

Воропаев Г.А. д.ф.-м.н., проф., Загуменный Я.В. к.ф.-м.н., ст.н.с., Розумнюк Н.В. к.ф.-м.н., ст.н.с., Сирош Е.А. ведущий инженер
Институт гидромеханики НАН Украины, г. Киев, Украина

ФОРМИРОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ И УПРАВЛЕНИЕ ЕЮ В ОГРАНИЧЕННОЙ ОБЛАСТИ

В работе исследуются особенности нестационарного формирования и развития импульсной сверхзвуковой струи и изучаются возможности управления такими струями для получения максимального коэффициента эжекции на единицу объема камеры смешения эжектора. Получены зависимости от времени интегральных расходных характеристик многосопельного эжектора с внутренним размещением сверхзвуковых дискретных осесимметричных сопел, показывающие наличие затухающих осцилляций их величин на этапе формирования течения в эжекторе, а после ее выхода на установившийся режим ($t > 3$ мс) суммарный массовый расход газа принимает практически постоянное значение порядка 1.3 кг/с, а коэффициент эжекции выше 3. Анализ профилей скорости на входе и выходе из эжектора при установившемся режиме течения показывает, что ядро выходной струи смешанного газа концентрируется вблизи наружной стенки эжектора, а в области оси симметрии образуется относительно слабый обратный поток.

Ключевые слова: импульсный эжектор, сопло, камера смешения, сверхзвуковая струя, расходные характеристики, численное моделирование

Введение

На сегодняшний день сложилось определенное понимание особенностей формирования течений при сверхзвуковых условиях на входе в камеру смешения эжектора, однако остается много вопросов, связанных с нестационарной структурой и формирующейся системой неустановившихся висячих скачков или псевдоскачков, взаимодействия которых с турбулентными пограничными слоями приводят к их отрыву на стенках камеры смешения [1]. Проблема представляет собой как фундаментальный, так и практический интерес, и остается весьма актуальной, о чем свидетельствует большое количество современных работ по данной тематике, как экспериментальных [2], так и теоретических, в которых наибольшее предпочтение отдается методам численного моделирования [3].

В данной работе с использованием методов численного моделирования исследуются особенности нестационарного формирования импульсной сверхзвуковой струи при выходе из соплового элемента эжекторной системы и изучаются возможности управления такими струями для получения максимального коэффициента эжекции на единицу объема камеры смешения эжектора.

Постановка задачи и метод решения

Рассматривается работа осесимметричного эжектора с произвольной формой камеры смешения либо с несимметричными кольцевыми соплами, либо с дискретными осесимметричными соплами, размещенными по периметру камеры смешения, в импульсном режиме. Моделирование работы эжекторной системы осуществляется на основании решения трехмерной нестационарной задачи формирования течения внутри газового эжектора при заданных значениях давления и температуры на входе в сопло эжектирующего газа, которые соответствуют величинам давления и температуры в форкамере, соединяющей газогенератор (источник эжектирующего газа) и сопловую часть эжектора, и давления и температуры эжектируемого газа на входе в камеру смешения. Схематические чертежи типичных моделей импульсного многосопельного газового эжектора (аспиратора) с различным размещением сверхзвуковых сопел приведены на Рис. 1 с указанием основных составных элементов его конструкции: сопло для высоконапорного газа, входной конфузор для эжектируемого газа, камера смешения и выходной диффузор для смешанного газа.

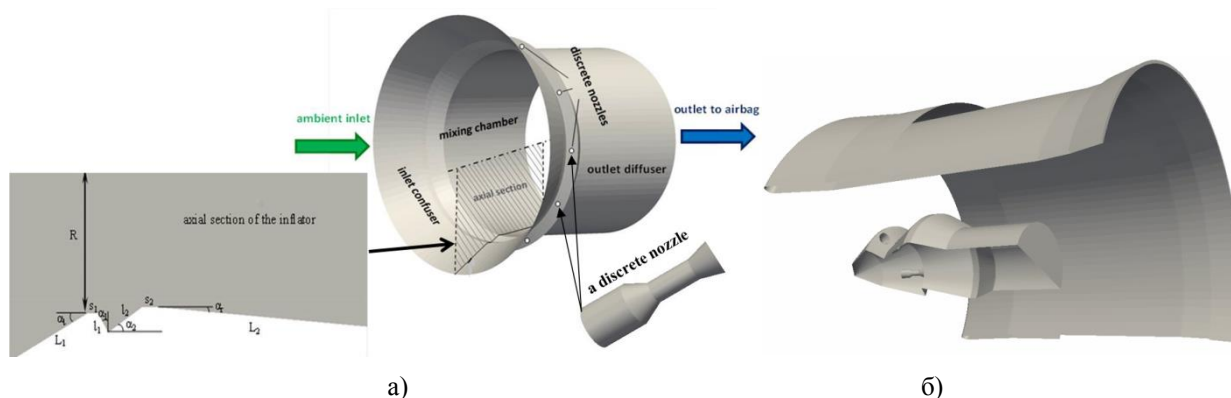


Рис. 1. Схема импульсного многосопельного aspirатора (эжектора) с внешним (а) и внутренним (б) расположения сверхзвуковых сопел

Для численного моделирования трехмерной задачи нестационарного течения вязкого сжимаемого газа в aspirаторе применяется метод конечного объема, реализуемый в рамках вычислительного пакета OpenFOAM с открытым исходным кодом с использованием объектно-ориентированного языка программирования C++. Расчеты задачи проводились в параллельном режиме с применением метода декомпозиции расчетной области на базе суперкомпьютерных систем. Обработка и визуализация результатов расчетов выполнялась с использованием стандартных утилит пакета OpenFOAM, графического интерфейса ParaView и пакета прикладных программ для численного анализа и научной графики Origin.

Результаты расчетов

Численные расчеты работы импульсного 15-сопельного aspirатора с внутренним расположением сверхзвуковых сопел были проведены при давлении 40 атм и температуре 1200 °К на высоком входе. На Рис. 2 представлены мгновенные картины модуля скорости в центральном осевом сечении aspirатора в последовательные моменты времени: $t=0.02, 0.08, 0.18, 0.38, 0.8$ мс. Приведенные мгновенные картины поля скорости (Рис. 2) иллюстрируют особенности развития во времени сверхзвуковой струи внутри камеры смешения, включая начальный этап ее формирования при выходе из сопловой части, дальнейшее ее распространение вдоль оси сопла, а также нестационарный процесс взаимодействия струи с внутренними и внешними стенками камеры смешения aspirатора.

В мгновенных картинах поля давления отчетливо просматривается фронт ударной волны, распространяющийся внутри камеры смешения от источника возмущений со скоростью, колеблющейся в пределах 400–500 м/с вследствие зависимости от локальных значений температуры газа. Начиная с момента времени $t=0.8$ мс в области течения за соплом образуется обширная зона пониженного давления, что свидетельствует о начале формирования устойчивой струи смешанного газа, направленной в сторону выхода из aspirатора.

Профили горизонтальной компоненты скорости в области эжектируемого потока газа и на выходе из aspirатора в подушку безопасности приведены на Рис. 3 при установившемся режиме течения в камере смешения. Структура профиля на входе в aspirатор показывает, что скорость эжекции воздуха вблизи внешней стенки aspirатора более чем в два раза превышает скорость подсоса вблизи его внутреннего тела. Анализ профиля на выходе из aspirатора показывает, что ядро выходной струи смешанного газа сконцентрировано вблизи внешней стенки aspirатора, а в области оси симметрии образуется обратное течение.

Значения интегральных расходных характеристик aspirатора – массовые расходы эжектирующего, эжектируемого и суммарного смешанного, поступающего непосредственно в подушку безопасности, газов, а также коэффициента аспирации, представлены на Рис. 4 как функции времени. Приведенные кривые показывают, что после выхода на

установившийся режим течения ($t > 3$ мс) суммарный массовый расход газа принимает практически постоянное значение порядка 1.3 кг/с, а коэффициент аспирации выше 3, что соответствует суммарной генерации более 50 литров газа на выходе из аспиратора приблизительно за 50 мс.

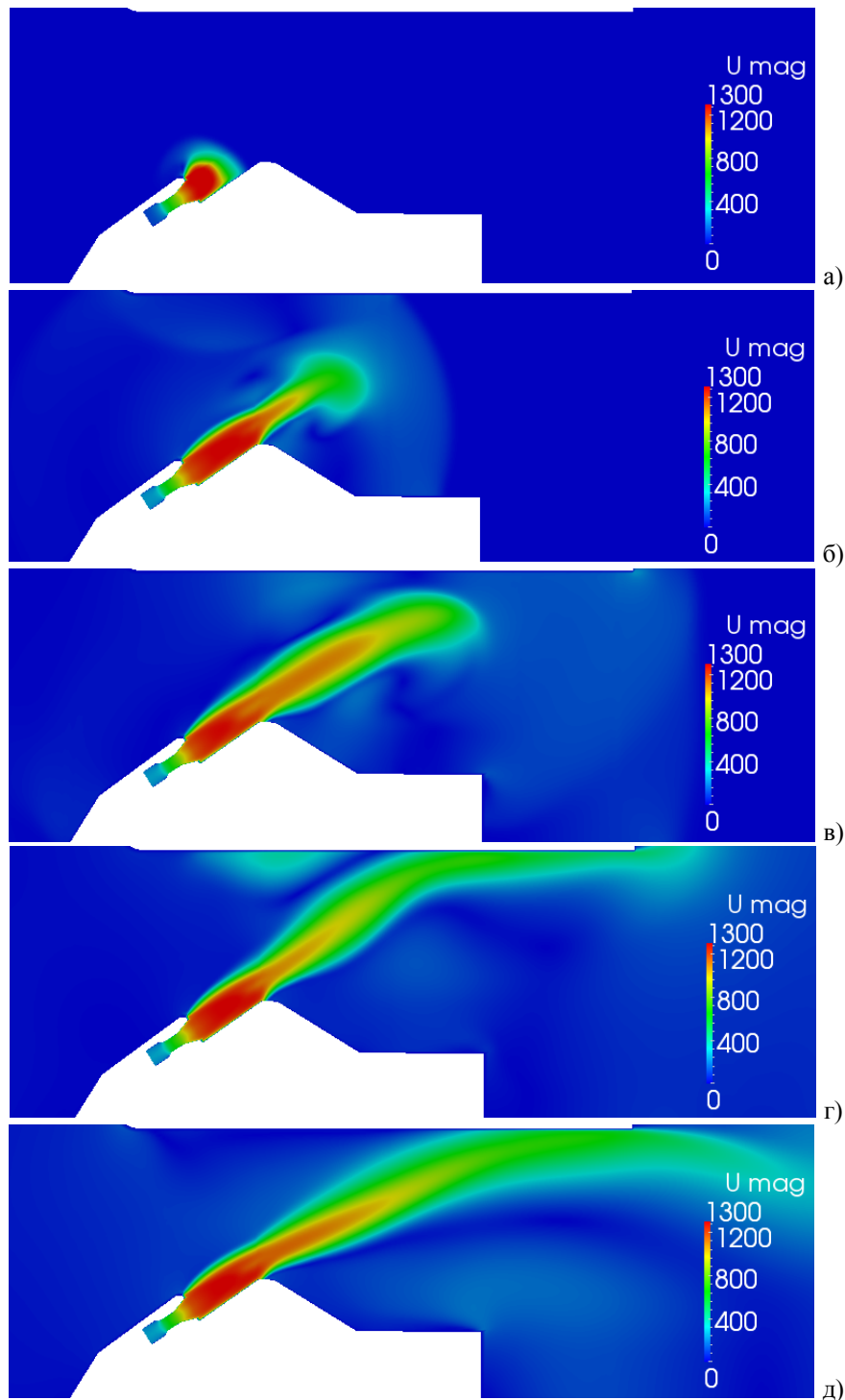


Рис. 2. Мгновенные картины модуля скорости в центральном осевом сечении аспиратора:
 $P=40$ атм, $T=1200$ °К, $t=0.02, 0.08, 0.18, 0.38, 0.8$ мс (а–д)

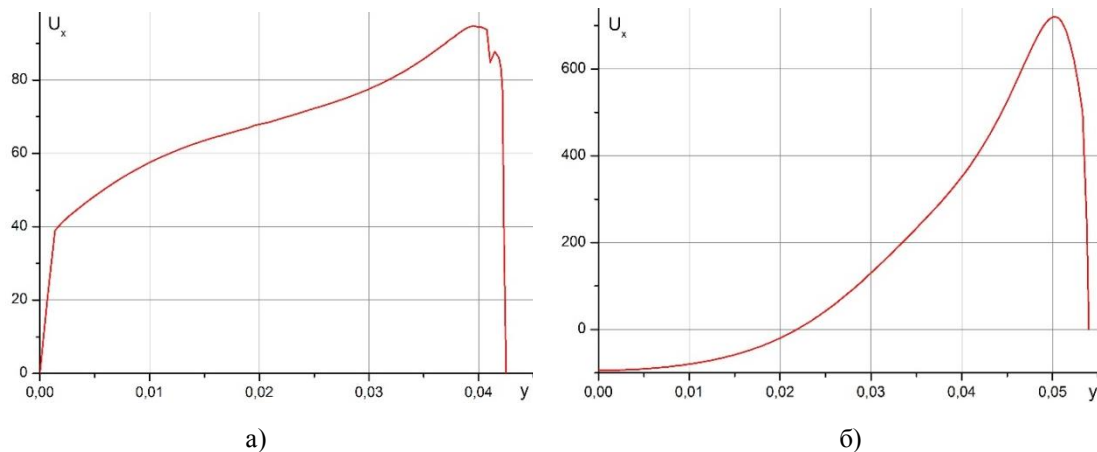


Рис. 3. Профили горизонтальной компоненты скорости в области эжектируемой струи (а) и на выходе из аспиратора в подушку безопасности (б): $P=40$ атм, $T=1200$ °К

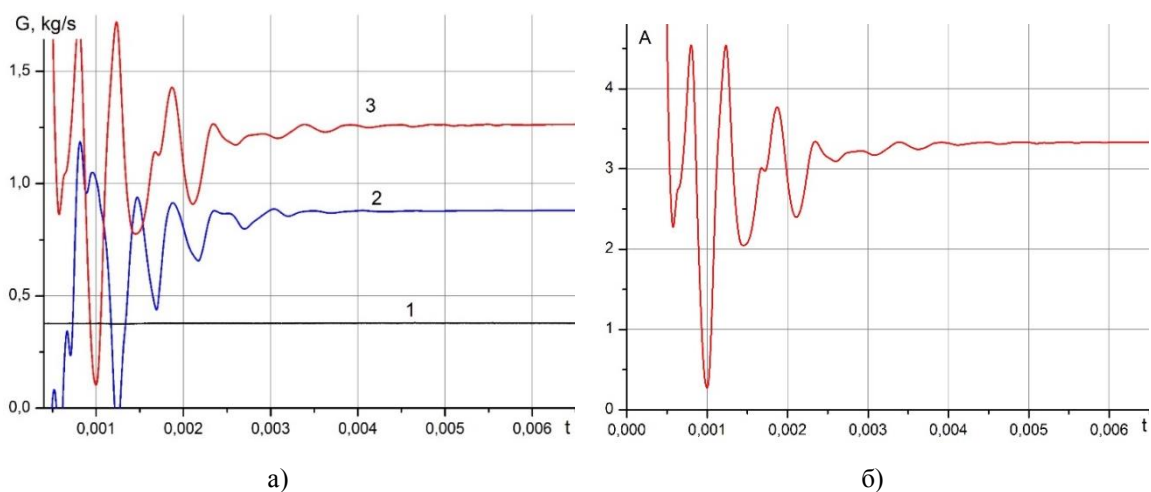


Рис. 4. Зависимости от времени интегральных расходных характеристик аспиратора: массовые расходы эжектирующего (1), эжектируемого (2) и смешанного (3) газов (а), а также коэффициент эжекции (б).

Выводы

На основе проведенных численных расчетов выявлены особенности нестационарного формирования и развития сверхзвуковой струи внутри камеры смешения многосопельного эжектора с внутренним размещением сверхзвуковых дискретных осесимметричных сопел. Получены зависимости от времени интегральных расходных характеристик эжектора, показывающие наличие затухающих осцилляций их величин на этапе формирования течения в эжекторе, а после ее выхода на установившийся режим ($t > 3$ мс) суммарный массовый расход газа принимает практически постоянное значение порядка 1.3 кг/с, а коэффициент эжекции выше 3. Анализ профилей скорости на входе и выходе из эжектора при установившемся режиме течения показывает, что ядро выходной струи смешанного газа концентрируется вблизи наружной стенки эжектора, а в области оси симметрии образуется относительно слабый обратный поток.

Список литературы

1. Гуськов О.В. Процессы торможения сверхзвуковых течений в каналах / О.В. Гуськов, В.И. Копчёнов, И.И. Липатов, В.Н. Острась, В.П. Старухин – М.: Физматлит, 2008. – 168 с.
2. Коробов В.И. Течение в эжекторной системе с полуограниченной высокоскоростной струей / В.И. Коробов, Ю.А. Парамонов, Я.В. Загуменный // Прикладная гидромеханика. – 2007. – Том 9, № 1. – С. 36–44.
3. Воропаев Г.А. Взаимодействие импульсной сверхзвуковой пристенной струи с дозвуковым потоком в ограниченном объеме / Г.А. Воропаев, Н.В. Розумнюк, Я.В. Загуменный, Е.А. Сирош // Збірник тез VI Міжнародної науково-практичної конференції «Комп'ютерна гідромеханіка», Київ, 2018, С. 16–18.