

03

Диффузионное самовоспламенение водорода, возникающее при истечении его из блока сопел

© В.В. Голуб, Т.В. Баженова, И.Н. Ласкин, Н.В. Сёмин

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

E-mail: bazhenova@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 16 июня 2008 г.

Показано, что при истечении водорода из резервуара под высоким давлением в воздух через блок сопел в результате взаимодействия струй возникают условия для самовоспламенения при диаметрах сопел, при которых в одиночной струе самовоспламенение невозможно. Найдены условия безопасного выпуска водорода из резервуара под давлением 400 atm и менее.

PACS: 47.40.Nm

При внезапном выбросе водорода из резервуара повышенного давления в атмосферу возникает сверхзвуковая струя. Температура водорода падает по мере расширения струи, однако существуют причины для резкого локального повышения температуры за счет перехода механической энергии струи в тепловую энергию при нагреве окружающей атмосферы в пусковой ударной волне и перемешивании горячего воздуха с истекающим газом на турбулизованной контактной поверхности. Проведенные методом численного моделирования предварительные исследования самовоспламенения водорода, поступающего в воздушную атмосферу в результате разгерметизации баллона высокого давления, показали, что при давлении в баллоне порядка 150–400 atm и диаметре отверстия более 2.6 mm формирующаяся в воздухе ударная волна имеет интенсивность, достаточную для поджига водородно-воздушной смеси за фронтом распространяющейся струи сжатого водорода [1]. Для диаметра, меньшего чем 2.6 mm, воспламенение не возникает, а если и возникает, то быстро гаснет [2–4]. Причиной этого явления служит уменьшение при малых диаметрах времени существования зон с температурой выше температуры воспламенения водородно-воздушных смесей. В силу автомодельности процесса при

малом диаметре выходного отверстия интенсивность воздушной ударной волны падает с расстоянием быстрее, чем при большом диаметре. Создание необходимого расхода выпускаемого водорода возможно при использовании перфорированной насадки, имеющей достаточно малые отверстия, обеспечивающие время пребывания смеси газа с горячим воздухом меньше времени задержки самовоспламенения [5]. Однако при недостаточном большом разnose выпускных отверстий может возникнуть взаимодействие соседних пусковых ударных волн [6,7], что приведет к дополнительному повышению температуры смеси и возможности самовоспламенения. В данной работе исследовано влияние расстояния между выпускными отверстиями на возможность самовоспламенения составной струи водорода. Структура импульсной составной струи исследована на примере истечения азота.

Экспериментальное моделирование взаимодействия импульсных струй проводилось на ударной трубе квадратного сечения (40×40 mm), состыкованной с вакуумной барокамерой. В торце ударной трубы устанавливались двухсопловые блоки. Истечение происходило после отражения от торца ударной волны. Все исследованные блоки звуковые, диаметр критического сечения сопла в двухсопловых блоках взят из соотношений равенства расхода с односопловым и составляет 2.75 mm. Относительный разнос, т. е. отношение расстояний между осями сопел к диаметру критического сечения, составлял $l = 2.5, 4.4$ и 6.2 (блоки I, II и III). Камера низкого давления и барокамера наполнялись азотом при давлении в диапазоне $p_0 = 30 \div 380$ mm Hg и температуре $T_0 = 300$ K. В качестве толкающих газов использовались либо азот, либо гелий или смесь этих газов. Отношение n давления за отраженной ударной волной перед входом в сопло p к давлению в барокамере p_0 в данной серии опытов равнялось 45, число Маха M потока на выходе из сопла было равно 1. Получены последовательные фотографии формирования потока для двухсопловых блоков нестационарных струй при различном разnose сопел. На рис. 1 представлено развитие струй водорода от каждого сопла и возникающих перед ними воздушных ударных волн для двухсоплового блока в осевой плоскости.

Анализ фотографий позволяет выделить три последовательные стадии образования квазистационарной струи за многосопловыми блоками. Первая стадия начинается в момент появления за срезом сопла истекающего газа, сопровождается возникновением характерной волновой структуры и заканчивается в момент начала взаимодействия первичных

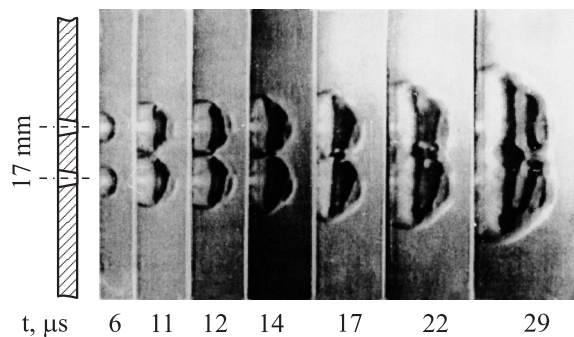


Рис. 1. Последовательные теплереграммы взаимодействия двух недорасширенных струй азота в осевой плоскости, истекающих из двухсоплового блока ($M = 1$; $p/p_0 = 45$; $l = 6.2$). Цифры под кадрами обозначают время от начала процесса истечения.

ударных волн (до момента $t = 11 \mu\text{s}$ на рис. 1). На стадии независимого развития струй от каждого сопла закономерности движения волновой структуры не зависят от разнесения сопел. Длительность существования этой стадии пропорциональна разнесению сопел и изменяется от $4 \mu\text{s}$ для блока I до $11 \mu\text{s}$ для блока III.

На начальной стадии развития течения импульсные струи от каждого сопла распространяются автономно и характеризуются стартовой ударной волной, контактной поверхностью с вихревым кольцом, вторичной ударной волной. На второй стадии происходит взаимодействие ударных волн и вихрей вплоть до появления результирующей первичной ударной волны для всего блока и суммарных вихрей для каждого сопла ($t = 29 \mu\text{s}$ на рис. 1).

С целью определения условий, при которых в блочных струях диффузионное самовоспламенение не происходит, проведено численное трехмерное моделирование истечения струи водорода из одного отверстия или системы отверстий одинаковой суммарной площади.

Расчет основывается на физико-математической модели, включающей газодинамический перенос вязкого газа, кинетику окисления водорода, многокомпонентную диффузию и теплопроводность. Решается полная система уравнений Навье–Стокса для многокомпонентной смеси газов. Моделирование механизма химической кинетики окисле-

ния водорода было выполнено на основе схемы Боумана–Миллера, в которой рассматриваются 11 компонентов: H_2O , O_2 , H_2 , OH , H , O , HO_2 , H_2O_2 , N_2 , N , NO и 21 реакция:

- | | |
|----------------------------------|------------------------------------|
| 1) $H_2O + M = H + OH + M$, | 12) $HO_2 + H_2 = H_2O_2 + H$, |
| 2) $H_2 + M = H + H + M$, | 13) $H_2O + HO_2 = H_2O_2 + OH$, |
| 3) $O_2 + M = O + O + M$, | 14) $H + HO_2 = OH + OH$, |
| 4) $H + O + M = OH + M$, | 15) $O + HO_2 = O_2 + OH$, |
| 5) $O + H_2 = OH + H$, | 16) $OH + HO_2 = H_2O + O_2$, |
| 6) $O_2 + H = O + OH$, | 17) $HO_2 + HO_2 = H_2O_2 + O_2$, |
| 7) $O + H_2O = OH + OH$, | 18) $H + HO_2 = H_2 + O_2$, |
| 8) $H_2O + H = OH + H_2$, | 19) $N + NO = N_2 + O$, |
| 9) $H_2 + O_2 = OH + OH$, | 20) $N + O_2 = NO + O$, |
| 10) $H_2O_2 + M = OH + OH + M$, | 21) $N + OH = NO + H$. |
| 11) $HO_2 + M = H + O_2 + M$, | |

Вычисления молярных скоростей реакций проведены при помощи пакета CHEMKIN-II. Расчеты проводились в трехмерной постановке с использованием явной схемы второго порядка точности по времени и по пространству.

Сначала в качестве тестовых были проведены расчеты в трехмерной постановке для круглого отверстия 4 и 2 мм в диаметре, и результаты были сопоставлены с двумерными расчетами и результатами работы [2]. Для давления в баке 400 atm истечение из отверстия диаметром 4 мм приводило к воспламенению и последующему горению, а для 2 мм — нет.

Рассматривалось влияние разнеса отверстий в насадке на условия самовоспламенения струй водорода, истекающих из резервуаров под давлением 400 atm. Проведено сравнение характера течения для двух геометрий: одного отверстия диаметром 4 мм и четырех отверстий диаметром 2 мм каждое, разнесенных на некоторое расстояние друг от друга. Во втором случае входные отверстия располагались в вершинах квадрата. Выходные площади обеих систем совпадали. В расчетах варьировалось расстояние между центрами отверстий. На рис. 2 представлены зависимости максимальной температуры на оси струи от времени.

После замены одного отверстия диаметром 4 мм на эквивалентную по площади систему из четырех отверстий диаметром 2 мм, разнесенных на расстояние 3 мм, происходит увеличение максимальной

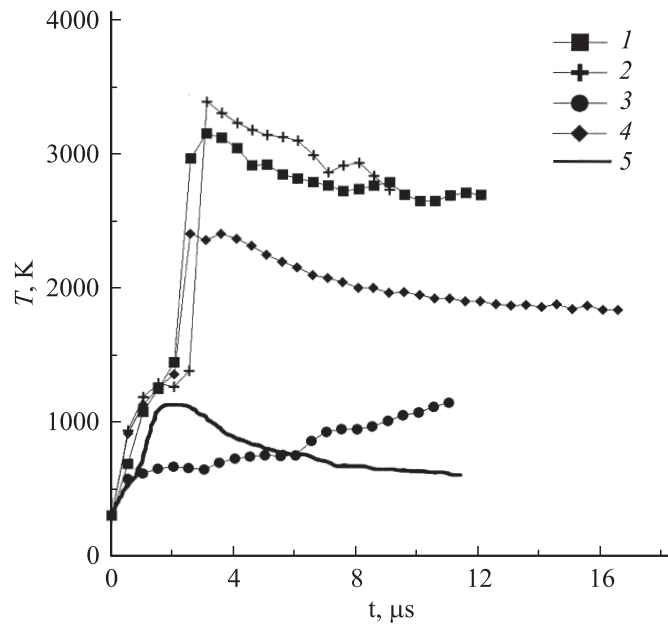


Рис. 2. Максимальная температура в струе для различных типов выходного отверстия: 1 — одно отверстие диаметром 4 мм; 2–4 — четыре отверстия диаметром 2 мм каждое, центры которых расположены в вершинах квадрата со стороной 2–3 мм, 3–5 мм; 4 — 10 мм; 5 — одно отверстие диаметром 2 мм. Начальное давление в баке — 400 atm.

температуры по сравнению с результатом для одного отверстия с таким же диаметром. На контактной поверхности водорода и ударно-нагретого воздуха происходит самовоспламенение и температура достигает 3000 К. Это явление можно объяснить дополнительным увеличением начальной температуры смеси при взаимодействии пусковых ударных волн на оси симметрии системы (рис. 1). Аналогичный результат получен при разное отверстий в 5 мм. Однако, когда расстояние между отверстиями становится достаточно большим по сравнению с диаметром одного отверстия (10 мм), самовоспламенение не происходит, так как взаимодействие происходит на большем расстоянии, когда пусковые ударные волны оказываются ослабленными. Максимальная температура

не превосходит 1000 К, как и в случае истечения из одиночного сопла с диаметром 2 mm (кривая 5 на рис. 2).

Следует отметить, что полученные условия безопасного выпуска водорода являются необходимыми только для резервуара под давлением 400 atm. При меньших давлениях полученные условия являются достаточными, так как с уменьшением давления в резервуаре интенсивность пусковых ударных волн падает.

Список литературы

- [1] *Баженова Т.В., Брагин М.В., Голуб В.В., Иванов М.Ф.* // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. В. 6. С. 77–82.
- [2] *Баженова Т.В., Брагин М.В., Голуб В.В., Иванов М.Ф.* // ТВТ. 2007. Т. 45. № 5. С. 733–740.
- [3] *Dryer F., Chaos M., Zhao Zh., Stein J., Alpert J., Homer Ch.* // Combust. Sci. and Tech. 2007. V. 179. P. 663–694.
- [4] *Golub V.V., Baklanov D.I., Bazhenova T.V., Bragin M.V., Golovastov S.V., Ivanov M.F., Volodin V.V.* // Journal of Loss Prevention in the Process Industries. 2007. V. 20. Is. 4–6. P. 439–446.
- [5] *Голуб В.В., Котельников А.Л., Баженова Т.В., Володин В.В., Петухов В.А., Головастов С.В.* Перфорированное сопло к газовому клапану. Патент РФ. Решение о выдаче от 20.11.2007 г. по заявке 2007142541/22(046594).
- [6] *Сизов А.М.* // Сверхзвуковые газовые струи. Новосибирск: Наука, 1983. С. 85–102.
- [7] *Голуб В.В., Набоко И.М., Шульмейстер А.М.* // Изв. АН СССР. МЖГ. 1987. Т. 6. С. 153–159.