

03;12

Экспериментальное измерение энергии вихревого движения газа при автоколебаниях в свободноконвективном течении

© В.П. Самсонов

Сургутский государственный университет
E-mail: samsonov@surgu.wsnet.ru

Поступило в Редакцию 26 июля 2002 г.

Изучено свободноконвективное течение газа в „поющем“ пламени и трубе Рийке при числах Рейнольдса, меньших 1000. Предложен метод измерения диссипации энергии потока газа по смещению трубы-резонатора от положения механического равновесия при смене стационарного режима течения автоколебательным, сопровождающимся самопроизвольным образованием вихревых структур. Показано, что вихревое движение газа приводит к уменьшению теплового потока через поперечное сечение трубы. Обнаружена гистерезисная зависимость энергии вращательного движения от мощности теплового источника.

В некоторых теплообменных устройствах и камерах сгорания вихреобразование в потоке приводит к колебаниям интенсивности теплообмена и скорости горения. Классическим примером автоколебательных систем являются „поющее“ пламя и труба Рийке [1]. В работах [2,3] с помощью интерференционных и голографических методов визуализации течения показано, что возбуждение акустических колебаний в „поющем“ пламени обусловлено самоорганизацией вихревых структур. Однако из-за отсутствия данных об энергии вращательного движения

газа до сих пор остается не выясненной роль вихревых структур в механизме обратной связи между колебаниями скорости потока и тепловыделения.

Из результатов работы [3] следует, что вихревая структура представляет собой ряд тороидальных вихрей, расположенных вниз по потоку от теплового источника до верхнего конца трубы. Максимум скорости вращательного движения в соответствии с аннулярным эффектом Ричардсона [4] находится вблизи стенки трубы. Вихревое движение приводит к возникновению силы вязкого трения на внутренней поверхности трубы, периодически меняющей свое направление. Произведение среднего значения силы трения и скорости вращательного движения газа равно диссипации кинетической энергии в единицу времени [5]:

$$\pi \cdot R^2 L \cdot \nu \sqrt{\omega \cdot \nu / 2} = W / T. \quad (1)$$

Здесь R и L — внутренний диаметр и длина трубы-резонатора, ν и ω — линейная скорость и угловая частота, W и T — кинетическая энергия вращательного движения и период колебаний. При возбуждении колебаний газа и вихреобразовании результирующая сила вязкого трения, приложенная к поверхности трубы, уменьшается. В случае, если труба-резонатор закреплена в неподвижной опоре так, что находится в механическом равновесии под действием внешней упругой силы, силы трения и силы тяжести, смена режима течения газа в трубе вызывает изменение положения равновесия. Уменьшение потенциальной энергии трубы-резонатора в поле сил тяжести равно энергии вращательного движения газа в вихревой структуре.

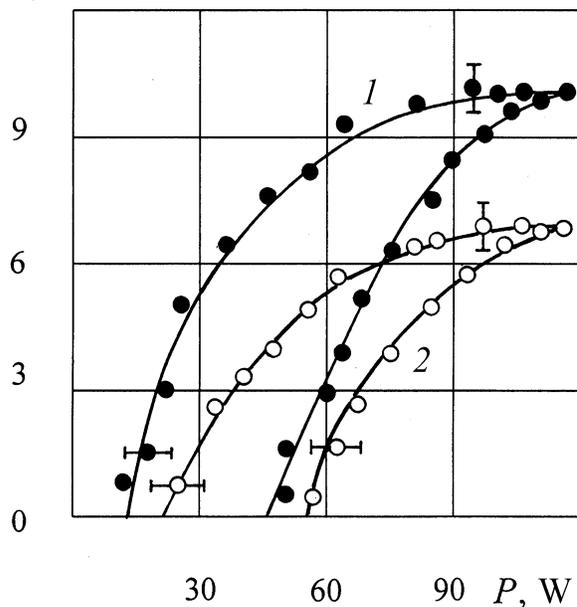
Экспериментальная установка состояла из стойки, на которой вертикально устанавливали неподвижную цилиндрическую трубу с внутренним диаметром 0.085 м и длиной 1.8 м. Внутри трубы подвешивали на пружине подвижную цилиндрическую гильзу длиной 2 м и внешним диаметром 0.08 м. Гофрированные стенки гильзы склеивали из бумаги. Внутреннюю поверхность гильзы изготавливали из алюминиевой фольги. Толщина гофрированных стенок $5 \cdot 10^{-3}$ м. Конструкция гильзы обеспечивала необходимые термостойкость и прочность при массе, равной 0.137 кг. На расстоянии, равном 1/4 длины гильзы от ее нижнего конца, помещали тепловой источник: диффузионное пламя пропана либо электрическую спираль. Мощность теплового источника изменяли от 10 до 120 W. Внутренний диаметр горелки равнялся $4 \cdot 10^{-3}$ м,

а скорость пропана на срезе горелки изменяли от 0.1 до 0.3 м/с. Напряжение на электрической спирали изменяли от 20 до 40 В, а силу тока от 0.5 до 3 А. Пропан подавали из газометра вытеснения. Объемный расход пропана измеряли по перепаду давления на калиброванных капиллярах, а скорость продуктов горения у верхнего конца гильзы — ротаметром. Температуру продуктов горения с точностью до 10°С измеряли термопарой, устанавливаемой в центре гильзы на расстоянии 0.1 м от верхнего конца.

При мощности теплового источника $P < 30$ Вт течение газа внутри гильзы, вызванное свободной конвекцией, стационарное и ламинарное. Гильза смещается вверх внутри внешней оболочки под действием упругой силы пружины и сил вязкого трения. Смещение гильзы вверх относительно положения, которое она занимала при отсутствии течения в зависимости от мощности теплового источника, изменялось в интервале значений $h_1 \approx 3.0 \cdot 10^{-3} \div 30.0 \div 10^{-3}$ м. Возбуждение автоколебаний газа вызывало смещение гильзы вниз на величину $\Delta h = h_1 - h_2 \approx 3.0 \cdot 10^{-3} \div 20.0 \cdot 10^{-3}$ м. Для увеличения точности измерений смещений h_1 и h_2 гильзу подвешивали на пружине с коэффициентом жесткости $k \leq 0.14$ Н/м.

Собственная частота столба газа в гильзе равнялась 90 Гц. При увеличении мощности теплового источника возрастание амплитуды колебаний скорости газа превышало постоянную составляющую, что приводило к срыву и гашению пламени. Однако и в этом случае из-за инерционности гильзы колебаний величины ее смещения не наблюдали. Вращение газа в соседних вихревых ячейках происходит в противоположных направлениях, поэтому энергия вращательного движения равна работе сил вязкого трения, затрачиваемой на изменение потенциальной энергии гильзы $W = k \cdot \Delta h^2$.

На рисунке представлены результаты измерения энергии вращательного движения газа W в зависимости от мощности теплового источника P . Графики, отмеченные цифрами 1 и 2, соответствуют „полюсному“ пламени и трубе Рийке. Возбуждение автоколебаний происходит соответственно при мощностях тепловыделения, равных 45 и 55 Вт. В обоих случаях максимум энергии колебаний достигается при мощности тепловыделения, равной ≈ 120 Вт. На рисунке видно, что уменьшение мощности приводит к гистерезисной зависимости $W(P)$. Очевидно, это связано с тем, что вихревое течение является более устойчивым по сравнению с поступательным. Средняя линейная скорость газа в

$W \cdot 10^{-6}, \text{ J}$ 

Гистерезисные зависимости энергии вращательного движения газа от тепловой мощности диффузионного пламени пропана (1) и электрической спирали (2).

вихре, вычисленная по соотношению (1) с учетом измеренных значений энергии W , больше средней поступательной скорости в $10 \div 15$ раз.

Установлено, что формирование вихревой структуры сопровождается уменьшением средней температуры газа на выходе из трубы на $\Delta t = 45^\circ\text{C}$. Оценку величины Δt производили по балансу энергии: $c_p \rho \cdot v \cdot S \cdot \Delta t = W/T$. Здесь c_p и ρ — удельная теплоемкость и плотность газа, S — площадь поперечного сечения гильзы. Из расчетов следует, что по порядку величины Δt равно экспериментально измеренному значению. Следовательно, движение газа в вихревой структуре увеличивает скорость теплоотдачи на стенках гильзы. Закономерности изменения температуры и энергии одинаковы для „поющего“ пламени и для трубы Рийке. Это дает основания предполагать, что основной механизм поддержания колебаний — гидродинамический.

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] *Шлихтинг Г.* Теория пограничного слоя. М.: Наука, 1974. 711 с.
- [5] *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Гидродинамика. М.: Наука, 1988. 736 с.