

УДК 69.05:658

## АНТИФОНЫ В ТЕПЛОТЕХНИКЕ

*Северянин В.С.**Брестский государственный технический университет*

*В статье показано одно из направлений предотвращения звукового загрязнения окружающей воздушной среды высокофорсированными топочными устройствами. Объяснена физика действия, предложена классификация антифонов, разработаны некоторые конструкции. Публикация способствует более широкому использованию высокоэффективной техники.*

### 1. Введение

Антифон (греч.: против; звук) – устройство для снижения звукового эффекта путем воздействия на источник звука или звуковое поле физическими методами, компенсирующими акустические колебания.

Другой метод шумоглушения – звукоизоляция, которая не пропускает (в разной степени) акустические (или связанные с ними механические) колебания от источника в окружающую среду. Прочные, многослойные, гибкие или массивные, армированные, опорные, колеблющиеся и т.д. ограждения решают проблему, но в теплотехнике такие объекты как топочные устройства невозможно изолировать от внешней среды достаточно полно. Это объясняется тем, что при горении необходимо непрерывно подавать воздух и удалять газообразные продукты сгорания через отверстия, связанные с внешней воздушной средой, и через них происходит, в частности, акустическое излучение.

В последнее время начинают использоваться так называемые камеры пульсирующего горения – топочные устройства различной тепловой мощности (от 50 кВт до 5 МВт), обладающие рядом теплотехнических преимуществ (резкое уменьшение габаритов, высокие показатели топочного процесса, малые расходы энергии на собственные нужды, удобство эксплуатации). Но эти устройства имеют существенный недостаток – сильное шумовое загрязнение примыкающего пространства (более 100 дБА). Обслуживаемые ими объекты поэтому также высоко экономичны, но акустика по указанной выше причине (шум на входе воздуха и на выходе топочного газа) ограничивает их применение. Громоздкая звукоизоляция

снижает принципиальное достоинство пульсирующего горения. Поэтому весьма актуальной задачей становится разработка новых, усовершенствование известных методов снижения акустического загрязнения окружающей среды, промышленных объектов высокофорсированными топочными устройствами. Одним из целесообразных направлений достижения цели может явиться использование и разработка антифонов.

### Физика действия антифонов

Принцип действия антифонов – генерация явлений, веществ, ситуаций, противоположных по эффекту уничтожаемым качествам, совпадающих во времени и месту. Если повышается давление – надо воздействовать снижением, и наоборот. Ускоряется в одном направлении – создать обратное. Нагревается – охладить. И т.д. Естественно, на это требуется энергия и различные материалы. Но это – цена достижения комфорта или необходимого технического условия.

Звук – это распространение знакопеременных давлений воздуха. При гармонических установившихся колебаниях зависимость давления во времени выражается синусоидой, на которую могут накладываться обертоны, обусловленные вторичными колебаниями. Если рядом с этой синусоидой образовать другую, противоположную по фазе, то их суммирование, т.е. интерференция, в пространстве, окружающей точку, даст алгебраический результат: нулевое давление при идентичных параметрах слагаемых волн. В электрических сетях этого добиться несложно, но в технической акустике, особенно при таком сложном процессе как горение топлив, влияют трудноустраняемые причины (конструкции, аэродинамика, различие пространственных пламен, постоянство подачи

воздуха и топлива, их смешение, удаление продуктов сгорания и т.д.), усложняющие достижения нулевого эффекта.

Если же источники колебаний воздуха находятся на некотором расстоянии друг от друга, то в окружающем их пространстве возникает «интерференционная картина» – образуются области с повышенным и «нулевым» звуком. На рис. 1: А – источник звука, Б – антифон («гасящий источник»), В, Г – колебания «Р» давления в А и Б, τ – время, Д, Е – интерференционные зоны шума и затишья, L – расстояние между источниками

Очевидно, что только при  $L \rightarrow 0$  шумопроизводящий агрегат меньше акустически загрязняет окружающую среду, ибо в этом случае зоны Е и Д аннулируют друг друга. На практике волна В может содержать обертоны, тогда Б требует соответствующей настройки для получения нужной Г (возможны и другие помехи).

Физический аналог антифона – резонатор Гельмгольца. Он представляет собой ёмкость  $v$  с горлом длиной  $l$  и сечением  $S$ . В этом устройстве происходит поглощение/генерация звуковых волн, когда собственная частота колебаний массы воздуха в нем совпадает с внешними колебаниями газа. Антифонный эффект возникает в этом случае за счёт движения воздуха (газа) в горле

резонатора при сжатии/расширении его в объёме ёмкости. Собственная частота такого реактивного глушителя [1]:

$$f = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{C_0}{v}} \quad (1)$$

где  $C$  – скорость звука,  $C_0$  – акустическая проводимость горла резонатора (отверстий соединяющих объём  $v$  с зоной глушения),

$$C_0 = \frac{\frac{\pi}{4} d^2 n}{l + \frac{\pi}{4} \cdot \frac{d}{\zeta(\xi)}} \quad (2)$$

где  $d$  – диаметр горла резонатора или отверстий, образующих его,  $n$  – количество отверстий,  $l$  – длина горла (канала) или толщина стенки резервуара резонатора,  $\zeta$  – функция, учитывающая поправку на присоединённую массу,  $\xi = d/a$ ,  $a$  – расстояние между центрами соседних отверстий.

В настоящей статье не рассматриваются такие источники шума, как вибрации элементов оборудования, т.к. борьба с ними представляет собой другое направление решения проблемы звукового загрязнения окружающей среды, т.е. целесообразно разделить акустические и механические методы.

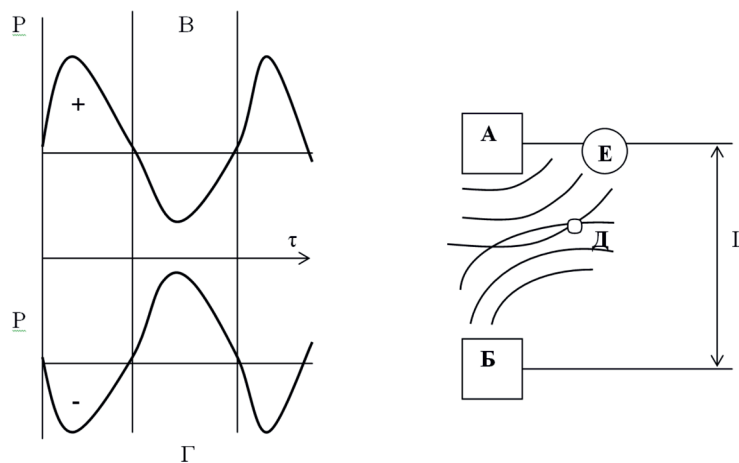


Рис. 1. Действие генераторов звука

### Конструкции антифонных схем

#### 3.1. Камерные реактивные глушители

Разработана конструкция устройства, изображённого на рис. 2 [2]. Здесь 1 – камера воспламенения с форсункой 2, запальником 3 и аэродинамическим клапаном 4. К камере 1 примыкает полость 5 из перфорированной трубы; в ней имеется трубка 6 для пускового воздуха. Резонансная

труба 8 подсоединена тангенциально к камере 1 и введена аксиально в трубу 10, в которой имеется перегородка с каналом 7 и корпус 9. Устройство закрыто кожухом 11, в котором имеются секции I, II, III, представляющие собой резонаторы Гельмгольца. Размеры элементов в мм указаны на чертеже.

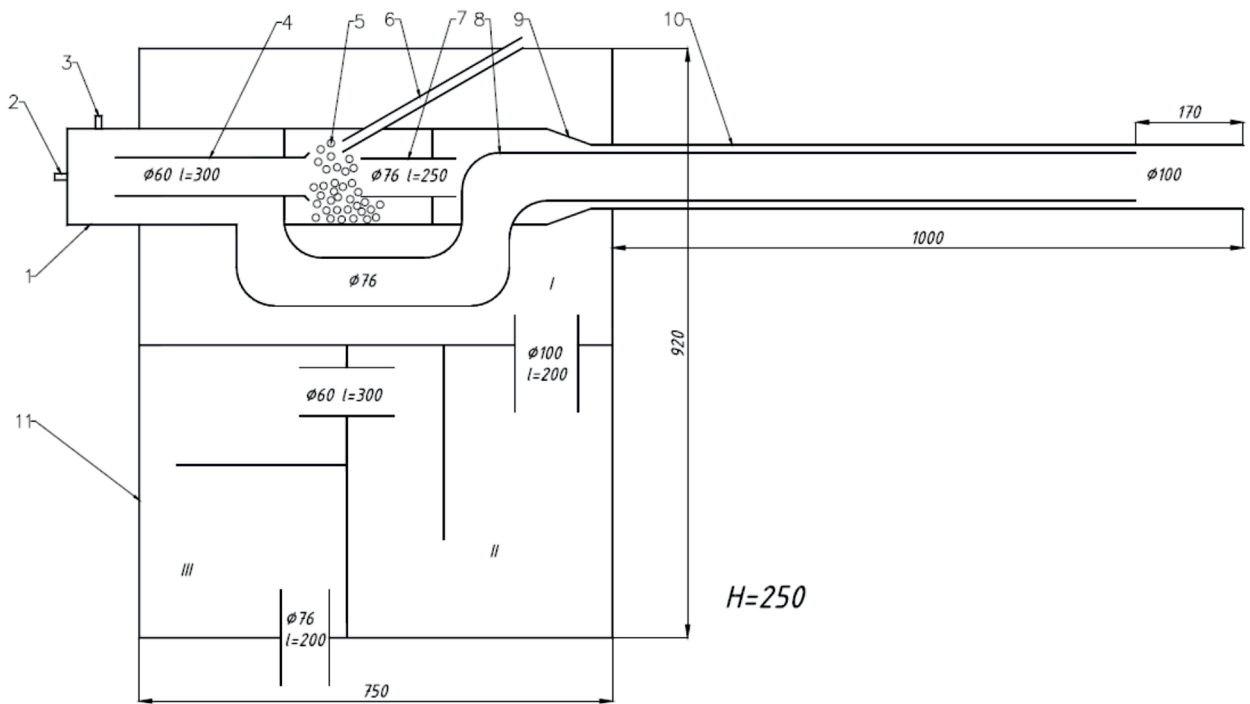


Рис. 2. Антифон типа резонаторного реактивного глушителя камеры пульсирующего горения.

При работе устройства из-за больших скоростей в зазоре между 4 и 7 создаётся разрежение, поэтому в полость 5 засасывается воздух, преодолевая сопротивление секций I, II, III кожуха II. Топочные газы взаимодействуют на выходе из резонансной трубы 8 с потоком газа из клапана 7, улучшая добавочное снабжение воздухом камеры воспламенения I. Опробование и испытания устройства подтвердили правильность физических предпосылок. Секции I, II, III снижают силу звука при пульсирующем горении на

25–30 Децибел.

### 3.2. Струйный антифон

Способ шумоглушения устройств пульсирующего горения может быть реализован устройством, изображённом на чертеже рис. 3, где: 1 – камера пульсирующего горения, 2 – воздушный короб, 3 – воздуховод, 4 – вентилятор, 5 – двигатель, 6 – перфоратор, 7 – сервопривод, 8 – датчик, 9 – регулятор, а – лопасть вентилятора, б – плоскость вентилятора, в – плоскость перфоратора, г – отверстие перфоратора [3].

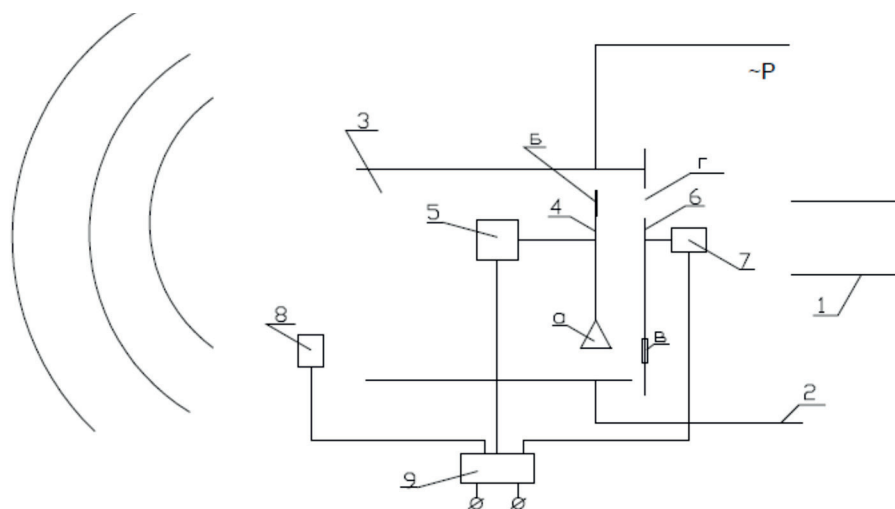


Рис. 3. Схема струйного антифона

Камера пульсирующего горения 1 направлена в воздушный короб 2, имеющий воздухопровод 3. В воздуховоде 3 располагается вентилятор 4 с двигателем 5. Соосно с ним смонтирован перфоратор 6 в виде диска с отверстиями. Перфоратор может поворачиваться на своей оси при помощи сервопривода 7 (шаговый электродвигатель). Датчик 8 (микрофон), двигатель 5, сервопривод 7 электрически связаны с регулятором 9 (имеющим усилители, коммутаторы, преобразователи частоты, тиристорные преобразователи, микропроцессоры, задатчики и др.), который питается от электросети. Вентилятор 4 и перфоратор 6 образуют прерыватель струй воздушного потока.

При вращении вентилятора 4 лопасть вентилятора «а» нагнетает воздух в воздушный короб 2, когда лопасти вентилятора «а» совпадают с отверстиями «г» перфоратора 6. Когда плоскость вентилятора «б» совпадает с отверстием перфоратора «г» и «а» с «в», воздушный поток прерывается. Закрытие/открытие во времени происходит синусоидально, т.е. также как изменяется давление «р» в воздушном коробе 2.

При медленном повороте перфоратора 6, начало закрытия/открытия отверстия перфоратора «г» во времени изменяется.

Камера пульсирующего горения 1 при своей работе создаёт звуковой поток в сторону воздушного короба 2. Этот звуковой поток в виде пульсирующей струи без включения системы шумоглушения через воздухопровод 3 выходит в окружающую среду, создавая сильное звуковое загрязнение (линии слева).

Во избежание этого включается вентилятор 4, вращаемый двигателем 5. Скорость его вращения задаётся датчиком 8 через регулятор 9. Например, для соблюдения частоты в 50 Герц и наличия двух отверстий «г», равных по величине плоскости перфоратора «в», при  $a=b=v=g$ , скорость вращения должна быть  $n=(1/2T) \cdot 60$  об/мин, где  $T$  – время оборота (полоборота равно периоду пульсаций), т.е.  $n=(1/2 \cdot 0,02) \cdot 60$  об/мин = 1500 об/мин, где  $0,02 = 1/f = 1/50$ .

Для четырёх отверстий на круге перфоратора и четырёх лопастей вентилятора имеем:  $n = 750$  об/мин, и т.д., т.е. для характерных частот камер пульсирующего горения обороты вполне достижимы. Для других частот, определяемых датчиком 8 от действия камеры пульсирующего горения 1, скорости вращения двигателя 5, осуществляемых регулятором 9, будут соответствующие данному расчёту.

Однако совпадения частот камеры пульсирующего горения и частот прерывания струи воздуш-

ного потока, входящего в воздушный короб 2, недостаточно для эффективного шумоглушения: необходимо совпадение фаз акустических колебаний от камеры пульсирующего горения 1 и от вентилятора 4 с перфоратором 6. Положительная полуволна должна совпадать с закрытием «г», чтобы звук не выходил из воздушного короба 2 наружу, отрицательная полуволна колебаний – с открытием «г», т.е. с подачей воздуха, когда происходит всасывание его в зону горения. Только в этом случае идёт процесс подачи воздуха и шумоглушения, а остаточный звук улавливается датчиком 8.

Если фазы не совпадают, датчик 8 фиксирует усиление звука, подаёт сигнал в регулятор 9, который включает сервопривод 7. Перфоратор 6 поворачивается, фаза изменяется, т.к. начало закрытия/открытия становится другим, звук у датчика 8 снижается. Регулятор 9 находит оптимум путём знакопеременного поворота перфоратора 6, и при минимуме звука отключает сервопривод 7.

При изменении режима работа камеры пульсирующего горения, когда может измениться и частота, и амплитуда акустических колебаний, регулятор 9 настраивает новый минимум излучения звука наружу. При этом частота (скорость вращения вентилятора) задаётся жёстко датчиком 8, а фаза, т.е. положение перфоратора 6, «ищется» как указано выше.

Таким образом, описываемый антифон снижает шумность высокоэффективных устройств пульсирующего горения.

Предложенный струйный антифон реализует способ шумоглушения. Он состоит из подачи воздуха из окружающей среды в зону горения, при этом фаза повышенного акустического давления совмещается с перекрытием подачи воздуха, фаза пониженного акустического давления совмещается с временем открытия подачи воздуха, частота перекрытия и подачи струи воздуха сравнивается с частотой пульсаций в устройстве пульсирующего горения.

### 3.3. Излучающий антифон

Прямым аналогом такого типа антифона является обычный громкоговоритель. Это устройство для преобразования электрических сигналов звуковых частот в акустические колебания в целях сильного воспроизведения звука с заданными акустическими характеристиками [4]. Подводимые электрические импульсы вызывают механические колебания подвижной системы устройства, что генерирует излучение воздушных колебаний

в окружающее пространство по законам линейной акустики. Звуковое давление (амплитуда колебаний) зависит от подводимой мощности. Громкоговорители мощностью 50–100 ватт считаются весьма громкими излучателями, гашение их звука является непростой задачей. Такие точные теплотехнические устройства, как камеры пульсирующего горения, представляют собой идентичный звуковой излучатель [5]. Они выделяют гармонические звуковые колебания в диапазоне 10–200 Герц. При этом в установившемся режиме горения эти колебания устойчивы, чётко фиксируются, легко анализируются, надёжно воспроизводятся. Поэтому можно подобрать аналогичные звуковые колебания, например, с помощью особого громкоговорителя, с настраиваемой частотой, амплитудой, если нужно – обертонами, но – с противофазными качествами, рис. 1.

Если источник звука (излучение которого следует подавить) и вспомогательный звуковой генератор с противофазными колебаниями расположить рядом, то такое сочетание приведёт к уменьшению шума (вплоть до нуля) этого комплекса. Звуковое поле, как показано выше, зависит от геометрии расположения, но при указанном условии (рис. 1), если  $L \rightarrow 0$ , шумоглушение будет обеспечено.

Если  $L \neq 0$  (слушатель далеко от источника подавляемого звука, вне зоны затишья), требуется персональный противофазный громкоговоритель (наушники с небольшими приспособлениями). Такие «беруши» могут обеспечить звуковой комфорт. Принципиальная схема предлагаемого излучающего антифона показана на рис. 4.

На рис 4: 1 – источник подавляемого звука, 2 – датчик звукового давления, 3 – анализатор, 4 – фазовращатель, 5 – регулятор, 6 – динамик.

При включении шумопроизводящего устройства 1 акустический датчик 2 улавливает звук, анализатор 3 оценивает его силу, фазовращатель 4 вырабатывает противофазные электрические сигналы, которые передаются на динамик 6 (электродинамический громкоговоритель). Интерференция звуковых волн 4 от 1 и 6 глушит звуковое поле вокруг 1 и 6, регулятор 5 поддерживает это условие работой автоматики и предварительной настройкой. При отключении 1 отключается также 6. При работе 1 датчик 2 фиксирует шумоглушение. Таким образом, антифон создаёт и действует комбинацией элементов 3...6, весьма простых по устройству и работе при минимальном потреблении электроэнергии. Кроме того, этой системе можно придать функции регулятора самого теплотехнического генератора (тепловая мощность, подача топлива, время включения/отключения и т.д.).

Схему по рис. 4 можно расширить увеличением количества динамиков и датчиков. Элементы 3,4,5 объединены в одном компактном блоке. Излучающая антифонная система может быть оптимальной (по стоимости, эффективности, обслуживанию) для многих случаев, превосходя другие методы шумоглушения и звукоизоляции. Метод не требует реконструкций теплотехнического оборудования, а достижение звукового комфорта малозатратно, при получении теплотехнического эффекта на обслуживаемом аппарате.

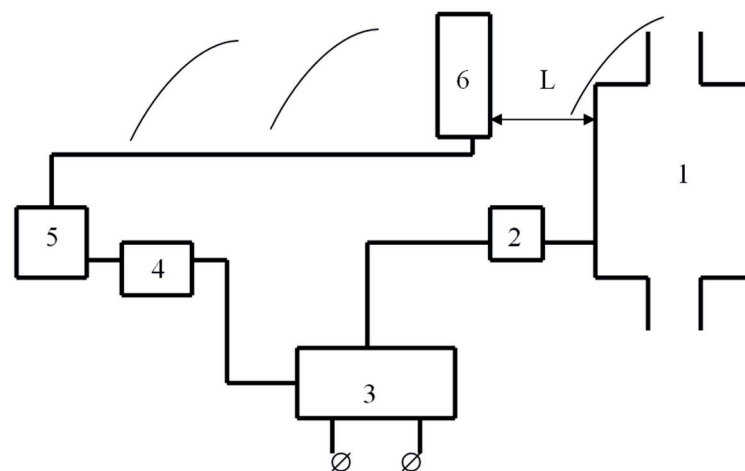


Рис. 4. Излучающий антифон

### 3.4. Антифонные компоновки генераторов теплоты

#### 3.4.1. Особые конструкции

Снизить шум, излучаемый устройством, можно приданием специальной формы или компоновкой элементов, например, применением двух резонансных труб, на концах которых организуются противоположные по фазе колебания. Отличие от известных противофазных схем в том, что в данном случае геометрические характеристики труб выбираются такими, чтобы в одной из них укладывалась четверть волны, а в другой – три четверти [5].

На рис. 5-А представлена схема устройства, на рис. 5-Б – эпюры колебаний (показаны акустические смещения газа). Устройство содержит форсунку 1 для подачи топлива, аэродинамический воздушный клапан 2, камеру воспламенения 3, две резонансные трубы 4 и 5, которые введены в выхлопной объем 6. Если температуры

газов в этих трубах одинаковы, то труба 4 втрое короче трубы 5. Верхний график а-б – колебания в трубе 4, нижний – а-в-д-г – в трубе 5 (стоячие волны соответствуют указанным соотношениям длин). Тогда «+» на а-б совмещается с «-» на д-г в данный момент времени, чем обеспечивается противофаза в 6. Точки «а» и «д» – узлы смещения, точки «в», «б», «г» – пучности акустического смещения.

Внутри труб могут располагаться теплообменные поверхности, корректирующие шайбы и т.п. Трубы могут иметь переменное по длине поперечное сечение, произвольную форму в плане. Аналогичную схему можно использовать на аэродинамических клапанах. Достоинство устройства – незначительное увеличение аэродинамического сопротивления, которое вообще требует расхода энергии, т.е. снижения мощности на выработке теплоты.

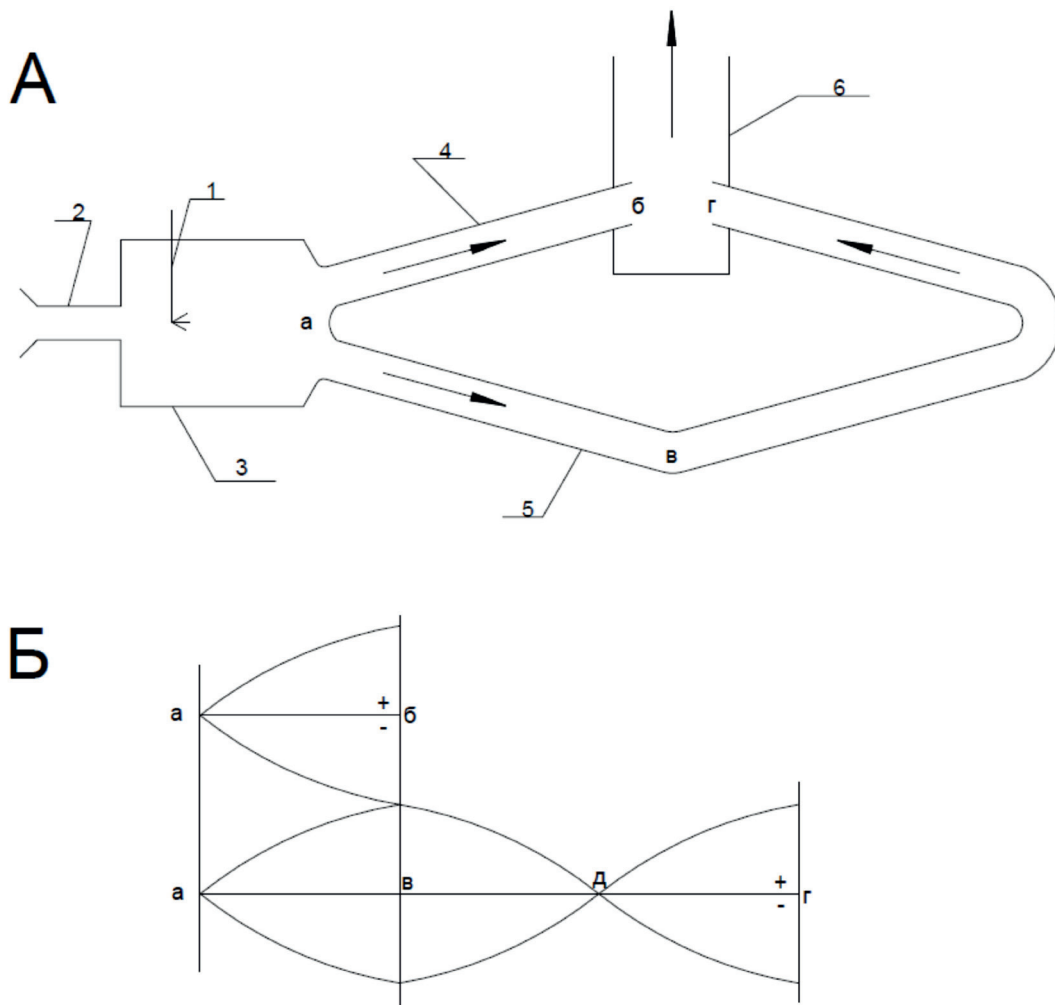


Рис. 5. Конструкционный метод подавления звука

### 3.4.2. Противофазные комбинации

Если источник интенсивного звука (в данном случае мощный теплогенератор) установить рядом с другим полностью аналогичным, то организация противофазной работы может привести, по вышеприведённым соображениям, к уменьшению акустического загрязнения окружающей воздушной среды [6].

Во-первых, у звуковых потоков должны быть одинаковые частоты колебаний  $f$ , а во-вторых – амплитуды колебаний источника. Для общеизвестных устройств пульсирующего горения:

$$f = \frac{c}{4L} \quad (3)$$

скорость звука:

$$c = \sqrt{RT c_p / c_v} \approx 20\sqrt{T} \quad (4)$$

( $R$  – газовая постоянная,  $c_p$  и  $c_v$  – теплоёмкости).

Выражение (3) применимо для четвертьволновых схем упомянутых устройств. Длина  $L$  задаётся теплотехническими и конструктивными условиями, одинаковые длины безусловны.

На скорость звука влияют газовые параметры – плотность  $\rho$ , температура  $T$ ; эти параметры (4) поддерживать одинаковыми в двух теплогенераторах сложнее. Они зависят от тепловыделения в топочном объёме, т.е. от качества горения, расхода топлива и др.

Амплитуда колебаний давления газа в устройстве пульсирующего горения и в других, аналогичных ему теплогенераторах, определяется геометрическими, акустическими, теплофизическими, эксплуатационными и т.д. факторами и может быть оценена следующим выражением [7]:

$$\Delta P = \frac{1}{4} \frac{Q_H^P G}{v f} \quad (5)$$

где  $Q_H^P$  – теплота сгорания топлива,  $G$  – расход топлива,  $v$  – объём камеры сгорания,  $f$  – частота колебаний.

Зависимости (3) (4) (5) показывают условия поддержания противофазной работы двух теплогенераторов с целью снижения звукового загрязнения среды. Если геометрические характеристики выполнить конструктивно несложно, то одинаковый топочный режим требует точного поддержания расхода топлива, его качества (включая распыл), воздуха, удаления продуктов сгорания, охлаждения топочной камеры, чистоты внутренних поверхностей, аэродинамического сопротивления, структуры внутренних потоков. Однако нужно подчеркнуть, что эти требования, как показывает практика, вполне удовлетворяются существующей автоматикой и компьютерным управлением, без существенного увеличения общих конструктивных и эксплуатационных расходов.

На рис. 6 показана противофазная комбинация двух теплогенераторов – камер пульсирующего горения, работающих в качестве топочного устройства на водогрейном котле. Топливо подаётся в камеры воспламенения 1, оно распределяется по ним автоматически регулятором 2 по описанным выше условиям. Регулятор 2 имеет датчики расхода, температуры, частоты, амплитуды колебаний. Воздух на горение подаётся аэродинамическими клапанами 3. Эти клапаны трубчатого типа смонтированы по одной прямой линии навстречу (по потоку газа/воздуха) друг

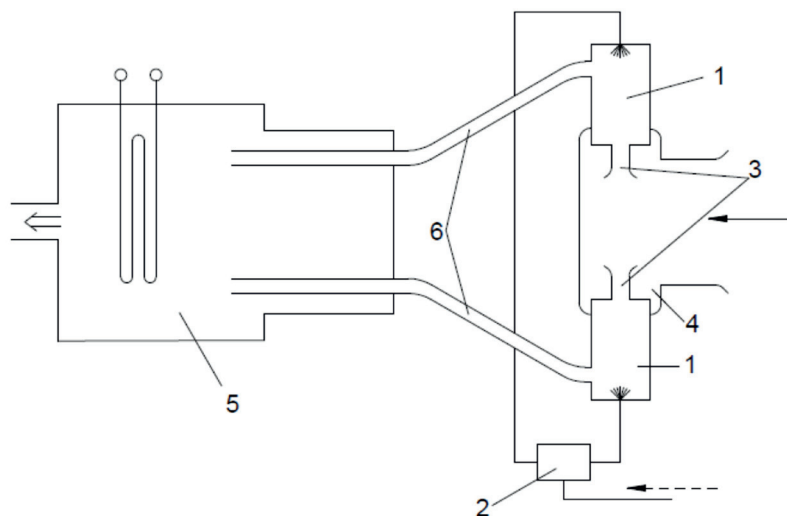


Рис. 6. Комбинационный метод подавления звука

другу. Общий воздухопровод 4 может иметь дутьевой вентилятор или просто выводиться наружу от обслуживаемого котла 5.

На рис. 6 стрелками обозначено: простая – воздухопровод, пунктирная – топливо, двойная – продукты сгорания. Излучение звука из аэродинамических клапанов 3 создается пульсирующими потоками воздуха, из резонансных труб 6 – газа, причем эти потоки синфазны из одной камеры пульсирующего горения, но противофазны по отношению к другой. При этом потоки среды сразу при запуске автоматически настраивают противоположные колебания давления, необходимо поддерживать это действие установкой одинаковых термических и газодинамических условий. Это создается действием регулятора подачи топлива (при прочих одинаковых условиях).

#### 4. Заключение

Антифоны как одно из средств борьбы с акустическим загрязнением окружающей среды, наряду с шумоглушением различного вида, звукоизоляцией, звукопоглощением, экранизацией является эффективным способом снижения отрицательных качеств ряда высокопроизводительных экономичных аппаратов и машин, в частности – теплотехнического огневого оборудования. Конструкционные и эксплуатационные затраты для достижения комфортных или технологических требований неизмеримо меньше должны быть экономического эффекта от действия защищаемого оборудования. Имеющаяся и разрабатываемая техника управления и оптимизации позволяет шире реализовать это направление.

Система антифонов, предлагаемых для устройств пульсирующего горения, может быть также использована в других случаях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Самойлов, Е.Н. Борьба с шумом и вибрацией в строительстве и на предприятиях стройиндустрии / Е.Н. Самойлов, В.В. Сафонов / Киев, «Будівельник». – 1979. – 152 стр.
2. Северянин, В.С. Пульсирующее горение – способ интенсификации теплотехнических процессов: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / В.С. Северянин. – Саратовский политехнический институт, 1987.
3. Северянин, В.С. Способ шумоглушения устройств пульсирующего горения. Патент РФ №14942, С1, F23C15/00, 2017г.
4. Политехнический словарь / Гл. ред. Ишлинский А.Ю. – М.: «Советская энциклопедия», 1989. – С. 137–138.
5. Попов, В.А. Технологическое пульсационное горение / В.А. Попов, В.С. Северянин, А.М. Аввакумов. – М.: «Энергоатомиздат», 1993. – С. 320.
6. Прикладные исследования вибрационного горения / В.Н. Подымов [и др.]. – Изд. Казанского ун-та, 1978. – С. 173–175.
7. Северянин, В.С. Оценка амплитуды давления при пульсирующем горении / В.С. Северянин, В.М. Яскевич // Журнал Известия ВУЗов СССР, серия «Энергетика», №2. – 1983. – С. 89–90.