

# НЕРАВНОВЕСНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ ГОРЕНИИ В ОГРАНИЧЕННЫХ СПЛОШНЫХ СРЕДАХ

О.В. Иовлева, Е.В. Семенова, Э.Р. Сайфуллин  
Казанский (Приволжский) Федеральный Университет

techphys@kpfu.ru

**Аннотация.** В докладе представлены результаты исследований неравновесных физико-химических процессов, происходящих в установках с горением. Первая задача – анализ пульсационного течения газа, вызванного неустойчивостью процесса горения, находящихся в потоке твердых частиц. Вторая задача связана с неравновесностью процессов, обусловленных непостоянством физико-химических характеристик горящей сплошной среды.

Работа выполнена за счет средств субсидии, выделенной в рамках государственной поддержки Казанского (Приволжского) федерального университета в целях повышения его конкурентоспособности среди ведущих мировых научно-образовательных центров.

## ВВЕДЕНИЕ

Имеется целый ряд промышленных установок, в которых движение сплошной среды сопровождается протеканием сложных физико-химических процессов, в результате которых, например, происходит воспламенение и горение частиц среды[1]. Эти процессы могут быть неравновесными из-за непостоянства состава, физико-химических характеристик среды или в результате самовозбуждения резонансных колебаний газа, образующегося в результате сгорания частиц сплошной среды.

## ПУЛЬСАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ В УСТАНОВКЕ ТИПА ТРУБЫ РИЙКЕ

На Рис.1 представлена система двух коаксиально расположенных труб в которой в результате самовозбуждения колебания газа процесс горения частицу твердого топлива становится неравновесным.

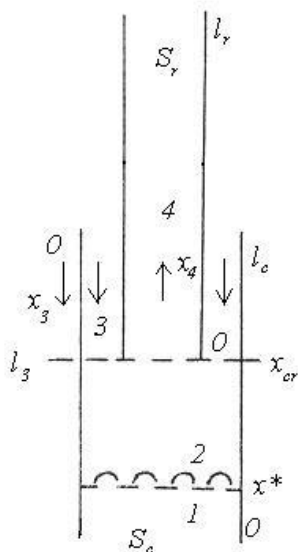


Рис. 1 Установка пульсационного горения твердого топлива типа трубы Рийке

Выделим в изучаемой установке (Рис. 1) четыре участка. Первый – часть камеры сгорания до решётки, удерживающей топливо. Второй участок – область тепловыделения, которая расположена между решёткой и сечением камеры сгорания, до которого введена резонансная труба. Третий участок – кольцевой канал между трубами, по которому подаётся вторичный воздух. Четвёртый участок – резонансная труба, по которой движется горячий газ.

Уравнение частот колебания газа имеет вид:

$$\frac{S_c + S_3}{Y_1 + Y_3} = \frac{S_r}{Y_r}$$

где,  $Y_1$ ,  $Y_3$ ,  $Y_r$  – акустические импедансы соответствующих частей установки.

Согласно методике, описанной в работе [2], была определена акустическая энергия, генерируемая слоем горящего топлива, и потери энергии, вызванные трением газа о стенки труб и излучением звука из установки. Равенство получаемой и теряемой газом энергии позволило рассчитать условие возбуждения и амплитуду установившихся колебаний газа.

Расчеты проводились для камеры сгорания с внутренним диаметром 60 мм, резонансной трубы с внутренним диаметром 36 мм и толщиной стенки 1 мм. Температура газа 1073 К в зоне горения и температура газа 673 К на выходе резонансной трубы длиной 1,2 м соответствовали горению резинотехнических изделий. Анализ процесса колебаний газа проводился при условии, что длина камеры сгорания – 0,4 м, длина резонансной трубы 1,2 м,  $x^* = 0,24$  м,  $x_{с.г} = x^* + 0.01$  м. В этом случае происходит самовозбуждение колебаний газа с частотой 201 Гц и уровнем звукового давления в зоне горения 136,7 дБ. Было установлено, что в исследуемой системе возможна ситуация, когда пульсаций расхода первичного воздуха для возбуждения колебаний газа недостаточно, и пульсационное горение возникает после того, как амплитуда пульсаций расхода вторичного воздуха, поступающего в зону горения, достигает некоторого порогового значения.

## НЕРАВНОВЕСНЫЕ ПРОЦЕССЫ, ВЫЗВАННЫЕ ИЗМЕНЕНИЕМ СОСТАВА ГОРЯЩЕЙ СРЕДЫ

Второй случай относится к процессам горения смесей газообразного топлива с воздухом в ограниченных объемах, например, в камерах сгорания или топочных объемах тепловых энергетических установок. Если состав топлива нестабилен, процессы горения и теплообмена в таких системах становятся неравновесными. В связи с этим актуальной становится задача по обеспечению устойчивости рабочего процесса в этих установках, то есть определить, как необходимо изменять расходы топлива и воздуха, чтобы топливо сгорало полностью, а скорость тепловыделения сохраняла постоянное заданное значение.

Воспользуемся известными из теории топочных процессов [3] соотношениями:

$$q = 7050n + 2500, [q] = \text{ккал/м}^3. \quad (1)$$

$$g^* = 7,13n + 2,28, [g] = \text{м}^3/\text{м}^3. \quad (2)$$

где  $q$  – теплота сгорания единицы объема топлива,  $g^*$  – объем воздуха, необходимый для полного сгорания единицы объема топлива,  $n$  – углеродное число.

Пусть в некоторый момент времени теплота сгорания топлива изменилась скачкообразно на небольшую величину  $\Delta q$ , а затем остается постоянной с течением времени, т.е.:

$$q = q_0 \pm \Delta q, \quad \Delta q/q_0 = \theta_q \ll 1.$$

Из соотношений (1), (2) следует

$$g^* = k_5 q + k_6, \quad k_5 = k_3/k_1; \quad k_6 = k_4 - k_2 k_3/k_1.$$

Анализ показал, что после снижения удельной теплоты сгорания топлива на небольшую относительную величину, восстановить начальный тепловой режим можно увеличив расход топлива на такую же относительную величину, не изменяя расхода воздуха. После повышения удельной теплоты сгорания топлива на небольшую относительную величину, сократив подачу топлива на такую же относительную величину, не изменяя расхода воздуха, можно обеспечить полное сгорание топлива и заданное значение теплового потока, сообщаемого теплоносителю.

## Литература

1. Ларионов В.М. //Автоколебания газа в установках с горением / В.М. Ларионов, Р.Г. Зарипов – Казань: Изд-во Казан. гос. технич. ун-та, 2003. – 237 с.
2. Ларионов В.М. // Известия ВУЗов: Проблемы энергетики. – 2009. – № 11–12. – С. 3–15.
3. Теория топочных процессов / Под ред. Г.Ф. Кноре – М. –Л.: Энергия, 1966. – 491 с.