

03

Роль вихря в усилении воздействия импульсного осесимметричного потока на стенку

© А.С. Чижиков

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва

E-mail: chizhikov@ihed.ras.ru

Поступило в Редакцию 26 мая 2008 г.

Сообщается о физическом явлении возрастания давления в центральной точке преграды, расположенной перпендикулярно оси течения, после достижения жидким соплом, образованного движением головного и вторичных вихрей, поверхности стенки. Эффект наблюдался в области дозвуковых чисел Маха за ударной волной при расстояниях $\approx 1-4$ калибра. В качестве рабочего газа был использован воздух. Результаты экспериментов обобщены в виде безразмерных зависимостей.

PACS: 47.40.-x

Выход импульсного потока из открытой стороны канала в неограниченное пространство, заполненное тем же газом, сопровождается формированием поверхностей сильного разрыва: сферической ударной волны в ранее неподвижном газе, контактной поверхности, разделяющей внешний и истекающий газы, и, если начальный перепад давлений был значителен, обратной ударной волны в истекающем газе. Вязкий отрыв при срезе порождает крупномасштабный вихрь, который затем сносится вниз по потоку. В ряде случаев это тороидальное вихревое кольцо может выполнять роль жидкого сопла, что также приводит к дополнительной перестройке центральной области течения. Среди первых экспериментальных работ по изучению начальной стадии импульсного недорасширенного потока газа за ударной волной следует отметить [1-4].

Значительно более сложную структуру поток приобретает, если взаимодействует на своем пути с препятствием. Задача удара газа о плоскую стенку, расположенную перпендикулярно оси симметрии, являясь наиболее простым условием, позволяет выделить основные

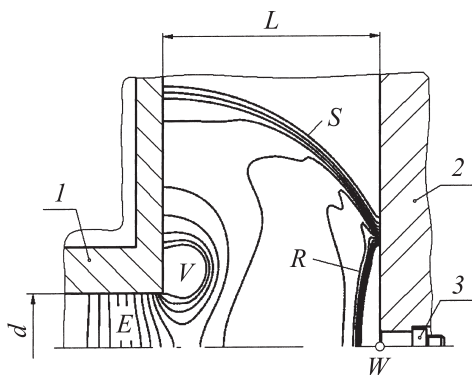


Рис. 1. Расчетные изолинии давления для числа Маха волны $M_s = 1.34$ при $L/d = 2$. S — фронт ударной волны во внешнем газе, E — волны разрежения, V — вихрь, R — отраженная волна; 1 — насадок (осесимметричный канал с экранирующей стенкой), 2 — преграда, 3 — пьезоэлектрический датчик давления Kistler-603B.

характерные черты этого процесса, что служит основой для построения физико-математических моделей более сложных явлений (преграда ограниченных размеров, наклонное расположение стенки, обтекание тел сложной формы). Большинство газодинамических исследований по ударным волнам посвящено исключительно волнам сильной интенсивности, поток за которыми сверхзвуковой, и лишь небольшая часть затрагивает вопросы, связанные с дозвуковыми режимами. Для канала круглого сечения взаимодействие ударной волны с плоской преградой при фиксированных числах Маха спутного потока 0.75 (число Маха стартовой волны $M_s = 1.68$), 0.46 ($M_s = 1.35$), 0.25 (1.17) экспериментально исследовалось в работах [5–7] соответственно.

В лабораторном эксперименте для моделирования импульсного течения используется ударная труба, когда практически плоская стартовая волна образуется еще задолго до выхода из канала. Рабочая область наблюдения такой установки показана на рис. 1.

При условии существования ударной волны импульсный поток при выходе из канала всегда будет недорасширенным. Появление тангенциальной составляющей скорости и отрывное движение газа приводят к вихреобразованию. Вслед за головным вихрем формируется последовательность более слабых вторичных и истекающий газ

оказывается как бы в сопле. Рост и движение вихрей сопровождаются отбором энергии из центральной области преобладания струйного течения газа. На стадии формирования структуры струи характер распределения параметров вдоль оси таков, что максимальное число Маха соответствует осевой координате ядра вихря. Одновременно внутри канала распространяются волны разрежения, что способствует ускорению потока при выходе. Роль этого фактора весьма значительна. Например, при начальном числе Маха 0.25 газ ускоряется до 0.5, а начиная с 0.45 уже до скорости звука. Таким образом, изначально дозвуковой поток может стать звуковым и сверхзвуковым [8,9].

В диапазоне рассматриваемых дозвуковых режимов за ударной волной степень нерасчетности потока близко соответствует условию формирования многоблочной структуры в аналогичной сверхзвуковой стационарной струе. Особенность такой ударно-волновой конфигурации состоит в малых потерях полного давления на участке, примыкающем к выходу. Выигрыш в давлении в первой бочке приводит к возникновению следующей и т.д. Тенденция к многоблочности распространяется и на случай импульсного потока.

После взаимодействия с отраженной волной вихрь достигает поверхности преграды. Поджатие газа у стенки выполняет роль катализатора для возникновения скачка, замыкающего сопло, с образованием первой или очередной бочки (при достаточном расстоянии), а вихрь блокирует радиальное растекание газа. В результате происходит подъем давления. Здесь можно провести две аналогии с процессами, происходящими в сильно недорасширенных струйных течениях расширения, которые хорошо известны: возникновением волны торможения на нестационарной стадии (из-за разницы в скоростях натекающего и сжатого газа) и неустойчивом режиме взаимодействия сверхзвуковой стационарной струи с преградой (из-за градиента давления между областями за диском Маха и отраженным скачком).

Экспериментальные кривые изменения давления в центральной точке потока при различных расстояниях до преграды и обобщенные данные для времени, когда воздействие на стенку начинает определяться приходом вихря, показаны на рис. 2. Шкалы безразмерные. Давление на стенке P^* нормировано на начальное значение в ранее неподвижном и невозмущенном газе P_0 , а безразмерное время t_{non} связано с размерным t соотношением $t_{non} = t a_0/d$, где a_0 — скорость звука также в невозмущенном газе. За начало отсчета времени принят

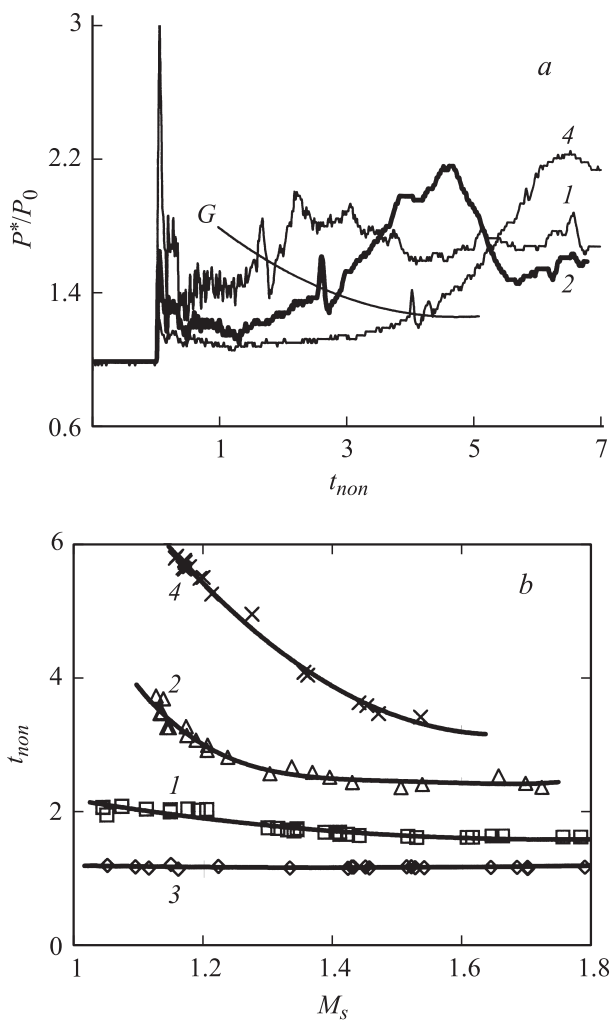


Рис. 2. Осциллограммы давления (а) и время прихода вихря к преграде (б). Линии 1, 2, 4 соответствуют $L/d = 1$ ($M_s = 1.345$), 2 ($M_s = 1.337$) и 4 ($M_s = 1.357$), 3 — $L/d = 0.5$; G — граничная кривая двух стадий воздействия импульсного потока.

момент достижения ударной волной датчика на преграде (точка W на рис. 1).

Поджатие газа в регионе, ограниченном поверхностью преграды и вихревым кольцом, приводит к возрастанию давления на стенке. С увеличением расстояния до преграды проявление эффекта усиливается. Например, если на осциллограммах сравнить пики начального (как результат воздействия фронта стартовой волны) и максимального значения (как результат блокирования жидким соплом радиального растекания газа), то для расстояний $L/d = 2$ и 4 это будет превышение по абсолютному значению в 1.31 ($2.17/1.652$) и 1.82 ($2.267/1.249$) раза соответственно. Но время жизни головного вихря в импульсном потоке ограничено. При взаимодействии с преградой пик давления на стенке совпадает со сменой траекторией ядра вихря осевого направления на радиальное. Жидкое сопло разрушается, и давление падает.

Идентификация момента времени усиления воздействия на стенку позволяет выполнить более корректную оценку величины восстановления полного давления. Если на равных временных интервалах от этой точки, а именно на найденном выше значении t_{non} , проинтегрировать кривую давления, то частным от их деления и будет искомая величина соотношения двух стадий воздействия (рис. 3).

При расположении преграды на первом из расстояний заметно сказывается преобладание роли стартовой ударной волны, когда сила воздействия в начальный момент времени максимальна. Затем, по мере удаления преграды, начинают проявляться процессы, связанные с формированием структуры струи, и ее пространственный характер. Для расстояния $L/d = 4$ калибра линия тренда показана условно (только по 5 точкам), так как выполнить обработку других данных не удалось из-за ограниченности рабочего времени эксперимента. Сравнение по абсолютным значениям интегралов двух стадий воздействия импульсного потока позволяет сделать вывод о наличии оптимума в приращении давления на стенке. Наибольший эффект наблюдается в диапазоне чисел Маха ударной волны $1.3 \div 1.5$. Те же данные можно сопоставить и по избыточным составляющим, т.е. вычислить отношения $(I_2 - I_0)/(I_1 - I_0)$, где $I_0 = P_0 t_1$, а $t_1 \equiv t_2$; в этом случае область оптимума будет соответствовать диапазону чисел Маха $1.2-1.4$. Изменится и количественная характеристика. Например, если для осциллограммы, рассмотренной на рис. 3, отношение импульсов давления по абсолютным значениям равно 1.5 , то по избыточным будет составлять уже 2.63 раза.

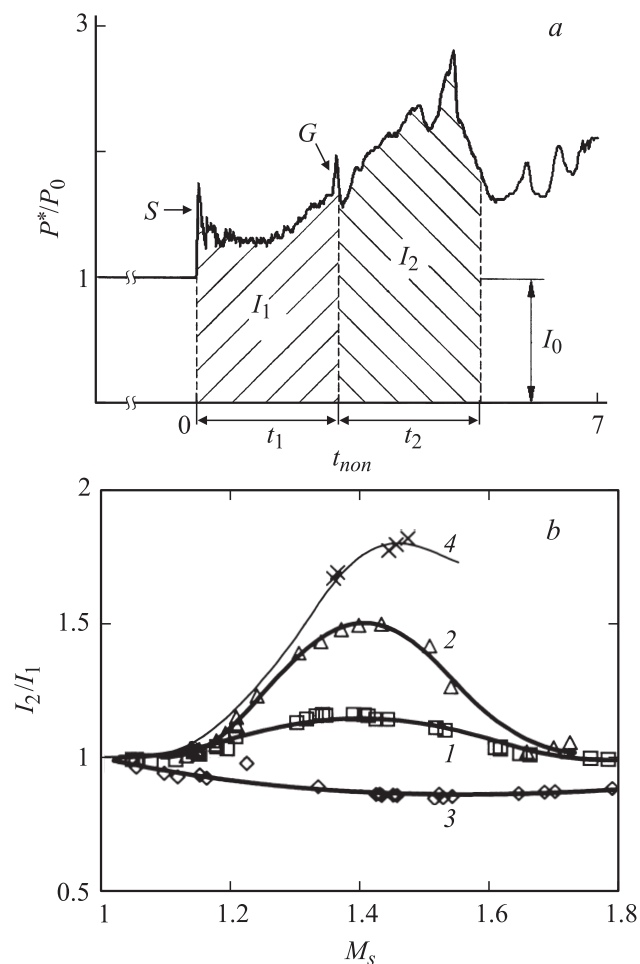


Рис. 3. Осциллограмма давления на преграде для числа Маха волны $M_s = 1.396$ при $L/d = 2$ (а) и отношение импульсов давления на стенке в центральной точке потока (б). Линии 1, 2, 4 — соответствуют $L/d = 1, 2$ и 4, 3 — 0.5.

Эффект усиления воздействия в области дозвуковых чисел Маха проявляется и при других расстояниях до преграды, но граница двух стадий воздействия в эксперименте определению не подлежит. В диапа-

зоне больших дозвуковых чисел Маха, чем рассмотренные, отмеченный эффект не наблюдался.

Полученные в работе зависимости для времени прихода головного вихря и диапазона чисел Маха существования оптимума усиления воздействия могут быть использованы при построении аналитических моделей взаимодействия импульсного потока с преградой и выработке мер по интенсификации технологических процессов, основанных на применении энергии газов высокого давления.

Список литературы

- [1] *Elder F.K., Haas de N.* // *Jornal of Appl. Phys.* 1952. V. 23. N 10. P. 1065–1069.
- [2] *Старшинов А.И.* // *Вестн. ЛГУ.* 1964. № 13. Сер. математики, механики и астрономии. Вып. 3. С. 110–113.
- [3] *Старшинов А.И.* // *Вестн. ЛГУ.* 1965. № 19. Сер. математики, механики и астрономии. Вып. 4. С. 166–168.
- [4] *Белавин В.А., Голуб В.В., Набоко И.М.* // *Журнал прикладной механики и технической физики.* 1979. № 1. С. 56–65.
- [5] *Панов Б.Ф., Старшинов А.И., Угрюмов Е.А.* // *Учен. зап. ЛГУ.* 1968. № 338. Сер. математических наук. Вып. 43. Газодинамика и теплообмен. Сб. 1. С. 108–115.
- [6] *Minota T., Nishida M., Lee M.G.* // *Fluid Dynamics Research.* 1997. N 21. P. 139–157.
- [7] *Голуб В.В., Чижиков А.С.* // *Физика экстремальных состояний вещества.* 2006. С. 145–147.
- [8] *Vaird J.P.* // *Proc. R. Soc. Lond. A.* 1987. V. 409. P. 59–65.
- [9] *Чижиков А.С., Голуб В.В., Щербак С.Б.* // *Актуальные проблемы российской космонавтики. Тр. XXXI академических чтений по космонавтике.* 2007. С. 160–161.