

УДК 532.527 + 532.525.2

© 2004 г. Д. Г. АХМЕТОВ, В. В. НИКУЛИН, В. М. ПЕТРОВ

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОКОЛЕБАНИЙ,  
ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ ИСТЕЧЕНИИ ЗАКРУЧЕННОЙ СТРУИ**

Представлены результаты экспериментального исследования периодических пульсаций давления, возникающих при истечении затопленной закрученной струи в открытое пространство. Определены основные параметры, характеризующие процесс, получена единая экспериментальная зависимость, связывающая частоту пульсаций с определяющими параметрами в широком диапазоне их изменения. На основе данной зависимости предложена эмпирическая формула для расчета частоты пульсаций.

*Ключевые слова:* закрученная струя, вихревая камера, автоколебания, периодические пульсации давления.

При истечении закрученных струй часто возникают колебательные явления, выражающиеся в появлении сильных периодических пульсаций давления и скорости [1, 2]. Такие процессы могут быть как полезными (в частности, они используются в вихревых свистках или генераторах звука, расходомерах [1–4]), так и нежелательными, поскольку могут приводить к возникновению автоколебаний при работе гидро- и газовых турбин [5]. Изучение колебаний представляет и значительный научный интерес, поскольку их появление может быть первой стадией на пути перехода к нерегулярному течению.

До настоящего времени нет однозначного понимания причин возникновения и механизма генерации периодических пульсаций. Наиболее распространенная гипотеза о механизме генерации: таковым является прецессия вихревого ядра, возникающая при истечении закрученной струи из вихревой камеры [2]. Однако, чем вызывается прецессия и какова кинематическая структура течения, не ясно. Кроме этой, существует гипотеза, согласно которой причиной и механизмом автоколебаний может быть периодическая перестройка потока из-за возможного существования двух режимов течения [6]. Вывод о такой возможности сделан на основе решения модельной задачи о течении во вращающейся пористой круглой трубе в [7]. В [6] с привлечением эмпирических предположений сделаны оценки частоты колебаний, однако экспериментального материала для их проверки пока недостаточно.

Отсутствие адекватного теоретического описания рассматриваемого явления обусловлено большой сложностью течения из-за его трехмерного нестационарного характера. В связи с этим большое значение приобретают экспериментальные исследования, которые могут дать сведения, необходимые для построения теоретических моделей. В экспериментах в основном измерялись пульсации давления при истечении закрученного потока из вихревой камеры [2, 3]. Установлено, что в спектре пульсаций имеются пики на ряде частот, среди которых по интенсивности резко выделяется одна, которую будем называть доминирующей. Обнаружено, что доминирующая частота изменяется почти пропорционально расходу, причем коэффициенты пропорциональности различны при разных геометрических параметрах камеры. Единых закономерностей установлено не было. Таким образом, в настоящее время эксперименты находятся на стадии накопления материала и не носят систематического характера.

Настоящая работа посвящена изучению зависимости доминирующей частоты от расхода и параметров закручивающего устройства. Отдельное внимание к исследованию доминирующей частоты обусловлено тем, что наличие столь характерного и ярко выраженного параметра, несомненно отражает существенные особенности течения. Поэтому на основе подобных исследований можно будет делать выводы и о структуре потока, и о механизме возникновения колебаний.

В работе изучаются пульсации давления в случае, когда закрученная струя вытекает из вихревой камеры. Такая постановка имитирует типичные процессы, возникающие в различных закручивающих устройствах. Вихревая камера и выходное сопло осесимметричны, воздух подается по касательной к внутренней цилиндрической границе камеры через щелевые тангенциальные входные каналы. Конструкцией предусматривается возможность изменения диаметра сопла, площади тангенциальных входов, длины камеры.

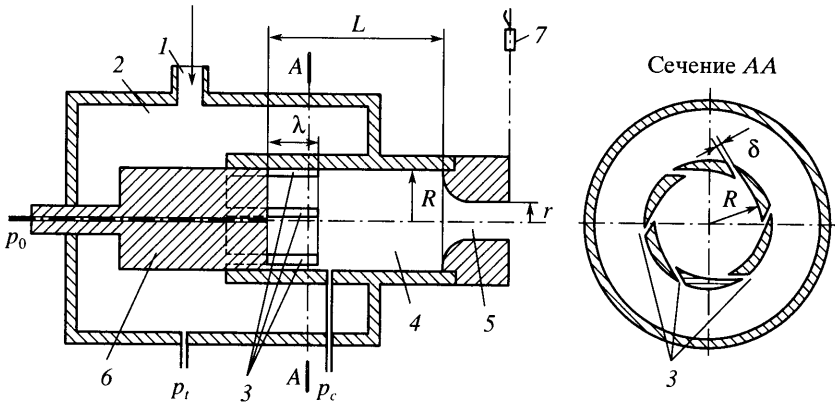
Эксперименты проведены для широкого диапазона значений (от 1 до 30) так называемого геометрического параметра закрутки, определение которого будет дано ниже. В результате получены эмпирические закономерности, связывающие безразмерные критерии, включающие измеряемую частоту, входную скорость, диаметр сопла и площадь тангенциальных входов.

**1. Постановка эксперимента.** Экспериментальная установка, представляющая собой цилиндрическую вихревую камеру с боковым вдувом, изображена на фиг. 1. Воздух из магистрали через патрубок 1 попадает в расширительную камеру 2, которая служит для выравнивания давления на входе в тангенциальные щели 3. Далее через шесть щелей 3 воздух тангенциально поступает в вихревую камеру 4. Из камеры 4 воздух вытекает в атмосферу через сопло 5 с выходным отверстием радиуса  $r$ . Ширина щелей  $\delta = 2$  мм, их длина  $\lambda$  может изменяться от 1 до 15 мм с помощью осевых перемещений поршня 6. Радиус камеры  $R$  фиксирован и составляет 14 мм, ее длина  $L$  может укорачиваться ступенчатым образом на 46 мм, для чего убирается цилиндрический насадок того же диаметра. Длина камеры с насадком при перемещениях поршня изменяется от 71 до 85 мм. Камеру с насадком назовем длинной, без него – короткой.

Эксперименты проводились с выходными соплами трех диаметров: 8, 14 и 20 мм, а также без сопла (диаметр выходного отверстия равнялся диаметру камеры). Сменные сопла спрофилированы изнутри в виде сужающегося конфузора длиной 10 мм, плавно переходящего в цилиндрическое отверстие длиной 10 мм. Пульсации давления на выходе из камеры измерялись с помощью микрофона 7.

Доминирующая частота находилась путем измерения пульсаций давления. Для этого сигнал с микрофона через фильтр с полосой пропускания  $\pm 8\%$  измеряемой частоты подавался на осциллограф. Искомая частота определялась по максимуму сигнала с точностью не ниже 5%. Проведены контрольные измерения, когда сигнал в течение нескольких секунд (что много больше характерных периодов колебаний) записывался на компьютер, а затем проводился фурье-анализ. Частоты, определяемые этими двумя способами, совпадали с указанной точностью. С целью уменьшения помех, вносимых в поток, и для выделения в чистом виде пульсаций давления микрофон устанавливался на большем по сравнению с диаметром сопла расстоянии. В подавляющем числе экспериментов датчик помещался в плоскости среза сопла на расстоянии 1 м от оси камеры (фиг. 1), в отдельных экспериментах – на расстоянии 0.3 м в той же плоскости или на оси симметрии вниз по потоку. Влияние положения датчика на измеряемое значение доминирующей частоты замечено не было.

Одновременно с измерениями частоты пульсаций давления на выходе из вихревой камеры с помощью спиртовых микроманометров регистрировались также разности давлений  $\Delta p_1 = p_i - p_c$  и  $\Delta p_2 = p_i - p_0$ , где  $p_i$  – давление в расширительной камере 2,  $p_c$  – давление на внутренней цилиндрической поверхности вихревой камеры на расстоя-



Фиг. 1. Схема экспериментальной установки: 1 – входной патрубков, 2 – расширительная камера, 3 – тангенциальные входные щели, 4 – вихревая камера, 5 – сопло, 6 – подвижный поршень, 7 – микрофон

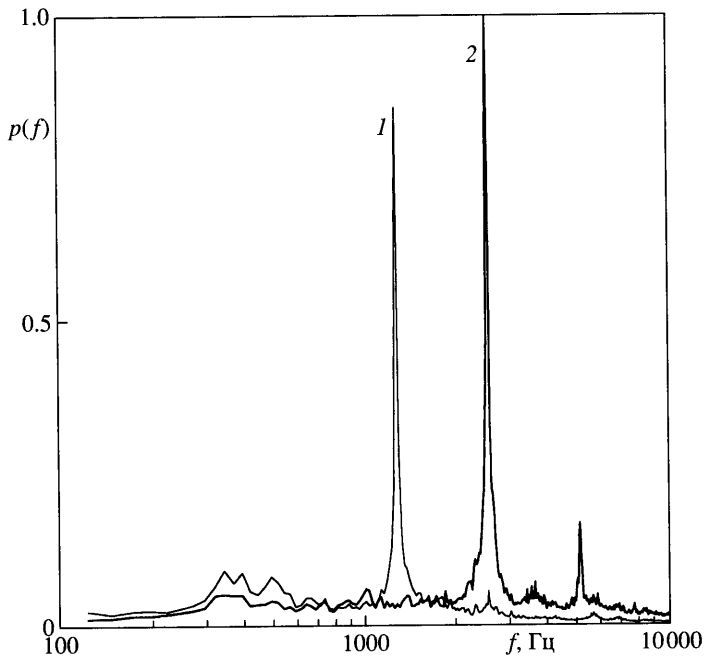
нии 5 мм от конца щелей по направлению к соплу,  $p_0$  – давление в центре закрытой поршнем торцевой стенки камеры (фиг. 1). В ряде опытов измерены перепады давления между внутренней поверхностью камеры и атмосферой ( $\Delta p_3 = p_c - p_a$ ). Точность измерения не ниже 10 Па. Давления к микроманометрам подводились через дренажные трубки с внутренним отверстием диаметром 0.5 мм.

Из описания устройства и принципа действия вихревой камеры следует, что основными параметрами, определяющими истечение закрученной струи, являются:  $R$ ,  $r$  – радиусы вихревой камеры и сопла,  $L$  – длина камеры,  $\Sigma$  – суммарная площадь поперечного сечения входных щелей,  $V = (2\Delta p_1/\rho_0)^{1/2}$  – скорость втекания воздуха в камеру через щелевые каналы, рассчитываемая по формуле Бернулли (здесь  $\rho_0 = 1.2 \text{ кг/м}^3$  – плотность воздуха в условиях проведения опытов),  $\nu = 15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$  – кинематическая вязкость среды (воздуха). Поскольку все опыты проводились при дозвуковых скоростях подачи воздуха ( $V \leq 70 \text{ м/с}$ ), влияние сжимаемости среды можно считать несущественным. Определяемым параметром является доминирующая частота  $f$  возбуждаемых закрученной струей пульсаций давления.

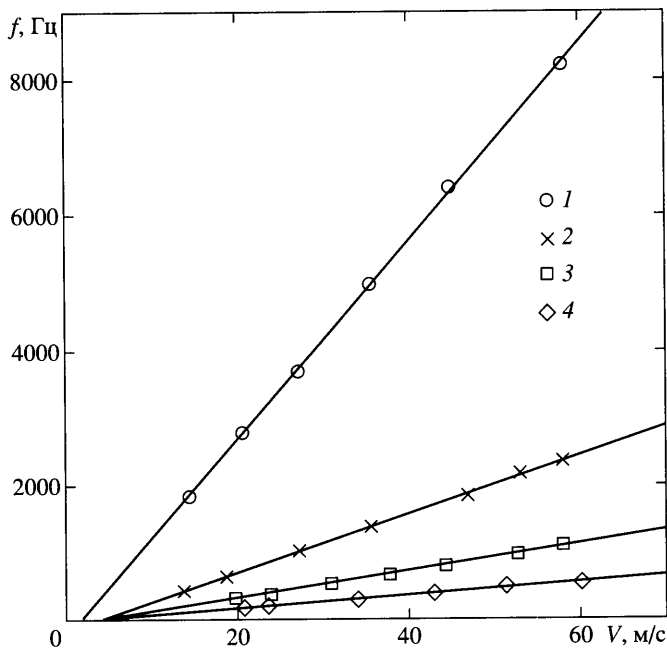
Если выбрать в качестве основных независимых по размерности параметров  $R$  и  $V$ , то, согласно теории размерности, можно ожидать, что все безразмерные кинематические характеристики закрученной струи, в том числе безразмерная частота или число Струхалия  $St = fR/V$ , будут зависеть от четырех безразмерных критериев  $r/R$ ,  $L/R$ ,  $\Sigma/R^2$  и числа Рейнольдса  $Re = VR/\nu$ . Следовательно, должна выполняться функциональная зависимость  $St = \Phi(r/R, L/R, \Sigma/R^2, Re)$ . В работе основное внимание уделено исследованию зависимости от трех критериев  $r/R$ ,  $\Sigma/R^2$  и  $Re$ . Поскольку изменение  $\Sigma$  влекло за собой небольшое изменение  $L$ , для понимания влияния последнего проведены контрольные эксперименты на короткой камере, длина которой меньше основной на 46 мм, т.е. более чем в 2 раза.

**2. Результаты экспериментов.** На фиг. 2 изображены характерные спектры пульсаций давления для двух значений  $V(Re = 2.8 \cdot 10^4, 5.3 \cdot 10^4)$ , остальные критерии фиксированы:  $r/R = 1/2$ ,  $L/R = 6$ ,  $\Sigma/R^2 = 0.81$ . Из фиг. 2 следует, что в каждом спектре частот имеется один ярко выраженный пик, соответствующий доминирующей частоте.

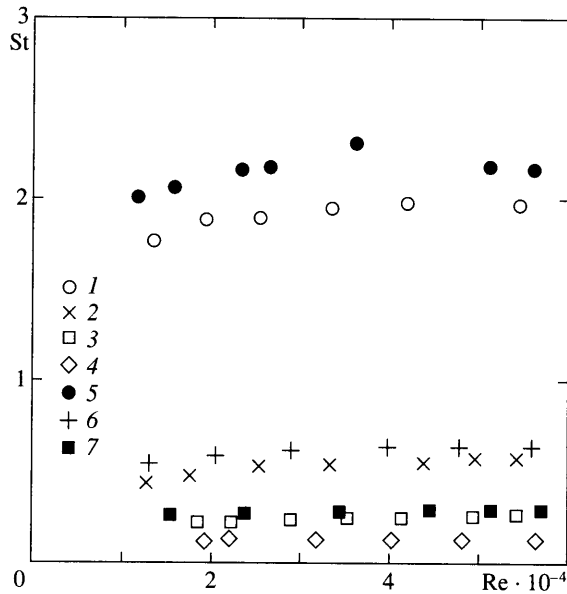
На фиг. 3 показана зависимость  $f$  от  $V$  при разных  $r$  и фиксированных  $L = 77 \text{ мм}$ ,  $\Sigma = 81.42 \text{ мм}^2$ . Прямые линии изображают линейную регрессию, построенную по экс-



Фиг. 2. Типичные спектры пульсаций давления при  $r/R = 1/2$ ,  $L/R = 6$ ,  $\Sigma/R^2 = 0.81$ :  
 1 –  $Re = 2.8 \cdot 10^4$ , 2 –  $5.3 \cdot 10^4$



Фиг. 3. Зависимость доминирующей частоты от входной скорости при разных радиусах сопла и  $L/R = 5.5$ ,  $\Sigma/R^2 = 0.42$ : 1 –  $r/R = 2/7$ , 2 –  $1/2$ , 3 –  $5/7$ , 4 – 1



Фиг. 4. Зависимость числа  $St$  от числа  $Re$  при разных радиусах сопла, длинах камеры и  $\Sigma/R^2 = 0.42$ : 1 –  $r/R = 2/7$ ,  $L/R = 5.5$ , 2 –  $1/2$ ,  $5.5$ , 3 –  $5/7$ ,  $5.5$ , 4 –  $1$ ,  $5.5$ , 5 –  $2/7$ ,  $2.2$ , 6 –  $1/2$ ,  $2.2$ , 7 –  $5/7$ ,  $2.2$

периментальным точкам. При других значениях параметров качественный вид зависимостей  $f(V)$  такой же.

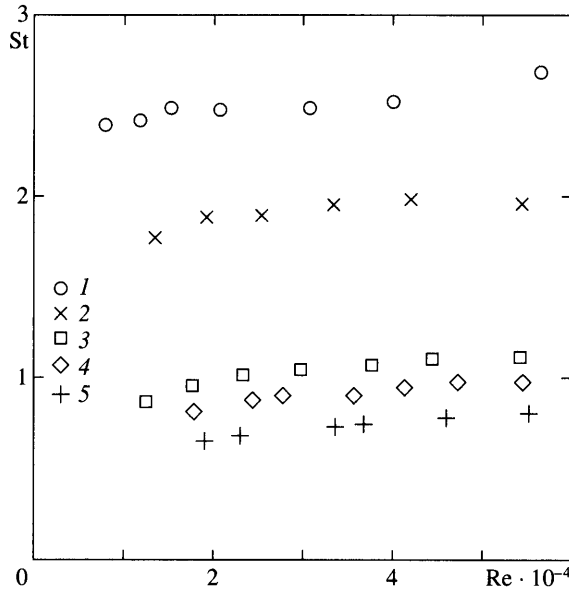
На фиг. 4 приведена зависимость числа  $St$  от  $Re$  для разных диаметров выходных сопел, двух длин камер и фиксированной площади входных щелей, на фиг. 5 – зависимость  $St$  от  $Re$  для длинной камеры при фиксированном  $r$  и разных значениях  $\Sigma$ .

На основе фиг. 4 можно сделать вывод, что изменение длины камеры при изменениях длины щелей слабо влияет на измеряемую частоту. Согласно фиг. 4, при уменьшении длины камеры примерно в 2.5 раза числа  $St$  меняются не более чем на 15%. В то же время осевой размер длинной камеры при вариации длины щелей изменяется менее чем на 20%. Из фиг. 3 следует, что доминирующая частота практически линейно возрастает с увеличением входной скорости. Несмотря на это, числа  $St$  при данной геометрии камеры не строго постоянны, а немного возрастают с увеличением числа  $Re$  (фиг. 4, 5). Такое же поведение  $St$  от  $Re$  можно увидеть в [8].

Как следует из фиг. 3, непостоянство числа  $St$  обусловлено тем, что график линейной регрессии, построенный по экспериментальным точкам, не выходит из начала координат, а пересекает ось абсцисс в некоторой точке  $v_0$ . Таким образом, частоту  $f$  можно представить в виде

$$f = b(V - v_0) \quad (2.1)$$

где  $b$  – постоянная, зависящая лишь от геометрических параметров камеры. Из (2.1) следует, что, в отличие от  $St$ , величина  $b$ , являющаяся тангенсом угла наклона графика  $f(V)$ , и соответствующий ей безразмерный параметр  $bR$  не зависят от  $Re$ , поэтому они – более удобные характеристики для безразмерного анализа. Вполне возможно, что параметр  $bR$  более адекватно отражает физические механизмы, приводящие к возникновению доминирующей частоты.



Фиг. 5. Зависимость числа St от числа Re при разных площадях тангенциальных щелей,  $r/R = 2/7$  и малых изменениях длины камеры: 1 –  $\Sigma/R^2 = 0.69$ ,  $L/R = 5.86$ , 2 – 0.42, 5.5, 3 – 0.14, 5.21, 4 – 0.11, 5.14, 5 – 0.067, 5.07

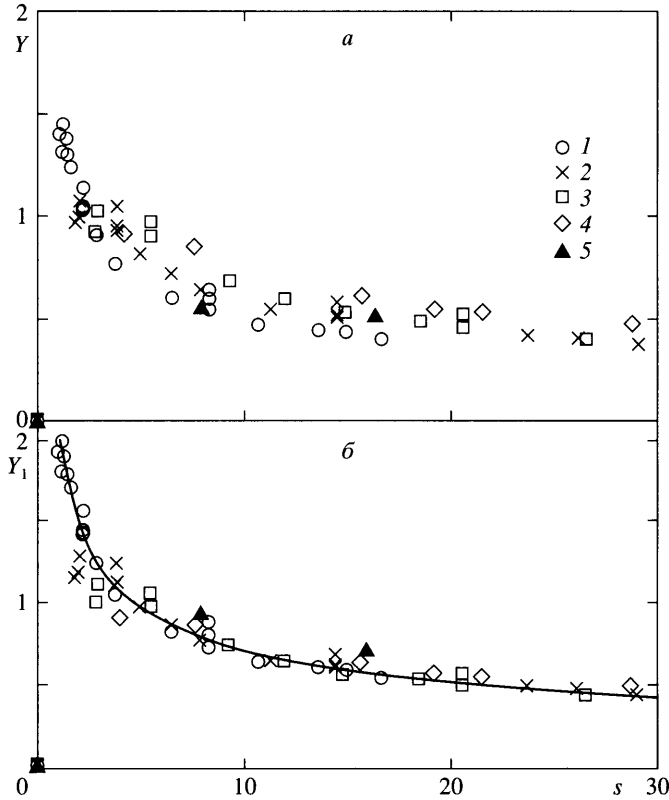
Из приведенных фигур видно, что с введенными выше безразмерными критериями трудно установить какие-то общие закономерности. Поэтому целесообразно ввести другие критерии. Вместо  $\Sigma/R^2$  рассмотрим геометрический параметр закрутки  $s = \pi r R / \Sigma$  (в [3, 4] данное выражение обозначено через  $A$ ). Ему можно придать два физических смысла. Первый – отношение момента импульса, втекающего в камеру, к среднему потоку импульса через сопло, умноженному на радиус сопла [9]. Второй больше связан со структурой потока. Поскольку, как правило, циркуляция скорости вокруг оси для вихревых камер с тангенциальным вдувом сохраняется вплоть до выходного радиуса сопла [10], можно показать, что  $s$  есть отношение вращательной компоненты скорости на радиусе сопла к средней осевой скорости через сопло. Для характеристики частоты пульсаций  $f$  введем новый безразмерный параметр, который в силу (2.1) не зависит от числа Re:

$$Y = 2\pi b r^2 / R \tag{2.2}$$

Ему также можно придать некоторый физический смысл. Поскольку  $v_0$  мало по сравнению с  $V$  (фиг. 3),  $Y \approx 2\pi f r^2 / (VR)$ . Если принять, что циркуляция скорости сохраняется вплоть до выходного радиуса сопла, то  $Y$  приближенно есть отношение доминирующей частоты к частоте вращения жидкости на радиусе сопла. На фиг. 6, а нанесены точки, изображающие зависимость  $Y$  от  $s$  для различных  $r/R$  и  $L/R$ . На графике также приведены две точки, которые можно получить из фиг. 5 работы [2]. Видно, что точки группируются с разбросом не более 20% вдоль некоторой убывающей кривой. Однако точки группируются еще более компактно, если вместо  $Y$  ввести

$$Y_1 = Y(R/r)^{0.25} \tag{2.3}$$

Это иллюстрирует фиг. 6, б, где приведены данные для  $Y_1$  в зависимости от  $s$  и две точки из [2]. Сплошная кривая – график функции  $g_1(s) = 2/s^{0.45}$ , аппроксимирующей



Фиг. 6. Зависимость параметров  $Y(a)$  и  $Y_1(b)$  от параметра закрутки  $s$ : 1 –  $r/R = 2/7$ , 2 –  $1/2$ , 3 –  $5/7$ , 4 – 1, 5 – данные из фиг. 5 [2]. Сплошная кривая – график функции  $2/s^{0.45}$

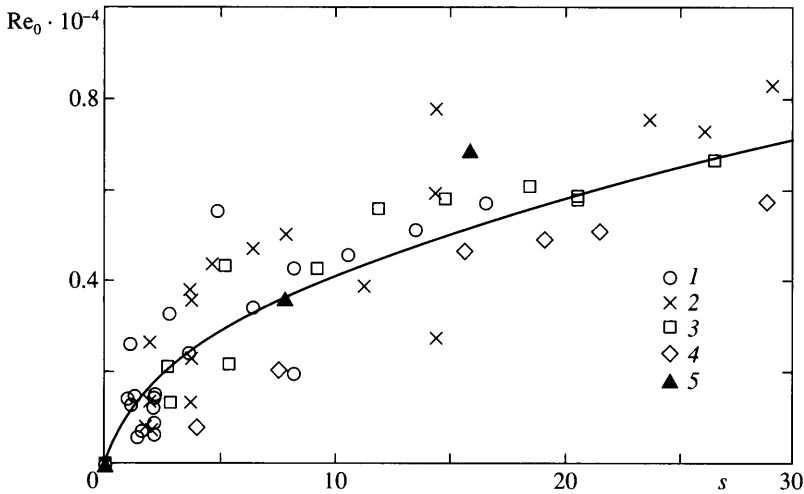
экспериментальные данные. Максимальное отклонение экспериментальных точек от аппроксимирующей кривой не превышает 20% для всех значений  $1 \leq s \leq 30$ .

Согласно (2.1), для нахождения зависимости  $f$  от  $V$  необходимы сведения о  $u_0$ . На фиг. 7 приведены экспериментальные данные, изображающие зависимость  $Re_0 = u_0 R / \nu$  от  $s$ . Сплошная кривая – график функции  $g_0 = 1300s^{0.5}$ . Более значительный разброс в значениях  $Re_0$ , чем  $Y$  и  $Y_1$ , возможно, связан с большей чувствительностью величины  $u_0$  к погрешностям измерений частоты и скорости. Так, изменение крайнего значения частоты на фиг. 2 всего на 5% приводит к изменениям величины  $u_0$  на 15%, а величин  $Y$  и  $Y_1$  – менее чем на 5%. Таким образом, используя (2.1) – (2.3) и аппроксимируя  $Y_1$  сплошной кривой фиг. 6, б, получаем единую эмпирическую связь между  $St$ ,  $Re$ ,  $s$ ,  $(r/R)$  для значений параметров, достигнутых в настоящих экспериментах  $1 < s < 30$ ,  $0.58 \cdot 10^4 < Re < 5.8 \cdot 10^4$  (при этом скорости на входе в вихревую камеру изменялись от 6.2 до 62 м/с)

$$St = \frac{1}{\pi} \left( \frac{R}{r} \right)^{1.75} s^{-0.45} \left( 1 - \frac{Re_0}{Re} \right) \quad (2.4)$$

Для оценки  $Re_0$  можно использовать значения, даваемые сплошной кривой на фиг. 7. Как следует из определений числа  $St$  и параметра  $Y_1$ , погрешности формулы (2.4) складываются из погрешностей определения величин  $Y_1$  и  $Re_0$ . Можно записать

$$\frac{(\delta St)}{St} = \frac{(\delta Y_1) s^{0.45}}{2} + \frac{(\delta Re_0)}{(Re - 1300s^{0.5})} \quad (2.5)$$



Фиг. 7. Связь числа  $Re_0$ , соответствующего нулевой частоте, с параметром закрутки  $s$ :  $1 - r/R = 2/7$ ,  $2 - 1/2$ ,  $3 - 5/7$ ,  $4 - 1$ ,  $5$  – данные из фиг. 5 [2]. Сплошная кривая – график функции  $1300s^{0.5}$

Поскольку, согласно фиг. 6, б и фиг. 7  $(\delta Y_1)s^{0.45}/2 < 0.2$ ,  $(\delta Re_0) < 0.3 \cdot 10^4$ , при  $Re > 2 \cdot 10^4$  получим, что  $(\delta St)/St < 0.5$  для всех  $s$  из исследованного диапазона. Из (2.5) следует, что погрешность в определении  $St$  убывает при увеличении  $Re$  и уменьшении  $s$ .

Отметим, что зависимость (2.4) не согласуется с формулой (9) из [6]. Согласно [6], выражение  $fr/V$  при постоянной  $s$  не зависит от  $r$ . В то же время из (2.4) следует, что эта величина убывает с возрастанием  $r$ . Сравнить результаты с данными [3], как это сделано в [6], затруднительно, поскольку в [3] приведен перепад давления на вихревой камере. Из контекста [3] можно понять, что это перепад между давлением в резервуаре, из которого газ вытекает в вихревую камеру, и атмосферой. Однако по этим данным нельзя рассчитать скорость при входе в вихревую камеру, поскольку этот перепад может значительно отличаться от разности давлений в резервуаре и на выходе из тангенциальных щелей. По данным настоящих экспериментов, они различаются в несколько раз.

**Заключение.** Проведены систематические исследования частоты периодических пульсаций давления, возникающих при истечении закрученной струи из вихревой камеры. Частота возрастает линейно с увеличением скорости на входе в камеру. График линейной регрессии, выражающий зависимость частоты от скорости, выходит не из начала координат, что определяет непостоянство числа  $St$  при изменениях числа  $Re$ , рассчитанного по входной скорости и радиусу камеры. Предложен новый безразмерный критерий, где вместо частоты и входной скорости используется угол наклона графика линейной зависимости этих параметров, т.е. критерий не зависит от входной скорости. Получена экспериментальная зависимость данного критерия от геометрического параметра закрутки в широком диапазоне его изменения (от 1 до 30), пригодная при разных диаметрах выходных сопел и площадях входных щелей.

Авторы благодарят В.М. Кулика за помощь при измерении спектров пульсаций давления.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке интеграционного проекта № 25 Сибирского отделения РАН.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Vonnegut V.A.* A vortex whistle // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1954. V. 26. № 1. P. 18–20.
2. *Chanaud R.C.* Experiments concerning the vortex whistle // *J. Acoust. Soc. Amer.* 1963. V. 35. № 7. P. 953–960.
3. *Кныш Ю.А., Лукачев С.В.* Экспериментальное исследование вихревого генератора звука // *Акуст. журн.* 1977. Т. 23. Вып. 5. С. 776–782.
4. *Киясбейли А.Ш., Перельштейн М.Е.* Вихревые счетчики-расходомеры. М.: Машиностроение, 1974. 161 с.
5. *Курзин В.Б.* Низкочастотные собственные акустические колебания в проточной части гидротурбин // *ПМТФ.* 1993. № 2. С. 96–105.
6. *Полянский А.Ф., Скурин Л.И.* К определению частоты звука, генерируемого вихревой камерой // *Акуст. журн.* 1993. Т. 39. Вып. 6. С. 1117–1122.
7. *Гольдштик М.А.* Вариационная модель турбулентного вращающегося потока // *Изв. АН СССР, МЖГ.* 1985. № 3. С. 22–32.
8. *Cassidy J.J., Falvey H.T.* Observations of unsteady flow arising after vortex breakdown // *J. Fluid Mech.* 1970. V. 41. Pt 4. P. 727–736.
9. *Gupta A.K., Lilley D.G., Syred N.* Swirl flows. Wells: Abacus Press, 1984. *Гунта А., Лилли Д., Сайред Н.* Закрученные потоки. М.: Мир, 1987. 588 с.
10. *Смутьский И.И.* Аэродинамика и процессы в вихревых камерах. Новосибирск. Наука, 1992. 300 с.

Новосибирск  
E-mail: nikulin@hydro.nsc.ru

Поступила в редакцию  
17.VI.2003