

УДК 532.552:532.527

© 1998 г. **В.А. ВИШНЯКОВ, В.Г. ЗАСЕЦКИЙ, Р.К. КАРАВОСОВ,  
А.Г. ПРОЗОРОВ, Л.И. СОКОЛИНСКИЙ**

### **ВОЗБУЖДЕНИЕ ИНТЕНСИВНЫХ ПУЛЬСАЦИЙ ДАВЛЕНИЯ ПРИ ПОВОРОТЕ ПОТОКА В ТРАКТЕ С ТУПИКОВОЙ ПОЛОСТЬЮ**

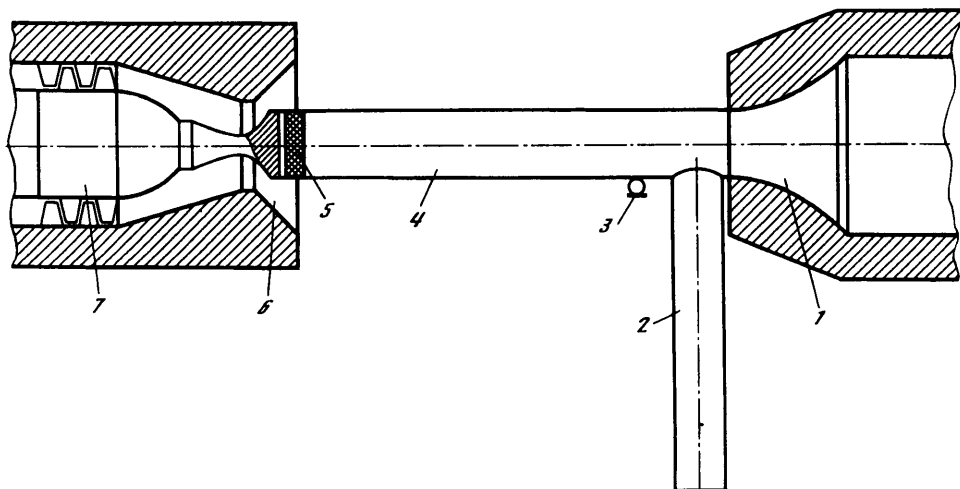
В аэродинамической трубе исследовалось возникновение в тракте магистральных газокompрессорных станций узкополосных пульсаций давления при повороте потока около тупиковой полости. Структура рассматриваемого течения оценивалась по результатам визуализации его аналога в гидрлотке. Полагается, что высокий уровень наблюдаемых в потоке узкополосных пульсаций давления является результатом неустойчивости и периодического перестроения крупномасштабных вихревых структур в тупиковой полости.

Движение газа при больших давлениях в системе трубопроводов магистральных газокompрессорных станций во многих случаях сопряжено с возникновением интенсивных узкополосных пульсаций давления вследствие неоднородности тракта. Их появление в потоке в конечном итоге приводит к возбуждению вибраций зачастую резонансного характера, способных вызвать разрушение конструкций.

Проблему предотвращения колебаний давления опасного уровня приходится решать каждый раз сообразно тому механизму, который предопределяет генерирование пульсаций крупномасштабными структурами в потоке. В [1] рассматривалось возбуждение пульсаций резонансного типа при движении газа по прямой трубе с тупиковой полостью в виде врезанного в нее под углом  $90^\circ$  отростка с перекрытым на удалении от сопряжения труб краном. Большая амплитуда крупномасштабных гидродинамических колебаний обуславливалась здесь, как и во многих других случаях, формированием автоколебательной системы с акустической обратной связью. Эти колебания в условиях [1] ослаблялись изменением масштабов вовлеченных в них структур и нарушением обратной связи.

Вместе с тем при измерениях на магистральных газокompрессорных станциях в потоке обнаруживались пульсации давления высокого уровня и тогда, когда сопутствующих им акустических возмущений не наблюдалось. Этот феномен возникал в том случае, когда при перекрытии клапана на прямой трубе-коллекторе в ней образовывалась тупиковая полость, а газ направлялся во врезанный в нее под углом  $90^\circ$  отросток. Поскольку течение по трубе с поворотом, как установлено в предшествующих исследованиях, не вызывает появления узкополосных пульсаций, последнее связывалось с упомянутой тупиковой полостью. Настоящая работа выполнена с целью выяснить, являются ли, при каких обстоятельствах и почему течения указанного типа источником интенсивных гидродинамических возмущений. При этом ставилась задача воспроизвести в главном принципиальный механизм процессов, наблюдаемых во многих системах разного назначения, не моделируя какое-то конкретное течение анализируемого типа.

1. Течение, подобное указанному выше, создавалось в аэродинамической трубе с диаметром сопла на выходе 150 мм [2]. Последняя при этом была превращена из трубы замкнутого типа с открытой рабочей частью в трубу незамкнутого типа. Ее рабочая часть, где



Фиг. 1. Рабочая часть аэродинамической трубы: 1 – сопло, 2 – отросток, 3 – микрофон, 4 – модель коллектора, 5 – вкладыш, 6 – кольцевой канал, 7 – двухступенчатый вентилятор

устанавливалась модель прямого участка трубы-коллектора с отростком, стала закрытой и была удлинена за счет снятия диффузора (фиг. 1). Обращенный к двухступенчатому вентилятору конец коллектора был закрыт, а в другой его конец воздух подавался из сопла аэродинамической трубы. Воздух в последнюю поступал через короткий профилированный кольцевой канал к вентилятору и, пройдя тракт трубы, выходил из нее через отросток.

Внутренний диаметр модели трубы-коллектора составлял  $d_k = 150$  мм, длина от среза сопла до установленного внутри нее вплотную к торцу вкладыша равнялась 930 мм. Последний позволял изменять глубину тупиковой полости  $h$  в достаточно широких пределах. На расстоянии 14 мм вниз по потоку от начала модели коллектора в нее устанавливались поочередно отростки для отвода воздуха с внутренним диаметром  $d_o = 110$  и 73 мм, длиной соответственно 738 и 805 мм. Соотношения указанных диаметров труб коллектора и отростка выбраны близкими к реальным в системе трубопроводов магистральных газокомпрессорных станций с тем, чтобы воспроизвести обсуждаемые процессы, не проводя обширных параметрических исследований.

Определение расхода воздуха через тракт осуществлялось путем измерений трубкой Пито профилей скорости на выходе из отростка. В экспериментах среднерасходная скорость на входе в модель коллектора составляла  $V_k = 11,9$  м/с при отводе воздуха из него через отросток диаметром 110 мм со среднерасходной скоростью  $V_o = 22$  м/с. Число  $Re = V_k d_k / \nu = 1,16 \cdot 10^5$ , здесь  $\nu$  – кинематический коэффициент вязкости воздуха. В случае, когда воздух отводился из коллектора по отростку с внутренним диаметром 73 мм,  $V_o = 23$  м/с,  $V_k = 5,5$  м/с,  $Re = 0,52 \cdot 10^5$ .

Для измерения пульсаций давления  $p$  и их частотных спектров  $L(f)$  использовались прецизионный шумомер 00026, конденсаторный микрофон МК 102/MV102, самописец 02013RFT, узкополосный анализатор 01025 "Роботрон", мультиметр CI-107. Пульсации анализировались в диапазоне частот  $f = 2-2000$  Гц, на который приходилась значимая часть пульсационных процессов. Микрофон в экспериментах по мере необходимости устанавливался либо практически заподлицо со стенкой модели трубы-коллектора на удалении 202 мм его оси от плоскости сопряжения коллектора с соплом, либо с соответствующей защитой укладывался на стенку тракта в том месте, где динамическим давлением можно пренебречь. В контрольных экспериментах микрофон устанавливался также заподлицо со стенкой обратного канала аэродинамической трубы.

Структура рассматриваемых течений анализировалась по результатам визуализации их аналогов в гидротлке [3]. В его рабочей части длиной 1180 мм, шириной 500 мм с глубиной воды 55 мм устанавливались модели, позволявшие приближенно в плоском течении воспроизвести в главном макроструктуры и нестационарные процессы, характерные для

течений по тракту с тупиковой полостью. Скорость потока в плоской модели коллектора шириной  $b = 140$  мм составляла  $V_k = 0,15$  м/с, чему соответствует  $Re = V_k b / \nu \approx 0,17 \cdot 10^5$ .

При всех различиях течений в моделях в аэродинамической трубе и в гидрлотке местные числа Рейнольдса  $R_1 = V_k \delta_1 / \nu$  перед местом поворота потока в сравниваемых случаях были близки. Здесь  $\delta_1$  – толщина вытеснения пограничного слоя на стенке канала. Величины  $R_1$  для аэродинамической трубы вычислены по результатам измерений профилей скорости в пограничном слое на стенке цилиндрического выхода из сопла, для гидрлотки получены приближенным расчетом. Временная эволюция структуры течения в моделях в гидрлотке прослеживалась путем замедленной киносъемки визуализируемого конфетти потока.

2. Уже при постановке экспериментов в аэродинамической трубе возникла необходимость составить гипотетическое представление об определяющих механизмах рассматриваемых физических процессов факторах и соответственно о структуре характеризующих колебания безразмерных параметров. Логично было предположить, например, что область генерирования интенсивных пульсаций давления находится в зоне поворота потока в коллекторе и в его тупиковой полости, а также в отростке, где возникает вихревое течение вблизи его верхней по потоку стенки.

Визуальными наблюдениями поведения пучка шелковинок в потоке было установлено, что вихревой характер течения в отростке не обнаруживается лишь на значительном удалении от входа в него. Однако когда отросток снимался с коллектора и на последнем оставалась лишь короткая муфта-переходник, уровень и спектры пульсаций давления в сечениях измерений не претерпевали существенных изменений. Отсюда следует, что в качестве характерного линейного размера, определяющего масштабы генерирующих интенсивные пульсации когерентных структур, правомерно использовать диаметр трубы-коллектора  $d_k$ .

Поскольку уровень возмущений при повороте потока определенно связан со среднерасходной скоростью в отростке  $V_o$ , последняя используется далее в качестве характерной при оценке интенсивности  $\epsilon_{p_1}$  узкополосных составляющих  $L_f$  спектров пульсаций давления и вычислении чисел Струхаля Sh

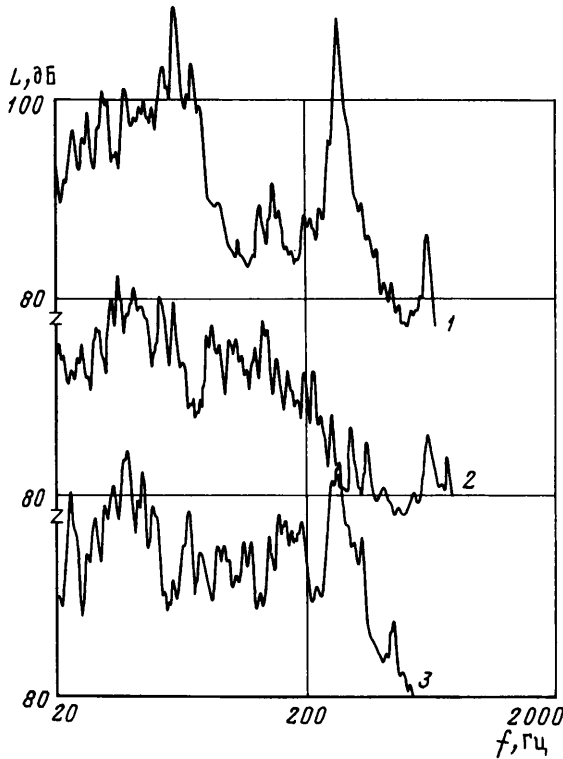
$$\epsilon_{p_1} = 2 \sqrt{\langle p_f^2 \rangle} / \rho V_o^2, \quad Sh = f_b d_k / V_o$$

где  $\rho$  – плотность газа,  $f_b$  – частота узкополосной составляющей.

Характерные результаты определения спектров пульсаций давления на стенке коллектора на удалении 78 мм от задней по потоку кромки отростка диаметром 110 мм,  $d_o/d_k = 0,733$  представлены на фиг. 2. На фоне сплошных спектров невысокого уровня в области частот 200–300 Гц узкополосные составляющие выделяются весьма четко. В отличие от этого при частотах  $f < 100$  Гц уровень сплошного спектра достаточно высок и на его фоне узкополосные составляющие частотой 30–70 Гц не столь заметны.

Приведенные данные свидетельствуют о достаточно сильной зависимости узкополосных составляющих и всего характера спектров от относительной глубины тупиковой полости в диапазоне исследованных значений  $h_1 = h/d_k = 1,19$ –5,26. При  $h_1 = 2,57$ , например, узкополосные составляющие в спектре практически отсутствуют (фиг. 2, спектр 2), тогда как при больших и меньших значениях чем  $h_1 = 2,57$ , они достигают достаточно высокого уровня (фиг. 2, спектры 1 и 3). Аналогичные по своему характеру результаты получены и при  $d_o/d_k = 0,486$ .

В том случае, когда микрофон лежал на стенке коллектора в тупиковой полости, полученные на различном удалении от ее торца спектры пульсаций давления имели практически такой же характер, как и в представленных выше измерениях. Вместе с тем узкополосные составляющие, наблюдавшиеся в тупиковой полости коллектора, не были обнаружены в форкамере аэродинамической трубы и в ее обратном канале, не прослушивались микрофоном в помещении вблизи модели коллектора с отростком и



Фиг. 2. Спектры пульсаций давления на стенке коллектора с отростком при  $d_o/d_k = 0,733$ .  
 1 –  $h_1 = 4,6$ ,  $Sh_1 = 0,406$ ,  $\epsilon_{p1} = 2,17\%$  и  $Sh_2 = 1,81$ ,  
 $\epsilon_{p1} = 1,73\%$ ; 2 –  $h_1 = 2,57$ ; 3 –  $h_1 = 1,19$ ,  $Sh_1 =$   
 $= 0,26$ ,  $\epsilon_{p1} = 1,15\%$  и  $Sh_2 = 1,81$ ,  $\epsilon_{p1} = 0,99\%$

около входа в вентиляторный отсек аэродинамической трубы. Остается сделать вывод, что интенсивные узкополосные составляющие спектров, даже напоминающих по своему характеру резонансные (фиг. 2, спектр 1), соответствуют гидродинамическим колебаниям, генерируемым крупномасштабными структурами в тупиковой полости.

Необходимо отметить, что характер пульсаций давления можно было наблюдать на экране осциллографа, соединенного с шумомером. Было видно, что пульсациям свойственны перемежающиеся режимы, при этом колебания в отличие от возникавших в коллекторе со слепым отростком на автоколебательных режимах [1] никогда не были близки к гармоническим.

Величины  $\epsilon_{p1}$  в данных экспериментах достигали значения 2,17%. Хотя пульсации давления измерялись и не во всем поле течения, можно полагать установленным, что порядок  $\epsilon_{p1}$  в рассматриваемом случае примерно такой же, какой наблюдался в потоке в коллекторе со слепым отростком при автоколебаниях.

Необходимо подчеркнуть существенное различие динамических нагрузок на конструкции, обусловленных наличием тупиковой полости в отростке и в самом коллекторе. В первом случае высокие динамические нагрузки благодаря акустическим волнам могут распространяться на значительной длине тракта системы. В отличие от этого во втором случае динамические нагрузки сосредоточены в основном вблизи места стыка двух труб.

Представляет интерес то, что числа  $Sh$ , соответствующие упомянутым выше узко-



Фиг. 3. Картины течения. Поток в коллекторе направлен справа налево,  $h_1 = 3,9$ . Фрагменты  $a$ – $ж$  соответствуют последовательным кадрам замедленной киносъемки



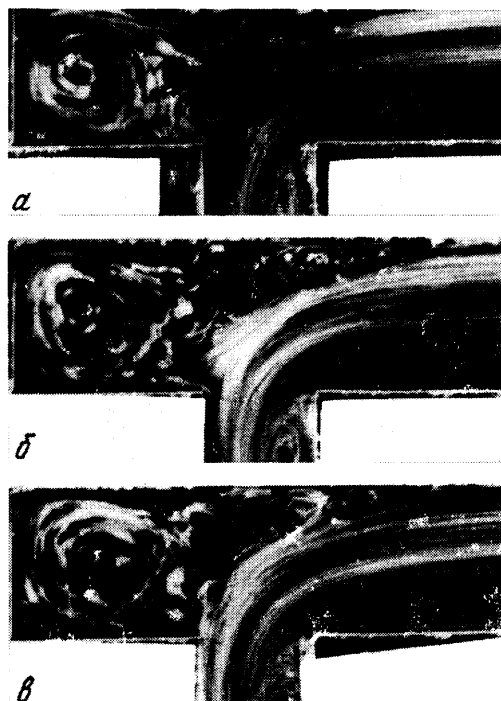
Фиг. 4. Картины течения. Поток в коллекторе направлен справа налево,  $h_1 = 2,4$

полосным составляющим, так же как и в [1], группируются в определенных интервалах значений: 0,33–0,51, 1,36–1,68, 1,8–2,02.

3. Вторая часть работы проведена в гидрлотке, где воспроизводилось приближенно течение через коллектор и отросток при трех значениях относительной глубины тупиковой полости  $h_1 = 3,9, 2,4$  и  $1,2$  и отношении  $d_o/d_k = 0,7$ . Замедленная киносъемка позволила проследить существенные различия эволюции течения в трех указанных случаях.

В наиболее глубокой из рассмотренных тупиковой полости с отношением  $h_1 = 3,9$  последовательно наблюдаются: один обширный вихрь (фиг. 3, а), его смещение и возникновение второго вихря (фиг. 3, б), существование двух примерно одинаковых по размерам вихрей (фиг. 3, в, г), разрушение находящегося на большем удалении от поворота потока второго вихря (фиг. 3, д, е), снова один обширный вихрь (фиг. 3, ж, а). Некоторым из перечисленных фаз развития – смещению первого вихря и появлению второго вихря, разрушению одного из вихрей – определенно сопутствует или предшествует появление интенсивных возмущений.

В рассматриваемом цикле второй вихрь появляется в тупиковой полости за период порядка 2 с, разрушение вихря происходит примерно за 4 с, а весь цикл длится около



Фиг. 5. Картины течения. Поток в коллекторе направлен справа налево,  $h_1 = 1,2$

15 с. Таким образом, в тупиковой полости при  $h_1 = 3,9$  вихревая структура течения неустойчива и периодически перестраивается.

В тупиковой полости с относительной глубиной  $h_1 = 2,4$  вихревая структура претерпевает со временем (фиг. 4, *а-2*) не столь заметные изменения, как в рассмотренном выше случае, не подвергается разрушению и, можно полагать, не инициирует интенсивные возмущения давления в потоке.

Наконец, при  $h_1 = 1,2$  вихрь в тупиковой полости снова приобретает достаточно четко выраженную (фиг. 5, *а-в*) неустойчивость. В интервале времени непосредственно перед фазой разрушения (фиг. 5, *б*) в потоке правомерно ожидать достаточно заметных возмущений давления.

Не вызывает сомнений, что механизм возбуждения интенсивных колебаний давления, измерившихся в аэродинамической трубе, при всех различиях вихревых структур в сравниваемых случаях имеет принципиально такой же характер, как и наблюдавшийся в гидролотке. В частности, обращает на себя внимание то, что неустойчивость и периодическая трансформация вихревой структуры и интенсивные узкополосные составляющие в спектре пульсаций давления в сравниваемых экспериментах наблюдались в тупиковой полости в одинаковых диапазонах изменения ее относительных размеров. И наоборот, указанного явления не обнаруживалось при  $h_1 = 2,4-2,6$ .

Результаты измерений спектров пульсаций давления в потоке газа и визуализация течения-аналога в гидролотке позволяют, по-видимому, связать в грубой качественной модели возникновение узкополосных составляющих с определенными стадиями развития вихревого течения в тупиковой полости. Если принять во внимание масштабы рассматриваемых возмущений, есть основания предполагать, что узкополосные пульсации давления на частотах порядка 200–300 Гц соответствуют экспоненциальному росту амплитуды волн неустойчивости в крупномасштабных вихревых структурах. Интенсивные же пульсации давления при частотах менее 100 Гц представляются

обусловленными разрушением и переформированием вихревых структур. Изложенное согласуется, в частности, с наблюдавшейся на экране осциллографа перемежаемостью режимов пульсаций давления в тупиковой полости при измерениях на модели в аэродинамической трубе.

Как известно, крупномасштабные вихревые структуры инициируют звуковые возмущения высокого уровня, например, в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью [4], при обтекании крылового профиля [5] и в ряде других случаев. Понятные трудности не позволили, однако, выяснить, каким образом вихревые формирования обуславливают высокий уровень узкополосных пульсаций давления, возникающих в потоке. В настоящей работе определен один из возможных подходов к исследованию этой проблемы. Однако уже изложенные результаты позволяют полагать, что в представляющих практический интерес случаях интенсивные звуковые возмущения обусловлены не периодической деформацией вихревых формирований [6], а их неустойчивостью, периодическим перестроением и разрушением.

**Заключение.** Выявлено, что при повороте потока в тракте около тупиковой полости в последней возникают вихревые структуры, способные в силу своей неустойчивости порождать интенсивные узкополосные пульсации давления. Порядок величин последних, несмотря на отсутствие заметных звуковых эффектов, может быть таким же, как и при автоколебаниях с акустической обратной связью.

В системах рассмотренного здесь типа наиболее эффективным способом предотвращения узкополосных пульсаций давления высокого уровня является соответствующее нормирование относительной глубины тупиковой полости в месте поворота потока.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пономаренко Ю.Б., Вишняков В.А., Каравосов Р.К., Прозоров А.Г. Теоретическое и модельное исследование возникновения низкочастотных колебаний в потоке в коммуникациях КС с высокорасходными нагнетателями // Сб. тр. Междунар. конф. "Энергодиагностика". М., Изд-е ИРЦ Газпром, 1995. Т. 2. С. 417–422.
2. Зосимов А.В. Акустический метод управления пульсациями скорости и давления в аэродинамических трубах с открытой рабочей частью // Тр. ЦАГИ. 1986. Вып. 2292. С. 38.
3. Ханжонков В.И., Тарасов Н.Ф. Гидролоток с эжекторным побуждением. Промышленная аэродинамика. М.: Оборонгиз, 1959. № 15. С. 85–91.
4. Стрелков С.П., Бендриков Г.А., Смирнов Н.А. Пульсации в аэродинамических трубах и способы демпфирования их // Тр. ЦАГИ. 1946. № 593. С. 56 с.
5. Муниин А.Г., Прозоров А.Г., Топоров А.В. Экспериментальное исследование тонального шума обтекания крыла при малых скоростях потока // Уч. зап. ЦАГИ. 1990. Т. 21. № 3. С. 28–38.
6. Kopyev V.F., Chernushev S.A. Sound radiation by high frequency oscillations of the vortex ring // AIAA Paper. 1993. № 4362. P. 1–9.

Москва

Поступила в редакцию  
10.VII.1996