

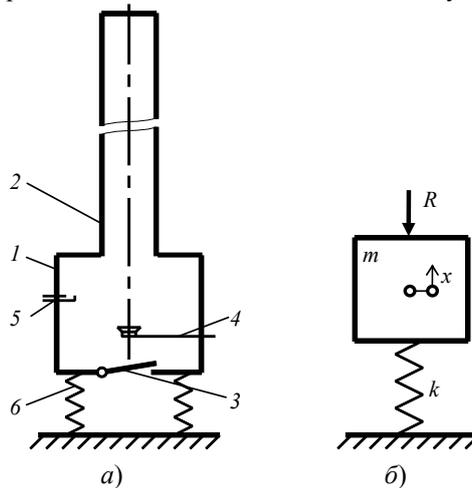
### ВИБРАЦИЯ АППАРАТА ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ НА УПРУГОМ ОСНОВАНИИ

Ярко выраженная периодичность изменения основных параметров в аппаратах пульсирующего горения (АПГ) ведет к снижению расхода топлива и вредных выбросов в окружающую среду, позволяет усовершенствовать ряд технологических процессов за счет использования высокоскоростного пульсирующего потока теплоносителя и акустических колебаний. Интенсифицирующее действие пульсирующих потоков достаточно хорошо известно и сводится, прежде всего, к развитию турбулентности и уменьшению толщины пограничного слоя. Вибрация элементов в установках пульсирующего горения, по данным Федотова [1], может достигать 0,5 мм и, в случае теплообмена непосредственно через стенки элементов аппарата пульсирующего горения, способна в несколько раз увеличить его интенсивность.

В то же время в научно-технической литературе недостаточно освещены вопросы, связанные с расчетом параметров вибрации устройств пульсирующего горения. Это обстоятельство сдерживает реализацию совмещенных технологических процессов с тепловым и вибрационным воздействием на перерабатываемый продукт.

Рассмотрим аппарат пульсирующего горения с механической клапанной системой, установленный на упругих опорах. В этом случае реализуются лишь вертикальные колебания под действием переменной во времени реактивной силы, возникающей при истечении продуктов сгорания. На рис. 1 представлена схема АПГ, установленного на упругом основании, и его эквивалентная расчетная схема.

Цикл работы такого аппарата (рис. 1, а) можно представить следующим образом. В момент запуска, внутрь камеры сгорания 1 поступают топливо через систему подачи 4 и воздух от внешнего источника. Топливная смесь воспламеняется от электрической свечи 5. В результате сгорания повышается давление, закрывается клапанная система 3, и выхлопные газы с высокой скоростью расширяются в резонансную трубу 2. Инерционное истечение продуктов сгорания по длинному тракту резонансной трубы вызывает разрежение в камере 1, что приводит к открытию воздушных клапанов 3 и поступлению новой порции воздуха, которая смешивается с топливом, подаваемым непрерывно. Вновь образованная топливная смесь самовоспламеняется от оставшихся продуктов сгорания. Таким образом, цикл работы повторяется. После выхода АПГ на устойчивый режим пульсирующего горения электрическая свеча и внешняя подача воздуха отключаются.



**Рис. 1. Аппарат пульсирующего горения и расчетная схема для определения параметров вибрации:**

1 – камера сгорания; 2 – резонансная труба; 3 – клапанная система; 4 – система подачи топлива; 5 – электрическая свеча; 6 – упругое основание

В ряде теоретических и экспериментальных исследований [2, 3] установлено, что истечение продуктов сгорания из резонансной трубы аппарата пульсирующего горения носит периодический характер со стационарной составляющей, и скорость потока на выходе, фактически, подчиняется закону

$$w = w_m + w_a \cdot \sin(\omega t), \quad (1)$$

где  $w_m$  – средняя скорость продуктов сгорания;  $w_a$  – амплитуда периодической составляющей скорости истечения;  $\omega$  – круговая частота собственных колебаний газового тракта АПГ, на которой аппарат работает в резонансном режиме. При этом в АПГ резонансного типа амплитудная составляющая скорости принимает значения, большие средней ( $w_a > w_m$ ), т.е. в определенные моменты времени поток замедляется и меняет направление на противоположное. Это явление объясняется возникновением разрежения в камере сгорания.

Рассматривая расчетную схему АПГ (рис. 1, б) без учета диссипативных сил, легко составить дифференциальное уравнение движения АПГ под действием реактивной силы, возникающей от выхлопа продуктов сгорания из резонансной трубы:

$$m\ddot{x} = -kx - R \quad \text{или} \quad \ddot{x} + \frac{k}{m}x = -\frac{R}{m}, \quad (2)$$

где  $m$  – масса АПГ;  $k$  – коэффициент жесткости;  $R$  – реактивная сила.

Реактивная сила при дозвуковом режиме истечения может быть найдена по выражению

$$R = Gw, \quad (3)$$

где  $G = \rho wF$  – массовый расход продуктов сгорания плотностью  $\rho$  на выходе из резонансной трубы с площадью сечения  $F$ .

Подставляя значение  $R$  из уравнения (3) с учетом закона изменения скорости (1) в дифференциальное уравнение движения (2), получим линейное неоднородное уравнение, которое после тригонометрических преобразований можно свести к виду:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = A_1 \cos(2\omega\tau) + A_2 \sin(\omega\tau) + A_3; \quad (4)$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}; \quad A_1 = \frac{\rho F w_a^2}{2m}; \quad A_2 = -\frac{2\rho F w_m w_a}{m}; \quad A_3 = -\frac{\rho F}{m} \left( w_m^2 + \frac{w_a^2}{2} \right). \quad (5)$$

Для нахождения закона движения АПГ под действием реактивной силы необходимо отыскать общее решение линейного однородного уравнения  $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$ , а также частные решения уравнений  $\ddot{x} + \omega_0^2 x = A_1 \cos(2\omega\tau)$ ,  $\ddot{x} + \omega_0^2 x = A_2 \sin(\omega\tau)$  и  $\ddot{x} + \omega_0^2 x = A_3$ .

Используя теорему о суперпозиции решений линейных неоднородных уравнений со специальной правой частью, в конечном итоге несложно получить:

$$x = C_1 \cos(\omega_0\tau) + C_2 \sin(\omega_0\tau) + \frac{A_1}{\omega_0^2 - 4\omega^2} \cos(2\omega\tau) + \frac{A_2}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin(\omega\tau) + \frac{A_3}{\omega_0^2}. \quad (6)$$

С учетом начальных условий  $x(0) = 0$ ,  $\dot{x}(0) = 0$  постоянные интегрирования в уравнении (6) определяются по выражениям:

$$C_1 = -\left( \frac{A_1}{\omega_0^2 - 4\omega^2} + \frac{A_3}{\omega_0^2} \right); \quad C_2 = -\frac{A_2\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)\omega_0}.$$

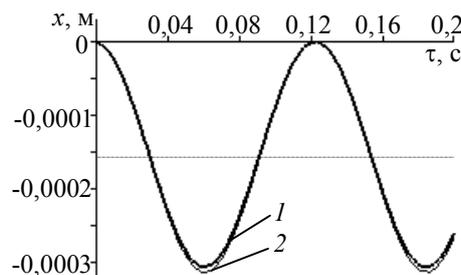
Следует заметить, что дифференциальное уравнение (4) с условными обозначениями (5) и полученное решение (6) не в полной мере описывают вибрационное перемещение АПГ на упругом основании под действием выхлопа продуктов сгорания. Так как в моменты времени, когда происходит обратное течение газов в резонансной трубе АПГ, реактивная сила отсутствует. Математически это означает, что закон вибрации АПГ должен определяться при тех же начальных условиях из дифференциального уравнения

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = R, \quad R = \begin{cases} A_1 \cos(2\omega\tau) + A_2 \sin(\omega\tau) + A_3, & \text{при } w_m + w_a \sin(\omega\tau) > 0; \\ 0, & \text{при } w_m + w_a \sin(\omega\tau) < 0. \end{cases} \quad (7)$$

Несмотря на это, с помощью уравнения (4) и его решения (6) можно сделать выводы о характере вибрационного перемещения АПГ:

- 1) движение системы определяется суммой колебаний с собственной частотой механической системы «масса-пружина»  $\omega_0$  и колебаний, зависящих от частоты вынуждающей силы  $\omega$ ;
- 2) на практике реализуются колебания с собственной частотой  $\omega_0$ , так как частота вынуждающей силы  $\omega$  для устройств пульсирующего горения гораздо выше собственной частоты механической системы  $\omega_0$ ;
- 3) колебания реализуются около нового положения, отличающегося от статического положения равновесия в начальный момент времени;
- 4) амплитуда колебаний зависит, в первую очередь, от скоростных параметров потока продуктов сгорания на выходе из резонансной трубы  $w_m$  и  $w_a$ ;
- 5) регулирование параметров вибрации для конкретного АПГ возможно с помощью изменения: жесткости упругой опоры, массы АПГ и расхода топлива.

На рис. 2 представлены параметры вибрации, рассчитанные по выражению (6) и определенные численным решением уравнения (7), для АПГ с тепловой мощностью 20 кВт, работающего на природном газе:  $m = 7$  кг,  $k = 18\,000$  Н/м,  $\rho = 0,41$  кг/м<sup>3</sup>,  $w_m = 50$  м/с,  $w_a = 78$  м/с;  $\omega = 930$  рад/с (148 Гц),  $F = 0,0012$  м<sup>2</sup>.



**Рис. 2. Параметры вибрации АПГ:**  
1 – численное решение уравнения (7);  
2 – аналитическое решение (6)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федотов, А.В. Об использовании пульсирующего горения для контактного нагрева воды / А.В. Федотов // Известия вузов. Сер. Энергетика. – 1991. – № 10. – С. 92 – 96.
2. Северянин, В.С. Особенности аэродинамики устройств пульсирующего горения / В.С. Северянин // Научные и прикладные проблемы энергетики : сб. науч. тр. – Минск : Высшая школа, 1978. – Вып. 5. – С. 25 – 29.
3. Баранов, А.А. Определение скоростных параметров газовых потоков в камере пульсирующего горения / А.А. Баранов // Труды ТГТУ. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004. – Вып. 15. – С. 74 – 78.

*Кафедра «Техника и технологии машиностроительных производств»*