

Рис. 6

После вычисления определенного интеграла, приняв  $\tau_2 - \tau_1 = T$ , получаем

$$\Delta = A_0^2.$$

Для линейной функции (1), если аргумент  $A$  изменяется по любому закону всегда  $\Delta = 0$ .

УДК 534.142

Новосельцев В.Г.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СЛОЕВОГО ПУЛЬСИРУЮЩЕГО ГОРЕНИЯ

Для анализа процесса слоевого пульсирующего горения жидкого топлива [1] проведены численные эксперименты на основе физико-математической модели, предложенной в [2].

Для проведения численных экспериментов использована модель устройства слоевого пульсирующего горения, состоящая из жаровой трубы, воздуховода, горелки в виде плоского дна с вмонтированными в нее трубками для подачи воздуха, показанная на рис. 1. Основные геометрические размеры модели, которые в дальнейшем варьировались, следующие:

$H=0.5$  м,  $L=2$  м,  $d=0.15$  м, горелки:  $h_{mp}=0.018$ м,

$d_{mp}=0.006$ мм. Количество трубочек горелки – 75 штук.

Решая дифференциальные уравнения при помощи программы МATHCAD методом Рунге-Кутты, получены графики зависимости перемещения газа во времени на участках  $[0; H]$ ,  $[H; H+h_{mp}]$ ,  $(H+h_{mp}; L]$ . Путем комбинирования этих графиков на промежутках соответственно  $[0; H]$ ,  $[H; H+h_{mp}]$ ,  $(H+h_{mp}; L]$ , получен график перемещения газа во

Таком образом, для принятой элементарной параболы абсолютный прирост функции обусловлен амплитудой колебания  $A$ , и если период колебаний  $T$  не влияет на какие-либо характеристики процесса, прирост  $\Delta$  не зависит от  $T$ . Если период  $T$  сам является функцией, или его действие многосторонне, расчет усложняется, но идея и порядок расчета прежние.

Относительный прирост функции для этого же примера, согласно (8)

$$\delta = \frac{\int_0^T \left( A \pm A_0 \sin \frac{2\pi}{T} \tau \right)^2 d\tau}{T \cdot B \Big|_{A_{cp}}} - 1 = \left( \frac{A_0}{A} \right)^2$$

Итак, если отождествлять эффективность топочного процесса с увеличением скорости горения топлива, то ее можно оценить, используя вычисленные  $\delta$  и  $\Delta$ .

Важным вопросом является определение суммарного эффекта от действия многих аргументов, влияющих на скорость горения. Вряд ли правильным будет простое суммирование  $\delta$  и  $\Delta$ . Поэтому предлагается использовать понятие, численно равное обратной величине относительного прироста функции при меняющихся аргументах:

$$H = \sum \frac{1}{\delta_i} = \frac{1}{\delta_1} + \frac{1}{\delta_2} + \dots$$

Тогда нестационарный топочный процесс можно охарактеризовать параметром  $\mathcal{E} = 1/H$ , сравнивая его со стационарным. Исходя из вышеприведенных условий, очевидно, что эффективность нестационарности выражается положительной величиной  $\mathcal{E}$ . Расчеты подтверждают, в частности, рассматриваемое преимущество пульсирующего горения.

времени, показанный на рис. 2. Из рис. 2 видно, что максимальная амплитуда пульсаций – по торцам трубы, минимальная – посередине трубы, то есть пучность смещения находится посередине трубы, узлы смещения – по концам трубы. Скачок перемещения – в трубках горелки за счет изменения скорости движения воздуха из-за изменения сечения. После прохождения газом трубок горелки за счет горения происходит увеличение скорости движения газа, что на рисунке иллюстрируется разным углом наклона частей графиков после координат, соответствующих местоположению горелки по отношению к углу наклона частей графиков, соответствующих расстоянию до горелки.

Путем изменения геометрических характеристик проведено исследование (и построены графические зависимости) влияния на процесс изменения длины трубы, угла наклона трубы, самотяги, потерь на трение по длине трубы, потерь давления в слое, амплитудного значения давления газа. Получены графики перемещения газа во времени при изменении амплитудного значения давления.

Новосельцев Владимир Геннадьевич. Ассистент каф. водоснабжения, водоотведения и теплоснабжения Брестского государственного технического университета. Беларусь, БГТУ, 224017. г. Брест, ул. Московская, 267.

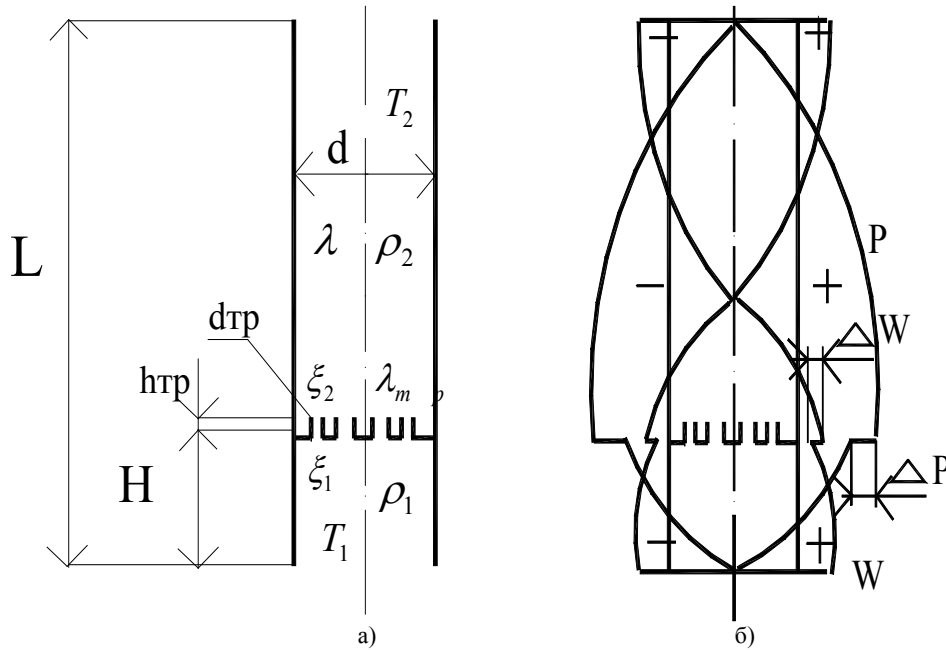


Рис. 1. Расчетная схема процесса слоевого пульсирующего горения:

- а) конструктивная схема;
- б) проекция эпюр давления и скорости.

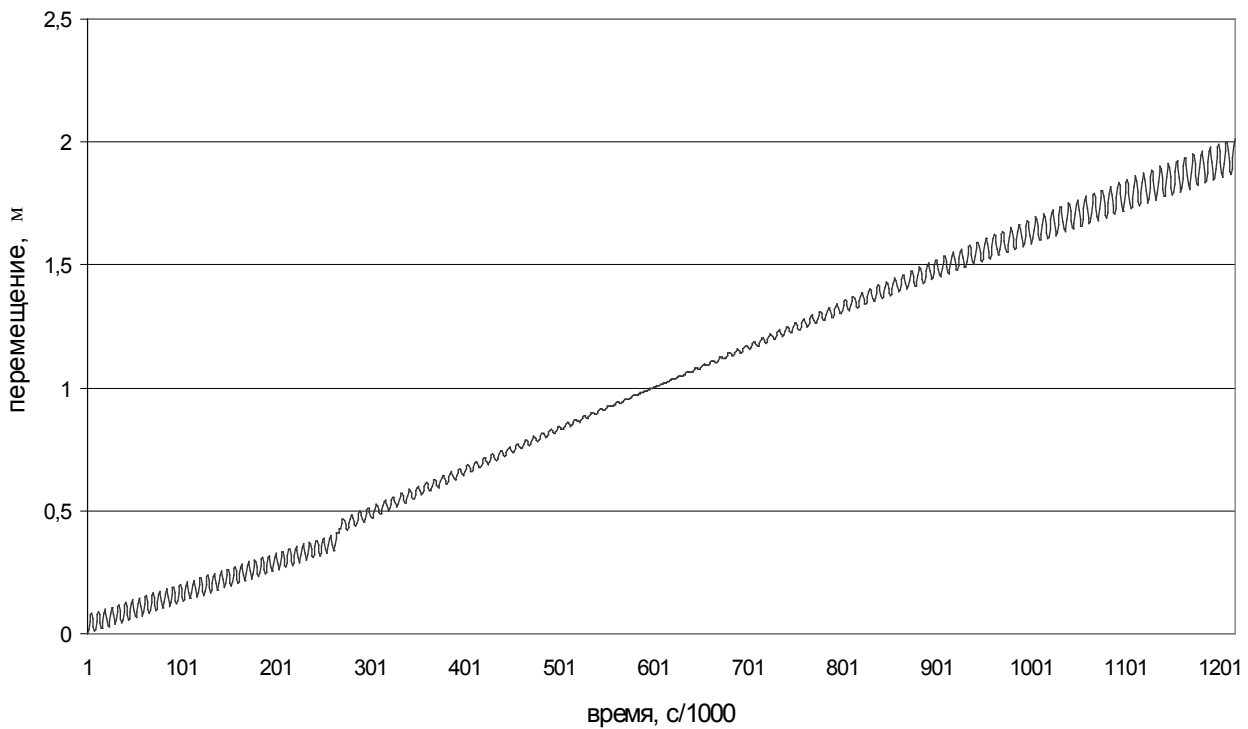


Рис. 2. График перемещения молекулы газа во времени

Численные эксперименты показали, что:

- Самотяга ограничена температурными характеристиками процесса и геометрическими характеристиками устройства. Наличие самотяги или внешнего источника обязательно для развития пульсаций.
- Потери на трение по длине трубы влияют на процесс незначительно. Таким образом, шероховатость трубы или рассредоточенные местные сопротивления не являются важным условием при проектировании топочного устрой-

ства, то есть, возможно, размещение развитых поверхностей теплообмена внутри устройства.

Рассмотрены зависимости количества воздуха, поступающего для горения и расхода топлива. Построена зависимость амплитуды пульсаций от площади зеркала горения при прохождении газом точки, удаленной на 0.2 м от нижнего торца трубы при различных решениях дифференциальных уравнений физико-математической модели процесса (рис. 3).

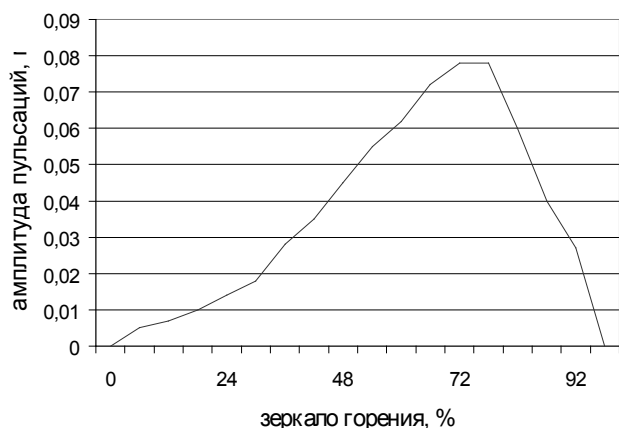


Рис. 3. Зависимость амплитуды пульсаций перемещения газа от относительной площади зеркала горения

Потери в слое изменяются за счет увеличения или уменьшения количества, диаметра и длины трубок горелки, при этом происходит уменьшение или увеличение площади зеркала горения. При изменении площади зеркала горения изменяется амплитуда пульсаций смещения газа, которая в основном зависит от изменения амплитудного значения давления. На основе зависимостей количества воздуха, поступающего для горения, и расхода топлива с учетом результатов анализа изменения амплитуды пульсаций перемещения газа получено выражение для нахождения оптимальных геометрических размеров горелки в данном топочном устройстве.

УДК 662.613.5.002.631

Горбачева М.Г.

## ОСОБЕННОСТИ ОБРАЗОВАНИЯ ОКИСЛОВ АЗОТА В НЕСТАЦИОНАРНЫХ ТОПОЧНЫХ ПРОЦЕССАХ

Окислы (оксиды) азота являются одним из вредных компонентов атмосферного воздуха. Предельно допустимая концентрация (ПДК) этих соединений составляет 0.25 мг/м<sup>3</sup>, что существенно ниже других опасных загрязнителей воздуха (СО, Н<sub>2</sub>S и т.д.) [1]. Поэтому совершенство топочных процессов, которые являются основным поставщиком окислов азота в атмосферу, оцениваются величиной выброса их из топочных устройств.

Пульсирующее горение – один из видов нестационарных топочных процессов, позволяет снизить выход NO<sub>x</sub> в ряде случаев на порядок [2]. Однако аналитического описания причин этого явления в обозримой литературе не имеется. Приводятся такие факторы, как снижение коэффициента избытка воздуха, снижение температуры реагирования, времени пребывания компонентов в зоне реакции, интенсивная турбулизация, снижение парциального давления кислорода во фронте горения, высокая равномерность температурных и концентрационных полей.

В работе [3] впервые при анализе образования окислов азота в пламени был изучен временной фактор и сделан очень

Это формула для определения значения относительного зеркала горения (относительное зеркало горения – это отношение значения действительного зеркала горения для рассматриваемой конструкции горелки к максимальному, т.е. площади поперечного сечения трубы):

$$S_{32}^{om} = \frac{1}{\frac{V_2}{V_6^{max}} \cdot K \cdot S_{32}^{max} + 1},$$

где  $S_{32}^{om}$  – относительное зеркало горения;  $S_{32}^{max}$  – максимальное зеркало горения, м<sup>2</sup>;  $V_6^{max}$  – максимальный расход воздуха, м<sup>3</sup>/час;  $K$  – поверхностная скорость горения топлива, кг/(м<sup>2</sup>·час);  $V_2$  – объем газов на 1 кг топлива при 760 мм.рт.ст. и 0 °С, м<sup>3</sup>/кг.

Таким образом, приведенное выражение является уравнением для определения оптимальных геометрических размеров горелки в данном топочном устройстве. Его целесообразно использовать при проектировании конкретных устройств, использующих процесс слоевого пульсирующего горения жидкого топлива. Теоретически полученное значение относительного зеркала горения горелки для разработанного водонагревателя составляет  $S_{32}^{om}=0.724$ . Исследования на экспериментальной установке показали диапазон оптимального значения  $S_{32}^{om}$  в пределах 0.7...0.8.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. V.S. Severyanin. Layer pulsating combustion. contributed papers of 6 international symposium on combustion processes. Karpacz 1979 – С. 109.
2. Новосельцев В.Г. Процесс слоевого пульсирующего горения. Вестник БГТУ. №2, 2002. - С. 14-16.

важный вывод: учет времени достижения равновесной концентрации дает еще большую зависимость выхода окислов азота от температуры. Этот вывод основан на общеинтегральных соотношениях, поэтому требуется более подробный анализ, учитывающий не только вышеупомянутую временную характеристику (время достижения равновесной концентрации), но и влияние амплитуд и частот колебаний температуры.

В продуктах сгорания топлив больше всего содержится оксида азота NO [4]. В образовании окислов азота может участвовать как азот воздуха, так и азот содержащийся в топливе в связанном состоянии; при этом механизм образования окислов азота в пламени различен. "Воздушные" окислы азота зависят в основном от температуры: окисление азота начинается с температур 1500 – 1700 К, а наиболее интенсивно – выше 2200 К [4].

Реакция имеет цепной характер [4]:



Горбачева Мария Григорьевна. Доцент каф. водоснабжения, водоотведения и теплоснабжения Брестского государственного технического университета.

Беларусь, БГТУ, 224017. г. Брест, ул. Московская, 267.