

УДК 533.6.011

© 2003 г. Т. В. БАЖЕНОВА, В. В. ГОЛУБ, А. Л. КОТЕЛЬНИКОВ,
А. С. ЧИЖИКОВ, С. Б. ЩЕРБАК

ВЛИЯНИЕ ЧАСТИЧНОГО ПЕРЕКРЫТИЯ КАНАЛА НА ИМПУЛЬС ДАВЛЕНИЯ ВЫХОДЯЩЕЙ ИЗ НЕГО УДАРНОЙ ВОЛНЫ

Выполнены экспериментальное и численное исследования развития во времени и пространстве структуры течения за ударной волной, характеризующейся различными числами Маха ($M_0 = 1.15-3.0$), из открытого и полузамкнутого торцов канала, изучено воздействие дифрагированной волны на преграду на различных расстояниях. Получены теплерограммы структуры потока, и измерено давление на преграде. Установлены закономерности взаимодействия ударной волны с пластиной, расположенной перпендикулярно оси канала. Обнаружено, что частичное перекрытие канала приводит к уменьшению давления на преграду при выходе сильной ударной волны ($M_0 > 2.2$) и к увеличению давления при дифракции слабой ударной волны ($M_0 = 1.1-1.7$). Получены зависимости динамического воздействия ударных волн на преграду, определяющие порог комбинации числа Маха ударной волны и расстояния до преграды для уменьшения или увеличения импульса давления на ней.

Ключевые слова: струи, сверхзвуковое течение, воздействие ударной волны, частично перекрытый канал.

Тепловое и динамическое воздействия на преграду ударной волны являются одной из интересных и практически важных задач газодинамики. Исследование взаимодействия ударной волны, дифрагированной из открытого канала круглого сечения, с плоской преградой было выполнено экспериментально и численно в [1–3]. Взаимодействие слабой дифрагированной ударной волны с преградой исследовано в [4] для определения оптимальной формы глушителя. Амплитуда звука, излучаемого глушителем автомобиля, пропорциональна градиенту изменения давления в нем [5].

При высоких числах Маха падающей ударной волны поток за скачком сверхзвуковой. При выходе ударной волны из осесимметричного канала сначала наблюдается автомодельное течение, затем, после пересечения центрированных волн разрежения, осуществляется нестационарная стадия течения и со временем формируется структура потока, подобная "бочке" в недорасширенной стационарной сверхзвуковой струе [6, 7]. В [8] показано, что затухание ударной волны происходит медленнее при выходе ее из осесимметричного канала, чем в случае трубы с установленной коаксиальной цилиндрической вставкой. Такая геометрия канала рекомендована для усиления воздействия ударной волны на обрабатываемые поверхности. Возможность управления давлением на преграду при выходе ударной волны из канала с помощью изменения формы его поперечного сечения дается в [9]. Давление на преграду при выходе ударной волны из канала круглой формы поперечного сечения больше, чем из канала квадратного сечения.

С увеличением числа Маха падающей ударной волны коэффициент восстановления полного давления при истечении из канала с квадратной формой поперечного сечения уменьшается, а круглой – растет. Наблюдаемый эффект объясняется тем, что в выходном сечении отрыв потока происходит под большим углом [7], что сопровождается увеличением числа Маха потока и потерь полного давления за волной торможения.

Если торец канала закрыт диафрагмой с соплом, критическое сечение которого мало по сравнению с сечением канала ("отражающее сопло"), то после отражения ударной волны от торца в окружающем пространстве возникает импульсная сверхзвуковая струя, перед которой распространяется пусковая ударная волна. Воздействие на преграду ударной волны, выходящей из открытого конца канала, сравнивалось с воздействием импульсной струи с использованием отражающего звукового сопла в торце канала [3]. Исследования проводились при одинаковых числах Маха падающей ударной волны и начальных условиях в канале. В [10] изучалась струя, сформированная после отражения ударной волны от торца ударной трубы со звуковым соплом при условиях, позволяющих считать параметрами торможения струи параметры за отраженной ударной волной. Число Маха M_0 падающей ударной волны составляло 2.7. Установление отражающего сопла в торце канала способствует понижению давления и увеличению температуры на преграде при выходе из канала сильной ударной волны [10].

Управление импульсом воздействия ударных волн обнаруживает ряд практических приложений – таких, как меры безопасности при взрывах в шахтах, домах, при разрыве трубопроводов, емкостей под давлением, производство чипов, очистка поверхностей ударными волнами, улучшение смешения при сверхзвуковом горении и для детонации в частотном режиме, а также при разработке устройств для уменьшения акустического воздействия выхлопов двигателей внутреннего сгорания.

1. Постановка задачи. Выход ударных волн из частично перекрытого канала и их воздействие на преграду составляют одну из нерешенных задач газодинамики. Дифракция ударной волны – явление, которое не описывается ни теорией сферического взрыва, ни теорией струй. Оно включает в себя элементы каждого из этих процессов. При больших числах Маха первичной ударной волны она определяет характер действия на преграду, при малых M_0 – в большей степени оказывает влияние струйное течение спутного потока. В промежуточном случае сочетается влияние двух данных явлений. Представляет интерес исследование влияния частичного перекрытия канала на относительную роль обоих процессов. Если торец канала полностью открыт, то ударная волна с параметрами падающей волны начинает дифрагировать в окружающее пространство, воздействуя на предметы с определенной интенсивностью.

Задача о дифракции ударной волны рассматривается для условий, не требующих необходимости учитывать изменение состояния в канале в ходе дифракции. Более общим случаем является режим, при котором происходит изменение параметров как вне канала, так и внутри него. В случае, если канал открыт не полностью, ударная волна частично проходит в окружающее пространство и отражается от торца канала [11]. Воздействие дифрагированной ударной волны на преграду может быть сильнее, так как давление на выходе из канала выше – промежуточное между давлениями за падающей и отраженной волной. В то же время уменьшение выходного диаметра приводит к увеличению относительного расстояния от выхода из канала до преграды. В этом случае имеем дело с неисследованными ранее режимами, при которых взаимодействие волн разрежения и скачков уплотнения может привести как к увеличению, так и к уменьшению воздействия дифрагированной волны на преграду. Для этого необходимо решать задачу о взаимодействии волн разрежения и скачков уплотнения в двухсвязной области различной геометрии.

Предварительные расчеты выхода ударной волны из частично перекрытого канала показали, что импульс давления на преграде может быть как больше, так и меньше, чем в случае выхода из открытого канала, в зависимости от числа Маха падающей ударной волны [12]. Для слабой ударной волны ($M_0 = 1.15$) из частично перекрытого канала импульс давления на преграде оказался больше, чем при выходе из открытого канала.

В данной работе проводится сравнение воздействия на преграду ударной волны, выходящей из открытого и частично перекрытого выхода из канала в зависимости от числа Маха ударной волны и расстояния от среза канала до преграды.

2. Экспериментальная установка. Экспериментальный стенд состоял из ударной трубы с сечением $40 \times 40 \text{ мм}^2$, соединенной с цилиндрической вакуумной камерой диаметром 80 см и длиной 120 см. На торце ударной трубы был установлен фланец с каналом, располагающимся внутри, длиной 100 мм и с круглым сечением диаметром $d = 20 \text{ мм}$. Торцевая насадка могла экранироваться диафрагмой с отверстием диаметром $0.5d$. В камере размещалась плоская преграда с координатным механизмом, позволяющим варьировать расстояние L от среза насадки до преграды. Плоскость преграды располагалась перпендикулярно оси истечения струи. В качестве толкающего газа использовался воздух. Канал низкого давления и вакуумная камера были соединены с атмосферой. Измерение скорости ударной волны проводилось базовым методом. Использовались два одинаковых датчика давления на кристаллах ЦТС-19. Время между первым и вторым импульсами измерялось осциллографом С9-8. Относительная случайная погрешность значения скорости составляла не более $\pm 1\%$.

Были проведены измерения давления на преграде. Для визуализации картины течения использовался теневой прибор ИАБ-451 и высокоскоростная камера ВСК-5. Поскольку эта камера не предназначалась для работы с прибором ИАБ-451, она была модернизирована путем замены штатных объективов, установки дополнительных объективов и переделкой электродинамического затвора. Это позволило получить в одном эксперименте 72 кадра размером $16 \times 22 \text{ мм}^2$ с интервалом 4–7 мкс. Изображение сканировалось и обрабатывалось на компьютере.

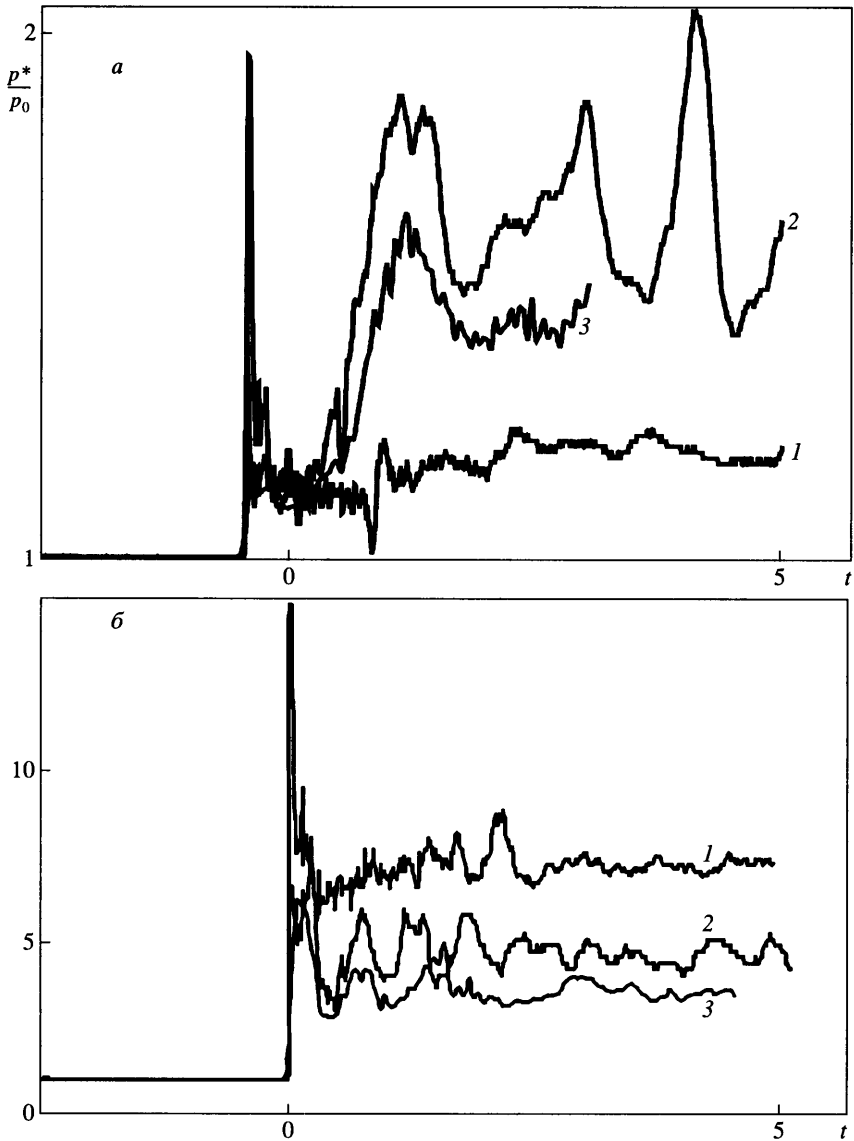
Аналогичные зарубежные высокоскоростные камеры позволяют получить втрое меньшее число кадров из одного эксперимента. Существующие образцы электронных видеокамер не синхронизируются с импульсным газодинамическим процессом, а теневые картины обладают менее четким изображением.

Регистрацию изменения во времени давления на преграде проводили датчиком давления "Kistler – 603В". Градуировку датчика осуществляли в ударной трубе по измерению давления за ударными волнами с заданным числом Маха. Точность измерения давления составляла 5%.

3. Численное моделирование. Задача о неавтономной дифракции ударной волны моделировалась путем решения уравнений Эйлера методом Годунова второго порядка точности. Разностная схема основывалась на интегральной форме законов сохранения и строилась по методу конечных объемов. Граничные условия выбирались в соответствии с геометрией с учетом частичного перекрытия канала и установления преграды на определенном расстоянии от торца трубы.

На выходе из торца ударной трубы задавались параметры потока, вычисленные для заданного M_0 . Проводился расчет поля течения для идеального газа в пространстве и во времени в зависимости от M_0 и показателя адиабаты γ истекающего газа. Безразмерное время t связано с размерным τ соотношением: $t = \tau/d \sqrt{p_0/\rho_0}$, где p_0 и ρ_0 – параметры невозмущенного газа.

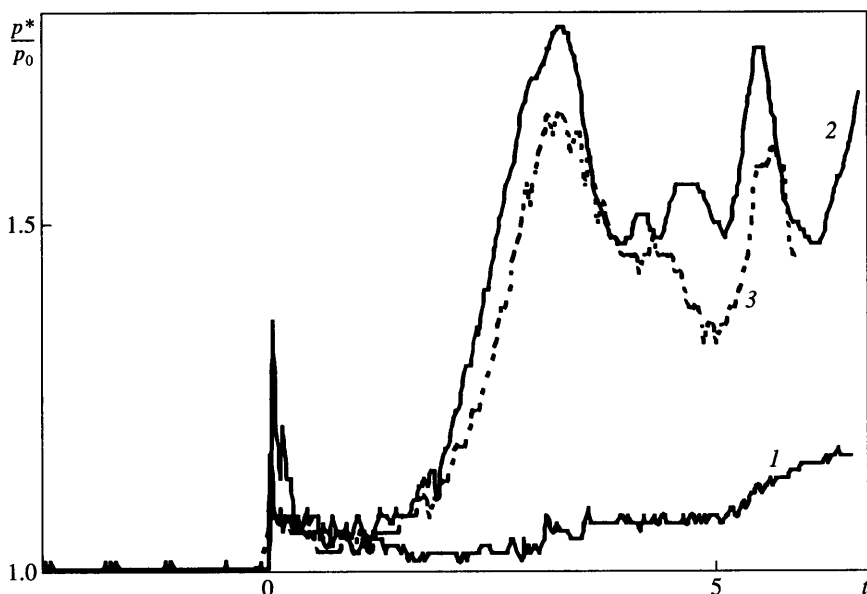
4. Результаты. Поле течения за сильной дифрагированной ударной волной характеризует структуру сверхзвукового потока, элементами которого являются: дифрагированная ударная волна, линия отрыва потока, сворачивающаяся в вихрь, веер волн разрежения, замыкаемый косым скачком, ударная волна торможения, согласующая состояние истекающего расширенного газа с более плотным газом за дифрагированной ударной волной [6]. Отраженная волна проходит через контактную поверхность, волну торможения и вихрь. Волна торможения после взаимодействия с отраженной волной приближается к пластине и занимает квазистационарное положение. Картина те-



Фиг. 1. Распределения давления на преграде в центральной точке потока при $L = 1d$: 1, 2 – эксперимент, открытый и частично перекрытый каналы; 3 – расчет для частично перекрытого канала; а, б – $M_0 = 1.14, 2.15$; t – безразмерное время, отсчитываемое от момента отражения ударной волны от преграды

чения подобна той, которая возникает при взаимодействии с преградой недорасширенной сверхзвуковой струи.

Изменение во времени давления на преграде, полученное из эксперимента и численного расчета, сравнивалось для случаев выхода ударной волны из открытого и частично перекрытого каналов для ударных волн с числами Маха $M_0 = 1.14$ (слабая ударная волна, поток за которой дозвуковой) и 2.15 (поток сверхзвуковой). Расстояние между выходом из канала и плоской преградой варьировалось от 0.5 до $2d$ (фиг. 1).

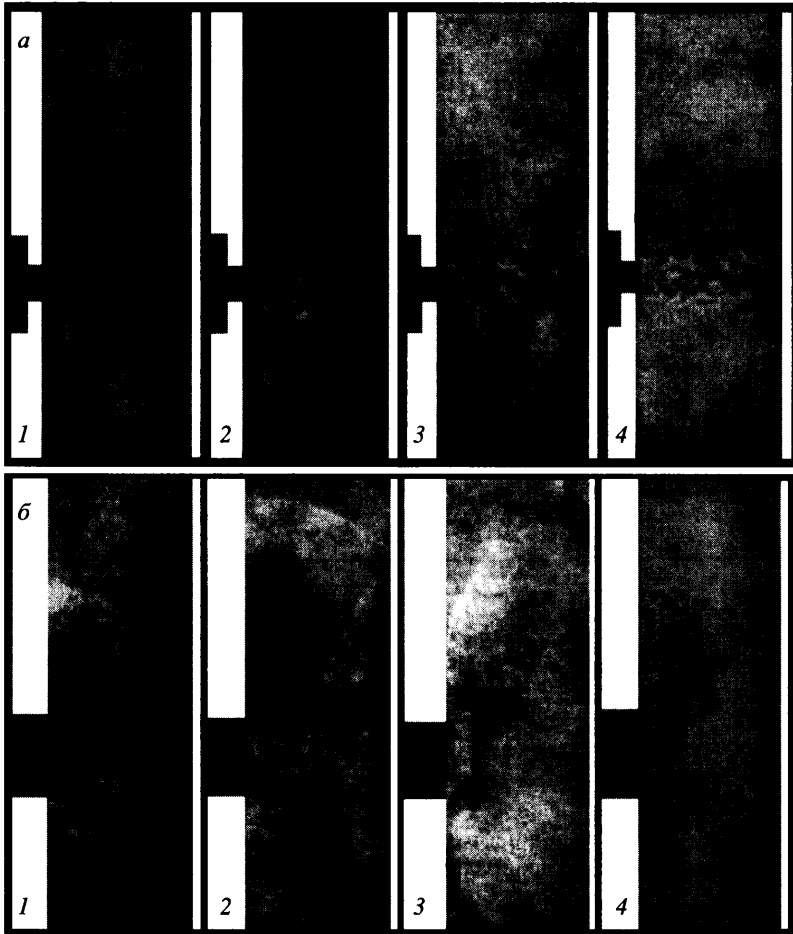


Фиг. 2. Изменения давления на преграде в центральной точке потока при $L = 2d$, $M_0 = 1.14$: 1, 2 — открытый и частично перекрытый каналы; 3 — расчет для частично перекрытого канала

Воздействие дифрагированной волны вызывает в первый момент скачок давления, затем следует быстрое его падение, как при отражении сферической ударной волны. Когда к пластине подходит граница раздела потока, истекающего из канала, и потока ранее невозмущенного газа за дифрагированной волной, то наблюдается второй подъем давления. Затем в центральной части пластины устанавливается квазистационарное состояние. Для сильных волн вторичный рост давления меньше увеличения давления в момент отражения ударной волны. При выходе слабой ударной волны из частично перекрытого канала вторичный подъем давления соизмерим с величиной давления в момент отражения ударной волны.

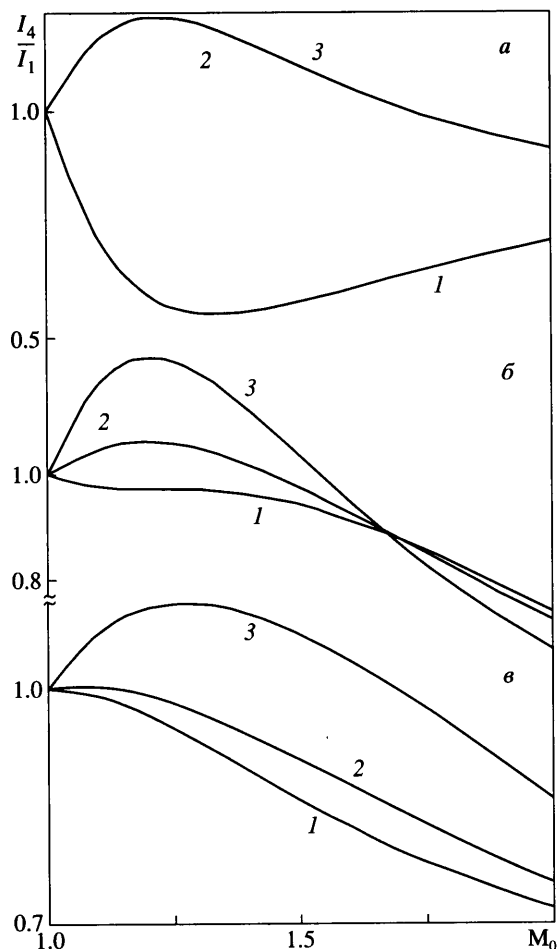
В тот момент, когда датчик давления начинает показывать сильное дополнительное увеличение давления при выходе слабой ударной волны из частично перекрытого канала (фиг. 2), на теплеграммах процесса взаимодействия дифрагированной волны с преградой наблюдается резкое изменение структуры потока (фиг. 3а, б). К преграде подходит сильно турбулизованная струя, которая не наблюдается при выходе как слабой ударной волны из открытого канала, так и сильной из открытого или частично перекрытого канала. Возникновение струи не связано с приходом из ударной трубы турбулизованного холодного газа за контактной поверхностью. Об этом свидетельствует оценка продолжительности горячей пробки в ударной трубе, а также тот факт, что появление дополнительного возрастания давления при истечении из полузамкнутого канала подтверждается численным расчетом, не учитывающим возможного ограничения рабочего времени в ударной трубе (фиг. 1, а, кривая 3). Сравнение осциллограмм измерения воздействия на преграду и теневого фотография позволяет сделать вывод, что повышение давления на пластине вызвано его увеличением на выходе из канала после отражения ударной волны от торца канала.

По осциллограммам давления вычислено значение полного импульса потока I в центральной точке струи. При анализе результатов величина I отнесена к составляющей



Фиг. 3. Кадры из серии теплереграмм процесса взаимодействия дифрагированной волны с преградой для $M_0 = 1.15$, $L = 2d$: 1–4 – $t = 0.4$; 1.2; 2.1; 3.6; частично перекрытый (а) и открытый (б) каналы

полного импульса I_0 для начального момента. В таблице представлены значения I/I_0 для двух отношений площади открытого торца канала F_1 к площади отверстия в полузакрытом канале F_{II} как функция числа M_0 на трех расстояниях L до преграды. Результаты представлены уравнениями вида: $I/I_0 = aM_0^3 + bM_0^2 + cM_0 + d$. Импульс вычислен на основании полученных осциллограмм давления для трех характерных моментов времени: через 30 мкс – момент воздействия первичной ударной волны, 100 мкс – действие спутного потока за ударной волной (переходный период) и 300 мкс – выход на квазистационарное состояние. Для случая $L/d = 1$; $F_1/F_{II} = 4$ определено, что $a = -3.01$ для времени 30 мкс и $a = -1.65$ для 100 мкс. В остальных случаях коэффициент $a = 0$. Такое безразмерное представление результатов делает возможным выявить не только количественные, но и качественные различия в структуре потоков без привязки к начальным условиям. Точность аппроксимации экспериментальных точек квадратичной функцией составляла для различных кривых 0.5–4%.



Фиг. 4. Зависимость отношения импульсов давления I_4/I_1 от числа M_0 при воздействии на преграду ударной волны, выходящей из частично закрытого (I_4) и открытого торца канала (I_1): 1-3 - $t = 0.44; 1.5; 4.4$; ($\tau = 30; 100; 300$ мкс соответственно); а-в - $L = 0.5d; 1d; 2d$

Для сравнения действия ударной волны, выходящей из частично закрытого и открытого торцов канала, удобно вычислить отношения импульсов давления в этих двух случаях в различные моменты времени (фиг. 4, а-в). Максимальное увеличение импульса давления при частичном перекрытии канала наблюдается при $M_0 = 1.25$ на рас-

L/d	F_V/F_{II}	$I/I_0 (t = 30 \text{ мкс})$			$I/I_0 (t = 100 \text{ мкс})$			$I/I_0 (t = 300 \text{ мкс})$		
		b	c	d	b	c	d	b	c	d
0.5	1	6.95	-11.69	5.74	7.42	-14.44	8.02	7.42	-14.44	8.02
0.5	4	7.69	-16.80	10.11	4.74	-7.11	3.37	4.74	-7.11	3.37
1	1	4.61	-8.50	4.89	4.24	-7.69	4.45	4.05	-7.09	4.04
1	4	15.34	-21.33	10.00	8.20	-9.78	4.23	-0.46	4.38	-2.92
2	1	2.05	-3.63	2.58	1.07	0.97	0.90	0.47	0.68	-0.15
2	4	1.07	-1.68	1.61	0.13	1.04	-0.17	-0.95	4.50	-2.55

стоянии одного диаметра канала от выхода до преграды. Эффект увеличивается с ростом интервала экспонирования.

При взаимодействии с преградой слабой ударной волны экранирование диафрагмой способствует увеличению амплитуды давления и продолжительности воздействия на преграду. В отличие от дифракции из открытого канала давление на преграде возрастает в основном не при отражении дифрагированной волны, а на более поздних стадиях при торможении спутного потока. Аналогичный ход изменения давления на преграде наблюдается при всех исследованных расстояниях до преграды.

Заключение. Геометрия канала влияет на воздействия ударной волны на преграду. Частичное перекрытие выхода приводит к уменьшению давления на преграде в случае сильной ударной волны ($M_0 > 2.2$) и к его увеличению для слабой ударной волны ($M_0 = 1.1-1.7$). На основе полученных результатов могут быть развиты пути управления импульсом воздействия ударных волн на преграды.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (№ 01-01-00664).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Панов Б.Ю., Старшинов А.И., Угрюмов Е.А. Экспериментальное исследование воздействия нестационарной струи на плоскую преграду // Газодинамика и теплообмен. Л.: Изд-во ЛГУ, 1970. Вып. 1. С. 108–115.
2. Серова В.Д. О взаимодействии начальной стадии струи с плоской преградой // Газодинамика и теплообмен. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. Вып. 6. С. 121–130.
3. Баженова Т.В., Базаров С.Б., Бормотова Т.А. и др. Воздействие дифрагированной ударной волны на преграду // Изв. РАН. МЖГ. № 4. 1999. С. 110–115.
4. Phan K., Stollery J. The effect of suppressors and muzzle brakes on shock wave strength // Proc. 14th Intern. Symp. on Shock Tubes and Shock Waves. Sydney, 1983. P. 519–525.
5. Matsumura S., Onodera O., Takayama K. Noise induced by weak shock waves in automobile exhaust systems // Shock Waves @ Marseille III. Berlin: Springer, 1995. P. 367–372.
6. Баженова Т.В., Базаров С.Б., Булат О.В. и др. Экспериментальное и численное исследование ослабления ударных волн при выходе из плоского и осесимметричного каналов // Изв. РАН. МЖГ. 1993. № 4. С. 204–207.
7. Баженова Т.В., Голуб В.В., Бормотова Т.А. и др. Расширение потока при выходе ударной волны из канала // Теплофизика высоких температур. 2001. Т. 39. № 1. С. 123–127.
8. Yu Q., Gronig H. Shock waves from an open-ended shock tube with different shapes // Shock Waves. 1996. V. 6. № 5. P. 249–258.
9. Баженова Т.В., Бормотова Т.А., Голуб В.В. и др. Потери полного давления в потоке за ударной волной, выходящей из каналов различной геометрии // Письма в ЖТФ. 2001. Т. 27. Вып. 16. С. 10–14.
10. Баженова Т.В., Базаров С.Б., Бормотова Т.А. и др. Взаимодействие импульсной сверхзвуковой струи с преградой // Изв. РАН. МЖГ. 1998. № 2. С. 45–51.
11. Дулов В.Г., Лукьянов Г.А. Газодинамика процессов истечения. Новосибирск: Наука, 1984. 234 с.
12. Баженова Т.В., Бормотова Т.А., Голуб В.В. и др. Воздействие на преграду ударных волн, выходящих из частично перекрытого канала // Письма в ЖТФ. 2000. Т. 26. Вып. 15. С. 32–38.