

рости распространения пламени в зависимости от запаса и оказывает заметное влияние на зависимость скорости распространения от других условий горения.

В заключение следует отметить, что в первом приближении влияние исследованных факторов проявляется в изменении разных параметров фронта пламени. Их взаимодействие между собой может происходить лишь через излучение фронта пламени. Но поскольку теплообмен излучением не доминирует в исследованных условиях, можно принять при ориентировочных оценках, что они влияют на процесс горения независимо друг от друга. Зависимость скорости распространения пламени от условий горения может быть описана тогда следующей обобщенной формулой:

$$u = u_0 \frac{(1+W)(1-e^{-BM})}{(1+AW)(1-C\varphi)(1+D\rho_{ca})}$$

Значения u_0 , A , B , C , D для слоя сосновой хвои приведены выше.

Авторы благодарны Е. К. Кисляхову за помощь при проведении фото и киносъемки.

*Поступила в редакцию
21/Х1 1974*

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Сухинин, Э. В. Конев. В сб. Вопросы лесной пирологии. Красноярск, ИЛИД СО АН СССР, 1972, с. 7—51.
2. С. Е. Van Wagner. Forestry branch departmental publication, N 1229. Ottawa, 1968, p. 30.
3. М. А. Софронов. Лесные пожары в горах Южной Сибири. М., «Наука», 1967.
4. Т. В. Fang, F. R. Stewart. Combustion and Flame, 1963, 13, 4, p. 392.
5. М. А. Шешуков. Канд. дис. Красноярск, ИЛИД СО АН СССР, 1970.
6. Э. В. Конев, А. И. Сухинин. ФГВ, 1975, 11, 4.
7. Э. В. Конев, А. И. Сухинин, Е. К. Кисляхов. В сб. Вопросы лесной пирологии. Красноярск, ИЛИД СО АН СССР, 1972, с. 41—49.

УДК 621.43.056

ВЗАИМОСВЯЗЬ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ КАМЕР ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ ТИПА «РЕЗОНАТОРА ГЕЛЬМГОЛЬЦА»

И. М. Севастьянов, К. С. Танин

(Астрахань)

Несмотря на большое количество теоретических и экспериментальных исследований пульсирующего горения, взаимосвязь между основными параметрами рабочего процесса недостаточно изучена. Цель настоящей работы — установление соотношений между такими характеристиками пульсирующего горения, как амплитуда давления газа, частота, тепловыделение и геометрия камеры пульсирующего горения (КПГ). В качестве объекта исследования выбрана КПГ, имеющая конфигурацию известного в акустике резонатора Гельмгольца, состоящего из камеры с присоединенной к ней резонансной трубой.

Обобщенные безразмерные переменные для КПГ

Обычно резонатор Гельмгольца рассматривают как колебательную систему с сосредоточенными параметрами, т. е. считают, что силы упругости обусловлены в основном упругостью газа в камере, а силы инерции и сопротивления — колебаниями газа в резонансной трубе. Запишем уравнение продольных свободных колебаний газа, заключенного в резонансной трубе.

$$mx'' = F_r + F_y, \quad (1)$$

где m — масса колеблющегося газа; F_r — сила сопротивления, возникающая при движении газа в резонансной трубе; F_y — сила упругости газа в камере; x'' — ускорение по продольной оси резонатора. Примем за колеблющуюся массу газ, находящийся в резонансной трубе, тогда

$$m = \rho_r ls, \quad (2)$$

где ρ_r — плотность газа в трубе; l — длина трубы; s — площадь ее поперечного сечения.

Силы упругости и сопротивления в общем случае есть нелинейные функции смещения и скорости газа. Ограничиваясь рассмотрением относительно небольших амплитуд колебаний давления, соответствующих докритическим режимам течения газа, можно в первом приближении считать упругие силы линейной функцией смещения x [1]

$$F_y = - \frac{\rho_k c_k^2}{V} \cdot s^2 \cdot x, \quad (3)$$

где ρ_k — плотность газа в камере резонатора; c_k — скорость звука в газе, наполняющем камеру; V — объем камеры. Будем считать силы сопротивления нелинейными, пропорциональными квадрату скорости газа в резонансной трубе. Обоснованием такой точки зрения могут служить работы [2, 3]. В этом случае

$$F_r = - \frac{1}{2} \rho_r s \xi x'^2 \operatorname{sgn} x', \quad (4)$$

где ξ — суммарный коэффициент гидравлического сопротивления резонансной трубы, x' — скорость газа,

$$\operatorname{sgn} x' = \begin{cases} +1 & \text{при } x' > 0, \\ 0 & \text{при } x' = 0, \\ -1 & \text{при } x' < 0. \end{cases}$$

Подставив (2) — (4) в уравнение (1), получим

$$x'' + \frac{1}{2l} \xi x'^2 \operatorname{sgn} x' + \frac{\rho_k}{\rho_r} \cdot \frac{c_k^2 s}{lV} \cdot x = 0 \quad (5)$$

или в безразмерном виде

$$\bar{x}'' + \frac{1}{2} \xi \bar{x}'^2 \operatorname{sgn} \bar{x}' + \frac{\rho_k}{\rho_r} \cdot \frac{c_k^2 s}{lV} \cdot \tau^2 \bar{x} = 0, \quad (6)$$

где $\bar{x} = x/l$, $\bar{t} = t/\tau$ — безразмерные смещение и время; t — время; τ — период колебаний.

Приближенные решения уравнений такого типа известны в общей теории колебаний [4, 5]. Однако останавливаться на этих решениях не будем, поскольку основной целью исследования являются автоколебания при горении в КПГ, а уравнения свободных колебаний играют вспо-

могательную роль и служат лишь для нахождения некоторых безразмерных параметров, характеризующих приближенное подобие колебаний в резонаторах.

Согласно методике, изложенной в [6], из уравнения (6) можно получить два таких параметра $\Pi'_1 = \frac{1}{2} \xi$ и

$$\Pi'_2 = (\rho_k/\rho_r) (c_k^2 s/lV) \tau^2.$$

Дробь, входящая в выражение Π'_2 , представляет собой низшую собственную частоту резонатора Гельмгольца без учета сил сопротивления

$$f_0 = \frac{c_k}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{lV} \cdot \frac{\rho_k}{\rho_r}}.$$

Опустив числовые коэффициенты и учитывая известную связь между периодом и частотой, запишем полученные безразмерные параметры резонатора: $\Pi_1 = \xi$, $\Pi_2 = \varphi$, где $\varphi = f_0/f$, f — частота свободных колебаний в резонаторе с сопротивлением.

Рассмотрим автоколебательный процесс горения в КППГ. При автоколебаниях энергия диссипации, связанная с наличием гидравлического сопротивления, должна компенсироваться тепловыделением при сгорании топлива. Поэтому процесс поддержания автоколебаний можно представить формально наличием некоторой периодической вынуждающей силы [7], частота которой равна частоте свободных колебаний в резонаторе. Представим эту силу функцией тепловыделения q в единице объема камеры сгорания

$$F_v = F_v(q).$$

Добавив ее в уравнение свободных колебаний (1), получим уравнение движения газа в резонансной трубе при автоколебаниях

$$mx'' = F_r + F_y + F_v. \quad (7)$$

Из сравнения уравнений (1) и (7) следует, что для характеристики автоколебаний в КППГ к величинам Π_1 и Π_2 достаточно добавить параметр Π_3 , в состав которого должно входить тепловыделение q . Установить вид параметра Π_3 аналитически затруднительно. Поэтому из анализа размерностей был выбран безразмерный параметр наиболее простого вида

$$\Pi_3 = \frac{p_A f}{q_0},$$

где p_A — амплитуда давления в камере сгорания; q_0 — среднее по времени тепловыделение в камере.

При обработке опытных данных q_0 рассчитывалось по формуле

$$q_0 = \frac{m_r Q_H}{V}.$$

Здесь m_r — расход топлива, Q_H — низшая теплота сгорания топлива.

Анализ полученных безразмерных величин

Коэффициент гидравлического сопротивления ξ отражает степень демпфирования колебаний за счет диссипации энергии. При больших числах Рейнольдса ξ не зависит от Re . Ориентировочные оценки Re по амплитудам скорости газа, соответствующим амплитудам давления более 10^4 Па, показывают, что числа Re находятся в зоне автомодельности. Учитывая это и опираясь на исследования [2, 3], можно считать ξ по-

стоянным для заданной формы газового тракта КПП. При этом достаточно учесть лишь сопротивление резонансной трубы (где скорости газа велики), состоящее из местных сопротивлений на входе и выходе из резонансной трубы и сопротивления по длине трубы, т. е.

$$\xi = \xi_{\text{вх}} + \xi_{\text{вых}} + \lambda \frac{l}{d}.$$

Отметим, что ξ зависит от соотношений размеров КПП, т. е. в определенной степени отражает геометрическое подобие газовых трактов резонаторов.

Параметр φ может служить мерой нелинейности сил сопротивления и должен быть связан с параметром ξ , что вытекает из анализа уравнения (6) процесса свободных колебаний. Эта связь должна сохраняться и при автоколебаниях в процессе резонансного пульсирующего горения, когда частота автоколебаний равна собственной частоте колебательной системы, т. е. резонатора. Отсюда следует, что зависимость φ от ξ можно найти, исследуя свободные колебания в холодной камере, когда измерение температуры газа в камере, необходимое для вычисления средней скорости звука в газе, значительно упрощается и может быть более точным.

Безразмерный параметр $p_A f / q_0$ представляет собой отношение энергий колебаний и тепловыделения. Энергия тепловыделения в автоколебательном процессе расходуется на поддержание уровня колебаний за счет компенсации диссипации. Поэтому следует ожидать, что параметр $p_A f / q_0$ должен в значительной степени зависеть от гидравлического сопротивления, являющегося главной составляющей диссипативной функции.

Методика эксперимента

Экспериментальная установка состояла из КПП, имеющей охлаждаемую камеру сгорания и резонансную трубу с рубашкой водяного охлаждения. Среднее давление в камере измерялось дифференциальным манометром. Осциллографирование давления газа в камере проводилось тензометрическим мембранным охлаждаемым датчиком, сигнал от которого через усилительную тензостанцию подавался на вход шлейфового осциллографа типа Н-102. Осциллограф и тензостанция питались от стабилизатора напряжения. Воздух в КПП поступал через дроссельную шайбу с дифманометром, ресивер и механический лепестковый клапан. Топливо из бака заливалось в расходный бачок, установленный на весах, откуда через фильтр насосом с приводным электродвигателем через центробежную форсунку распыливалось в камеру сгорания. Средняя температура газа в камере измерялась термопарой типа НК-СА и фиксировалась потенциометром ПП-63. Температура воды на входе и выходе рубашек охлаждения измерялась термометрами, расход воды — на сливе мерными емкостями.

При исследовании свободных колебаний на холодной камере входной патрубков камеры заглушивался и между камерой и резонансной трубой устанавливались разрывные бумажные мембраны. Затем в камеру подавался сжатый воздух до давления, при котором мембрана разрывалась. Размеры КПП: диаметр камеры сгорания 0,148 м, ее объем $4,57 \cdot 10^{-3}$ м³, диаметр резонансной трубы 0,05 м. Длина резонансной трубы могла изменяться в пределах 0,38—6,00 м.

Эксперименты по пульсирующему горению проводились на дизельном топливе ДЛ с низшей теплотой сгорания $Q_n = 4,2 \cdot 10^7$ Дж/кг. Датчик давления тарировался статически до и после каждой серии измерений, состоявшей из 15—25 опытов. Собственная частота мембраны датчика равнялась 2500 Гц, вследствие этого динамическая тарировка дат-

чика не производилась. В каждой серии опытов по пульсирующему горению размеры КПГ были фиксированными, варьировалось лишь тепловыделение (5—6 режимов); затем длина резонансной трубы измерялась и проводилась следующая серия опытов. Каждый режим воспроизводился 3—5 раз. Опыты по исследованию свободных колебаний состояли из 5—6 измерений при постоянной длине резонансной трубы, после чего длина трубы изменялась. Погрешность экспериментов составляла 4—6%.

Результаты экспериментального исследования

Исследование свободных колебаний в резонаторе Гельмгольца показало, что в диапазоне амплитуд давления затухающих колебаний порядка $5 \cdot 10^4$ — $3 \cdot 10^3$ Па частота колебаний не зависит от амплитуды, и параметр φ зависит только от длины резонансной трубы. Поскольку изменение длины трубы связано с изменением ее коэффициента гидравлического сопротивления, результаты опытов представлены в виде (рис. 1):

$$\varphi = \exp(0,06\xi). \quad (8)$$

В результате исследования автоколебательного процесса горения в КПГ установлено, что величины параметров $p_{\Delta f}/q_0$ и φ также зависят только от длины резонансной трубы и не зависят (при постоянной длине трубы) от тепловыделения q_0 . Пределы изменения q_0 составляли $6,4 \times 10^6$ — $13,8 \cdot 10^6$ Вт/м³, что соответствовало диапазону устойчивости автоколебаний.

Считая, что φ в неявном виде через частоту f входит в состав параметра $p_{\Delta f}/q_0$, и учитывая, что изменение φ относительно мало, результаты опытов можно представить зависимостью (рис. 2)

$$p_{\Delta f}/q_0 = 0,14 \exp(-0,28\xi). \quad (9)$$

На основании проведенной работы можно сделать следующие выводы.

1. В исследованном диапазоне амплитуд давления газа (до $5 \cdot 10^4$ Па) нелинейность свободных колебаний в резонаторе Гельмгольца связана в основном с нелинейностью сил гидравлического сопротивления, а не с нелинейностью упругих сил. В противном случае было бы заметно влияние амплитуды колебаний на частоту, тогда как при нелинейности сил неупругого сопротивления амплитуда не влияет существенно на частоту [8]. Этот вывод свидетельствует в пользу качественной верности уравнения (5).

2. Анализ эмпирической формулы (8) показывает, что в предельном случае при $\xi=0$ (резонатор без неупругого сопротивления) приходим к известной формуле основной частоты резонатора Гельмгольца. Формула (8) может быть использована и для расчета частоты авто-

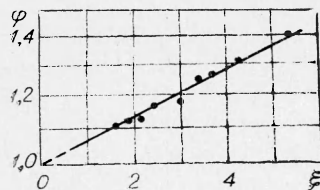


Рис. 1. Зависимость параметра φ от коэффициента гидравлического сопротивления.

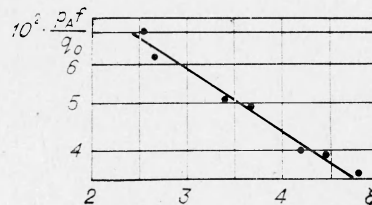


Рис. 2. Зависимость параметра $p_{\Delta f}/q_0$ от коэффициента гидравлического сопротивления.

