

## ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ УСТУПА НА ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ПОДГОТОВЛЕННОЙ ВОДОРОДО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ В РАСШИРЯЮЩЕМСЯ КАНАЛЕ

Ю.В. Захарова, Н.Н. Федорова, М.А. Гольдфельд, А.В. Федоров

*Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,  
630090, Новосибирск, Россия*

В работе представлены результаты экспериментальных и численных исследований высокоскоростных высокоэнthalпийных течений водородо - воздушной смеси в канале с резким расширением (уступом). Рассмотрено 3 конфигурации канала: прямой уступ (базовая), уступ с предварительным сжатием, уступ с предварительным расширением. Для этих конфигураций канала исследован процесс воспламенения подготовленной стехиометрической водородной смеси. Показано, что на воспламенение смеси оказывают существенное влияние конфигурация уступа и температурные условия на стенках канала. В частности, для условий «холодной» стенки, реализующихся в установках кратковременного действия, область воспламенения смещается вниз по потоку.

В эксперименте исследовались три конфигурации обратного уступа (рис. 1): 1 – без предварительного воздействия, 2 – с предварительным сжатием, 3 – с предварительным расширением, для следующих значений геометрических параметров:  $h_1=16$  мм и  $h_2=22$  мм,  $h_3=10$  мм,  $\alpha=8^\circ$ . Параметры течений представлены в Таблице.

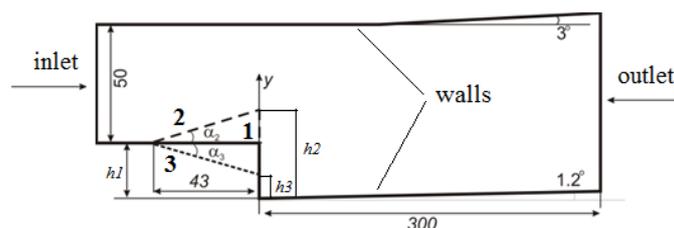


Рис.1. Конфигурация уступа

Параметры течений

$M_\infty$	$P_0$ , МПа	$T_0$ , К	$P_\infty$ , МПа	$T_\infty$ , К	$T_{w ad}$ , К
2.8	3.5	1813	0.13	705	1600

Расчеты плоских течений были выполнены с помощью коммерческого пакета ANSYS CFD (Fluent) [1]. Использовались полные осредненные уравнения Навье-Стокса, дополненные *SST k- $\omega$*  моделью турбулентности.

Предварительно были проведены расчеты течений в рассматриваемых каналах без учета химических реакций, что позволило детально проанализировать волновую и вихревую структуры, а также оценить влияние параметров набегающего потока и характеристик турбулентного пограничного слоя на течение в канале с уступом различной конфигурации. Сравнение полученного в расчете и эксперименте распределения статического давления вдоль нижней стенки показало хорошее соответствие для всех рассматриваемых конфигураций уступа (рис. 2). Наличие предварительного поджатия (конфигурация 2) приводит к увеличению высоты уступа и угла разворота потока, вследствие чего увеличивается размер отрывной зоны и уменьшается уровень донного давления по сравнению с конфигурацией 1. Для конфигурации 3 уровень давления в донной области выше, чем для конфигураций 1 и 2.

© Ю.В. Захарова, Н.Н. Федорова, М.А. Гольдфельд, А.В. Федоров, 2015

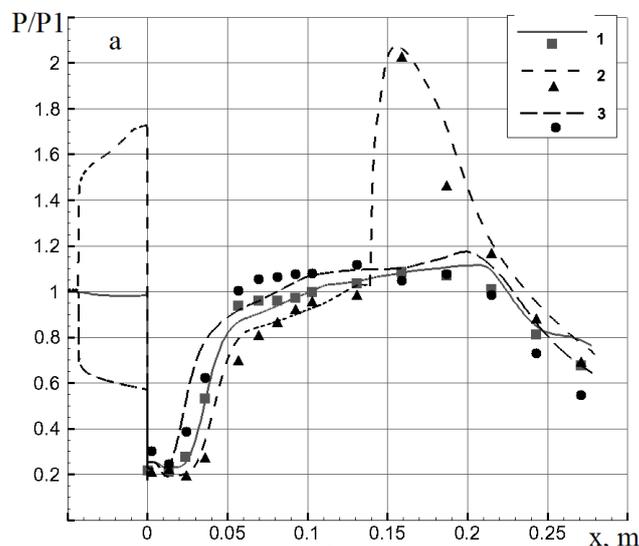


Рис.2. Распределение статического давления на нижней стенке канала, линии – расчет, символы – эксперимент

На следующем этапе был исследовано течение предварительно перемешанной стехиометрической водородно-воздушной смеси, которая подавалась через входное сечение при параметрах, указанных в таблице. Численно исследовался процесс воспламенения и распространения пламени по каналу с уступами различных конфигураций. Температура стенок канала составляла  $T_w = 300$  К.

Для исследования задачи воспламенения водорода в канале с уступом использовалась кинетическая схема [2] содержащая 38 реакций для 8 компонент:  $H_2$ ,  $O_2$ ,  $H_2O$ ,  $OH$ ,  $H$ ,  $O$ ,  $HO_2$ ,  $H_2O_2$ . В работе [3] было проверено и показано, что данная кинетическая схема правильно предсказывает время задержки воспламенения в диапазоне температур  $1000 < T < 2500$  К.

На рисунке 3 представлены концентрации воды для трех исследуемых конфигураций уступа. Из рисунков видно, что для прямого уступа (конфигурация 1) локальное воспламенение смеси происходит только на нижней стенке канала вблизи выходной границы расчетной области (рис. 3, а). Для данной конфигурации уступа не удалось добиться распространение пламени вверх по потоку и по всей ширине канала.

Для конфигурации 2 воспламенение смеси происходит вблизи выходной границы расчетной области на нижней стенке канала, а затем фронт пламени распространяется вверх по потоку и охватывает всю рециркуляционную область за уступом (рис.3, б). При этом происходит увеличение статического давления (рис. 4, а) и статической температуры (рис. 5, а) на нижней стенке канала по сравнению со случаем без инъекции. Кроме того, для конфигурации 2 наблюдается существенное увеличение статического давления (рис.4, б) и статической температуры (рис. 5, а) на верхней стенке канала в области  $x \approx 0.05$ , однако это не приводит к воспламенению смеси в данной области, что подтверждает распределение концентраций воды (рис. 3, б).

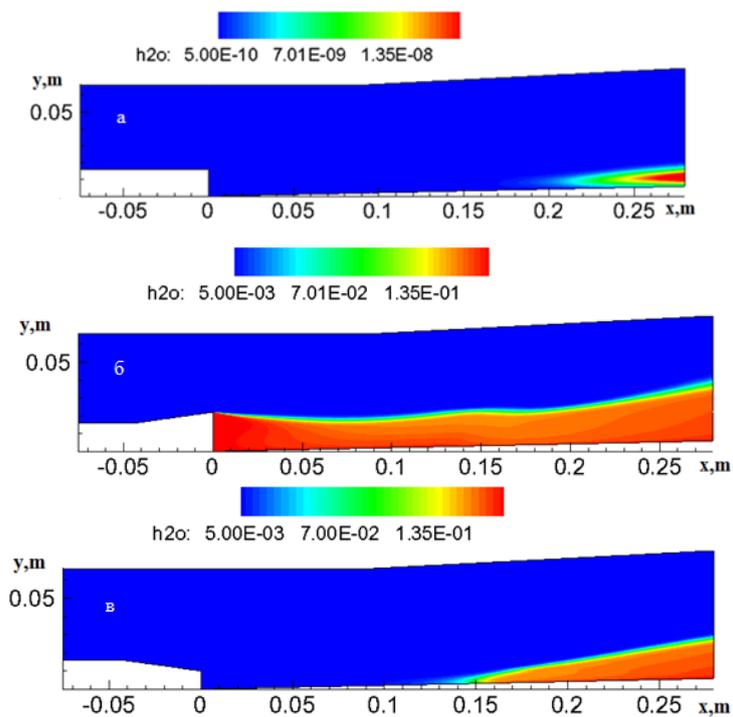


Рис. 3. Поля концентраций воды для трех конфигураций уступа

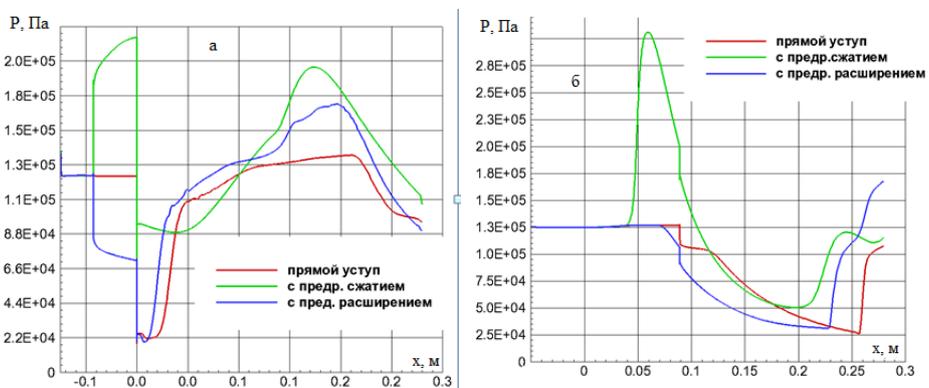


Рис. 4. Распределение статического давления на нижней (а) и верхней (б) стенках канала для 3-х конфигураций уступа с учетом массоподвода

Для случая с предварительным расширением (конфигурация 3) воспламенение смеси осуществлялось на нижней стенке канала за область замыкающего скачка  $x > 0.15$  м (рис. 3. в). Однако в данном случае не наблюдалось распространение пламени по всей длине канала

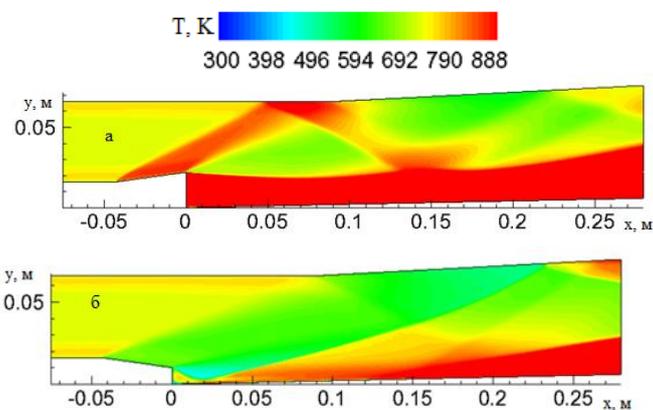


Рис. 5. Поля статической температуры для конфигураций 2 (а) и 3 (б) с учетом химических реакций

Результаты расчета показали, что для конфигурации уступа с предварительным сжатием (конфигурация 2) горение распространяется по всей длине канала. Для остальных конфигураций были получены только локальные зоны воспламенения. Для рассматриваемых параметров внешнего потока не удалось получить устойчивое горение по всей длине и ширине канала, что может быть связано с условием холодной стенки. Для достижения воспламенения и устойчивого горения по всей ширине канала необходимо увеличивать статическую температуру в потоке.

Работа выполнена при частичной поддержке следующих грантов:

- Российского фонда фундаментальных исследований, грант №13-08-00786 А.
- Российского фонда фундаментальных исследований, грант №15-08-01723 А.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ANSYS [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
2. **Tien J. H., Stalker R. J.** Release of Chemical Energy by Combustion in a Supersonic Mixing Layer of Hydrogen and Air // *Combustion and Flame* N 130, 2002, pp. 329-348.
3. **Бедарев И.А., Федоров А.В.** Сравнительный анализ трех математических моделей воспламенения водорода // *ФГВ* 2006, №1, С. 26-33.