

УДК 621.1

Бирюков А.Б.<sup>1</sup>, Сафьянц С.М.<sup>1</sup>, Новикова Е.В.<sup>1</sup>, Недбайло А.Н.<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донецкий национальный технический университет

<sup>2</sup> Институт технической теплофизики НАН Украины

## ИМПУЛЬСНЫЙ НАГРЕВ РАБОЧЕГО ПРОСТРАНСТВА В ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИХ АГРЕГАТАХ

Розроблені основи технічного рішення і алгоритмічні підходи для імпульсного нагрівання робочого простору в теплотехнічних агрегатах, що дозволяють досягти імпульсності підведення теплоносія на конкретних пальниках без накладення хвильової складової на загальну витрату середовища.

Разработаны основы технического решения и алгоритмические подходы для импульсного нагрева рабочего пространства в теплотехнических агрегатах, позволяющие достичь импульсности подвода теплоносителя на конкретных горелках без наложения волнообразной составляющей на общий расход среды.

Technical decision and algorithmic approaches for thermal aggregates impulse heating which allow wavy character of mediums supply on concrete torches creation without full flow rate oscillatory component are developed.

$A$  – относительная амплитуда колебания расхода топлива;  
 $Bg$  – расход топлива;  
 $d$  – диаметр обтекаемого тела;  
 $frac, int$  – операторы выделения дробной и целой частей дробного числа соответственно;  
 $l$  – количество горелок с повышенной подачей топлива;  
 $m$  – количество горелок с пониженной подачей топлива;  
 $n$  – общее количество горелок теплотехнического агрегата;  
 $N$  – номер горелки;  
 $w$  – скорость течения среды;  
 $Nu$  – число Нуссельта;  
 $Pr$  – число Прандтля;  
 $Re$  – число Рейнольдса;  
 $Sr$  – число Струхала;  
 $\nu$  – частота колебаний;

$X$  – целое число, генерируемое генератором случайных чисел;  
 $\tau$  – время;  
 $\Delta t$  – период колебания процесса или период переключения расходов топлива между горелками первой и второй очереди.

### Индексы нижние:

$max$  – максимальное значение величины;  
 $min$  – минимальное значение величины;  
 $общ$  – указатель на то, что берется общий расход газа;  
 $ж$  – указание на то, что величина берется для параметров среды в ядре потока;  
 $ст$  – указание на то, что величина берется для параметров среды у поверхности обтекаемого тела;  
 $i$  – индекс произвольной рассматриваемой горелки или индекс момента времени.

Известно, что импульсные режимы подвода теплоносителя позволяют интенсифицировать конвективный теплоперенос [1]. Так, в работе [2] получено эмпирическое критериальное уравнение для описания конвективного теплообмена при поперечном обтекании цилиндрических тел и импульсном характере течения среды с косинусоидальным изменением расхода

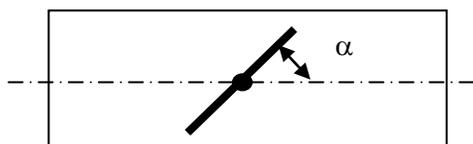
$$Nu = 0,494 \cdot Re^{0,6} \cdot Pr_{ж}^{0,36} \cdot (Pr_{ж} / Pr_{ст})^{0,25} \cdot (Sr)^{0,0971}.$$

В строгом смысле, полученное уравнение описывает конвективный теплообмен при косинусоидальном изменении расхода среды для конкретного пульсатора, использованного в лабораторной установке (определенное соотношение диаметров трубопровода и заслонки, относительное расстояние от заслонки до среза диффузора). Полученное уравнение справедливо в диапазоне изменения числа Струхала  $Sr$  0,017...0,068.

Усиление конвективной составляющей теплообмена на 20...30 %, зафиксированное в экспериментах, является достаточно существенным и позволяет, например, достичь примерно такого же ускорения нагрева в низкотемпературных печах или аналогичное ускорение воздушного охлаждения в печах. Что касается нагрева материалов в высокотемпературных печах, указанный уровень усиления конвективного теплообмена приведет к незначительному увеличению итогового теплообмена.

Для успешной реализации импульсного нагрева рабочего пространства в конкретных теплотехнологических агрегатах необходима разработка конструкций пульсаторов и соответствующих алгоритмов управления ими для систем АСУ ТП. При этом в качестве важного требования к таким технологиям зачастую выдвигается условие отсутствия колебательной составляющей общего расхода теплоносителей и достижения импульсности за счет периодического перераспределения расходов топлива между горелками. При таком подходе создаются нормальные условия эксплуатации нагнетателя, подающего воздух, и благоприятный режим давления в газовой сети.

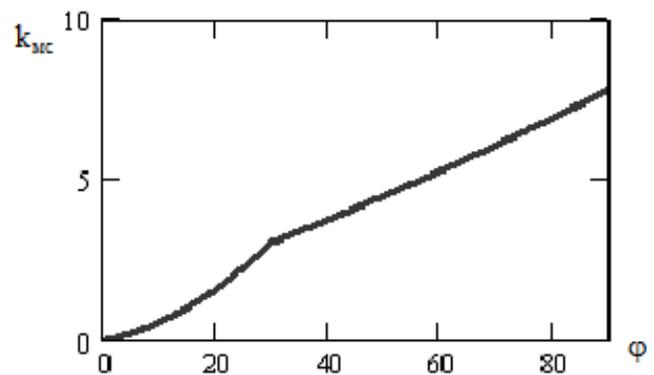
В основе решения практической задачи создания импульсных горелок лежит использование вращающихся заслонок, либо дроссельных клапанов (рис. 1) в каналах подачи топлива и окислителя. При этом важно синхронизированное управление устройствами, создающими пульсацию, учитывающее их гидравлические характеристики, при котором гарантированно не нарушалось бы заданное соотношение газ/воздух. Пример зависимости коэффициента сопротивления круглой заслонки, вращающейся в полости подводящего трубопровода, от угла



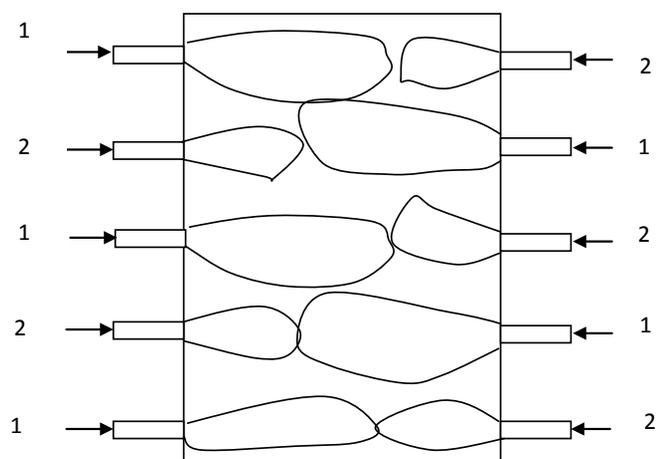
**Рис. 1.** Дроссельный клапан в каналах подачи воздуха и топлива для реализации импульсного закона подачи сред.

поворота заслонки при соотношении площадей поперечного сечения трубопровода и площади заслонки 100/75 приведен на рис. 2.

Примером решения задачи создания импульсности при отсутствии колебательной составляющей общего расхода теплоносителей может служить схема, предложенная на рис. 3. Ее сущность заключается в том, что боковые горелки камеры печи поделены на две группы (первая и вторая очередь).



**Рис. 2.** Зависимость коэффициента местного сопротивления круглой заслонки, вращающейся в полости подводящего трубопровода, от угла поворота заслонки при соотношении площадей 100/75.



**Рис. 3.** Схема импульсной работы боковых горелок камеры печи периодического действия или отапливаемой зоны печи непрерывного действия (1 – горелки первой очереди, 2 – горелки второй очереди).

Предложено встречное расположение горелок первой и второй очереди. Закон изменения расхода топлива на горелки приведен ниже:

горелка 1-ой очереди

$$Bg_1(\tau) = \begin{cases} Bg_i \cdot (1 + A) & \text{при } \text{frac}(\text{int}(\tau/\Delta\tau)/2) = 0; \\ Bg_i \cdot (1 - A) & \text{при } \text{frac}(\text{int}(\tau/\Delta\tau)/2) = 0,5; \end{cases}$$

горелка 2-ой очереди

$$Bg_2(\tau) = \begin{cases} Bg_i \cdot (1 - A) & \text{при } \text{frac}(\text{int}(\tau/\Delta\tau)/2) = 0; \\ Bg_i \cdot (1 + A) & \text{при } \text{frac}(\text{int}(\tau/\Delta\tau)/2) = 0,5; \end{cases}$$

Анализ предложенного закона изменения расхода топлива на горелки показывает, что при полном количестве горелок равном  $n$ , одинаковом количестве горелок первой и второй очереди ( $n/2$  соответственно), общий расход топлива равен  $n Bg_i$ .

Подобный подход можно применить к нагреву рабочего пространства любых агрегатов, имеющих четное число горелок. Например, для проходных методических печей. Для трехзонной печи подача топлива, как правило, реализуется при помощи шести горелок: две в томильной зоне, две в верхней сварочной зоне, две в нижней сварочной зоне. Распределив две горелки каждой зоны между очередями подачи топлива, можем использовать выше приведенный закон распределения подачи топлива.

В общем случае можно рассмотреть такую схему нагрева пространства в агрегатах, при которой вопрос нагрузки горелок решается с использованием генератора случайных чисел. Пусть общее число горелок  $n = m + l$ . В каждый момент времени  $l$  горелок выдают повышенный расход топлива, а  $m$  горелок пониженный расход топлива (это может быть минимальное значение, устойчиво выдаваемое конкретной конструкцией горелки).

Горелки, которые войдут в группу с повышенной подачей топлива  $l$ , определяются при помощи генератора случайных чисел. На остальные горелки подается пониженный расход топлива. Вопрос деления горелок на группы с повышенной и пониженной подачей топлива пересматривается через каждые  $\Delta\tau$  секунд. Если обозначить минимальный

расход топлива на одну горелку как  $Bg_{\min}$ , то расход топлива на каждую горелку с усиленной подачей топлива будет определен как  $Bg_{\max} = (Bg_{\text{общ}} - m \cdot Bg_{\min})/l$ .

Таким образом, имеем следующий алгоритм управления работой горелок. Всего генерируется  $l$  чисел, 1-ое из диапазона от одного до  $n$ , 2-ое – из того же диапазона за вычетом уже выбранной горелки повышенной подачи топлива и т.д. Таким образом,  $l$ -ым по счету генерируется целое число из диапазона еще не выбранных на  $l-1$  предыдущих генерациях номеров. Поскольку результаты закрепления горелок повышенной подачи топлива действуют в течение периода времени  $\Delta\tau$ , то целесообразно в течение времени действия конкретного набора горелок производить определение номеров, которые будут работать с увеличенной подачей топлива в течение следующего периода продолжительностью  $\Delta\tau$ :

для  $i$ -той горелки

$$Bg_i = \begin{cases} Bg_{\max} & \text{при } N_{\text{гор}} = X^i_{\text{г.с.ч.}}(\tau) \dots \text{или } N_{\text{гор}} = \\ & = X^2_{\text{г.с.ч.}}(\tau) \dots \text{или } N_{\text{гор}} = X^l_{\text{г.с.ч.}}(\tau); \\ Bg_{\min} & \text{иначе,} \end{cases}$$

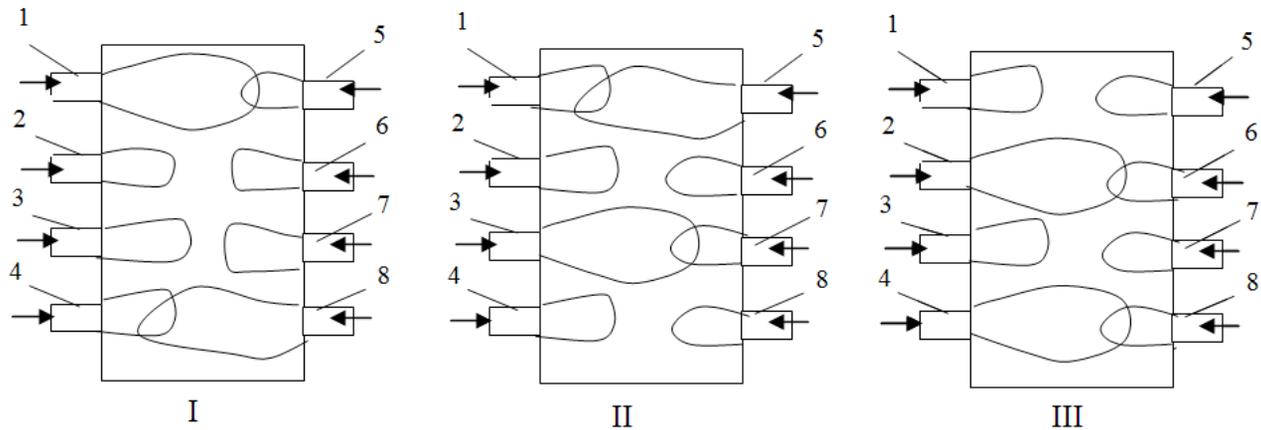
где  $N_{\text{гор}}$  – номер горелки;

$X^i_{\text{г.с.ч.}}$  – целое число, генерируемое генератором случайных чисел.

Пример работы алгоритма, использующего генератор случайных чисел, приведен на рис. 4. В рассмотренном примере теплотехнологический агрегат имеет восемь горелок, для которых показан пример возможного распределения теплоносителя для трех моментов времени (повышенным расходом нагружаются две горелки, остальные – пониженным). Так, в некоторый момент времени I максимальным расходом нагружены 1-ая и 8-ая горелки, в момент времени II – 4-ая и 5-ая горелки, III – 2-ая и 4-ая горелки.

#### **Реализация операции тепловой обработки выдержки материалов после нагрева**

Рассмотренный выше подход выбора горелок с усиленной подачей топлива при помощи генератора случайных чисел может быть ис-



**Рис. 4. Пример работы системы импульсного нагрева рабочего пространства технологического агрегата на основе алгоритма, использующего генератор случайных чисел, для трех моментов времени (I, II, III – произвольно выбранные моменты времени).**

пользован не только для реализации операций нагрева материала, но и для выдержки после него. Эта операция предполагает поддержание температуры поверхности материала на постоянном уровне, достигнутом после нагрева и прогрев внутренних слоев материала для уменьшения неравномерности температуры по толщине.

Известны технологии, позволяющие при помощи системы АСУ ТП поддерживать температуру в камере печи на заданном уровне с точностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Сущность не разглашается, однако, вероятно, речь идет об импульсной подаче топлива на горелку (горелки), выбранную при помощи генератора случайных чисел при сигнале от термопар о снижении температуры газовой среды относительно заданного уровня, позволяющего сформировать необходимую плотность теплового потока при заданной температуре поверхности материала. При этом качество поддержания температуры будет зависеть от того, насколько удачно подобраны соответствующие коэффициенты для ПИД-регулятора.

Предложено для каждого периода  $\Delta t$  определять суммарный расход топлива на горелки, исходя из анализа тепловой диаграммы операции. Коррекция этой величины может

производиться на основании сигнала термопар, измеряющих температуру в газовом пространстве печи и термопары, измеряющей температуру уходящих газов.

### **Выводы**

Рассмотрены основы технического решения и созданы два алгоритмических подхода для реализации импульсного нагрева рабочего пространства отдельных теплотехнологических установок с использованием нескольких горелок при постоянстве общего расхода топлива.

Показана возможность использования импульсного нагрева для эффективного использования такой операции тепловой обработки металлических заготовок, как выдержка после нагрева.

### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Кутателадзе С.С. Основы теории теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1970. – 659 с.
2. Бирюков А.Б. Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах. – Донецк: Ноулидж, 2012. – 247 с.

*Получено 20.08.2012 г.*