

03

Самовоспламенение горючего газа при импульсном истечении его в окислительную среду

© Т.В. Баженова, М.В. Брагин, В.В. Голуб, М.Ф. Иванов

Институт теплофизики экстремальных состояний
Объединенного института высоких температур РАН, Москва
E-mail: bazhenova@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 4 октября 2005 г.

Продемонстрирована возможность самовоспламенения водорода в результате возникновения перед холодным расширяющимся потоком газа стартовой ударной волны, на которой повышается температура выше температуры торможения, что приводит к воспламенению образующейся на контактной поверхности смеси горючего газа с воздухом. Методом численного моделирования показано, что при давлении в баллоне порядка 300–600 атмосфер формирующаяся в воздухе ударная волна имеет интенсивность, достаточную для поджига водородно-воздушной смеси за фронтом возникающей струи сжатого водорода.

PACS: 47.27.nf

Во время производства работ с использованием водорода при разгерметизации сосуда, при открытии перепускных клапанов или при срабатывании клапана сброса давления может произойти возгорание водорода с последующим взрывом. Одной из возможных причин является разряд между заряженными трением взвешенными частицами. Другой причиной может быть появление перед холодным расширяющимся потоком газа воздушной стартовой ударной волны, на которой температура повышается выше температуры торможения, что приводит к воспламенению образующейся на контактной поверхности смеси горючего газа с воздухом. Самовоспламенение может произойти при условии, что время пребывания смеси при высокой температуре достаточно для смешения и больше времени индукции.

Известно, что при запуске струи в пространство с противодавлением впереди истекающего газа в окружающей среде возникает ударная волна, скачок уплотнения, в котором механическая энергия движе-

ния газа преобразуется в тепловую неизэнтропическим образом [1,2]. На контактной поверхности, отделяющей истекающий газ от газа, нагретого ударной волной, возникает скачок температуры и плотности. Контактная поверхность сильно турбулизована, что способствует смешению истекающего холодного газа с горячим газом за ударной волной [3]. В работах [4,5] наблюдалось самовоспламенение водорода на контактной поверхности, отделяющей толкающий газ от кислорода (воздуха) за ударной волной в ударной трубе. В работе [6] численно решались уравнения Навье–Стокса с учетом диффузии и кинетики химических реакций для задачи о встречном взаимодействии осесимметричных струй холодного горючего и нагретого воздуха при атмосферном давлении. Самовоспламенение происходило при начальной температуре воздуха 600 К и температуре газа в струе 300 К. Период задержки составлял $15 \mu\text{s}$, после чего температура образующейся в области контакта смеси поднималась до 2000 К. В работе [7] на основании численных расчетов сделан вывод, что самовоспламенение водородной струи невозможно. Этот вывод является ошибочным, так как расчет проведен для одного диаметра отверстия (1 mm) и не может быть распространен на другие размеры, при которых время пребывания газа при высокой температуре соизмеримо со временем индукции.

Развитие импульсной струи моделировалось на ударной трубе, в торце которой устанавливались осесимметричное сопло и барокамера. На рис. 1 приведены типичные интерферограммы процесса истечения азота для различных моментов времени. Как видно из полученных фотографий, имеются следующие основные элементы импульсной струи: стартовая ударная волна (СВ), распространяющаяся в окружающем газе; контактная поверхность (КП), разделяющая ударно-нагретый газ струй и газ барокамеры с вихревыми кольцами (B_1, B_2, B_3); вторичная ударная волна (ВВ) в истекающем газе; ядро изэнтропического расширения струи (1) вблизи среза сопла. Наблюдаемые возмущения фиксируются также в результатах численного расчета.

Расчеты воспламенения струи водорода основывались на физико-математической модели, включающей газодинамический перенос вязкого газа, кинетику окисления водорода, многокомпонентную диффузию и теплопроводность [8]. Система уравнений химической кинетики включала 9 уравнений. Коэффициенты переноса определялись согласно

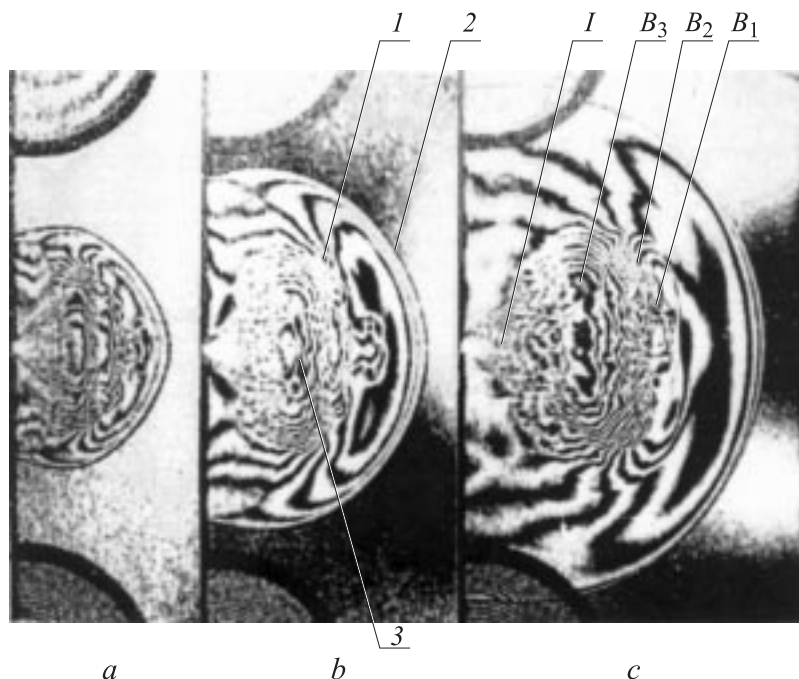


Рис. 1. Интерферограммы развития импульсной струи азота, истекающей в затопленное пространство при атмосферном давлении (давление на входе в звуковое сопло 34 atm.), для моментов времени 40, 64 и 98 μs : *I* — контактная поверхность; *2* — стартовая ударная волна; *3* — вторичная ударная волна.

молекулярно-кинетической теории. Расчеты проводились в двумерной (аксиально-симметричной) постановке с использованием численного алгоритма второго порядка точности по пространству.

Проведенные методом численного моделирования исследования самовоспламенения водорода, поступающего в воздушную атмосферу в результате разгерметизации баллонов высокого давления, показали, что при давлении в баллоне порядка 300–600 atm. формирующаяся в воздухе ударная волна имеет интенсивность, достаточную для поджига водородно-воздушной смеси за фронтом распространяющейся струи сжатого водорода. Температура на фронте горения при этом локально

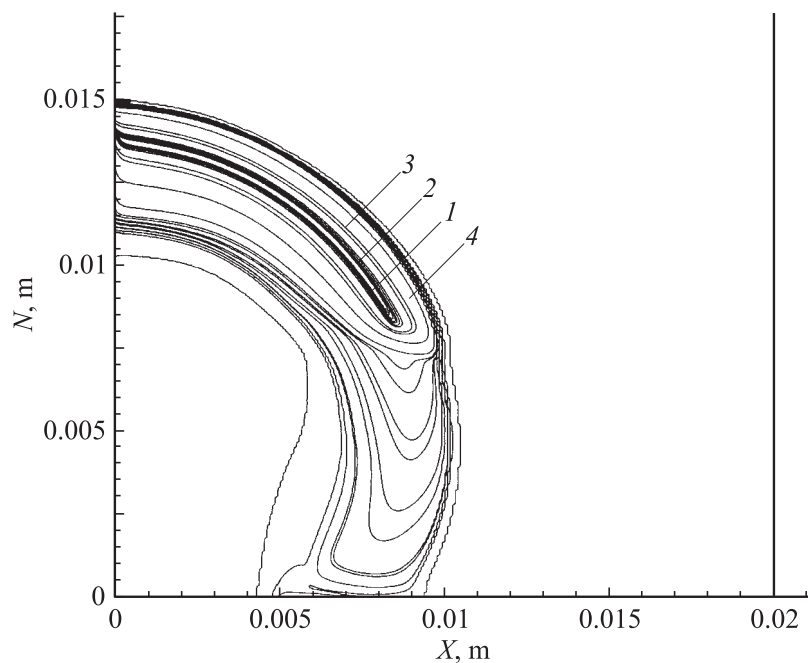


Рис. 2. Изолинии концентрации воды, образующейся при сгорании водорода, истекающего в атмосферу. X, N — расстояния от центра отверстия вдоль и поперек оси истечения. Концентрация воды отнесена к количеству воды, образующейся при полном сгорании стехиометрической смеси: 1–4 — 70, 30, 10, 2%.

превышает 2500° , что примерно в 2 раза превосходит температуру в ударной волне в воздухе при тех же условиях впрыска химически неактивной смеси. Полученные результаты указывают на возможность существования не связанного с электризацией микрочастиц механизма, приводящего к возгоранию водородно-воздушной смеси при разгерметизации баллонов высокого давления.

Типичный результат расчетов самовоспламенения струи сжатого водорода представлен на рис. 2 (изолинии концентрации воды, образующейся при сгорании водорода). Результаты относятся к моменту времени $8\mu\text{s}$ после начала выброса. Давление в баллоне составля-

ло 400 atm., температура сжатого газа и окружающего воздуха — 300 К, радиус отверстия, через которое выходила струя водорода, — 2 mm. Из приведенных результатов видно, что на передней границе струи формируется устойчивый фронт горения, даже без развитых механизмов турбулентного перемешивания.

Расчеты показали, что при тех же размерах выходного отверстия, нормальной температуре окружающей среды и сжатого газа поджиг выходящей струи не наблюдается при давлении в баллоне порядка 200 atm. и менее. В то же время исследуемый процесс существенно зависит от начальной температуры водорода и воздуха. Так, при начальной температуре среды 400 К и давлении сжатого водорода 200 atm. выходящая из баллона струя воспламеняется.

На стабильное развитие процесса самоподжига водорода естественным образом влияет размер выходного отверстия, уменьшение которого приводит к срыву воспламенения, что наблюдалось, например, в расчетах с радиусом отверстия $r = 0.5$ mm.

Заметим, что затухание горения за ударной волной может быть следствием не только физических факторов, но и вычислительных погрешностей. Так, тестовые расчеты процессов горения и детонации на сетках с размерами ячеек, заметно превосходящих ширину фронта пламени, имеют явно выраженную тенденцию к уменьшению зоны горения и постепенному затуханию пламени. Поэтому для приведенного выше анализа самовоспламенения струи водорода исследовались расчетные сетки с размерами ячеек 0.04–0.01 mm, что сопоставимо с шириной фронта пламени в водородно-воздушной смеси. При этом переход в указанном интервале от более крупных к более мелким сеткам уже незначительно сказывался на результатах.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (номер проекта 06-01-00087).

Список литературы

- [1] Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, 1984. 234 с.
- [2] Омельченко А.В., Усков В.Н. // Изв. РАН МЖГ. № 6. С. 118–126.
- [3] Голуб В.В. // Природа. 1998. № 1. С. 30–36.

- [4] *Баев В.К., Бузуков А.А., Шумский В.В.* // ФГВ. 2000. № 3. Т. 36. С. 3–10.
- [5] *Баев В.К., Шумский В.В., Ярославцев М.И.* // ФГВ. 1983. № 5. С. 73–80.
- [6] *Bityurin V.A., Vocharov A.N., Filimonova E.A.* // 15 Int. Conference on MGD Energy Conversion and 6 Int. Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics. Moscow, May 24–27, 2005. P. 359.
- [7] *Yun-feng Liu, Nobuyuki Tsuboi, Hiroyuki Sato, Fumio Higashino* // CD Proc. of The 20th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reacting Systems. Montreal, Canada, July 31–August 5, 2005.
- [8] *Ivanov M.F., Liberman M.A., Peril O.E., Valiev D.M., Eriksson L.E.* // Combust. Science and Tech. 2005. V. 177. N 1. P. 151–182.