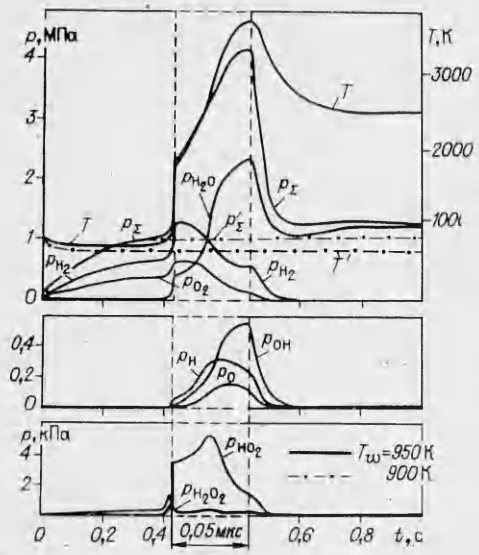

Рис. 3.

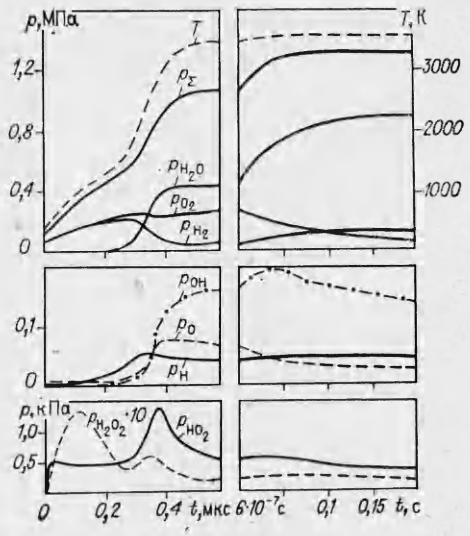

Рис. 4.

бом можно исследовать не только динамику процессов горения смеси O_2—H_2 в реакторе идеального смешения, но и другие химические процессы в газовой фазе при условии, что известен их кинетический механизм и его характеристики. В целом можно отметить, что данная методика применима для исследования нестационарных процессов химического взаимодействия газов в системах, позволяющих представить их целиком или поэлементно в виде реактора идеального смешения.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Д. А. Франк-Каменецкий.** Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967.
2. **Я. Б. Зельдович, Г. И. Баренблатт, В. Б. Либрович и др.** Математическая теория горения и взрыва. М.: Наука, 1980.
3. **В. Е. Алемасов, А. Ф. Дрегалин, В. М. Ермолаев и др.**— В кн.: Химическая физика процессов горения и взрыва. Кинетика химических реакций. Черноголовка, 1977.
4. **В. Т. Гонтковская, И. С. Гордополова, В. Я. Басевич.** ФГВ, 1981, 17, 1, 64.
5. **В. И. Димитров.** Простая кинетика. Новосибирск: Наука, 1982.
6. **Теоретические** основы и конструирование численных алгоритмов задач математической физики/Под ред. К. И. Бабенко. М.: Наука, 1979.
7. **В. В. Азатян, А. М. Коган, М. Г. Нейгауз и др.** Кинетика и катализ, 1975, XVI, 3, 577.
8. **Eugene P. Dougherty, Hershel Rabitz.** J. Chem. Phys., 1980, **72**, 12, 6571.

Поступила в редакцию 16/I 1984,
после доработки — 17/II 1986

РЕЗОНАНСНЫЕ СВОЙСТВА И УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА В ПРОТОЧНОЙ КАМЕРЕ С ВОЛНАМИ ЭНТРОПИИ (концентрации)

Б. Ф. Гликман, А. С. Лосенков

(Москва)

Введение. Вопрос о влиянии энтропийных волн на устойчивость процесса в проточной камере обсуждался в [1—3]. Волны энтропии возникают в камерах сгорания, топках, проточных химических реакторах и т. д. В большинстве случаев эффекты, связанные с энтропийными волнами, рассматриваются в качестве дополнительных факторов, влияющих на акустические свойства системы. В данной работе рассматривается новый ме-

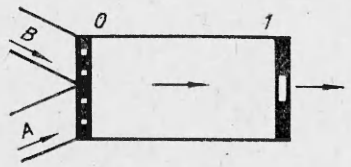

Рис. 1. Схема течения в камере.

ханизм возникновения низкочастотных колебаний, а при их отсутствии — резонансных явлений в проточных камерах с волнами энтропии, не связанный с акустическими свойствами столба газа в камере, а определяемый взаимодействием динамических свойств камеры как емкости и эффектов, вызываемых волнами энтропии (концентрации).

Применительно к камерам сгорания и топкам волны энтропии возникают в основном за счет колебаний температуры продуктов сгорания. В других случаях — в химических реакторах, смесителях и т. д.— возможно, определяющими будут колебания концентрации образующейся смеси, приводящие к изменениям ее газовой постоянной. Эффекты, связанные с колебаниями концентрации и температуры аналогичны. Ниже будут рассмотрены только последние. Аналогичные зависимости можно получить и для случая колебаний концентрации смеси [4]. Колебания или резонансные явления в камерах сгорания, топках, устройствах химической технологии могут приводить к вибрационным разрушениям элементов конструкции. Для определенности рассматривается цилиндрическая камера сгорания (топка), в которую поступают горючее и окислитель, временем горения которых пренебрегаем.

Постановка задачи. Рассмотрим схему течения в камере, представленную на рис. 1. Жидкости A (окислитель) и B (горючее) поступают через форсунки в цилиндрическую камеру, мгновенно сгорают в начальном ее сечении, а образовавшийся в результате сгорания газ вытекает через короткое сопло со сверхкритическим перепадом давления.

Если пренебречь вязкостью и теплопроводностью, нестационарное, неизотермическое, одномерное, адиабатическое течения совершенного газа в цилиндрической камере описываются уравнениями

$$\begin{aligned} &\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial x} = 0,\\ &\frac{\partial \rho}{\partial t} + u\frac{\partial \rho}{\partial x} + \rho\frac{\partial u}{\partial x} = 0,\\ &\frac{\partial s}{\partial t} + u\frac{\partial s}{\partial x} = 0, \end{aligned} \tag{1}$$

где u, ρ, p, s — скорость, плотность, давление и энтропия; x — координата вдоль оси камеры; t — время.

Для анализа устойчивости процесса и определения динамических характеристик камеры достаточно ограничиться линейным приближением, введя отклонения параметров в форме малых вариаций параметров течения:

$$\delta u' = u - \bar{u}, \quad \delta p' = p - \bar{p}, \quad \delta\rho' = \rho - \bar{\rho}, \quad \delta s' = s - \bar{s},$$

где $\bar{u}$, $\bar{p}$, $\bar{\rho}$, $\bar{s}$ — средние значения скорости, давления, плотности и энтропии; $\delta u'$, $\delta p'$, $\delta\rho'$, $\delta s'$ — малые вариации скорости, давления, плотности и энтропии, для которых система (1) преобразуется к следующему виду:

$$\begin{aligned} &\frac{\partial \delta u'}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \delta u'}{\partial x} + \frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \delta p'}{\partial x} = 0,\\ &\frac{\partial \delta\rho'}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \delta\rho'}{\partial x} + \bar{\rho}\frac{\partial \delta u'}{\partial x} = 0,\\ &\frac{\partial \delta s'}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \delta s'}{\partial x} = 0. \end{aligned} \tag{2}$$

Исключим из (2) $\delta\rho'$. Для этого воспользуемся термодинамическими соотношениями

$$s = c_v \ln T - R\ln p + \text{const}, \quad p = \rho RT. \tag{3}$$

Здесь R — газовая постоянная; c_p — удельная теплоемкость при постоянном давлении; T — температура газа.

После линеаризации соотношений (3) найдем

$$\frac{\delta s'}{c_p} = \frac{\delta T'}{\bar{T}} - \frac{(\varkappa - 1)}{\varkappa}\frac{\delta p'}{\bar{p}}, \tag{4}$$

$$\frac{\delta p'}{\bar{p}} = \frac{\delta \rho'}{\bar{\rho}} - \frac{\delta T'}{\bar{T}} \tag{5}$$

($\bar{T}$ — средняя температура газа; $\varkappa$ — показатель адиабаты).

При линеаризации (3) полагали, что $c_p = \text{const}$, $R = \text{const}$, т. е. пренебрегали изменением состава газа и зависимостью теплоемкости от температуры. Исключая $\delta\rho'$ и $\delta T'$ из (2), (4), (5), получим

$$\begin{aligned}
&\frac{\partial \delta u'}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \delta u'}{\partial x} + \frac{1}{\bar{\rho}}\frac{\partial \delta p'}{\partial x} = 0,\\
&\frac{\partial \delta p'}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \delta p'}{\partial x} + \bar{\rho}\bar{a}^2\frac{\partial \delta u'}{\partial x} = 0,\\
&\frac{\partial \delta s'}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial \delta s'}{\partial x} = 0
\end{aligned} \tag{6}$$

($\bar{a} = \sqrt{\varkappa RT}$ — скорость звука в невозмущенном потоке).

Метод решения. Для определения резонансных частот и исследования устойчивости системы используем метод комплексных амплитуд, широко применяющийся в теории колебаний. Для этого ищем частные периодические решения системы уравнений (6) в следующей форме:

$$\delta u' = \delta u \exp(i\omega t), \quad \delta p' = \delta p \exp(i\omega t), \quad \delta s' = \delta s \exp(i\omega t),$$

где δu, δp, δs — амплитуды вариаций скорости, давления и энтропии (величины в общем случае комплексные); ω — круговая частота колебаний; $i^2 = -1$.

Для столба газа с энтропийными волнами частное периодическое решение системы (6) можно записать в форме уравнений шестиполюсника [4]:

$$\begin{aligned}
\delta u(0) &= y_{11}\delta p(0) + y_{12}\delta p(1),\\
\delta u(1) &= y_{21}\delta p(0) + y_{22}\delta p(1),\\
\delta s(1) &= y_{33}\delta s(0),
\end{aligned} \tag{7}$$

$$y_{11} = \frac{\exp(i\omega L/(\bar{a}-\bar{u})) + \exp(-i\omega L/(\bar{a}+\bar{u}))}{\bar{\rho}\,\bar{a}\,[\exp(i\omega L/(\bar{a}-\bar{u})) - \exp(-i\omega L/(\bar{a}-\bar{u}))]},$$

$$y_{12} = -\frac{2}{\bar{\rho}\,\bar{a}\,[\exp(i\omega L/(\bar{a}-\bar{u})) - \exp(-i\omega L/(\bar{a}+\bar{u}))]},$$

$$y_{21} = \frac{2\cdot\exp(i\omega L/(\bar{a}-\bar{u}) - i\omega L/(\bar{a}+\bar{u}))}{\bar{\rho}\bar{a}\,[\exp(i\omega L/(\bar{a}-\bar{u})) - \exp(-i\omega L/(\bar{a}-\bar{u}))]},$$

$$y_{22} = -y_{11}, \quad y_{33} = \exp(-i\omega L/\bar{u}),$$

L — длина камеры; $\delta u(0)$, $\delta u(1)$, $\delta p(0)$, $\delta p(1)$, $\delta s(0)$, $\delta s(1)$ — амплитуды вариации скорости, давления и энтропии на входе ($x/L = 0$) и выходе камеры ($x/L = 1$).

От переменных $\delta u(0)$, $\delta u(1)$ перейдем к переменным $\delta G(0)$, $\delta G(1)$ (амплитуды вариаций расхода газа на входе и выходе камеры). Для этого используем выражение для расхода $G = puF/RT$ (G — расход газа, F — площадь проходного сечения тракта), после линеаризации которого получим

$$\delta G = \frac{\bar{G}}{\bar{p}}\delta p + \frac{\bar{G}}{\bar{u}}\delta u - \frac{\bar{G}}{\bar{T}}\delta T. \tag{8}$$

Из (4), (7), (8) найдем другую форму записи уравнений (7), связывающих отклонения параметров при малых гармонических колебаниях газа