$$E - E_0 = 0,5(P + P_0)(V_0 - V). \quad (1)$$

Здесь индексом отмечено исходное состояние смеси, в нашем конкретном примере $P_0 = 1$ атм, $E_0 = 2,38$ кДж/г. Величины без индекса соответствуют состоянию (искомому) на фронте УВ. Предполагается, что в этом состоянии имеется полное термодинамическое равновесие. Тогда, известная свободная энергия Гельмгольца определяет, в частности, калорическое уравнение состояния, то есть связь между термодинамическими параметрами E, P, V :

$$f(E, P, V) = 0. \quad (2)$$

Два уравнения (1), (2) используются для определения двух величин из E, P, V . Третье уравнение, обоснованное Я.Б. Зельдовичем, сводится к следующему. Если из искомой точки в P, V - плоскости провести адиабату Пуассона, то есть линию, определяемую решением дифференциального уравнения $dE = -PdV$, то прямая, проходящая через искомую точку P, V и исходную P_0, V_0 , должна касаться адиабаты Пуассона в искомой точке:

$$-dP/dV = (P - P_0)/(V_0 - V). \quad (3)$$

Здесь производная в левой части уравнения берется вдоль адиабаты Пуассона. Три уравнения определяют три величины E, P, V на фронте ударной (детонационной) волны. Найденное состояние называют точкой Чепмена-Жуге.

Помимо калорического уравнения состояния (2) свободная энергия также определяет температуру T , энтропию S и равновесный молекулярный состав $x(i)$. Так что в процессе вычисления величин E, P, V из уравнений (1), (2), (3) одновременно вычисляются и $T, S, X(i)$. Одновременно имеются в виду термины, что ударная адиабата, определяемая уравнением (1), и адиабата Пуассона имеют в точке Чепмена-Жуге касание второго порядка, и что адиабата Пуассона одновременно является изэнтропой, то есть на ней $S = const$. Из законов сохранения следует также, что скорость ударной волны D определяется наклоном (3) прямой, которая называется лучом Рэлея-Михельсона, а именно, этот наклон равен квадрату отношения D/V_0 .

В таблице 2 приводятся расчетные значения в точке Чепмена-Жуге.

Таблица 2 – Расчетные значения в точке Чепмена-Жуге [Calculated values at the Chapman-Jouguet point]

Молекулярный состав в точке Чэмпена-Жуге	
H ₂ O	0,4049
CO ₂	0,4197
CO	1,5803
O ₂	0,5324
H ₂	0,1654
O	0,5904
H	0,3352
ОН	0,5202
Термодинамические величины в точке Чэмпена-Жуге	
T=4217 К	
$\rho_1/\rho_0=1,84$	
P=34,6 атм	
S=11,17 Дж/г/К	
E=3,038 кДж/г	
D=2,426 км/с	

Итак, расчетная скорость детонации 2,426 км/с находится в пределах ошибки измерения экспериментальной скорости.

Химпик

Основное предположение в модели Зельдовича-Неймана прямо противоположно предположению Чэмпена-Жуге. Если в последней предполагается, что на фронте ударной волны химическая реакция происходит мгновенно, то в первой предполагается, что из-за мгновенности нарастания давления во фронте УВ, трактуемом как математический разрыв, реакция совершенно не успевает произойти, так что непосредственно на фронте молекулярный состав такой же, как перед фронтом. И только уже за фронтом за конечное время химическая реакция приведет к конечному равновесному составу молекул, соответствующему точке Чэмпена-Жуге на некотором удалении от фронта УВ. Таким образом, в области конечной толщины будет наблюдаться неравновесный химический состав. Эта область называется химзоной, ширина которой может быть порядка нескольких миллиметров.

Другое предположение модели Зельдовича заключается в том, что для установившейся детонации движения химзоны стационарно, то есть в ней все профили (давления, плотности, химсостава и пр.) перемещаются как жесткое целое со скоростью нормальной детонации D . Тогда начальное состояние химзоны определяется как состояние на ударной адиабате газа постоянного (исходного) состава, имеющего скорость ударной волны, равную D . Это состояние называется химпиком. В исследуемом взрывчатом составе расчет дает следующие числа (для $D=2,46$ км/с):

$$P=66,6 \text{ атм}$$

$$E_0=4,81 \text{ кДж/г}$$

$$\rho_1/\rho_0 = 8,65$$

$$T=2300 \text{ К}$$

Температура в химпике достаточно низкая, т.к. на самом фронте УВ химическая реакция еще не началась. Горение происходит позже. температура достигает

максимума в состоянии Чепмена-Жуге, когда все необратимые реакции закончились, далее температура будет падать за счет адиабатического расширения продуктов взрыва.

Эксперименты с использованием ГВС

Ударная труба с газовзрывчатым драйвером

Эксперименты проводились на ударной трубе, схема которой представлена на рисунке 1. Ударная труба состояла из камеры высокого (драйвер) и низкого давлений. Камера высокого давления герметично отделялась от камеры низкого давления мембраной из лавсана толщиной (50÷150) мкм. Камера низкого давления состояла из входного и выходного каналов и оптически прозрачной измерительной секции с внутренним сечением (40×40) мм.

Измерительная секция от входного канала герметично отделялась тонкой (≈ 1 мкм) полимерной пленкой, выходной канал от атмосферной среды – мембраной из лавсана, толщиной 50 мкм.

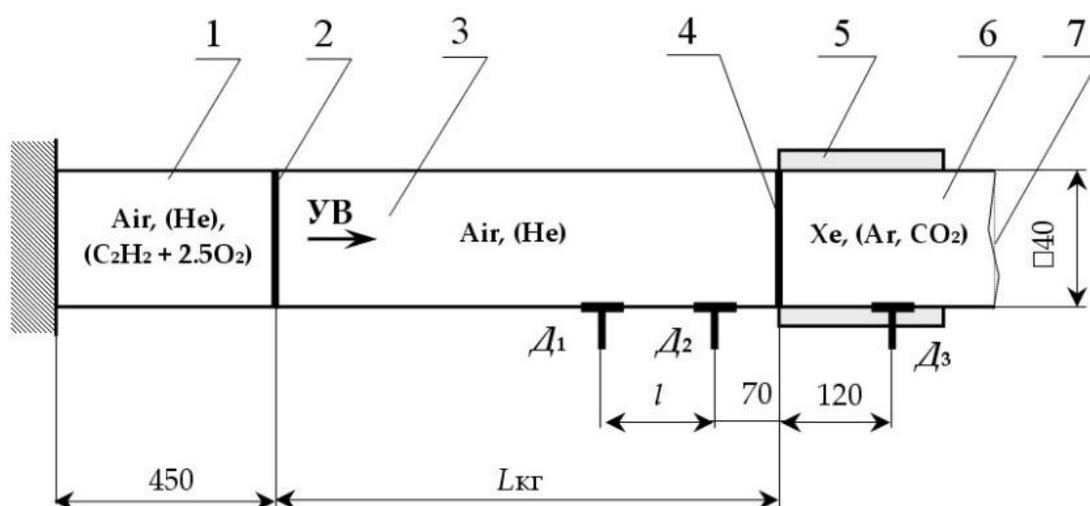


Рисунок 1 – Схема эксперимента: 1 – камера высокого давления; 2 – мембрана; 3 – канал входной; 4 – разделительная пленка (КГ); 5 – измерительная секция; 6 – канал выходной; 7 – мембрана; D_1, D_2, D_3 – датчики давления (размеры в мм) [Experiment scheme: 1 – high pressure chamber; 2 – membrane; 3 – input channel; 4 – separating film (CG); 5 – measuring section; 6 – output channel; 7 – membrane; D_1, D_2, D_3 – pressure sensors (dimensions in mm)]

Измерительная секция и выходной канал заполнялись ксеноном (углекислым газом, аргоном), входной канал камеры низкого давления – воздухом или гелием при атмосферных условиях. Камера высокого давления заполнялась газовой взрывчатой смесью (ГВС) ацетилена и кислорода ($C_2H_2 + 2,5O_2$) или гелием (воздухом) под определенным давлением.

Взрывчатая смесь инициировалась электроискровым разрядом в точке, расположенной по центру крышки камеры высокого давления. При этом по камере высокого давления распространяется детонационная волна. При выходе ее на диафрагму, последняя разрушается, и в «легкий» газ распространяется УВ. При выходе УВ на контактную границу с «тяжелым» газом происходит распад разрыва с образованием ударной волны, уходящей в «тяжелый» газ и отраженной волны, уходящей в «легкий». Разделительная пленка разрушается, граница раздела газов ускоряется, в результате чего на ней возникает неустойчивость Рихтмайера-Мешкова [9-10], приводящая к развитию возмущений и перемешиванию контактирующих газов.

При заполнении драйвера сжатым воздухом или гелием установка работала как обычная ударная труба.

Регистрация течения производилась в покадровом режиме скоростной кинокамерой СФР, сочлененной с теневой установкой ИАБ-451 [11]. При этом во всех опытах применялся теневой метод регистрации (без ножа Фуко [12]). Скорость УВ определялась по временным показаниям датчиков-отметчиков D_1, D_2, D_3 и геометрии ударной трубы, а также по кинограммам экспериментов. Датчики D_1, D_2, D_3 – пьезокерамические датчики давления АР1710 (полоса пропускания ~ 20 кГц.) с диаметром чувствительного элемента 10 мм.

В таблице 1 представлены некоторые условия и результаты проведенных экспериментов со следующими обозначениями:

P_0 – начальное полное давление ГВС (*воздуха, гелия*) в камере (погрешность $\pm 0,1$ атм);

t_1, t_2, t_3 – время прихода УВ на датчики D_1, D_2, D_3 соответственно (погрешность ± 2 мкс);

$t_{КГ}$ – время прихода УВ на контактную границу газов (рассчитанное по t_1, t_2 и геометрии УТ);

$L_{КГ}$ – расстояние от диафрагмы до начального положения КГ; l – расстояние между датчиками D_1 и D_2 ;

M_1 – число Маха УВ в *воздухе, гелии*; M_2 – число Маха УВ в газе измерительной секции;

U – скорость контактной границы газов (определена из условия симметричного развития перемешивания относительно КГ);

$A = \frac{\rho_T - \rho_L}{\rho_T + \rho_L}$ – число Атвуда (определялось из условия распада-разрыва на КГ, здесь

ρ_T, ρ_L – плотность «тяжелого» и «легкого» газа соответственно).

Отметим, что при заполнении драйвера воздухом или гелием, в «легком» газе образовывалась стационарная ударная волна, при использовании ГВС – нестационарная.

Таблица 3 – Результаты проведенных экспериментов [Results of the experiments]

№ опыта	Вид КГ	Драйвер, P_0 , атм	t_1 , мкс	t_2 , мкс	t_3 , мкс	$t_{КГ}$, мкс	$L_{КГ}$, мм	A	U , м/с	l , мм	M_1	M_2
520	<i>B-He</i>	ГВС, 1	758	1439	-	1517	1275	0,46	278	603	2,58	3,1
526	<i>B-CO₂</i>	ГВС, 1	759	1444	-	1524	1275	0,32	441,3	603	2,55	2,6
527	<i>B-He</i>	ГВС, 1	752	1444	-	1524	1275	0,47	282,8	603	2,55	3,1
531	<i>B-He</i>	ГВС, 9,5	454	747	-	1517	1275	0,23	940,8	603	6,02	7,8
536	<i>B-He</i>	Air 4,5	1150	2380	-	2530	1183	0,6	122,5	603	1,4	$\approx 1,5$
539	<i>B-He</i>	ГВС, 9,5	450	742	-	776	1275	0,25	1000,8	603	6,04	7,6
540	<i>B-CO₂</i>	ГВС, 9	442	746	-	781	1275	0,4	1314	603	5,8	5,2
578	<i>B-He</i>	ГВС, 4	613	893	1073	942	1230	0,37	743	403	4,25	5,4
711	<i>He-He</i>	ГВС, 9,5	387	502	609	524	1230	0,9	814	403	3,6	8,3
719	<i>Ar-He</i>	<i>He</i> , 31	1247	1726	2013	1809	1258	0,47	395	403	2,6	3,46
720	<i>Ar-He</i>	<i>He</i> , 31	1105	1582	1875	1665	1258	0,47	399	403	2,64	3,36
724	<i>Ar-He</i>	ГВС, 4	639	925	1105	975	1230	0,43	736	403	4,4	5,4
730	<i>He-He</i>	<i>He</i> , 31	775	1040	1348	1086	1258	0,93	218	403	1,6	2,7
732	<i>He-He</i>	ГВС, 4	438	570	712	593	1230	0,9	685	403	3,2	5,9

На рисунке 2 представлены кинограммы некоторых экспериментов со следующими обозначениями: УВ – ударная волна; ЗТП – зона турбулентного перемешивания; КГ – начальное положение контактной границы; Φ – фрагменты полимерной пленки. Время t отсчитывается от момента прихода УВ на КГ.

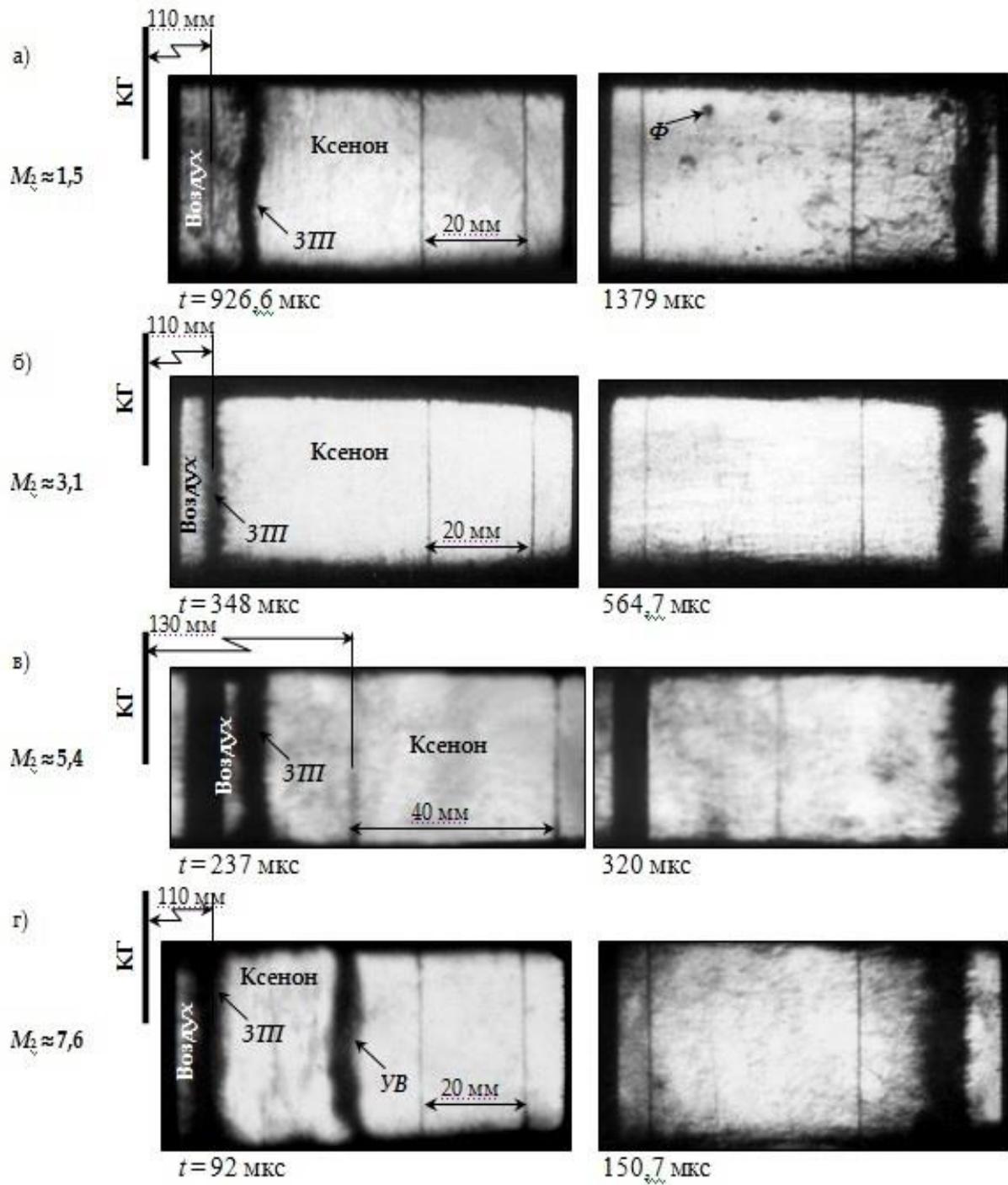


Рисунок 2 – Кинограммы экспериментов по развитию турбулентного перемешивания на границе воздух – ксенон: а) опыт № 536; б) опыт №527; в) опыт №578; г) опыт № 539 [Films of experiments on the development of turbulent mixing at the air-xenon interface: a) experiment No. 536; b) experiment No. 527; c) experiment No. 578; d) experiment No. 539]

Зафиксировано, что с увеличением числа Маха ударной волны ширина зоны перемешивания и скорость ее роста увеличиваются.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физика взрыва : в 2 т. / С.Г. Андреев, А.В. Бабкин, Ф.А. Баум [и др.] ; ред. Л.П. Орленко – Т. 1. – Москва : Физматлит, 2004. – 832 с.
2. Зельдович, Я.Б. Теория детонации / Я.Б. Зельдович, А.С. Компанеец. – Москва : Гостехиздат, 1955. – 268 с.
3. Шаль, Р. Физика детонации Р. Шарль // Физика быстропротекающих процессов; пер. с англ. – Т. 2. – Москва : Мир, 1971. – С. 276-349.
4. Губкин, К.Е. Распространение взрывных волн / К.Е. Губкин // Механика в СССР за 50 лет. – Т. 2. – Москва : Наука, 1970. – 879 с.
5. Физика взрыва / Ф. А. Баум [и др.] ; под ред. К.П. Станюковича. – Москва : Наука, 1975. – 704 с.
6. Калашников, Я.А. Физическая химия веществ при высоких давлениях / Я.А. Калашников. – Москва : Высшая школа, 1987. – 240 с.
7. Термодинамические свойства индивидуальных веществ, в четырех томах : справочник / Отв. ред. В.П. Глушко. – Москва : Наука, 1978-1982.
8. JANAF Thermochemical tables. NSROS-NBS 37. Wash. Gov. print.off., 1971, 114 p.
9. Мешков, Е.Е. Исследование гидродинамических неустойчивостей в лабораторных экспериментах / Е.Е. Мешков. – Саров : ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2006. – 139 с.
10. Алеханов, Ю.В. Метод исследования взаимодействия диспергированной воды с пламенем / Ю.В. Алеханов, М.В. Близнецов, Ю.А. Власов, С.И. Герасимов, Е.Е. Мешков // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т. 42, № 1. – С. 57.
11. Златин, Н.А. Баллистические установки и их применение в экспериментальных исследованиях / Н.А. Златин, А.П. Красильщиков, Г.И. Мишин, Н.Н. Попов; под ред. Н.А. Златина и Г.И. Мишина. – Москва : Наука, 1974. – 344 с.
12. Зацепина, М.Е. Современный количественный теневой метод с применением средств компьютерных технологий / М.Е. Зацепина, В.К. Кирилловский. – Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. – 2013. – № 2(171). – С. 226-230.

REFERENCES

- [1] Andreev S.G., Babkin A.V., Baum F.A. Fizika vzryva: v 2 t. [Explosion Physics: in 2 volumes]. Edited by L.P. Orlenko. Vol. 1. Moscow: Fizmatlit, 2004. 832 p. (in Russian).
- [2] Zel'dovich YA.B. Teoriya detonacii [Detonation Theory]. Moscow: Gostekhizdat, 1955. – 268 p. (in Russian).
- [3] SHal', R. Fizika detonacii [Detonation Physics]. Fizika bystroprotekayushchih processov [Physics of Fast Processes]; translated from English. Vol. 2. Moscow: Mir, 1971. P. 276-349 (in Russian).
- [4] Gubkin K.E. Rasprostranenie vzryvnyh voln [Blast Wave Propagation]. Mekhanika v SSSR za 50 let [Mechanics in the USSR for 50 Years]. Vol. 2. Moscow: Nauka, 1970. 879 p. (in Russian).
- [5] Fizika vzryva [Explosion physics]. Baum F.A. and others; edited by K.P. Stanyukovich. Moscow: Nauka, 1975. 704 p. (in Russian).
- [6] Kalashnikov Ya.A. Fizicheskaya himiya veshchestv pri vysokih davleniyah [Physical Chemistry of Substances at High Pressures]. Moscow: High School, 1987. 240 p. (in Russian).
- [7] Termodinamicheskie svoystva individual'nyh veshchestv, v chetyrekh tomah : spravochnik [Thermodynamic Properties of Individual Substances, in four volumes: a handbook]. Edited by V.P. Glushko. Moscow: Nauka, 1978-1982 (in Russian).
- [8] JANAF Thermochemical Tables. NSROS-NBS 37. Wash. Gov. print.off. 1971. 114 p. (in English).
- [9] Meshkov E.E. Issledovanie gidrodinamicheskikh neustojchivostej v laboratornyh eksperimentah [Study of Hydrodynamic Instabilities in Laboratory Experiments]. Sarov: FSUE RFNC-VNIIEF, 2006. 139 p. (in Russian).
- [10] Alekhanov Yu.V. Metod issledovaniya vzaimodejstviya dispergirovannoj vody s plamenem [Method for Studying the Interaction of Dispersed Water with a Flame]. Fizika goreniya i vzryva [Combustion and Explosion Physics]. 2006. Vol. 42, No. 1. P. 57 (in Russian).
- [11] Zlatin N.A. Ballisticheskie ustanovki i ih primenenie v eksperimental'nyh issledovaniyah [Ballistic Installations and their Application in Experimental Research]. Edited by N.A. Zlatin and G.I. Mishin. Moscow: Nauka, 1974. 344 p. (in Russian).

- [12] Zacepina M.E. Sovremennyj kolichestvennyj tenevoj metod s primeneniem sredstv komp'yuternyh tekhnologij [Modern Quantitative Shadow Method Using Computer Technology]. Nauchno-tekhnicheskie vedomosti Cankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta [Scientific and Technical Statements of the St. Petersburg State Polytechnic University]. 2013. No. 2(171). P. 226-230 (in Russian).

Stoichiometric Mixture of Acetylene and Oxygen in Modeling of Gas Dynamic Instability Development

S.I. Gerasimov^{*,**1}, I.A. Kanygin^{*2}, N.V. Nevmerzhitsky^{*3}

^{*}*Sarov Physics and Technical Institute of National Research Nuclear University «MEPHI», Nizhny Novgorod region, Sarov, 6 Duchova str., Russia 607186*

^{**}*Mechanical Engineering Research Institute of Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod, Belinskogo str., 603024 Russia*

¹*ORCID iD: 0000-0002-6850-0816*

WOS Researcher ID: L-2727-2016

e-mail: s.i.gerasimov@mail.ru

²*ORCID iD: 0000-0001-8632-2155*

e-mail: kanyginiv@yandex.ru

³*e-mail: nnevmerzh@gmail.com*

Abstract – To simulate the processes of hydrodynamic instability, various schemes for accelerating the contact boundaries of different-density media in various structures of impact pipes are used. Such experiments have their own difficulties, for example, associated with the influence of thin diaphragms that delimit the studied media before the start of movement. In this regard, gas-explosive mixtures with the maximum temperature of the reaction products are extremely promising, allowing both to minimize the destruction time of thin films-diaphragms, and to significantly reduce the size of shock tubes for conducting experiments. The paper presents the results of calculations of the thermodynamic parameters of the explosion products of a stoichiometric mixture of $2C_2H_2+5O_2$ during detonation in the models of an ideal explosion, ideal detonation, chemical peak. An example of using the explosion products of these mixtures to study the Richtmayer – Meshkov instability is given.

Keywords: hydrodynamic instability, thermodynamic equilibrium, stoichiometric mixture, Chapman-Jouget point, internal energy, detonation.