

УДК 534.13: 533.6.011.5

## О МЕХАНИЗМЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ ПРИ НАТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ НА ПРЕГРАДУ

### 2. ПРЕГРАДА БЕЗ ИГЛЫ

С. П. Киселев, В. П. Киселев, В. Н. Зайковский

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия  
E-mails: kiselev@itam.nsc.ru, kiselevvp@itam.nsc.ru, zaikovskii@itam.nsc.ru

Представлены результаты численного решения задачи о натекании сверхзвуковой перерасширенной струи на преграду. Выявлен массорасходный механизм автоколебаний, состоящий в периодической смене режима втекания и режима вытекания газа из области отрыва в струю, обтекающую эту область. Показано, что ударно-волновая структура натекающей сверхзвуковой струи оказывает существенное влияние на амплитуду автоколебаний.

Ключевые слова: перерасширенная сверхзвуковая струя, преграда, автоколебания, ударная волна.

**Введение.** Данная работа является продолжением работы [1], в которой исследован механизм автоколебаний в сверхзвуковой струе, натекающей на преграду с иглой. В [1] приведен подробный обзор работ, посвященных изучению автоколебаний при натекании сверхзвуковой недорасширенной струи на ограниченные и неограниченные преграды с иглой. Интерес к исследованию недорасширенных сверхзвуковых струй обусловлен их применением в ракетной технике. Изучению автоколебаний в перерасширенных сверхзвуковых струях при их взаимодействии с преградой посвящено небольшое количество экспериментальных работ [2, 3]. Однако в последние годы эта задача приобрела актуальность вследствие использования метода холодного газодинамического напыления [4]. Суть метода состоит в ускорении микрочастиц в сверхзвуковой перерасширенной струе, натекающей на преграду. В результате соударения ускоренных микрочастиц с преградой на ней возникает покрытие. При некоторых параметрах течения появляются автоколебания, что может приводить к ухудшению качества покрытия. Таким образом, необходимо исследовать механизм возникновения автоколебаний при взаимодействии перерасширенной сверхзвуковой струи с преградой.

В настоящей работе представлены результаты теоретического и экспериментального исследований автоколебаний, возникающих при натекании сверхзвуковой перерасширенной струи на неограниченную преграду.

**1. Постановка задачи.** Постановка задачи в данной работе близка к соответствующей постановке в [1]. Рассматривается коническое сопло Лаваля, за которым на некотором расстоянии располагается плоская преграда (рис. 1). Расчет течения струи газа

---

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 11-08-01336).

© Киселев С. П., Киселев В. П., Зайковский В. Н., 2014

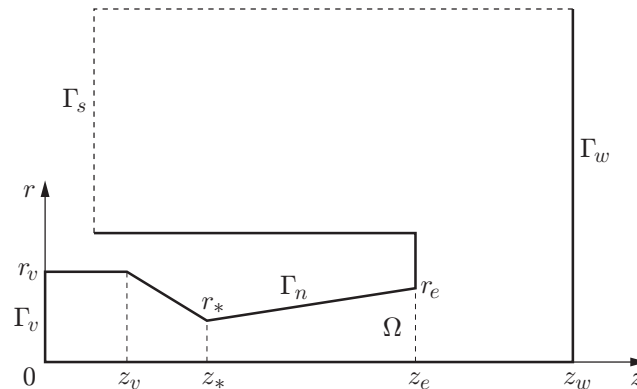


Рис. 1. Расчетная область в задаче о натекании сверхзвуковой перерасширенной струи в цилиндрической системе координат  $(z, r)$

в сопле Лавалья и ее соударения с преградой проводится в осесимметричной постановке в координатах  $z, r$  в рамках двухпараметрической (SST)  $(k-\omega)$ -модели турбулентности [5]. В качестве газа используется воздух, описываемый уравнением состояния идеального газа  $p = \rho RT$ ,  $\gamma = 1,4$ . Численный расчет проводится по неявной схеме с первым порядком точности по времени и вторым порядком точности по пространству. Уравнения для турбулентной энергии  $k$  и скорости диссипации  $\omega$  решаются с первым порядком точности.

В экспериментах использовалась стандартная установка, которая включала источник газа высокого давления и сверхзвуковое коническое сопло. Среднее давление на преграде измерялось через дренажные отверстия диаметром 0,4 мм, расположенные на расстоянии 0,8 мм друг от друга.

Эксперименты и расчеты проводились для конического сверхзвукового сопла (см. рис. 1) с такими же размерами, как у сопла, рассмотренного в работе [1]: радиус входного сечения  $r_v = 0,5$  см, критического сечения  $r_* = 0,2$  см, выходного сечения  $r_e = 0,4$  см, длина входного участка  $z_v = 0,3$  см, дозвукового сужающегося участка  $z_* - z_v = 1$  см, сверхзвукового конического расширяющегося участка  $z_e - z_* = 4,3$  см, угол конусности  $\alpha = 5,3^\circ$ . Расчетная область разбивалась на  $1,5 \cdot 10^5$  расчетных ячеек. Вблизи границ сопла и преграды сетка сгущалась, при этом значение  $y^+$  в зависимости от шага сетки в окрестности границы изменялось в диапазоне от 1 до 10. На границах сопла  $\Gamma_n$  и преграды  $\Gamma_w$  ставились условия прилипания, на границе  $\Gamma_s$  — “мягкие” граничные условия (равенство нулю градиентов параметров течения). Через входное сечение сопла  $\Gamma_v$  подавался воздух с давлением торможения  $p_0 = 1,5$  МПа. Эксперименты и расчеты проводились при двух значениях температуры торможения:  $T_0 = 300$  К (“холодная” струя) и  $T_0 = 700$  К (“горячая” струя). Температура воздуха в окружающем пространстве, куда вытекала струя, в обоих случаях была равна  $T'_0 = 300$  К. В начальный момент во всей области течения задавалось постоянное давление  $p_0 = 1,5$  МПа, скорость газа была равна нулю.

**2. Анализ результатов численных расчетов.** При заданных геометрических размерах сопла численно решены две задачи о натекании на преграду “холодной” и “горячей” сверхзвуковых струй при различных расстояниях от среза сопла до преграды.

Задача 1. Рассмотрим процесс натекания перерасширенной сверхзвуковой “холодной” струи газа с параметрами  $p_0 = 1,5$  МПа,  $T_0 = 300$  К,  $n = 0,5$  на преграду, расположенную на расстоянии от среза сопла  $z_w - z_e = 2$  см (см. рис. 1).

На рис. 2,а показана структура рассчитанного течения в струе на участке между срезом сопла и преградой в момент времени  $t_2$ . Сверхзвуковая струя вытекает из сопла,

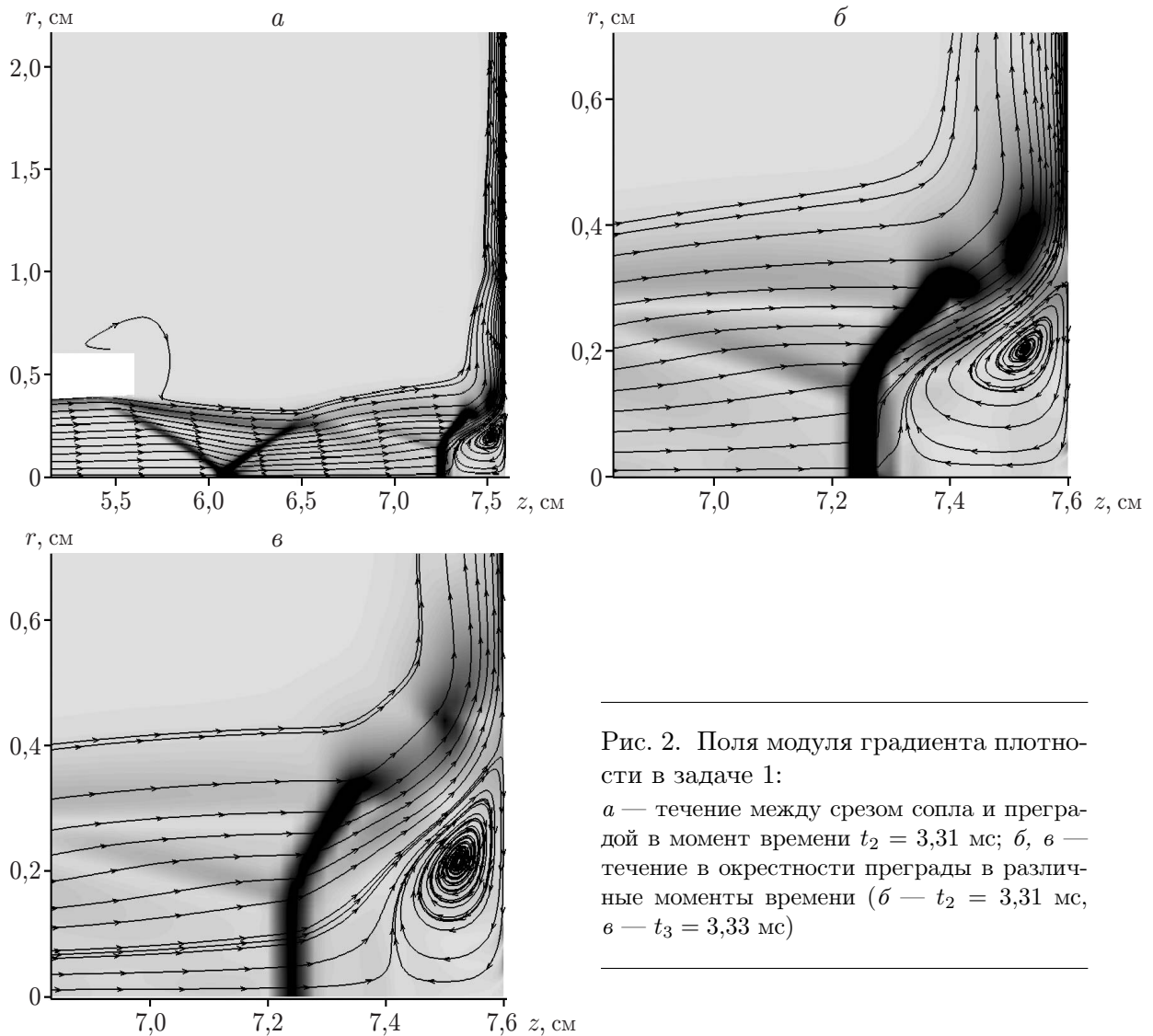


Рис. 2. Поля модуля градиента плотности в задаче 1:

*a* — течение между срезом сопла и преградой в момент времени  $t_2 = 3,31 \text{ мс}$ ; *б*, *в* — течение в окрестности преграды в различные моменты времени (*б* —  $t_2 = 3,31 \text{ мс}$ , *в* —  $t_3 = 3,33 \text{ мс}$ )

разворачивается в окрестности преграды, превращаясь в радиальную струю, а затем растекается по преграде. В окрестности преграды вблизи оси образуется отраженная ударная волна с криволинейным фронтом. За прямым скачком (фронт ударной волны перпендикулярен набегающему потоку) имеет место дозвуковое течение с тороидальным вихрем, а за косым скачком — сверхзвуковое течение. В сверхзвуковой перерасширенной струе, вытекающей из сопла, возникает сложная ударно-волновая структура. В сопле происходит отрыв пограничного слоя, в результате чего образуется косая ударная волна, распространяющаяся по направлению к оси струи и отражающаяся от нее в виде ударной волны в направлении границы струи, от которой она отражается в виде волны разрежения. Отраженная волна разрежения взаимодействует с отраженной от преграды ударной волной, что приводит к излому фронта отраженной ударной волны. Описанная ударно-волновая структура не является стационарной и совершает периодические колебания (пульсации). На рис. 2, *б*, *в* показаны картины течения газа в окрестности преграды в моменты времени  $t_2 = 3,31 \text{ мс}$  и  $t_3 = 3,33 \text{ мс}$ . (Моменты времени  $t_i$  соответствуют координатам пронумерованных точек на оси абсцисс (рис. 3, *a*).) Видно, что за время  $t_3 - t_2 = 20 \text{ мкс}$  происходит

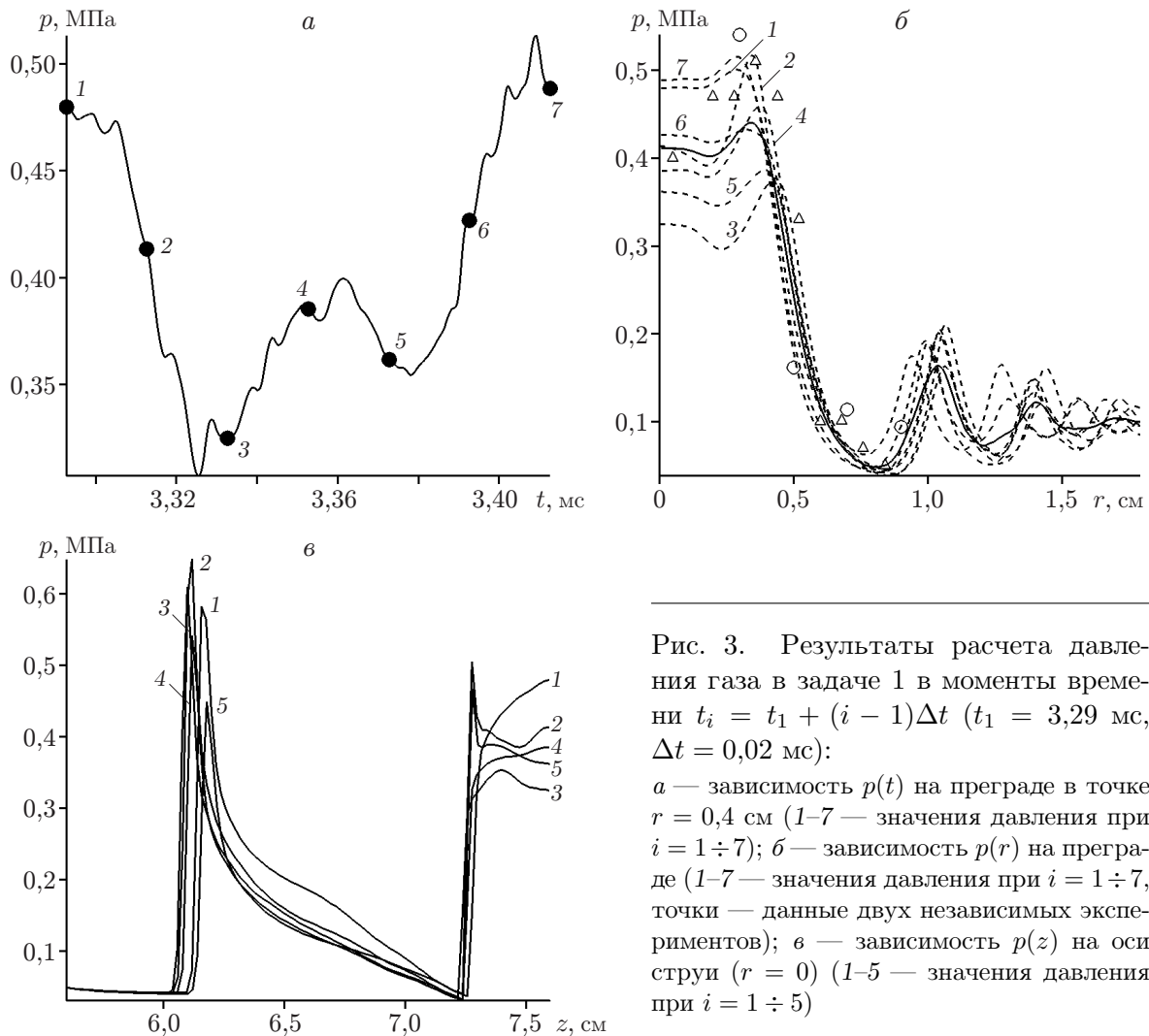


Рис. 3. Результаты расчета давления газа в задаче 1 в моменты времени  $t_i = t_1 + (i - 1)\Delta t$  ( $t_1 = 3,29$  мс,  $\Delta t = 0,02$  мс):

*a* — зависимость  $p(t)$  на преграде в точке  $r = 0,4$  см (1–7 — значения давления при  $i = 1 \div 7$ ); *б* — зависимость  $p(r)$  на преграде (1–7 — значения давления при  $i = 1 \div 7$ , точки — данные двух независимых экспериментов); *в* — зависимость  $p(z)$  на оси струи ( $r = 0$ ) (1–5 — значения давления при  $i = 1 \div 5$ )

качественное изменение картины течения. В момент времени  $t_2 = 3,31$  мс газ вытекает из области вихревого течения в натекающую струю (см. рис. 2,б), а в момент времени  $t_3 = 3,33$  мс газ втекает в эту область из натекающей струи (см. рис. 2,в). Следовательно, в данных условиях реализуется массорасходный механизм пульсаций в окрестности преграды.

На рис. 3,а приведена зависимость давления газа от времени на преграде в точке  $r = 0,4$  см за один период колебаний. Видно, что на преграде имеют место значительные колебания давления  $\Delta p/\bar{p} \approx 0,5$ . Здесь  $\bar{p}(r) = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} p(r, t) dt \approx 0,42$  МПа — среднее давление в точке  $r = 0,4$  см;  $T_f$  — период колебаний. Давление в момент времени  $t_2 = 3,31$  мс больше, чем в момент времени  $t_3 = 3,33$  мс. При  $t > t_7 = 3,42$  мс колебания повторяются, однако форма кривой  $p(t)$  незначительно изменяется от периода к периоду.

На рис. 3,б показаны распределения давления на преграде в различные моменты времени. Точками показаны результаты двух экспериментов, в которых измерялось среднее давление в нескольких точках на преграде, находящихся на различном расстоянии от оси

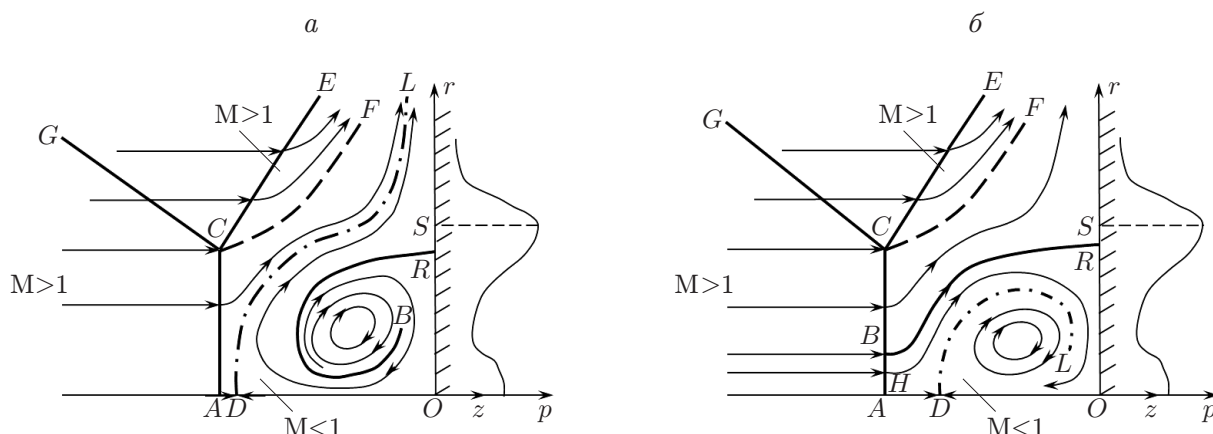


Рис. 4. Схема течения газа в окрестности преграды, полученная на основе результатов численных расчетов (см. рис. 2, б, в):

$a$  — в момент времени  $t_2 = 3,31$  мс;  $b$  — в момент времени  $t_3 = 3,33$  мс;  $DL$  — контактный разрыв, начинающийся в точке соударения “прямой” и “обратной” струек на оси струи;  $CF$  — контактный разрыв, разделяющий дозвуковое ( $M < 1$ ) и сверхзвуковое ( $M > 1$ ) течения газа за фронтом отраженной ударной волны;  $AC$  — отраженная от преграды прямая ударная волна;  $EC$  — отраженная от преграды косая ударная волна;  $GC$  — волна разрежения;  $R$  — точка растекания струи на преграде;  $S$  — точка максимума давления на преграде

струи. Сплошной линией показана зависимость среднего давления от радиуса  $\bar{p}(r)$ , рассчитанная по приведенной выше формуле. Видно, что распределения среднего давления  $\bar{p}(r)$  на преграде, полученные в экспериментах и численном расчете, удовлетворительно согласуются. Заметим, что в расчете и экспериментах максимум давления смещен относительно оси струи на расстояние  $r = 0,4$  см.

На рис. 3, в показаны распределения давления на оси струи в различные моменты времени. Наблюдаются два скачка давления, один из которых соответствует косой ударной волне, отраженной от оси в точке  $z = 6,1$  см (см. рис. 2, а), а другой — прямой ударной волне, отраженной от преграды и находящейся в точке  $z = 7,2$  см. Давление за этими ударными волнами испытывает значительные колебания, причина возникновения которых установлена в работе [1]. Растекающаяся по преграде радиальная струя излучает акустические волны, которые распространяются в газе, окружающем струю, по направлению к срезу сопла, проникают по пограничному слою внутрь сопла и вызывают колебания точки отрыва пограничного слоя от стенки сопла. В результате происходят колебания угла наклона косой ударной волны, которая зарождается в окрестности точки отрыва (см. рис. 2, а), и значений давления за этой ударной волной.

Приведенные на рис. 2, 3 результаты численных расчетов позволяют уточнить действие массорасходного механизма автоколебаний при натекании струи на преграду. Используя результаты расчетов (см. рис. 2, б, в), представим схему течения газа в окрестности преграды для тех же моментов времени  $t_2 = 3,31$  мс и  $t_3 = 3,33$  мс (рис. 4, а, б). Рассмотрим течение газа в окрестности преграды в момент времени  $t_2 = 3,31$  мс (см. рис. 4, а). В этот момент максимум давления на оси возникает на фронте прямой ударной волны (точка  $A$  на рис. 4, а и точка  $z = 7,3$  см на рис. 3, в). Точка соударения  $D$  (точка торможения) “прямой” и “обратной” струек находится в окрестности ударной волны. (“Прямая” струйка пересекает фронт ударной волны и течет слева направо в направлении преграды, а “обратная” струйка течет справа налево из области отрыва течения на оси струи (см. рис. 4, а).) Линия тока, выходящая из точки  $D$  (штрихпунктирная линия  $DL$ ),

совпадает с линией контактного разрыва, разделяющей газ из натекающей струи и газ из области отрыва. Эта линия огибает область отрыва и уходит вверх по потоку вдоль преграды. В результате происходит вытекание газа из области отрыва.

Вытекание газа приводит к уменьшению размеров области отрыва и понижению давления в ней. В момент времени  $t_3 = 3,33$  мс за счет изменения параметров набегающего потока (изменяется угол наклона косо́й ударной волны, распространяющейся от стенки сопла до оси струи (см. рис. 2,а)) происходит понижение давления за фронтом прямой ударной волны (линия 3 на рис. 3,б). Это приводит к уменьшению потерь полного давления в струйках тока, пересекающих фронт прямой центральной ударной волны. В этом случае максимум давления на оси (максимум на линии 3 на рис. 3,б) достигается не на фронте ударной волны, а внутри дозвуковой области в точке торможения “прямой” и “обратной” струек  $z = 7,4$  см (см. рис. 2,в). Видно, что точка  $D$  торможения и растекания “прямой” и “обратной” струек сместилась к преграде. Это приводит к тому, что линия тока, выходящая из точки торможения  $D$  и совпадающая с линией контактного разрыва  $DL$ , попадает в вихревую область отрыва (см. рис. 4,б). За фронтом отраженной ударной волны полное давление в “прямых” струйках тока, проходящих через точку  $H$ , больше либо равно полному давлению в “прямой” струйке тока на оси. В этом случае “прямые” струйки тока натекающей струи на участке  $AB$  также будут затекать в область отрыва (см. рис. 4,б). Заметим, что в обоих случаях (см. рис. 4,а,б) точка растекания струи на поверхности преграды  $R$  расположена в области положительного градиента давления перед точкой максимума давления на преграде  $S$ . Втекание газа приводит к увеличению области отрыва и давления в ней, до тех пор пока режим втекания не сменится на режим вытекания ( $t_5 = 3,37$  мс на рис. 3). Затем процесс массообмена между областью отрыва и натекающей струей повторяется.

Задача 2. Рассмотрим процесс натекания сверхзвуковой перерасширенной “горячей” струи газа с параметрами  $p_0 = 1,5$  МПа,  $T_0 = 700$  К,  $n = 0,5$  на преграду, расстояние до которой от среза сопла увеличено на 0,5 см:  $z_w - z_e = 2,5$  см. Температура торможения струи увеличена в 2,3 раза, что позволяет обеспечить одно и то же время прохождения акустического сигнала от преграды до среза сопла и обратно в обеих задачах.

Оценим время прохождения акустического сигнала от преграды до среза сопла и обратно  $\Delta t_1$  в задаче 1 и  $\Delta t_2$  в задаче 2. Используя формулы, приведенные в работе [1], находим  $\Delta t_1 \approx 0,95 \cdot 10^{-4}$  с,  $\Delta t_2 \approx 1,05 \cdot 10^{-4}$  с. Следовательно, изменение фазы равно  $\Delta\alpha = \omega(\Delta t_2 - \Delta t_1) = \alpha_2 - \alpha_1 \approx 0,2\pi$ . Поскольку  $\Delta\alpha \ll \pi$ , при сравнении результатов решения задач 1 и 2 изменение фазы колебаний возмущений можно не учитывать.

На рис. 5 показаны рассчитанные (в момент времени  $t_1$ ) поля модуля градиента плотности в области между срезом сопла и преградой и в окрестности преграды. Видно, что в окрестности преграды характер течения газа существенно меняется по сравнению с задачей 1 (см. рис. 2). Волна разрежения, приходящая от границы струи, отражается от оси струи в точке  $z = 7,6$  см в виде волны сжатия, которая взаимодействует с ударной волной перед преградой. Отрывное вихревое течение за ударной волной занимает малую область в окрестности оси струи и не оказывает существенного влияния на течение газа за ударной волной в окрестности преграды.

На рис. 6 показаны распределения давления на преграде и вдоль оси струи в различные моменты времени. Видно, что амплитуда пульсаций на преграде  $\Delta p/\bar{p} \approx 0,16$  мала по сравнению с амплитудой пульсаций в задаче 1. Кроме того, значительно уменьшается разность давлений в точке  $r = 0,2$  см и на оси струи ( $r = 0$ ).

Значительное уменьшение амплитуды пульсаций в задаче 2 обусловлено изменением волновой структуры натекающей сверхзвуковой струи в окрестности преграды. В задаче 1 ударная волна, возникающая перед преградой (см. рис. 2), взаимодействует с волной раз-

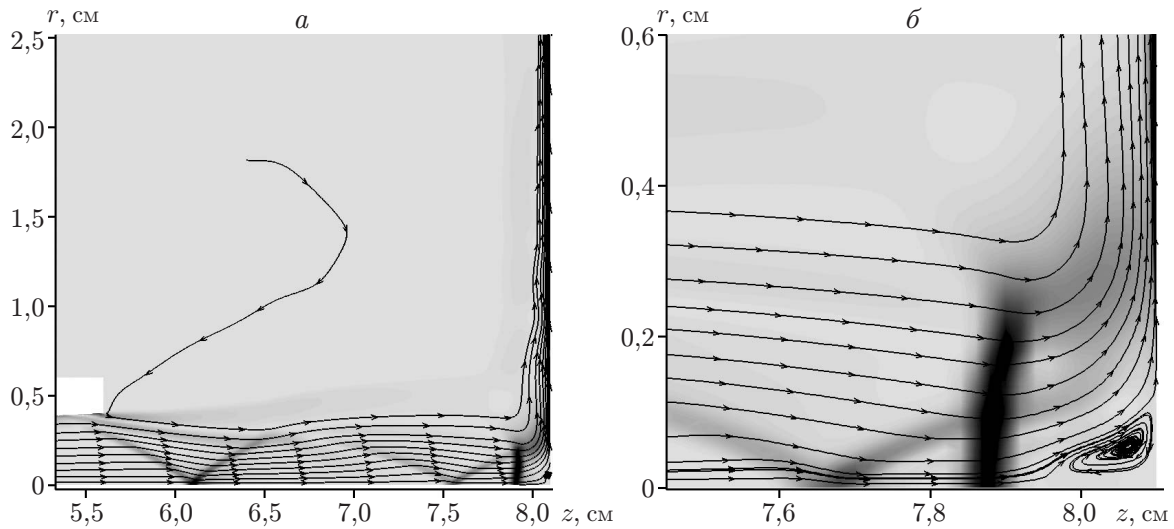


Рис. 5. Поля модуля градиента плотности в задаче 2:  
 а — течение между срезом сопла и преградой в момент времени  $t_1 = 2,88$  мс (белый прямоугольник — стенка сопла); б — течение в окрестности преграды в момент времени  $t_2 = 3$  мс

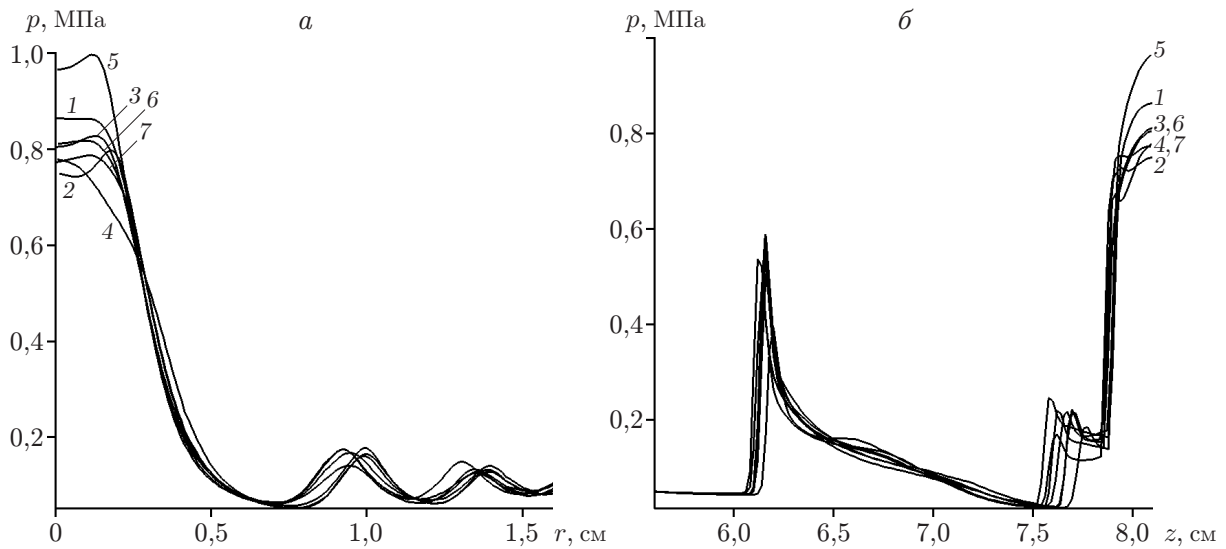


Рис. 6. Результаты расчета давления газа в задаче 2 в моменты времени  $t_i = t_1 + (i - 1) \Delta t$  ( $i = 1 \div 7, \Delta t = 20$  мкс):  
 а — зависимость  $p(r)$  на преграде, б — зависимость  $p(z)$  на оси струи ( $r = 0$ ); 1–7 — значения давления при  $i = 1 \div 7$

режения в натекающей струе. В задаче 2 соответствующая ударная волна перед преградой взаимодействует со слабой ударной волной, возникающей в струе при отражении волны разрежения от оси (см. рис. 5). В задаче 2 в струйках тока, расположенных вблизи оси (см. рис. 5, б), газ претерпевает двукратное сжатие в двух ударных волнах, расположенных одна за другой (см. рис. 6, б). В случае сжатия газа в двух ударных волнах необратимые потери будут меньше, чем при сжатии в одной ударной волне той же интенсивности. При двукратном сжатии в задаче 2 полное давление (давление торможения) в струйке тока вблизи оси струи будет больше, чем при однократном сжатии в задаче 1. Следовательно, двукратное сжатие приводит к увеличению давления газа на преграде в окрестности оси струи и соответственно к уменьшению разности давлений на оси и в максимуме давления на преграде. В результате положительный градиент давления на преграде уменьшается, что приводит к почти полному исчезновению отрыва пограничного слоя на преграде. Как показано в задаче 1, автоколебания происходят за счет массообмена между натекающим потоком и областью отрыва. Значительное уменьшение размеров вихревой области отрыва приводит к соответствующему уменьшению амплитуды пульсаций в задаче 2.

Следовательно, существенное влияние на характер пульсаций в струе оказывает волновая структура сверхзвуковой струи, натекающей на преграду.

**Заключение.** В работе численно решена задача о натекании сверхзвуковой перерасширенной струи газа на преграду. Показано, что необходимым условием возникновения автоколебаний является наличие положительного градиента давления на преграде, приводящее к отрыву пограничного слоя на преграде и образованию вихревой области отрыва. Колебания происходят за счет массообмена между отрывной областью и внешним сверхзвуковым потоком. В случае неограниченной преграды колебания поддерживаются за счет акустических возмущений, распространяющихся в газе, окружающем струю. Показано, что расстояние от среза сопла до преграды оказывает существенное влияние на амплитуду автоколебаний в струе. Это влияние обусловлено изменением ударно-волновой структуры натекающей на преграду сверхзвуковой струи.

Авторы выражают благодарность А. А. Желтоводову за полезные обсуждения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Киселев С. П., Киселев В. П., Зайковский В. Н.** О механизме автоколебаний при натекании сверхзвуковой струи на преграду. 1. Преграда с иглой // ПМТФ. 2014. Т. 55, № 4. С. 50–59.
2. **Анцупов А. В., Благосклонов В. И., Пимштейн В. Г.** Взаимодействие перерасширенной струи газа с плоской преградой // Учен. зап. Центр. аэрогидродинам. ин-та. 1973. Т. 4, № 13. С. 84–87.
3. **Серов Ю. В., Соболев А. В.** Экспериментальные исследования взаимодействия сверхзвуковой перерасширенной струи с преградой // Газодинамика и акустика струйных течений. Новосибирск: Ин-т теорет. и прикл. механики СО АН СССР, 1979. С. 23–86.
4. **Алхимов А. П.** Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика / А. П. Алхимов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, В. М. Фомин. М.: Физматлит, 2010.
5. **Menter F. R.** Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications // AIAA J. 1994. V. 32, N 8. P. 1598–1605.

*Поступила в редакцию 28/1 2013 г.*