

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЗВУКА НА ОТКРЫТОЕ ПЛАМЯ

В. И. Кондратьев, А. Л. Сушков

Известно [1, 2], что скорость турбулентного горения растет с увеличением интенсивности турбулентных пульсаций. Поэтому наложение на турбулентные пульсации акустических волн определенной частоты и тем самым увеличение колебательной скорости частиц в пламени приводит к существенному росту скорости турбулентного горения.

В топливных системах, состоящих из камеры предварительного сжигания топлива и камеры дожигания, автоколебания, возникающие в первой камере, могут передаваться по газоподводящим каналам во вторую и усиливаться в ней при дожигании топливной смеси.

Большое влияние на передачу колебаний из первой камеры во вторую оказывают акустические характеристики газоподводящих каналов. В связи с этим сконструированная авторами экспериментальная установка (рис. 1) была выполнена таким образом, что позволяла обеспечить воздействие звука на пламя только через газопроводящую трубку и определять резонансы трубок, имеющих сложную конструкцию, при условии прохождения через них потока. Регулирование расходов и соотношения в смеси горючего и окислителя осуществлялось редукторами. В качестве горючего использовалась пропан-бутановая смесь (98:2); окислитель — воздух, отбираемый из газобаллонной системы.

Объемное стехиометрическое соотношение пропан-бутановой смеси и воздуха $v_0 = 23,9$ [3]. Источник звука — громкоговоритель (тип 10-ГРД-5) помещался в герметичную камеру у входного конца газопроводящей трубки так, чтобы оси громкоговорителя и газоподводящей трубки совпадали. Амплитуда и частота гармонического сигнала задавались звуковым генератором (тип 2601), при этом амплитуда звукового давления на входе в газоподводящую трубку контролировалась микрофоном (тип 4137). Звуковое давление на выходе из трубки измерялось микрофоном точного импульсного шумомера (тип PSJ-101) с одновременной записью сигнала на самописец (тип 2305) или на магнитную ленту магнитофона (тип «МЗ»). Длины исследуемых газоподводящих трубок менялись дискретно: 100, 120, 130, 140, 150, 165, 180, 190, 200, 215, 230, 255 мм. Исследования диффузионно-кинетического пламени проводились на двухкомпонентной форсунке, которая схематически представлена на рис. 1. Форсунка состояла из центральной трубки для подачи горючего и рубашки окислителя. Центральный канал диаметром 6 мм имел на выходном конце сужение диаметром 3 и длиной 8 мм.

Диффузионный факел исследовался с помощью указанной трубки с сужением и трубки постоянного сечения диаметром 6 мм.

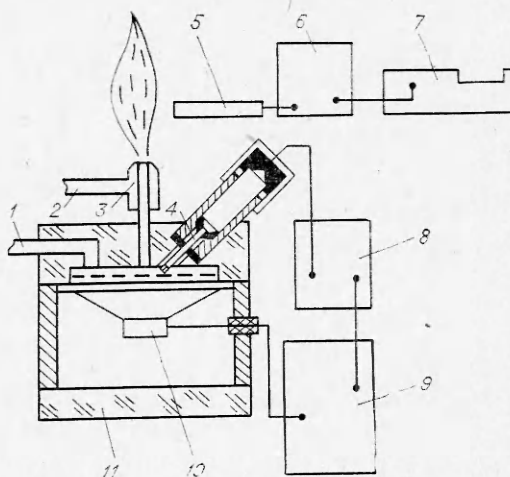


Рис. 1. Принципиальная пневмосхема установки и блок-схема измерительной аппаратуры.

1 — трубка подвода воздуха; 2 — трубка подвода газа; 3 — форсунка; 4, 5 — микрофоны; 6 — точный импульсный шумомер; 7 — самописец; 8 — микрофонный усилитель; 9 — звуковой генератор; 10 — громкоговоритель; 11 — герметичная камера.

Расходы горючего и окислителя изменялись в пределах: $Q_i = (0,05-4,35) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_o = (1,5-8,65) \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{с}$. Коэффициент избытка окислителя менялся от 0,25 до 1,20. Амплитуда звукового давления на входе в газоподводящую трубку в широком диапазоне частот поддерживалась постоянной.

Известно, что амплитуда звукового давления и скорость частиц на выходном конце трубки равны

$$\begin{aligned} p &= 2z_i \rho c \psi_0 / \Delta, \\ v &= 2S \rho c \psi_0 / \Delta, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\Delta = 2(z_0 z_i + S^2 \rho^2 c^2) \text{sh}(\gamma l) + 2S \rho c (z_0 + z_i) \text{ch}(\gamma l)$, z_0 — импеданс громкоговорителя, ψ_0 — переменная сила, действующая на газ в трубке; S — площадь проходного сечения трубки; $\gamma = \beta + ik$ — постоянная распространения; β — коэффициент затухания; ρc — волновое сопротивление; k — волновое число. Из уравнений (1) видно, что при сохранении постоянными ψ_0 и z_0 давление и скорость на выходном конце трубки будет зависеть только от z_i .

К сожалению, импеданс громкоговорителя является частотно-зависимым и поэтому сохранить постоянным z_0 можно было только в диапазоне частот от 200 до 1100 Гц. Для форсунки, выполненной в виде цилиндрической трубки, z_0 следует считать равным импедансу поршня z площади S , излучающего в открытое пространство. При низких частотах $z_{00} = 0$ и входной импеданс трубки

$$z_{00} \approx iS \rho c \text{tg} kl. \quad (2)$$

Здесь предполагается $\beta = 0$, $z_i = 0$, что возможно при $\lambda \gg \pi d$ и $z_0 = 0$ для указанного диапазона частот.

Из (2) нетрудно увидеть, что $z_{00} = 0$, когда $kl = n\pi$, т. е. $l/\lambda = n/2$, $n = 1, 2, 3, \dots$. Фактически $z \neq 0$, и поэтому резонансы трубок будут несколько отличаться от $n/2$. Для форсунки, состоящей из трубки с площадью поперечного сечения S , длиной l_1 и присоединенной к ней трубки 2 сечением σ , длиной l_2 , условие полуволнового резонанса (при $(S/\sigma)kl_2 \ll 1$) будет иметь вид

$$k[l_1 + (S/\sigma)kl_2] \approx n\pi.$$

На рис. 2 показана зависимость разности между интегральным уровнем звука, излучаемого диффузионно-кинетическим пламенем, озвученного на резонансной частоте трубки, и собственного шума турбулентного пламени ΔP от $\text{Re}(l/d)$. Значения Re рассчитывались по средней скорости потока и диаметру выходного участка трубки. Из рис. 2 следует, что постепенное увеличение $\text{Re}(l/d)$ приводит сначала к уменьшению ΔP , а потом к его возрастанию. По-видимому, такое резкое возрастание ΔP связано с приближением частоты звукового воздействия к Струхалевой частоте ($f_{st} = 0,2v/d$). При значениях $\text{Re}(l/d) > 140$ происходит срыв пламени, что связано со значительным увеличением колебательной скорости на срезе форсунки.

В случае диффузионного пламени уровень звукового давления на входе в трубу также поддерживался постоянным ($P = 120 \text{ дБ}$), но из-за ограниченности динамического диапазона на линии компенсации измерение уровня звукового давления на выходе из трубки производилось по точкам.

Характерные зависимости P от f для длин трубок 105 (а) и 190 мм (б) представлены

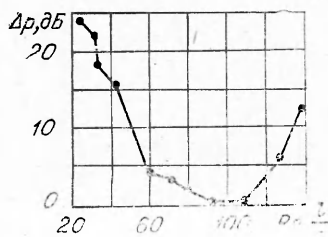


Рис. 2. Разность между уровнем звукового давления пламени, озвученного на резонансной частоте, и уровнем шума неозвученного пламени в зависимости от $\text{Re}(l/d)$.

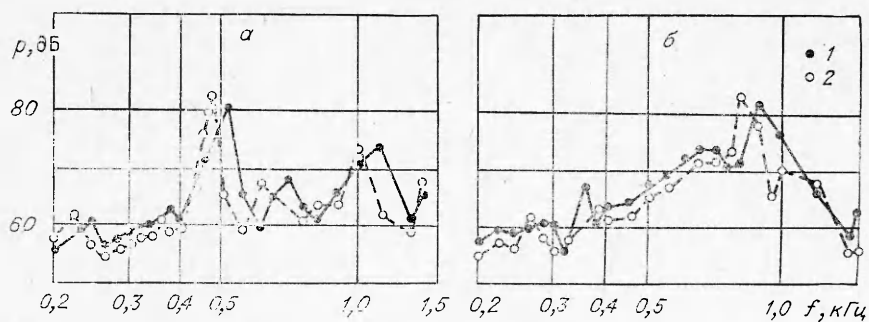


Рис. 3. Амплитудно-частотная зависимость звука на выходе газоподводящей трубки.

1 — без пламени; 2 — с пламенем.

на рис. 3. По графикам четко прослеживается уменьшение резонансных частот трубки при наличии пламени, что связано, очевидно, с присоединением дополнительной колеблющейся массы.

На рис. 4 нанесены экспериментальные данные по резонансной частоте для разных длин трубок как в случае наличия пламени, так и отсутствия его, а также зависимость f_p от l_0/d , рассчитанная для условия полуволнового резонанса [$l_0 = l_1 + (S/\sigma)l_2 = \lambda/2$] (l_0 — эквивалентная длина трубки с учетом концевой поправки). Видно, что характер изменения частоты как в первом случае, так и во втором один и тот же, но все резонансные частоты при наличии пламени лежат ниже, что следует учитывать при расчете акустических характеристик газоподводящих трактов.

Воздействие звука на пламя проявлялось не только в интенсификации горения и увеличении скорости турбулентного горения, но также в сужении области устойчивого горения, укорочении пламени и изменении его формы. На резонансных частотах эти эффекты максимальны. Согласно проведенным оценкам отношения пульсационной скорости u к средней скорости потока v , эффективное воздействие звука на пламя начинается с $u/v \approx 0,08$. При дальнейшем увеличении это воздействие усиливается и приводит сначала к отрыву пламени от форсунки, а затем к срыву его при $u/v \approx 0,3$.

Из сравнения спектров звукового давления, измеряемого на выходе из форсунки следует, что через форсунку с сужением в условиях резонанса могут передаваться колебания только основной частоты, а через форсунку без сужения наряду с колебаниями основной частоты могут передаваться колебания высших гармоник. Этот факт может быть использован для направленного изменения конструкции резонансных форсунок с целью регулирования отбора акустической энергии из газогенератора в камеру сгорания.

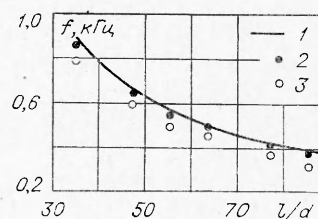


Рис. 4. Зависимость резонансной частоты от длины трубки.

1 — расчет; 2 — без пламени; 3 — с пламенем.

Акустический институт АН СССР,
Москва

Поступила в редакцию
28/1 1975

ЛИТЕРАТУРА

1. П. Грегус. Акуст. ж., 1962, 8, 4, 420.
2. В. Е. Дорошенко, В. И. Фурлетов, ФГВ, 1972, 8, 3.
3. Н. Ф. Дубовкин. Справочник по углеводородным топливам и их продуктам сгорания. М.—Л., ГЭИ, 1962.