

УДК 533.6.011.5:534.115

## КОЛЕБАНИЯ ВЕЕРНОЙ СТРУИ ПРИ НАТЕКАНИИ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ НА ПРЕГРАДУ С ВЫЕМКОЙ

В. С. Демин, А. В. Кожин\*

Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, 630090 Новосибирск

\* Институт лазерной физики СО РАН, 630090 Новосибирск

Описано несколько видов колебаний веерной струи. Сформулирована физическая модель одного из видов автоколебаний веерной струи. Приведены формулы для вычисления частот автоколебаний.

В ряде технических устройств важным элементом является взаимодействие сверхзвуковой струи с преградой. Широко известны аэродинамические излучатели звука (свистки) и система взаимодействующих выхлопной ракетной струи и стартового устройства. В этих случаях определяющее значение имеют нестационарные явления в потоке. Достаточно полно исследованы пульсации при натекании осесимметричной сверхзвуковой струи на плоскую преграду (эффект Гартмана) и открытый конец заглушенной трубы (эффект Гартмана — Шпренгера). При этом основное внимание уделяется нестационарным процессам в падающей струе и трубе. Колебания в веерной струе, растекающейся по преграде или по фланцу трубы, мало исследованы. Известны периодические колебания веерной струи, связанные с колебаниями в падающей струе или в трубе [1]. Однако при некоторых условиях периодические пульсации давления в трубе и веерной струе не коррелируют (отсутствует постоянный сдвиг фаз). Поэтому можно выделить веерную струю как отдельный объект исследования.

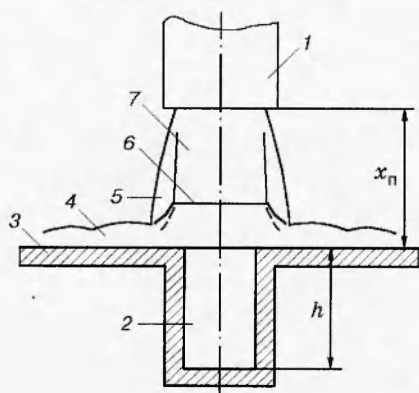


Рис. 1

Известно, что при изменении параметров, определяющих струйное течение, существуют зоны параметров, где наблюдаются интенсивные колебания, как нерегулярные, так и периодические. В этих зонах механизмы периодических колебаний различаются между собой, т. е. колебания описываются различными физическими моделями. Работа посвящена описанию разновидностей колебаний веерной струи с указанием совокупности стационарных параметров, определяющих зону существования колебаний данного типа. В работе считается, что стационарная структура течения задана так, как это принято при изучении нестационарных явлений в струях.

На рис. 1 представлена схема течения сверхзвуковой недорасширенной осесимметричной струи 7, натекающей на плоскую преграду 3 с выемкой 2. Преграда расположена в первой бочке струи нормально к оси струи. Условия для колебаний возникают при изменении следующих параметров системы: нерасчетности падающей струи  $n$ , расстояния сопла — преграда  $x_n$ , диаметра выемки  $d$  и ее глубины  $h$ . Эти колебания могут быть периодическими и непериодическими. В случае периодических

колебаний веерная струя 4 либо совершает вынужденные колебания с дискретной частотой, либо входит, как элемент, в автоколебательную систему. При этом автоколебания могут иметь различный механизм.

В [1] установлено, что при определенных нерасчетностях «падающей струи» 7 и расстояниях от среза сопла до плоской преграды возникает режим автоколебаний с излучением в пространство звуковых волн. При этом веерная струя является излучателем звука. Обратная связь в этой автоколебательной системе замыкается звуковыми волнами через внешнее пространство между срезом сопла 1 и границей веерной струи 4. Частота колебаний  $f$  определяется в основном размером  $x_n$  и скоростью звука  $a$ . Частоту можно вычислить по эмпирической формуле [2]  $f = a(k + 1,25)/(2x_n)$ ,  $k = 0, 1, 2, \dots$ . В этом случае веерная струя является активным элементом автоколебательной системы. Если в преграде имеется соосная падающей струе 7 цилиндрическая выемка 2 (рис. 1) и диаметр выемки меньше диаметра прямого скачка уплотнения 6 перед преградой, то присутствие выемки слабо влияет на автоколебания. Заметим, что это справедливо для достаточно больших нерасчетностей падающей струи ( $n > 1,5$ ). При таких значениях отношений давления на срезе сопла и в окружающей среде в свободной (без преграды) струе 7 образуется прямой скачок уплотнения (диск Маха), диаметр которого сравним с диаметром струи.

Если при указанных значениях  $n$  край выемки 2 находится в области торможения сжатого слоя 5 на участке, где в случае плоской преграды статическое давление растет вдоль радиуса от оси симметрии к периферии, то возникают автоколебания, связанные с присутствием выемки в преграде. Механизм этих автоколебаний рассмотрен в [3] для случая, когда глубина выемки больше ее диаметра. Частота колебаний  $f = 0,25a/L$  близка к собственной частоте закрытой с одного конца трубы длиной  $L$ . Здесь  $L$  — расстояние от дна выемки до прямого скачка перед преградой. При интенсивных колебаниях из-за нелинейности процесса частота может быть меньше расчетной (расхождение может достигать 20%). При этом веерная струя 4 совершает вынужденные колебания под действием автоколебаний в выемке. В момент, когда в процессе колебаний происходит истечение из выемки, веерная струя может отрываться от преграды.

Нами экспериментально установлено, что в случае, когда диаметр выемки меньше диаметра падающей струи, при нерасчетностях струи, близких к единице, возбуждаются автоколебания, частота которых определяется в основном расстоянием между прямым скачком и поверхностью преграды за скачком. Такие колебания возникают, если прямой скачок расположен во второй половине бочки струи, где число Маха уменьшается вдоль оси струи. В этом случае, независимо от диаметра выемки, ее присутствие существенно влияет на частоту колебаний, так как частоту определяет расстояние от скачка до дна выемки. Тот факт, что на возникновение автоколебаний влияет распределение числа Маха вдоль оси струи и не влияет диаметр выемки, свидетельствует о том, что при малой нерасчетности  $n$  реализуется механизм колебаний, отличный от механизма при  $n > 1,5$ . В настоящее время общепризнанной модели этого явления не существует.

В работе [4] описано несколько видов колебаний веерной струи, когда диаметр выемки близок или превышает диаметр падающей на преграду струи. В этих случаях веерная струя оторвана от преграды и может совершать колебания, обусловленные эффектом эжекции веерной струи. На рис. 2 изображена схема такого течения (режимы течения слева и справа различные). В результате эжекции давление между веерной струей 3 и плоскостью преграды 8 понижается. Под действием перепада давлений по нормали к оси веерной струи последняя изгибается в сторону преграды. Если преграда имеет большой диаметр («бесконечна»), то веерная струя «прилипает» к преграде и далее течет вдоль нее. При этом давление в «пузыре» 4 между веерной струей и преградой меньше атмосферного. При меньшем диаметре преграды веерная струя может обогнуть преграду. В этом случае, как

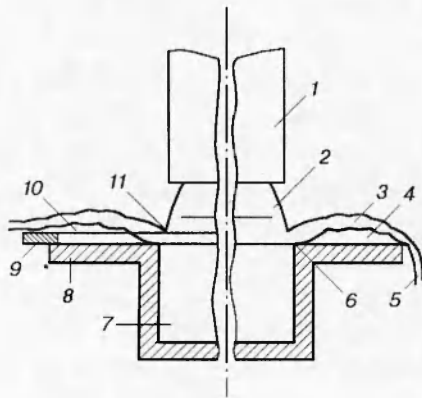


Рис. 2

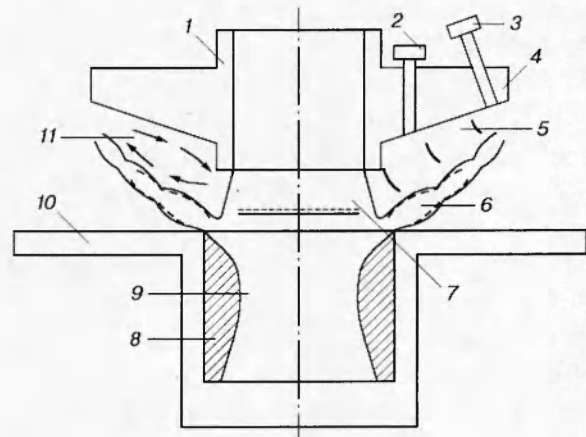


Рис. 3

показано на рис. 2 справа, газ течет в виде кольцевой струи 5 в том же направлении, что и струя 2.

Если веерная струя 3 вытекает из выемки под углом к преграде менее  $45^\circ$  и точка прилипания к преграде большого диаметра приходится на то место по длине веерной струи, где имеется бочка, то возникают нерегулярные колебания веерной струи. В [4] это объясняется тем, что при касании стенки сверхзвуковым потоком возникают скачки уплотнения, кроме того, во второй половине бочки статическое давление растет вниз по потоку. Поэтому в области прилипания возникает распределение статического давления вдоль стенки, приводящее к отрыву пограничного слоя. Происходит отрыв потока. Веерная струя отбрасывается от преграды, но сила, возникающая вследствие эжекции, вновь возвращает веерную струю к преграде. Если диаметр преграды 8 в случае, показанном на рис. 2 справа, уменьшать, то очевидно, что разность между давлениями по обе стороны веерной струи начнет уменьшаться. При определенном диаметре преграды веерная струя 3 примет «колоколообразную» форму, показанную на рис. 3. В этом случае давление в области 5 благодаря эжекции ниже, чем давление в пространстве между границей струи 6 и преградой 10. В интервале изменения диаметров преграды имеется переходная зона, в которой положение веерной струи самопроизвольно изменяется от «колокола» к «пузырю». При этом преграда испытывает нерегулярные ударные нагрузки, направление течения веерной струи скачком изменяется. В зависимости от режима течения веерная струя большую часть времени может находиться в одном из стационарных положений, совершая короткие перескоки в другое положение. Существуют режимы, при которых время пребывания струи 6 в названных положениях примерно одинаково и соответствовало частоте около 400 Гц. Однако автоколебаний с устойчивой фазой не наблюдалось. Параметры установки приведены ниже. Поскольку пульсации давления в выемке 9 не всегда коррелировали с пульсациями давления на преграде под веерной струей, можно полагать, что перескоки веерной струи вызываются радиальными колебаниями границ падающей струи. Чтобы убедиться в наличии связи между положением границы падающей струи и размером веерной струи при постоянном полном давлении в сопле 1, в пространство 5 (рис. 3) вводились препятствия. Последние затрудняли эжекцию из пространства 5, так что давление в нем повышалось. Вследствие этого уменьшался диаметр падающей струи и соответственно увеличивался размер щели, из которой вытекает веерная струя 6. Наблюдалось увеличение размера первой бочки веерной струи, а значит, дальнобойность последней и ее

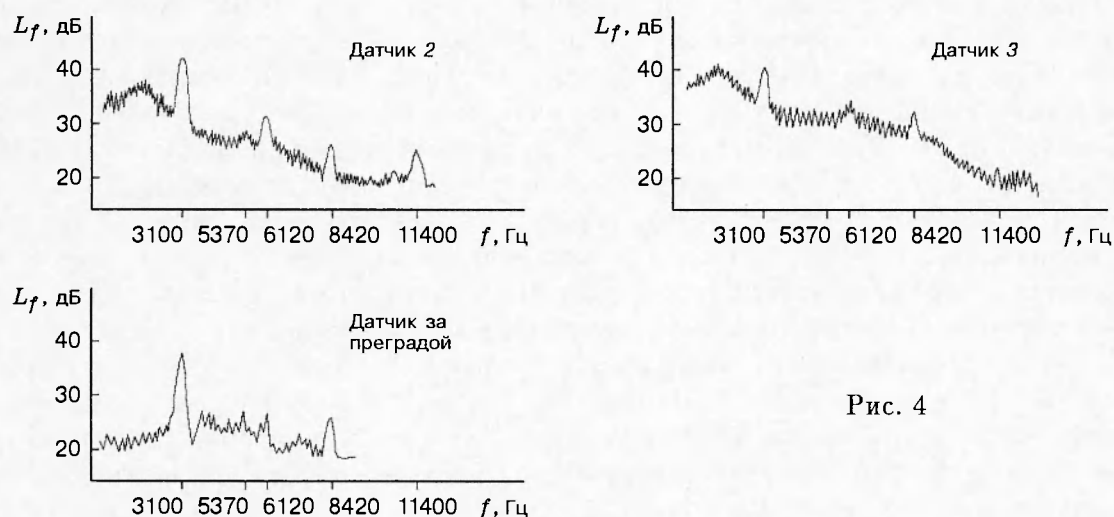


Рис. 4

эжекционная способность. От этих свойств и зависит конфигурация веерной струи.

Авторами была предпринята попытка сделать «перескоки» веерной струи регулярными, т. е. получить автоколебания. Для этого регулировкой давления в форкамере сопла 1 (см. рис. 2) подбирался такой режим течения, что веерная струя большую часть времени находилась в положении «пузырь». В точке присоединения веерной струи к преграде устанавливался «выступ». Для этого к преграде 8 крепилось кольцо 9 (рис. 2). Ожидалось, что в момент присоединения к преграде веерная струя затормозится «выступом», вдоль преграды возникнет обратное течение, давление в «пузыре» возрастет и веерная струя примет положение «колокол». Эффект эжекции вновь вернет струю к преграде, возникнут автоколебания. Однако наличие «выступа» только изменило форму «пузыря» и сдвинуло точку присоединения. Веерная струя не оторвалась от преграды. Варьирование размеров и местоположения «выступа» также не привело к отрыву.

При увеличении диаметра фланца 4 сопла 1 (см. рис. 3) веерная струя 6, находясь в положении «колокол», может натекать на фланец. Растекаясь по фланцу, часть газа образует возвратное течение 11, которое повышает давление в пространстве 5. Как указано выше, это приводит к увеличению размера бочек веерной струи. Как и в случае с «выступом», веерная струя займет положение, соответствующее балансу притока и оттока газа в пространстве 5. Автоколебаний не возникает.

Однако, если веерная струя проходит по кромке фланца 4, то она начинает колебаться. При этом в окружающее пространство излучаются звуковые волны определенного тона. На модели, показанной на рис. 3, при расстоянии между срезом сопла и преградой  $x_{\text{п}} = 8$  мм регулярные колебания наблюдались в интервале изменения полного давления в форкамере  $P = (3,25 \div 4,25) \cdot 10^5$  Па. В этом случае сверхзвуковая струя 7 истекала из сопла 1 с числом Маха  $M_a = 1$ . Диаметр сопла  $d_a = 16$  мм. Толщина стенки сопла 2 мм. Сопло имеет фланец 4 диаметром 53 мм. Толщина фланца вблизи сопла 10 мм, толщина по кромке фланца 4 мм. Расстояние между срезом сопла и краем фланца 3,5 мм. Диаметр преграды 10 составляет 74 мм. Диаметр выемки 9 на выходе 24 мм, глубина ее 20 мм. Вставка 8 задает угол выхода веерной струи 6 между осью струи и плоскостью преграды 10, равный  $45^\circ$ . Во фланец 4 вмонтированы два датчика 2 и 3 для измерения давления и пульсаций давления в пространстве 5. Приемное отверстие датчиков 2 и 3 имело диаметр 0,5 мм. Фазовые характеристики датчиков учитывались. Контрольный датчик пульсаций давления находился в акустическом поле за преградой. С помощью стробоскопического метода фото-

графировались фазы колебаний теневой картины веерной струи. Стробоскоп запускался от сигнала датчика 2. При давлении в форкамере  $P = 3,57 \cdot 10^5$  Па получены спектрограммы сигналов с трех датчиков. На всех спектрограммах (рис. 4) виден пик уровня пульсаций  $L_f$ , соответствующий тоновому излучению с частотой  $f = 3100$  Гц, и небольшие пики, соответствующие частотам 5370, 6120, 8420 Гц. Тоновый сигнал датчика 3 сильно зашумлен. Сигнал датчиков 2 и в акустическом поле имеет хорошо выраженный регулярный характер. Сравнение сигналов датчиков 2 и 3, пропущенных через узкополосный фильтр (6%-й) на частоте  $f = 3100$  Гц, показало, что пульсация давления, регистрируемая датчиком 2, отстает по фазе от пульсации давления в точке установки датчика 3 на  $41,5^\circ$ . Датчик 3 показывает среднее давление больше атмосферного, датчик 2 регистрирует давление ниже атмосферного. Это значит, что в процессе колебаний веерная струя попадает на приемное отверстие датчика 3. По стробоскопическим фотографиям определено, что угол между осью первой бочки веерной струи 6 (см. рис. 3) и поверхностью преграды в процессе пульсаций практически не изменяется. При этом синфазно пульсируют длина и толщина первой бочки. Колебания веерной струи симметричны относительно общей со струей 7 оси симметрии. На рис. 3, выполненном с фотографий, показаны два крайних положения веерной струи. Линиями обозначены границы бочек веерной струи, видимые на фотографиях, полученных прямотеневым методом. Пунктиром обозначено положение, когда на краю фланца 4 отмечается максимальное давление. Сплошной линией обозначено положение веерной струи, когда на краю фланца давление минимально. Заметим, что радиальные смещения веерной струи относительно общей оси симметрии происходят главным образом в хвостовой части веерной струи вблизи кромки фланца. В одном из экспериментов полость выемки 9 до половины была заполнена ватой, что не оказало заметного влияния на изучаемые колебания. Следовательно, полость выемки не участвует в поддержании автоколебаний.

Исходя из полученных результатов исследования предлагается описанный ниже механизм автоколебаний. Вследствие эффекта эжекции давление в пространстве 5 (см. рис. 3), ограниченном фланцем сопла, границей падающей струи и веерной струей, понижено в сравнении с атмосферным. Веерная струя касается кромки фланца 4. На кромке частично восстанавливается полный напор струи. Это определяет повышенное давление на кромке и вихревое движение в пространстве 5.

Допустим, вследствие поперечных возмущений веерная струя сместится в сторону от кромки фланца. Восстановленный полный напор уменьшится, давление на кромке фланца понизится. В сторону падающей струи вдоль фланца побежит волна разрежения. Когда волна достигнет границы 7 падающей струи, диаметр последней увеличится, так как увеличится нерасчетность струи. Ширина кольца между стенкой выемки и границей падающей струи уменьшится. Веерная струя станет тоньше, и ее первая бочка станет короче. Такая струя становится менее дальнобойной и сильнее изгибается. Структура веерной струи перестраивается вниз по потоку. Скорость распространения возмущения равна скорости звука плюс скорость потока. Веерная струя займет положение, изображенное на рис. 3 пунктиром. Поскольку струя стала натекает на кромку фланца, давление на кромке возрастет. В пространство 5 побежит волна давления. Когда она дойдет до границы 7 падающей струи, последняя уменьшит свой диаметр. Это увеличит толщину и длину первой бочки веерной струи, а вследствие этого дальнобойность всей струи, которая примет положение, обозначенное на рис. 3 сплошной линией. Поскольку при таком положении веерная струя пройдет мимо фланца, давление на краю фланца понизится. В пространство 5 будет распространяться волна разрежения, и процесс повторится. Таким образом, за период колебаний волна возмущения должна пройти расстояние от кромки фланца до границы падающей струи и обратно дважды. Длина этого пути и скорость распростра-



нения возмущений определяют частоту автоколебаний. Рассматривая упрощенно, в этой автоколебательной системе можно выделить источник звука типа «монополь». Он расположен на кромке фланца и излучает звуковые волны в направлении границы падающей струи, которые на рис. 3 изображены тремя дугами. Для изучаемого режима течения характерно, что малое изменение статического давления у границы 7 падающей струи (в пространстве 5) вызывает более сильное изменение давления на кромке фланца 4. В предельных случаях веерная струя либо восстанавливает полный напор, либо не попадает на кромку. Поэтому границу падающей струи с веерной струей и кромкой фланца можно рассматривать как «усилитель» возмущения давления. В этом случае можно говорить, что звуковые волны, идущие от кромки фланца к границе падающей струи, осуществляют «обратную связь» в этой автоколебательной системе. Автоколебания возбуждаются, если потери в цепи «обратной связи» компенсируются приращением в «усилителе».

На основе изложенной модели автоколебаний можно получить формулу для оценки частоты. Между сигналами датчиков давления 3 и 2 (см. рис. 3) сдвиг фазы  $\Delta\varphi = 41,5^\circ$ . При частоте  $f = 3100$  Гц и расстоянии между датчиками  $\Delta x = 11,2$  мм этот сдвиг соответствует фазовой скорости  $a$  распространения возмущения давления вдоль фланца, где  $a = 360f\Delta x/\Delta\varphi = 300$  м/с. Эта скорость в пределах ошибки эксперимента близка к скорости звука в атмосфере. Примем среднюю скорость течения вдоль оси веерной струи равной 1,5 скоростей звука. Как следует из дальнейшего расчета, достаточно большая ошибка в определении средней скорости (на 0,5а) изменяет вычисленную частоту не более чем на 6%. Фазовая скорость возмущения в такой веерной струе  $v = 2,5a$ . Как указано выше, давление на кромке фланца определяется поперечным смещением веерной струи. Смещение веерной струи задается смещением границы падающей струи, а последняя смещается под действием волны давления. При этом колебания границы падающей струи отстают по фазе на  $90^\circ$  от колебаний давления у границы. Действительно, смещения границы равны смещению частиц в волне. Если вблизи падающей струи акустическую волну считать плоской, то давление и скорость в волне колеблются синфазно. Пусть давление  $P$  и скорость  $v$  колеблются по закону  $v = cP = cP_1 \cos(\omega t)$ . Смещение границы  $x$  является интегралом по времени от скорости:

$$x = cP_1 \int \cos(\omega t) dt = cP_1 \sin(\omega t)/\omega.$$

Однако функция  $\sin(\omega t)$  сдвинута по фазе относительно  $\cos(\omega t)$  на  $90^\circ$ . В рассматриваемом случае это эквивалентно задержке волны на дополнительное время, равное  $90/360$  части периода. Если расстояние  $l$  между краем фланца и границей падающей струи примерно равно длине веерной струи, то период колебаний может быть оценен из условия, что возмущение проходит дважды весь фазовый путь за время, кратное периоду колебаний  $T$ :

$$2\left(\frac{l}{a} + \frac{l}{2,5a} + 90\frac{T}{360}\right) = T(k+1),$$

где  $k = 0, 1, 2, \dots$ . С учетом того, что  $f = 1/T$ , после преобразований получится искомая формула  $f = (a/l)(2k+1)/5,6$ .

Если принять  $a = 340$  м/с,  $l = 20 \cdot 10^{-3}$  м, то  $f = 3040$  Гц при  $k = 0$ ,  $f = 9100$  Гц при  $k = 1$ . Поэтому измеренные значения частот 3100 и 8420 Гц следует относить к «модам», т. е. к независимым колебаниям, реально происходящим в колебательной системе. Только эти две частоты регистрировались датчиком в акустическом поле за преградой. Частота 6120 Гц является «гармоникой». Она появляется в спектрограмме вследствие разложения в ряд Фурье несинусоидальных сигналов с периодом  $1/3100$  с, получаемых с датчиков 2 и 3 (см. рис. 3). Наличие в спектрограммах датчиков 2 и 3 двух слабых пиков с частотой 5370 и 11400 Гц является, по-видимому, результатом нелинейного взаимодействия указанных выше «мод», так как частоты слабых пиков равны разности и сумме частот этих «мод».

Интересно отметить, что согласно предложенной выше модели акустические волны, излучаемые во внешнее пространство веерной струей, не участвуют в поддержании автоколебаний. Это одно из отличий рассматриваемых автоколебаний от автоколебаний, описанных в [1].

Из сравнения картин течения, изображенных на рис. 3 и рис. 2 слева, можно заключить, что на рис. 2 имеются те же элементы автоколебательной системы, что и на рис. 3. На внутренней кромке кольца 9 (рис. 2) имеется излучатель звука типа «монополь». Излучаемый им звук может воздействовать на границу падающей струи 2 аналогично случаю, изображенному на рис. 3. В течении, представленном на рис. 2, автоколебания не возникают только потому, что потери колебательной энергии в «обратной связи» не компенсируются «усилителем». Последнее, возможно, связано с тем, что «монополь» на рис. 2 излучает звук в основном в пространство 10 между веерной струей и преградой. Однако звуковые волны в этом месте не могут смещать точку отрыва 6 струи от преграды. Не смещают они и точку 11, так как от последней экранируются сверхзвуковым течением в веерной струе. Поэтому эти волны не могут существенно изменить ширину щели и, значит, размер первой бочки веерной струи. Таким образом, «обратная связь», изображенная на рис. 2, слабее, чем в течении, изображенном на рис. 3.

Заметим, что при перемещении преграды из первой бочки падающей струи во вторую или в последующие полный напор веерной струи уменьшается и не наблюдается такого разнообразия интенсивных колебаний веерной струи. Отметим также, что в данной работе не рассмотрены случаи, когда диаметр глубокой выемки настолько больше диаметра струи, что течение следует считать уже не натеканием на преграду, а втеканием в замкнутую полость. В этих условиях возможны интенсивные колебания других типов.

Авторы выражают благодарность В. Я. Левченко за помощь в трактовке экспериментальных результатов.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Глазнев В. Н., Демин В. С. Полуэмпирическая теория генерации дискретных тонов сверхзвуковой недорасширенной струей, натекающей на преграду // ПМТФ. 1976. № 6. С. 49–55.
2. Демин В. С. Возникновение автоколебаний в сверхзвуковой недорасширенной струе, натекающей на плоскую преграду // Дис. ... канд. физ.-мат. наук. Новосибирск, 1979. Машинопись.
3. Демин В. С., Гапонов С. А. Условия возникновения автоколебаний в трубе при натекании на ее вход потока газа // ПМТФ. 1994. Т. 35, № 6. С. 31–39.
4. Демин В. С., Кожин А. В. Некоторые типы пульсаций при натекании сверхзвуковой струи на преграду с выемкой // Моделирование в механике: Сб. науч. тр. / АН СССР. Сиб. отд-ние. Ин-т теорет. и прикл. механики. 1989. Т. 3, № 5. С. 30–35.

*Поступила в редакцию 18/IV 1994 г.*