

Численное моделирование инжекции струи водорода в канал с каверной*

Н.Н. Фёдорова, И.А. Федорченко

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН
irina@itam.nsc.ru: 630090, Новосибирск, Институтская, 4/1

В работе методами математического моделирования исследуется выдув струи водорода и гелия в плоский канал изменяемой геометрии, в котором имеется турбулентный воздушный поток при числе Маха $M=2.5, 2.8$. Выдув струи организуется перед внезапным расширением канала. В качестве математической модели используются полные осредненные уравнения Навье-Стокса, замыкаемые двухпараметрической моделью турбулентности $k - \omega$.

1. Введение

Выдув струй в сверхзвуковой внешний поток применяется при охлаждении поверхностей и подачи топлива в камеру сгорания сверхзвуковых летательных аппаратов. Возникающие в этой конфигурации отрывные и поперечные скачки, контактные разрывы, волны разрежения и отрывные зоны образуют сложную волновую картину. Расчет параметров такого течения является трудной задачей, результаты которой в значительной мере зависят от выбора модели турбулентности и метода расчета.

В настоящей работе исследуется две постановки задачи о выдуве струи. Первая описывает выдув струи гелия в канал с внезапным расширением. Число Маха основного потока в канале равно 2.8. Вторая постановка включает выдув струи водорода во внешний турбулентный воздушный поток при числе Маха $M = 2.5$. Область течения при этом представляет собой плоский канал с каверной. В обоих случаях выдув производится перед расширением канала.

2. Математическая модель и численный метод

В качестве математической модели используются полные осредненные уравнения Навье-Стокса, замыкаемые двухпараметрической моделью турбулентности $k - \omega$ [1] либо ее модификацией SST [2]. Для расчета привлекается коммерческий пакет ANSYS FLUENT 12.0. Использовались явная и неявная схема расчета по времени, и схемы повышенного порядка аппроксимации MUSCL, основанные на расщеплении вектора потока Roe и AUSM для аппроксимации конвективных членов.

Алгоритм и программа были верифицированы ранее по экспериментальным данным, результаты можно найти в [3].

*Работа выполнена при финансовой поддержке АБЦП «Развитие научного потенциала высшей школы Министерства образования и науки» на 2011 год, код проекта 2.1.1/11316.

Т а б л и ц а 1. Основные параметры внешнего течения в канале и струи.

№задачи	Параметр	Основное течение	Струя
1	Массовая доля гелия	0	1
	Статическое давление, МПа	0.11	1.72
	Число Маха	2.8	1.4
	Полная температура, К	2000	293
2	Массовая доля водорода	0	1
	Статическое давление, МПа	0.185	1.52
	Число Маха	2.5	1.7
	Полная температура, К	1800	300

3. Постановка задачи

Расчетная область первой задачи включала плоский канал с внезапным расширением. На входе в канал задавались профили основных газодинамических параметров потока и турбулентных величин, полученных из расчета турбулентного течения в канале постоянного сечения при числе Маха 2.8. На поверхности перед расширением канала располагалась щель размером 0.3 мм, через которую осуществлялся выдув струи. Основные параметры струи и течения в канале представлены в таблице 1.

Геометрия второй задачи включает в себя канал с каверной, с наклонной задней кромкой. Водород инжектируется перед каверной через щель шириной 1 мм, параметры течения также показаны в таблице 1. Аналогично первому случаю, на входе в канал задавались все профили течения при числе Маха основного потока 2.5.

На верхней и нижней поверхностях расчетной области, соответствующих стенкам канала, ставились условия прилипания для скорости газа и адиабатические условия для температуры в задаче 1, в задаче 2 температура стенки полагалась равной 300 К. В выходном сечении использовалось условие нулевого градиента всех параметров. Расчетная сетка имела сгущение к стенкам модели и вблизи струи, для всех расчетов соблюдалось выполнение условия для переменной закона стенки $y^+ < 1$.

4. Результаты расчета

4.1. Задача 1: исследование влияния угла выдува струи

. На примере задачи о выдуве струи гелия в канал с внезапным расширением рассмотрим влияние угла выдува струи на картину течения и характеристики перемешивания инжектируемого газа с основным потоком. На рис. 1 представлены поля чисел Маха для двух случаев углов выдува струи $\alpha = 30^\circ$ и 60° . При увеличении угла инжектирования происходит рост интенсивности возникающей перед струей ударной волны, что приводит к увеличению размера отрывной зоны как перед, так и за струей, а также к возникновению отрывной области на верхней стенке канала. Более масштабный отрыв на верхней поверхности канала, реализующийся в случае угла выдува 60° , приводит к возникновению отрывного скачка, который взаимодействует с основной ударной волной и в зоне их взаимодействия организуется область повышенного давления. Ниже по по-

току можно наблюдать скачок присоединения за отрывом на верхней стенке, который взаимодействует с аналогичной волной за рециркуляционной зоной за уступом. Размеры этой зоны также увеличиваются при росте угла выдува гелия. Дальнейшее повышение угла выдува струи вплоть до нормального к поверхности при фиксированном расходе приводит к тому, что канал перекрывается возникающими скачками уплотнения и происходит его "запирание".

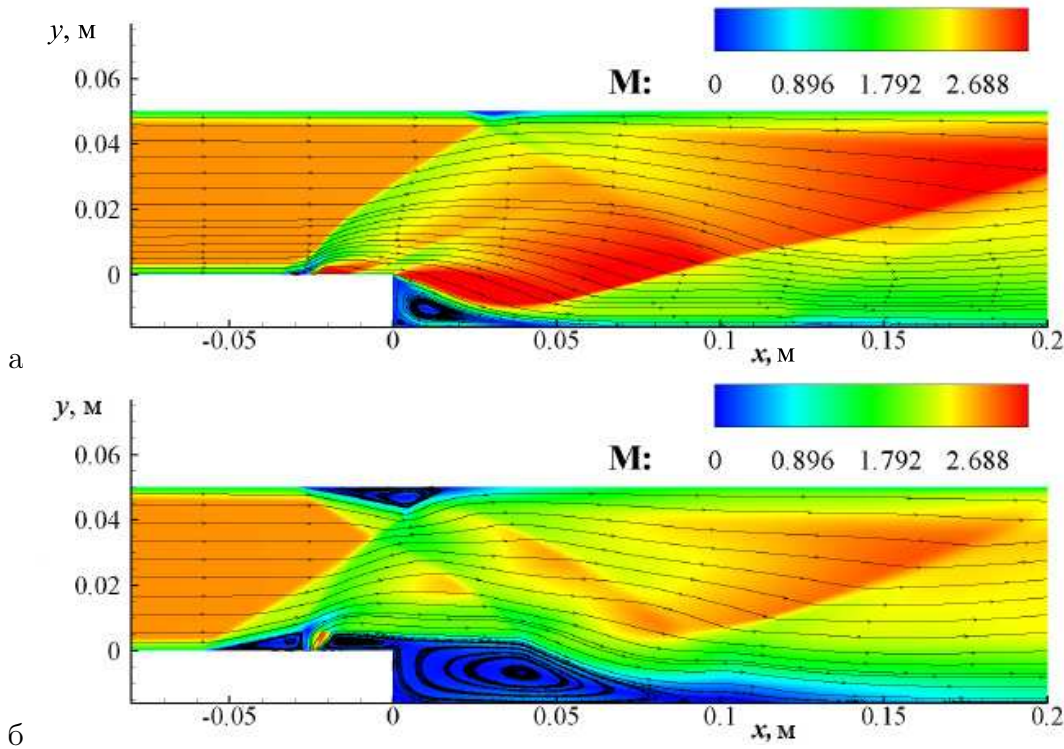


Рис. 1. Поля чисел Маха и линии тока для углов выдува гелия $\alpha = 30^\circ$ (а) и $\alpha = 60^\circ$ (б)

В результате реализуемой картины течения распределение гелия в канале выглядит, как показано на рис. 2. При увеличении угла выдува высота проникновения струи в канал увеличивается, и в выходном вертикальном сечении канала наблюдается более равномерное перемешивание гелия с воздухом наряду с увеличенной толщиной слоя смешения. Это является положительной тенденцией с точки зрения качества смешения основного и вторичного потоков. В то же время, как упоминалось выше, увеличение угла приводит к интенсификации ударно-волновой структуры течения и, как следствие, более высоким потерям давления, что, естественно, является нежелательным фактором.

4.2. Задача 2: исследование влияния массового расхода струи.

Исследование величины массового расхода струи на картину течения и характеристики смешения проводится на примере задачи 2 о выдуве водорода в канал с каверной. Параметр массового расхода изменялся за счет изменения давления в струе.

Поля чисел Маха и линии тока для случаев массового расхода струи $\rho u = 3000$ и $\rho u = 6350$ кг/м²/с приведены на рис. 3. Из распределений видно, что при увеличении массового расхода выдуваемого газа увеличивается интенсивность и наклон отрывной

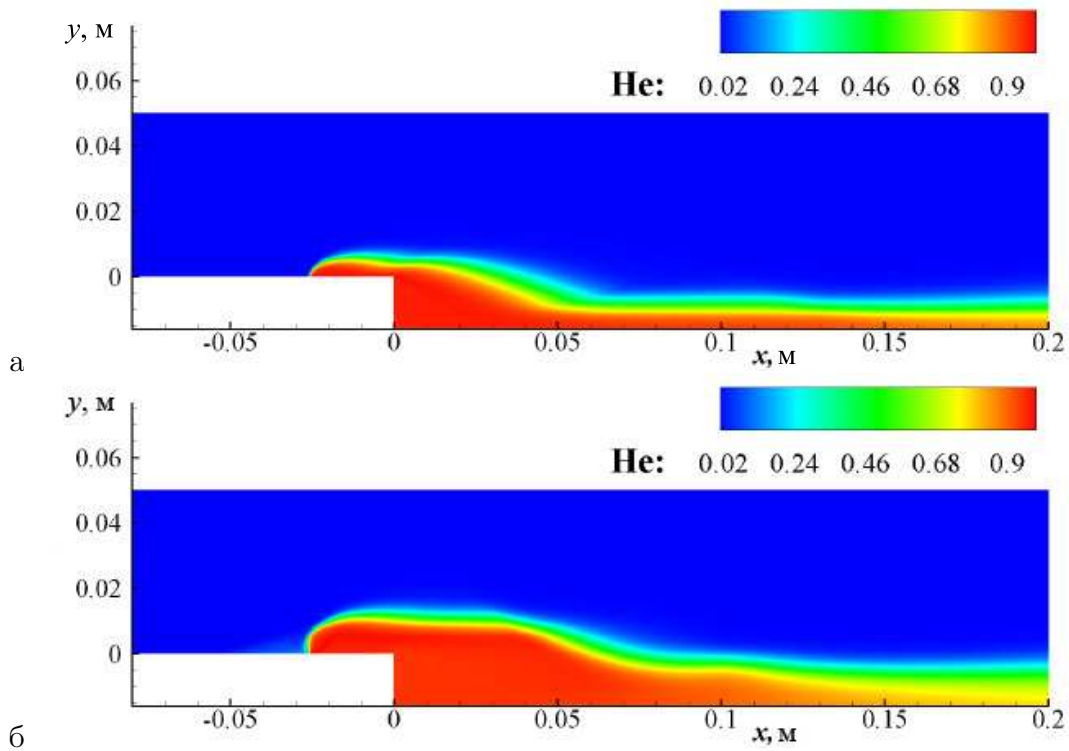


Рис. 2. Поля массовой концентрации гелия для углов выдува $\alpha = 30^\circ$ (а) и $\alpha = 60^\circ$ (б)

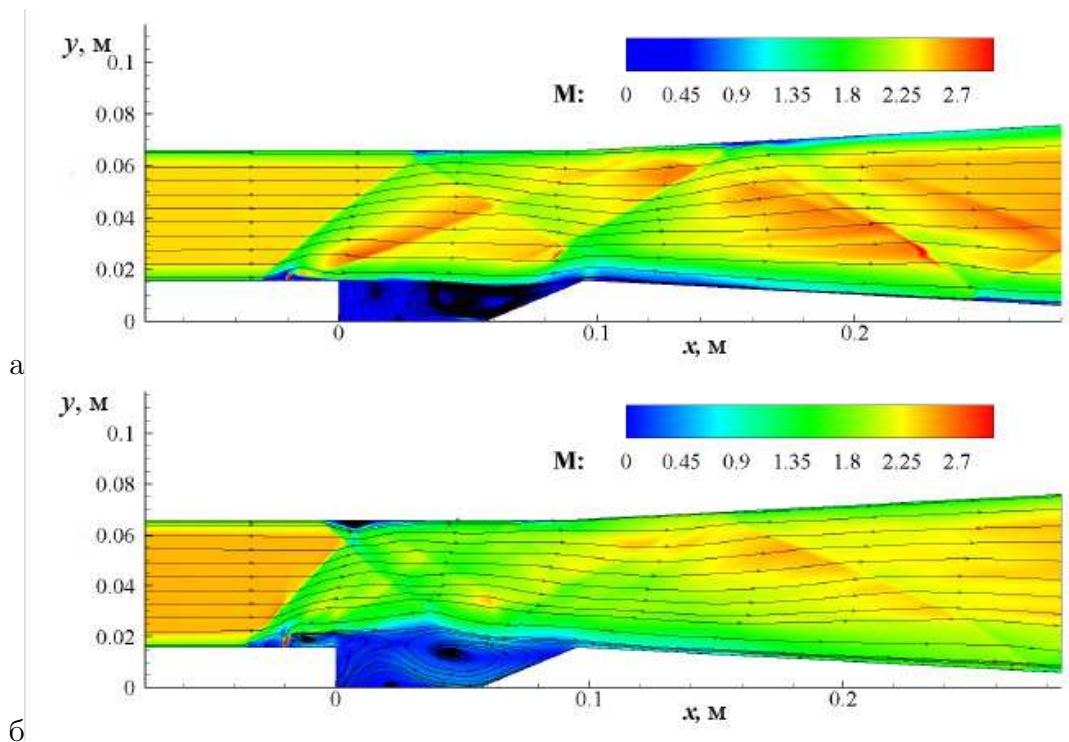


Рис. 3. Поля чисел Маха и линии тока для массового расхода водорода $\rho u = 3000$ (а) и $\rho u = 6350$ кг/м²/с (б)

ударной волны, а также масштаб отрывной зоны в окрестности струи. Как и в предыдущем случае, на верхней стенке канала возникает отрыв, приводящий к появлению второго отрывного скачка, и при дальнейшем увеличении массового расхода возникает конфигурация, также приводящая к "запиранию" канала.

Поля массовой концентрации водорода показаны на рис 4 для тех же массовых расходов струи. Можно видеть, с ростом расхода струи увеличивается высота, на которую струя проникает во внешний сверхзвуковой поток воздуха, улучшается перемешивание инжектируемого газа с основным течением вниз по течению канала. При этом внутри каверны организуется обширная дозвуковая рециркуляционная зона, в которой массовая концентрация водорода равна примерно 0.5 и практически не зависит от массового расхода струи. Возникающий в случае более высокого расхода отрыв на верхней стенке приводит к появлению отрывного скачка, который падает на слой смешения в области каверны, приводя к его "вспуханию".

Также следует отметить, что при увеличении расхода наблюдается тенденция к переходу течения в нестационарный режим. Рис. 3б и 4б приведены для мгновенного распределения величин, и установившегося результата получить в данном случае не удалось.

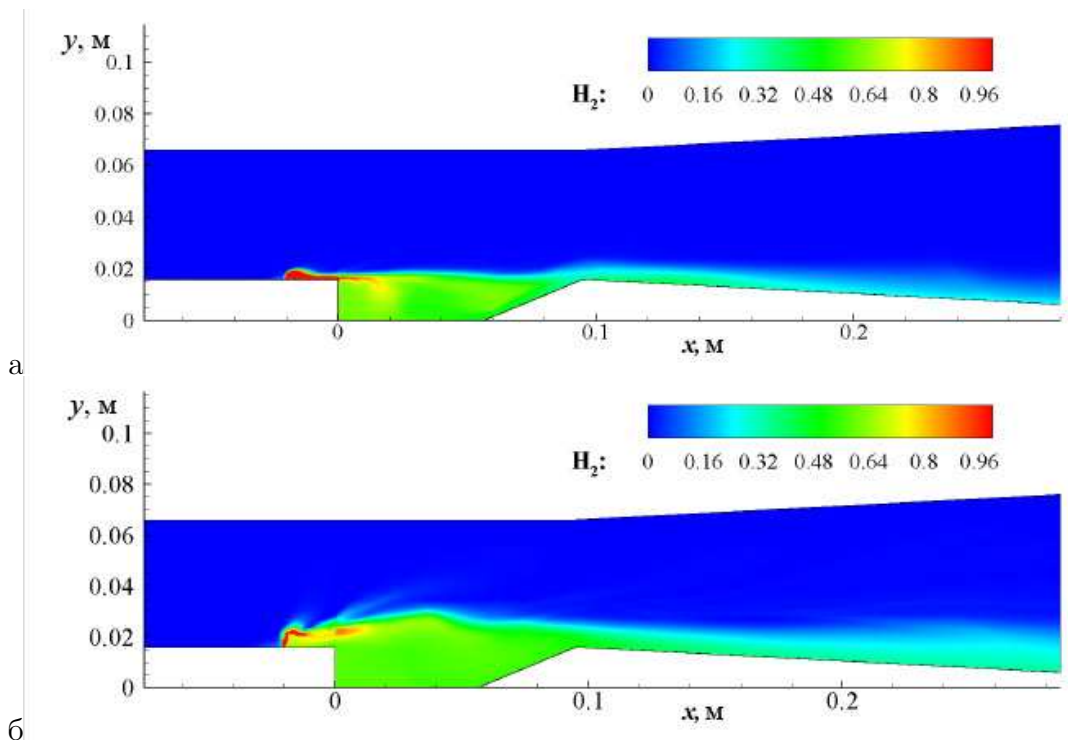


Рис. 4. Поля массовой концентрации водорода при массовом расходе струи $\rho u = 3000$ (а) и $\rho u = 6350$ кг/м²/с (б)

5. Заключение

Проведено численное моделирование инъекции газа в сверхзвуковое течение в канале с внезапным расширением на основе модели полных осредненных нестационарных уравнений Навье-Стокса.

Параметрическое исследование влияние угла выдува струи и ее массового расхода продемонстрировала похожую в обоих случаях тенденцию (при увеличении данных параметров) к росту высоты проникновения струи в основной поток и образованию дополнительного отрыва на верхней стенке канала. Последнее обстоятельство приводит к появлению дополнительного отрывного скачка, что ведет к организации области повышенного давления и "запиранию" канала.

Список литературы

- [1] D.C. WILCOX. TURBULENCE MODELING FOR CFD. DCW IND. INC., LA CANADA, CALIFORNIA. 1993.
- [2] MENTER F.R., KUNTZ M., AND LANGTRY R. TEN YEARS OF INDUSTRIAL EXPERIENCE WITH THE SST TURBULENCE MODEL // TURBULENCE, HEAT AND MASS TRANSFER. 2003. BEGELL HOUSE, INC. P. 625–632.
- [3] FEDORCHENKO I.A., FEDOROVA N.N., FEDOROV A.V. NUMERICAL STUDY OF TRANSVERSE JET INJECTIONS INTO SUPERSONIC FLOW // EUCASS-2009, VERSAILLES, PARIS, JULY, 6–9, 2009. ЭЛЕКТРОННОЕ ИЗДАНИЕ. ISBN 978-2-930389-47-8.