

03;12

## **Роль вихревой структуры в механизме поддержания тепловых автоколебаний**

© В.П. Самсонов

Сургутский государственный университет  
E-mail: svp@iff.surgu.ru

*Поступило в Редакцию 16 декабря 2002 г.*

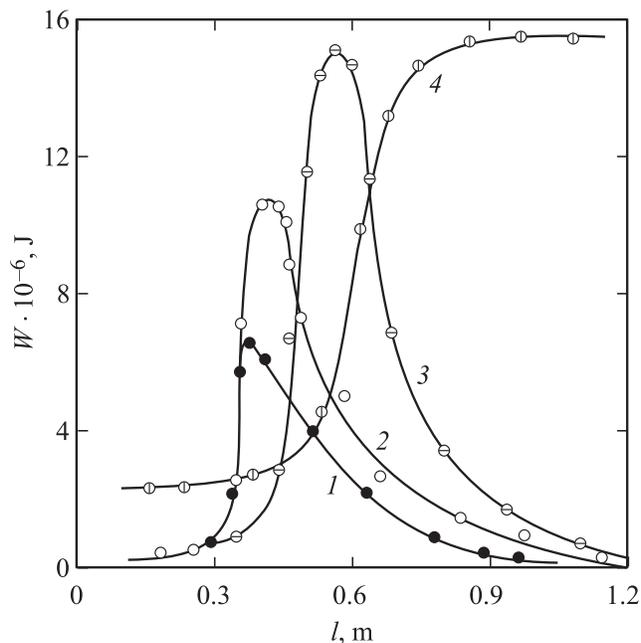
Исследовано вихревое течение газа при возбуждении тепловых автоколебаний в „поющем“ пламени и трубе Рийке. Предложен метод измерения распределения энергии вихревого движения вдоль трубы-резонатора. Обнаружено, что вихревое движение газа происходит в области нахождения теплового источника по длине, не превышающей 3–4 диаметра трубы-резонатора. Показано, что при удлинении трубы-резонатора увеличивается относительная доля энергии вращательного движения в полной механической энергии столба газа, совершающего акустические колебания.

Известно [1], что тепловые автоколебания столба газа в трубе-резонаторе, возбуждаемые тепловыделением в „поющем“ пламени или другом тепловом источнике, обладает общей характерной особенностью. Величина тепловой мощности, необходимой для возбуждения акустических колебаний, уменьшается при увеличении длины трубы-резонатора при прочих равных условиях опыта. Физические модели, объясняющие это явление, противоречивы. Механизмы реализации обратной связи между колебаниями давления и скоростью тепловыделения также до сих пор не поняты. В „поющем“ пламени и в трубе Рийке они отличаются ввиду зависимости скорости горения как от давления, так и от температуры. Скорость же тепловыделения от химически нейтрального теплового источника, например электрической

спирали, зависит лишь от скорости конвективной передачи тепла. В работах [2–4] показано, что возбуждение акустических колебаний сопровождается формированием вихревых структур вблизи пламени. Знание распределения энергии вихревого движения газа вдоль трубы-резонатора необходимо для понимания роли вихревой структуры при теплообмене между тепловым источником и газом, совершающим акустические колебания.

Измерения энергии вихревого движения газа в ограниченной по длине области трубы проводили методом вставной гильзы, описанным в [5]. Длину вставной, подвижной цилиндрической гильзы устанавливали равной внутреннему диаметру трубы (0.085 м), так как, согласно результатам работ [2–4], внутренний диаметр трубы определяет максимальный размер вихревой ячейки. Масса гильзы равнялась 24.5 г. Гильзу подвешивали на пружине с коэффициентом жесткости  $k \leq 0.14$  N/m. Гильза могла перемещаться вдоль трубы от нижнего конца до верхнего. Измерения вертикального смещения  $h_1$  и  $h_2$  гильзы в каждом начальном положении относительно концов трубы производили дважды: в момент возбуждения колебаний и при максимальной амплитуде колебаний. Величину энергии вращательного движения определяли из соотношения  $W = k \cdot (h_1 - h_2)^2$ . Труба-резонатор состояла из двух секций. Неподвижная — длиной 1.5 м укреплялась жестко на стойке. На ее верхнюю половину надевали перемещаемую секцию — трубу-насадок длиной 1 м. Внутренний диаметр подвижной секции превышал внешний диаметр неподвижной секции на  $2 \cdot 10^{-3}$  м. В зазор между секциями добавляли глицерин с целью исключения дренажа продуктов горения в окружающую атмосферу и предотвращения вследствие этого падения давления внутри трубы. Перемещение подвижной секции позволяло изменять общую длину трубы-резонатора, а следовательно, и период колебания во время одного опыта. Интервал изменения длины трубы-резонатора равнялся  $1.5 \div 2.3$  м.

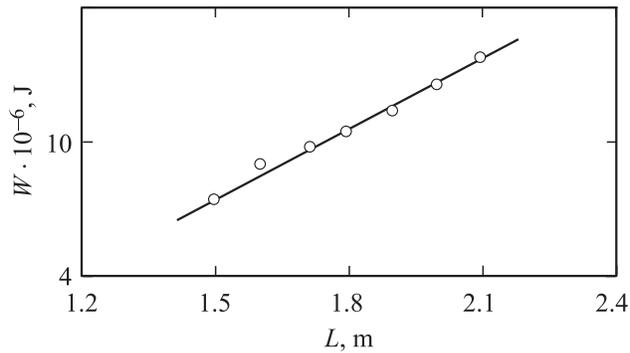
На рис. 1 представлены результаты измерений зависимости энергии вращательного движения газа в трубе от текущей координаты  $l$  нижнего конца подвижной гильзы, полученные при различной длине трубы-резонатора. Координату  $l$  отсчитывали от нижнего конца трубы-резонатора. Тепловым источником являлось „поющее“ пламя. Из графиков 1–3 зависимостей  $W(l)$  видно, что основная энергия вихревого движения сосредоточена вблизи „поющего“ пламени. Вихревое течение при удалении от пламени переходит в потенциальное из-за влияния сил



**Рис. 1.** Распределение кинетической энергии вращательного (1–3) и поступательного движения газа (4) вдоль трубы-резонатора в „поющем“ пламени. 1, 2, 3 — длина трубы-резонатора  $L = 1.5$  м,  $L = 1.8$  м,  $L = 2.3$  м. Зависимость 4 получена при  $L = 2.3$  м.

вязкого трения. Смещение максимума связано с тем, что само пламя перемещали таким образом, чтобы оно находилось в нижней четверти трубы-резонатора. График 4 иллюстрирует изменение кинетической энергии поступательного движения  $U(l)$ , которая возрастает скачком вблизи пламени до некоторого постоянного значения. Изменение  $U(l)$  связано с тепловым расширением газа и ускорением под действием архимедовой силы, уравновешиваемой силами вязкого трения.

Перемещение подвижной секции трубы-резонатора во время опыта позволяет получить новые данные о соотношении энергий поступательного и вращательного движения газа. В работе [6] показано, что в некоторых незамкнутых механических колебательных системах при



**Рис. 2.** Зависимость изменения энергии вращательного движения газа при медленном удлинении трубы-резонатора.

медленном изменении параметров системы произведение полной механической энергии  $E$  на период колебания  $T$  может являться адиабатическим инвариантом:  $E \cdot T = \text{const}$ . Удлиняя трубу-резонатор во время колебаний столба газа, следует ожидать появления адиабатических инвариантов и для „поющего“ пламени. Согласно [7], энергия звуковых колебаний столба газа в трубе связана со средней скоростью поступательного движения газа на конце трубы  $\bar{v}_0$  соотношением  $I = c\rho \int \bar{v}_0^2 dS$ . Здесь  $I$  — интенсивность звука, равная средней энергии колебаний столба газа в трубе в единицу времени,  $\rho$  — плотность газа,  $S$  — площадь поперечного сечения трубы,  $c$  — скорость звука в продуктах горения. Относительное изменение интенсивности звука при медленном удлинении трубы в системе отсчета, связанной с трубой, можно представить в виде:  $\Delta I/I = -4u/\bar{v}_0$ , где  $u$  — скорость удлинения трубы. Если скорость  $u$  мала по сравнению с  $\bar{v}_0$ , то для относительного изменения периода колебаний можно получить выражение:  $\Delta T/T = 4Tu/v_0$ . Сравнивая последние два выражения, получим  $I \cdot T = \text{const}$ . Из полученного соотношения следует, что при увеличении длины трубы-резонатора интенсивность звуковых колебаний уменьшается, так как увеличивается период колебаний. Противоречие с известным фактом более легкого возбуждения акустических колебаний и увеличения их амплитуды с увеличением длины трубы при одинаковой тепловой мощности может быть объяснено тем, что доля энергии вращательного движения в полной механической энергии газа возрастает.

Для проверки этого предположения проводили экспериментальное измерение энергии вращательного движения при выдвигании подвижной секции трубы-резонатора со скоростью  $\approx 0.01$  m/s. Скорость поступательного движения продуктов горения равнялась  $\approx 0.2$  m/s, период колебаний изменялся от  $4 \cdot 10^{-3}$  до  $6.8 \cdot 10^{-3}$  s. Положение вставной гильзы относительно пламени оставляли постоянным. На рис. 2 представлены результаты измерения зависимости  $W(L)$ . Здесь  $L$  — текущее значение длины трубы-резонатора. Из графика зависимости видно, что в исследованном интервале изменения  $L$  происходит пропорциональное увеличение энергии вращательного движения. Результаты, представленные на рис. 1, 2, качественно совпадают с теми, что получены в трубе Рийке. Это говорит о том, что механизмы обратной связи, реализующие принцип Рэля возбуждения тепловых автоколебаний, связаны с формированием вихревых структур в потоке газа.

## Список литературы

- [1] *Маркштейн Дж.Г.* Нестационарное распространение пламени. М.: Мир, 1987. 430 с.
- [2] *Афанасьев В.В., Аbruков С.А., Кидин Н.И.* и др. // Физика горения и взрыва. 1995. Т. 31. № 4. С. 34–40.
- [3] *Афанасьев В.В.* // Физика горения и взрыва. 1999. Т. 35. № 4. С. 43–52.
- [4] *Luin S.V., Alexandrov D.C., Afanasyev V.V.* Application of holographic Interferometry to the Investigation in two Large-Scale Coherent Vortical Structure occurring during in Non-stationary combustion // CD-ROM Proc. of VSJ-SPIE98 Intern. Conference on Optical Technologies and Image Processing in Fluid, Thermal and Combustion Flow, AB074. Jokohama, Japan, 1998.
- [5] *Самсонов В.П.* // Письма в ЖТФ. 2003. Т. 29. В. 2. С. 1–5.
- [6] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Механика. М.: Физматлит, 2001. 222 с.
- [7] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.