

О ВОЗБУЖДЕНИИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ КОЛЕБАНИЙ ГАЗА В АКУСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ «КОЛЛЕКТОР – ТРИ ТУПИКА»

Ю.Б. Пономаренко (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

Известно, что в трубопроводах КС могут возбуждаться интенсивные низкочастотные колебания газа [1], которые локализованы в коллекторных тупиках – перекрытых кранами безрасходных трубопроводах отключенных агрегатов. Частота колебаний равна основной (первой) собственной частоте колебаний газа в тупиках.

Для возбуждения колебаний необходим достаточно интенсивный поток газа, текущего в коллекторе мимо тупиков, и малая диссипативность акустической системы «тупики – коллектор» [2, 3].

Большинство способов подавления колебаний основано на повышении их диссипации из-за рассеяния акустических волн в коллекторе [2, 3]. В силу указанной специфики диссипации ее повышение реализуется подходящим изменением собственной частоты.

Так как частота обратно пропорциональна длине тупика, то изменение длины и частоты чаще всего достигается сдвигом крана, ограничивающего тупик.

В случае двух тупиков для подавления колебаний обычно достаточно изменить длину одного из них на 30–40 %.

Системы с тремя и более тупиками – более сложные, и свойства колебаний в них могут существенно отличаться от упомянутых выше.

Экспериментальное подтверждение этому получено в 2010 г. в компрессорном цехе с шестью газоперекачивающими агрегатами (ГПА) на ДКС-1 «Ямсовейская», где при работе агрегатов 1–3 с отключенными агрегатами 4–6 обнаруживалась интенсивная вибрация в обвязке всасывания.

Симметричная акустическая система тупиков агрегатов 4–6 представлена на рис. 1, а эквивалентная ей упрощенная система двух тупиков – на рис. 2 (возможность упрощения пояснена ниже). Вертикальными линиями показаны тупики, горизонтальной линией – коллектор.

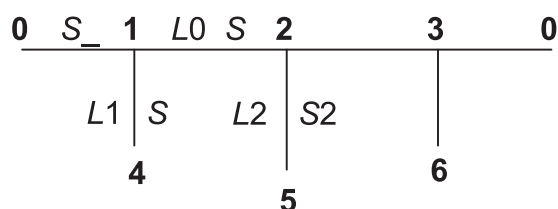


Рис. 1. Симметричная система трех тупиков

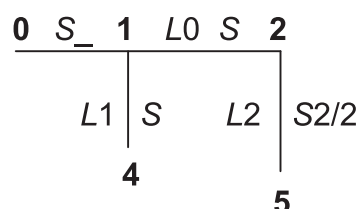


Рис. 2. Эквивалентная система двух тупиков

Ветви коллектора с узлами 0 рассматриваются как полубесконечные [2]. Диссипация колебаний учитывается только в этих ветвях.

В узлах 4–6 расположены закрытые краны № 1 агрегатов 4–6.

Обозначения длин труб на рис. 1 начинаются с буквы L , площадей поперечных сечений – с буквы S . Рассматривается общий случай, когда значения S_1 , S_2 могут отличаться от S .

Схема на рис. 1 – симметричная относительно среднего тупика 5. Поэтому обозначения длин и площадей показаны на схеме только для этого тупика и труб слева от него.

В упомянутом компрессорном цехе все трубы – одного условного диаметра $Dу1000$, а их длины равны

$$L_0 = 30 \text{ м}, \quad L_1 = 20 \text{ м}, \quad L_2 = 26,5 \text{ м}. \quad (1)$$

Отсюда видно, что средний тупик 5 значительно (более чем на 30 %) длиннее тупиков 4, 6. Обычно такие тупики ведут себя как одиночные: они не возбуждаются сами и не влияют на устойчивость других тупиков.

Необычность наблюдавшейся в цехе вибрации состоит в том, что:

- длинный тупик 5 интенсивно вибрировал в осевом направлении (виброскорость крана № 1 в этом направлении достигала 35,4 мм/с);
- короткие тупики 4, 6 не вибрировали;
- длинный тупик 5 вибрировал на частоте, близкой к основной частоте колебаний газа в коротких тупиках 4, 6.

Объяснение таких необычных свойств вибрации приводится ниже.

В показанной на рис. 1 симметричной системе возможны симметричные и антисимметричные колебания газа.

В симметричных колебаниях распределение динамических расходов и давлений в трубах симметрично относительно узла 2. В частности, расходы в коллекторе вблизи этого узла одинаковы, и их сумма равна расходу в тупике 5. Поэтому динамическое давление в этом тупике отлично от нуля.

В антисимметричных относительно узла 2 колебаниях распределение динамических расходов и давлений в трубах симметрично относительно узла 2 по модулю, но противоположно по знаку. В частности, расходы в коллекторе вблизи этого узла 2 одинаковы по величине, но противоположны по направлению. Поэтому всюду в тупике 5 динамический расход и давление равны нулю.

Наблюдавшиеся колебания являются симметричными, так как в них тупик 5 вибрировал из-за наличия в нем динамического давления газа.

Для симметричных колебаний баланс расходов в тройнике 2 не нарушается, если разделить этот тройник и весь тупик 5 осевой перегородкой на две симметричные части с одинаковой площадью поперечного сечения, равной $S/2$. В результате исходная система разделяется на две независимые симметричные системы. Одна из таких систем (левая) показана на рис. 2. Эта эквивалентная упрощенная система рассматривается далее вместо исходной системы.

Представленная на рис. 2 система отличается от рассмотренной ранее [3] системы двух тупиков отсутствием полубесконечной ветви коллектора, присоединенной к узлу 2.

Колебания газа считаются пропорциональными $\exp(i\omega t)$, где ω – частота, t – время. Соответствующее волновое число $k = \omega/c$, где c – скорость звука.

Характеристическое соотношение для частоты получается из условий для давлений и расходов в трубах вблизи коллекторного тройника 1. Это соотношение имеет вид [3]

$$(Y_2 + i \cdot T)/(1 + i \cdot T \cdot Y_2) = -(Y_1 + E) \quad (T = \operatorname{tg}(k \cdot L_0), \quad k = \omega/c). \quad (2)$$

Левая часть (2) есть относительная входная проводимость трубы 1_2 с проводимостью Y_2 на конце [3, 4]. Проводимости Y_1 , Y_2 , E – это относительные входные проводимости тупиков 4, 5 и ветви коллектора 1_0.

Выражения для этих проводимостей имеют вид

$$Y_1 = i \cdot T_1, \quad Y_2 = i \cdot y \cdot T_2, \quad E = S_0/S; \quad (3)$$

$$(y = S_2/2/S, \quad T_1 = \operatorname{tg}(k \cdot L_1), \quad T_2 = \operatorname{tg}(k \cdot L_2)).$$

Указанные в (2), (3) относительные проводимости – в долях волновой проводимости трубы 1_2 (напомним, что в переменных давление – расход волновые проводимости труб пропорциональны их площадям поперечного сечения).

С учетом (3) из (2) можно получить

$$F_c = i \cdot E \cdot C_1 \cdot F_0 \quad (4)$$

$$(F_c = C_1 \cdot (S_0 \cdot C_2 + y \cdot S_2 \cdot C_0) + S_1 \cdot F_0 = C_2 \cdot S_0 + y \cdot S_2 \cdot C_0, \quad F_0 = C_0 \cdot C_2 - y \cdot S_0 \cdot S_2).$$

Здесь и ниже C_0 , C_1 , C_2 , C_01 , C_02 – косинусы волнового числа, умноженного на длины L_0 , L_1 , L_2 , $(L_0 + L_1)$, $(L_0 + L_2)$ соответственно, а S_0 , S_1 , S_2 , S_01 , S_02 – синусы аналогичных аргументов.

Нетрудно заметить, что соотношение (4) выполняется, если одновременно

$$C_1 = 0, \quad F_0 = 0. \quad (5)$$

В этом случае соответствующая собственная частота вещественна. Это означает, что в системе нет диссипации колебаний из-за излучения волн в коллектор. Отсюда и из соображений непрерывности следует, что диссипация колебаний мала, если корни уравнений (5) достаточно близки.

В общем случае правая часть в (4) отлична от нуля. При малых E ею в первом приближении можно пренебречь, а затем учесть как поправку для определения декремента.

Получаемые таким способом значения частот оказываются достаточно точными и при реальном значении $E = 1$. Это связано с тем, что при малых $C1, F0$ правая часть в (4) является величиной второго порядка малости, а левая часть – первого.

Рассматриваемая акустическая система значительно упрощается, если $y = 1$ вместо реального значения $y = 0,5$. При этом неоднородный тупик, состоящий из труб 1_2, 2_5 разного диаметра, становится однородным длины $L02 = L0 + L2$, и в соотношении (4)

$$F0 = C02; \quad Fc = C1 \cdot S02 + S1 \cdot C02 = \sin(k \cdot L); \quad (L = L0 + L1 + L2). \quad (6)$$

Сначала с учетом (6) оценим близость корней $\kappa1, \kappa2$ первого и второго уравнений (5). Их решения есть

$$\kappa1 \cdot L1 = n/2, \quad \kappa2 \cdot L02 = n/2 \cdot (2 \cdot N - 1) \quad (N = 1, 2, \dots). \quad (7)$$

Отсюда следует условие совпадения корней

$$L02 = L1 \cdot (2 \cdot N - 1) \quad (N = 1, 2, \dots). \quad (8)$$

Соотношение длин (8) – наихудшее для устойчивости системы, так как в этом случае нет излучения волн в коллектор.

Для длин (1) соотношение (8) приближенно выполняется при $N = 2$. В этом случае

$$L02/L1 = 2,83, \quad \kappa2/\kappa1 = 1,06. \quad (9)$$

Отсюда можно сделать вывод, что причиной возбуждения колебаний в системе является близость длины $L02$ к утроенной длине $L1$. При этом частота колебаний близка к основной собственной частоте колебаний газа в тупике длины $L1$ и ко второй собственной частоте – в тупике длины $L02$.

Аналогичные и существенные дополнительные результаты можно получить из соотношения (4). Из (4), (6) в пренебрежении правой частью (4) получается

$$\sin(kL) = 0, \quad kL = N \cdot n \quad (L = L0 + L1 + L2, N = 1, 2, \dots). \quad (10)$$

Отсюда и из (7) следует условие совпадения корней $\kappa, \kappa1$

$$L = 2 \cdot N \cdot L1 \quad (N = 1, 2, \dots). \quad (11)$$

Для длин (1) соотношение (11) приближенно выполняется при $N = 2$. В этом случае

$$L/L1 = 3,83, \quad \kappa/\kappa1 = 1,05. \quad (12)$$

Отсюда можно заключить, что причина возбуждения колебаний – близость полной длины L к учетверенной длине $L1$. При этом частота колебаний близка к основной собственной частоте колебаний газа в тупике длины $L1$ и ко второй собственной частоте всей системы с суммарной длиной труб L .

Безразмерный декремент G можно определить, учитывая правую часть в (4) и выполняющиеся в приближении (10) равенства

$$C/C02 = -S/S02 = \cos(kL).$$

В результате вместо (10) получается

$$kL = N \cdot n + i \cdot G \quad (G = E \cdot \cos^2 \Phi, \quad \Phi = N \cdot n \cdot L1/L, \quad N = 1, 2, \dots). \quad (13)$$

Отсюда видно, что для наилучших соотношений длин (11) декремент равен нулю.

Наилучшим (оптимальным) является соотношение длин, при котором минимальный (как функция номера N) декремент максимален. Это имеет место, когда для соседних номеров $N, (N + 1)$ декременты одинаковы, а фазы Φ равноудалены от $n/2$. Из этого условия получается

$$N = M, \quad L = (2 \cdot M + 1) \cdot L_1, \quad L_{02} = 2 \cdot M \cdot L_1 \quad (M = 1, 2, \dots). \quad (14)$$

Для длин (1) отсюда при $M = 1$ нетрудно найти, что оптимальное значение $L_{02} = 40$ м достигается уменьшением длины L_2 тупика 5 до 10 м.

Простые соотношения, полученные в п. 3 в случае $y = 1$, становятся приближенными в общем случае $y < 1$. В этом случае собственные частоты системы приходится определять численными методами.

Другая существенная особенность общего случая – возможность объяснить появление вибрации только в среднем тупике 5.

Сначала рассмотрим парциальные частоты колебаний газа в неоднородном тупике с длинами однородных участков L_0, L_2 и с открытым концом в узле 1 (см. рис. 2).

Для этого тупика второе уравнение (5) приводится к виду [5]

$$\cos \Omega = -a \cdot \cos(b \cdot \Omega) \quad (\Omega = k_2 \cdot L_{02}, \quad a = (1 - y)/(1 + y), \quad b = (L_0 - L_2)/L_{02}). \quad (15)$$

Непосредственно из этого уравнения можно видеть [5], что его корни Ω приближенно равны значениям (7) и уклоняются от них (по модулю) не более чем на

$$\Delta \Omega = \arcsin(a). \quad (16)$$

Найдено, что при $y = 0,5$ и $N = 2$ отношение частот κ_2/κ_1 равно 0,988 для длин (1) и равно 1, если $L_2 = 25,9$ м.

Можно видеть, что найденная наилучшая длина L_2 отличается от утроенной длины L_1 и более близка к исходной длине 26,5 м.

Рассмотрим теперь полную неоднородную систему труб с двумя закрытыми концами (в узлах 4, 5) и с длинами однородных участков L_2 и $L_{01} = L_0 + L_1$.

Для этой системы уравнение (4) (без правой части) приводится к виду, аналогичному (15)

$$\sin \Omega = -a \cdot \sin(b \cdot \Omega) \quad (\Omega = k \cdot L, \quad a = (1 - y)/(1 + y), \quad b = (L_{01} - L_2)/L). \quad (17)$$

Его корни Ω приближенно равны значениям (10) и уклоняются от них (по модулю) не более чем на величину (16).

Найдено, что при $y = 0,5$ и $N = 2$ отношение частот

$$\kappa/\kappa_1 = 0,991; 1 \quad (L_2 = 26,5; 25,9 \text{ м}). \quad (17a)$$

Полученные результаты практически совпадают с результатами, найденными для уравнения (15). Это связано с тем, что длина L_2 почти равна наилучшей длине, при которой

$$\kappa = \kappa_1 = \kappa_2.$$

Здесь первое равенство следует из второго, так как длина L_1 точно равна четверти длины волны с волновым числом κ_2 , и поэтому при $\kappa = \kappa_2$ условие закрытого конца (отсутствие расхода) выполняется для обоих узлов 4, 5.

Определение оптимальных длин L_2 в общем случае $y < 1$ оказывается усложненным. Его предполагается выполнить в дополнительном исследовании системы.

Важным свойством неоднородной системы является различие амплитуд давления на концах 4, 5 однородных участков.

Соотношение для давлений в трубах получается из условия их равенства на стыке труб (в узле 1) и максимальности на закрытых концах 4, 5:

$$P_4 \cdot \cos(k \cdot L_{01}) = P_5 \cdot \cos(k \cdot L_2). \quad (18)$$

Здесь P_4, P_5 – давления на закрытых концах 4, 5.

С учетом равенства (4) (без правой части) соотношение (18) приводится к виду

$$(P_5/P_4)^2 = (1/y^2 - 1) \cdot \sin^2(kL_01) + 1. \quad (19)$$

Из этого соотношения следует

$$1/y \geq P_5/P_4 \geq 1.$$

Таким образом, давление в узле 5 почти всегда больше, чем в узле 4.

Отношение этих давлений найдено из (19) с учетом первых равенств (7), (17а)

$$P_5/P_4 = 1,55. \quad (20)$$

С учетом этого соотношения возможно следующее объяснение появления вибрации только в среднем тупике 5.

В тупике 4 амплитуды давления невелики, и соответствующие динамические силы, действующие на этот тупик, не в состоянии преодолеть силы сухого трения в опорах. В результате этот тупик не вибрирует.

Согласно (20), в тупике 5 амплитуды давления – большие (превосходящие амплитуды в тупике 4 более чем в полтора раза). Соответствующие динамические силы, действующие на этот тупик, в состоянии преодолеть силы сухого трения в опорах. В результате этот тупик вибрирует.

В заключение отметим основные результаты рассмотрения системы трех тупиков, симметричной относительно среднего тупика:

- 1) симметричная система «коллектор – три тупика» может быть сведена к более простой эквивалентной системе двух тупиков;
- 2) причина наблюдаемой вибрации тупиков – неудачное соотношение их длин, приводящее к близости второй собственной частоты газа в системе к основной парциальной частоте колебаний газа в крайних тупиках;
- 3) причина наблюдаемой вибрации только среднего тупика – повышенные (более чем в 1,5 раза) амплитуды давления в этом тупике по сравнению с амплитудами в крайних тупиках;
- 4) системы трех и более тупиков требуют специального рассмотрения. Рассмотренная выше симметричная система трех тупиков также нуждается в дополнительном исследовании.

Список литературы

1. Соколинский Л.И. Исследования низкочастотной вибрации трубопроводов КС / Л.И. Соколинский, Ю.В. Забродин, С.Ф. Жданов, А.З. Шайхутдинов // Газовая промышленность. – 1997. – № 3.
2. Пономаренко Ю.Б. Расчетные методы устранения низкочастотных колебаний потока в коммуникациях эксплуатируемых и проектируемых КС / Ю.Б. Пономаренко // Матер. 1-й Межд. конф. «Энергодиагностика». – Т. 2. – М., 1995. – С. 267–272.
3. Пономаренко Ю.Б. Об оптимальном демпфировании колебаний газа в соседних коллекторных тупиках / Ю.Б. Пономаренко // Повышение эффективности газотранспортного оборудования: сб. тр. – М.: ВНИИГАЗ, 1996. – С. 62.
4. Ржевкин С.Н. Курс лекций по теории звука / С.Н. Ржевкин. – М.: Изд-во МГУ, 1960.
5. Пономаренко Ю.Б. О подавлении низкочастотных колебаний газа в трубопроводах компрессорных станций изменением диаметров их участков / Ю.Б. Пономаренко // Матер. 3-й Межд. конф. «Газотранспортные системы: настоящее и будущее». – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2009. – С. 286–292.