

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ КИПЯЩЕГО СЛОЯ И ФОРМЫ  
ИМПУЛЬСА СКОРОСТИ ВОЗДУХА НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ  
ПРОЦЕССА ГОРЕНИЯ УГОЛЬНОЙ ЧАСТИЦЫ**

*Розглянуто математичну модель горіння вугільної частки при різних формах імпульсів пульсуючого потоку газозавіси. Досліджено вплив параметрів киплячого шару, таких як діаметр вугільної частки, діаметр частки інерта, швидкості повітря і постійної складової швидкості на основні показники інтенсивності горіння вугільної частки: час горіння, відносне зменшення часу горіння і поверхневу швидкість горіння. Визначено раціональні параметри киплячого шару.*

**THE INFLUENCE OF THE PARAMETERS OF THE  
BOILING LAYER AND FORM OF THE PULSE OF  
THE AIR SPEED ON THE INTENSIFICATION OF  
THE PROCESS OF A COAL PARTICLE BURNING**

*A mathematical model of a coal particle burning is described on the basis of various forms of pulses of pulsed gas flow. An influence of the boiling layer parameters such as diameter of a coal particle, diameter of an inert particle, wind speed and constant speed of element is investigated on the basis of indicators of intensity of a coal particle burning: time of burning, relative reduction of the time of the burning and speed of surface burning. The rational parameters of a boiling layer are determined.*

Одним из эффективных путей интенсификации процесса горения угольной частицы является применение пульсирующей подачи воздуха. Рядом исследований показано, что применение пульсаций увеличивает горение топлив [1,2]. Однако недостатком этих работ является задание изменения скорости ожигающего потока (воздуха) в виде синусоидальной зависимости. В работе [3] скорость ожигающего агента задавалась в виде последовательности треугольных импульсов с переменной скважностью. Однако, в данной работе не рассмотрено влияние иных форм импульсов и постоянной составляющей скорости ожигающего агента на интенсивность горения угольной частицы. Целью настоящего исследования является определение влияния параметров кипящего слоя и форм импульсов скорости ожигающего агента, а также постоянной составляющей скорости на уменьшение времени горения угольной частицы по сравнению с постоянным потоком газозавесы равного расхода за период.

Рассмотрим математическую модель горения угольной частицы при пульсирующей подаче ожигающего агента (газа). Горение шарообразной угольной частицы описывается следующей системой уравнений [3]

$$\frac{dm}{dt} = -hS(c - c_0)\beta v, \quad (1)$$

$$m \frac{dU}{dt} = mg \left( \frac{\rho_s}{\rho_m} - 1 \right) + 3\pi\mu_s (U_g - U) \cdot \delta - \frac{m}{2} \frac{\rho_s}{\rho_m} \frac{dU}{dt}, \quad (2)$$

$$\frac{dx}{dt} = U, \quad (3)$$

где:  $m$  – масса частицы;  $U$  – скорость перемещения частицы;  $U_g$  – скорость газа;  $x$  – координата частицы в вертикальном направлении;  $t$  – время;  $S = \pi\delta^2$  – площадь поверхности частицы;  $\delta$  – текущий диаметр частицы;  $\rho_m$  – плотность частицы углерода;  $c_0, c$  – концентрация кислорода в потоке и на поверхности частицы соответственно;  $\beta = 12/32$  – отношение молекулярных масс углерода и кислорода;  $v$  – стехиометрический коэффициент при углероде в уравнении реакции, протекающей на поверхности частицы (например, для  $O_2 + C \rightarrow CO_2$ ,  $v = 1$ , для  $O_2 + 2C \rightarrow 2CO$ ,  $v = 2$ );  $h$  – коэффициент массопередачи, определяемый из критерия Шервуда

$$Sh = \frac{h\delta}{D} = 2 + 0,6\sqrt{Re},$$

откуда

$$h = \frac{D}{\delta} (2 + 0,6\sqrt{Re}),$$

где  $D$  – коэффициент диффузии кислорода и воздуха к поверхности горящей угольной частицы;  $Re$  – число Рейнольдса, определяемое как

$$Re = \frac{|U - U_s| \delta \rho_s}{\mu_s},$$

где  $\rho_s$  – плотность газозвеси, в свою очередь определяемая по формуле

$$\rho_s = \varepsilon \cdot \rho_g + (1 - \varepsilon) \cdot \rho_i,$$

где  $\rho_i$  – плотность частиц инерта;  $\rho_g$  – плотность газа;  $\varepsilon$  – порозность слоя, определяемая по формуле [4]

$$\varepsilon = 1,2 \cdot \varepsilon_0 \left( \frac{U_g}{U_{mf}} \right)^{0,08 + 4 \cdot 10^{-8} \cdot Ar},$$

где  $\varepsilon_0 = 0,4$  – порозность слоя на пороге начала псевдооживения;  $U_{mf}$  – скорость минимального псевдооживения, определяемая по формуле [5]

$$U_{mf} = \frac{v_g \cdot Ar \cdot \varepsilon_0^{n+2}}{d_i \left( 9 + \sqrt{81 + \frac{1}{3 \cdot Ar \cdot \varepsilon_0^{n+2}}} \right)},$$

где  $n = 2,5 \div 3,8$  – показатель степени, характеризующий состояние поверхности частицы [6];  $d_i$  – диаметр частиц инерта;  $Ar$  – критерий Архимеда

$$Ar = \frac{g \cdot d_i^3 \cdot \rho_i - \rho_g}{v_g^2 \cdot \rho_g},$$

где  $v_g = \mu_g / \rho_g$  – кинематическая вязкость газа,  $\mu_g$  – вязкость газа;  $\mu_s$  – вязкость газозвеси, определяемая по формуле [7]

$$\mu_s = 72,82 \cdot 10^2 \frac{g^{1,207} \cdot d_i^{2,207} \cdot \rho_i^{0,293} \cdot \rho_g^{0,707} (1 - \varepsilon)^{0,5}}{(U_g - u_i)^{1,414}},$$

где  $u_i$  – скорость скольжения частиц инерта, определяемая как

$$u_i = \frac{U_g}{4,9} \left( \frac{\rho_g}{\rho_i} \right)^{-0,1}.$$

Решение системы уравнений (1) - (3) проводилось в среде пакета Mathcad методом Рунге-Кутты 4-го порядка точности.

Формы импульсов скорости воздуха в процессе исследования задавались в виде равнобедренного треугольника, равнобедренной трапеции, прямоугольного треугольника и описывались следующими аналитическими зависимостями:

а) форма импульса в виде равнобедренного треугольника

$$U_g(t) = \begin{cases} kt + A, & nT \leq t \leq \frac{h_1 - A}{k} \\ h_1, & \frac{h_1 - A}{k} \leq t \leq \psi - \frac{h_1 - A}{k} \\ -kt + k_1, & \psi - \frac{h_1 - A}{k} \leq t \leq \psi \\ A, & \psi \leq t \leq (n+1)T \end{cases}, \quad (4)$$

где  $A$  – постоянная составляющая скорости газа;  $T$  – период;  $\psi$  – скважность;  $k$  – угловой коэффициент. При данной форме импульса выражение для углового коэффициента имеет вид

$$k = \frac{(h_1 - A)^2}{T((h_1 - A) \cdot \psi - (U_g - A))},$$

где  $h_1$  – амплитуда импульса, определяемая по формуле

$$h_1 = 2 \frac{U_g - A}{\psi} + A;$$

$k_1$  – переменный параметр уравнения, определяемый как

$$k_1 = h + k \left( \psi - \frac{h - A}{k} \right).$$

б) форма импульса в виде равнобедренной трапеции описывается зависимостью, аналогичной (4), с учетом амплитуды данной формы импульса

$$h_2 = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_g - A}{\psi} + A$$

в) форма импульса в виде прямоугольного треугольника

$$U_g(t) = \begin{cases} k_2 t + A, & nT \leq t \leq \psi \\ A, & \psi \leq t \leq (n+1)T \end{cases}$$

где  $k_2$  - угловой коэффициент, определяемый по формуле

$$k_2 = \operatorname{tg} \alpha = \frac{h_1 - A}{\psi}.$$

При проведении расчетов значения параметров принимали следующие значения:

– для угольной частицы: начальный диаметр  $d_0 = 2,5$  мм; 5 мм; 7,5 мм; плотность  $\rho_m = 1,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;

– для частиц инерта: диаметр  $d_i = 0,35$  мм; 0,5 мм; 0,65 мм; плотность  $\rho_i = 2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;

– для ожигающего агента (газ): плотность и вязкость определены по таблице для сухого воздуха при температуре  $T_g = 900$  °С,  $\rho_g = 0,301$  кг/м<sup>3</sup>;  $\mu_g = 46,7 \cdot 10^{-6}$  Па·с; средняя расходная скорость газа  $U_g = 3$  м/с; 5 м/с; 7 м/с; постоянная составляющая скорости  $A$  принималась равной 0 м/с; 0,5 м/с; 1 м/с;

– для параметров пульсирующего потока: период пульсаций  $T = 1$  с; скважность  $\psi = 0,25$ .

В качестве параметра, характеризующего влияние пульсаций на скорость горения частицы при переменных параметрах потока, используется относительное уменьшение времени горения

$$\theta = \frac{\Delta t_g}{t_{g0}} = \frac{t_{g0} - t_g}{t_{g0}}$$

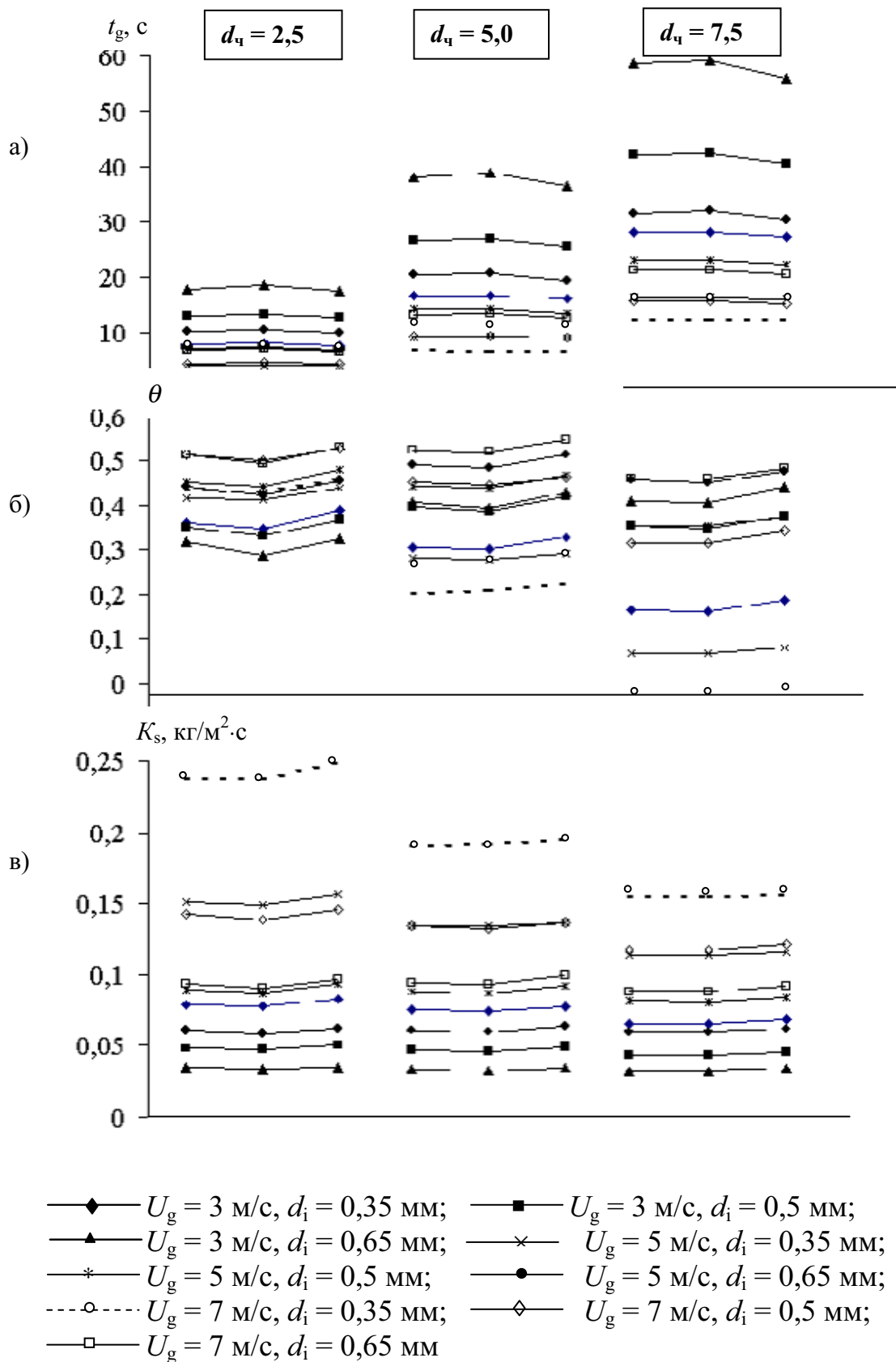
где  $t_g$  – время сгорания частицы в пульсирующем потоке;  $t_{g0}$  – время сгорания частицы в потоке постоянной скорости ( $\psi = 1$ ).

Очевидно, что чем больше значение  $\theta$ , тем более эффективным можно считать соответствующие параметры пульсирующего потока.

Скорость горения частиц можно оценить с помощью поверхностной скорости горения [8], определяемой по формуле

$$K_s = \frac{d_0 \cdot \rho_m}{6 \cdot t_g}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

При исследовании определялись следующие показатели: время горения угольной частицы  $t_g$ , относительное уменьшение времени горения  $\theta$ , поверхностная скорость горения  $K_s$  при переменных параметрах кипящего слоя, т.е. диаметре инерта  $d_i$ , диаметре угольной частицы  $d_0$  и скорости газа  $U_g$  при трех формах импульсов скорости ожигающего агента. Результаты решения представлены в графической форме на рис.1, где при



**Рис. 1. Показатели интенсивности горения угольной частицы при переменных параметрах кипящего слоя:**  
 а – время горения угольной частицы; б – относительное уменьшение времени горения; в – поверхностная скорость горения угольной частицы

различных диаметрах угольной частицы последовательность форм импульсов скорости оживающего агента (в пределах каждого столбца, начиная с левого края) представлена символами в следующем порядке: равнобедренный треугольник, равнобедренная трапеция и прямоугольный треугольник.

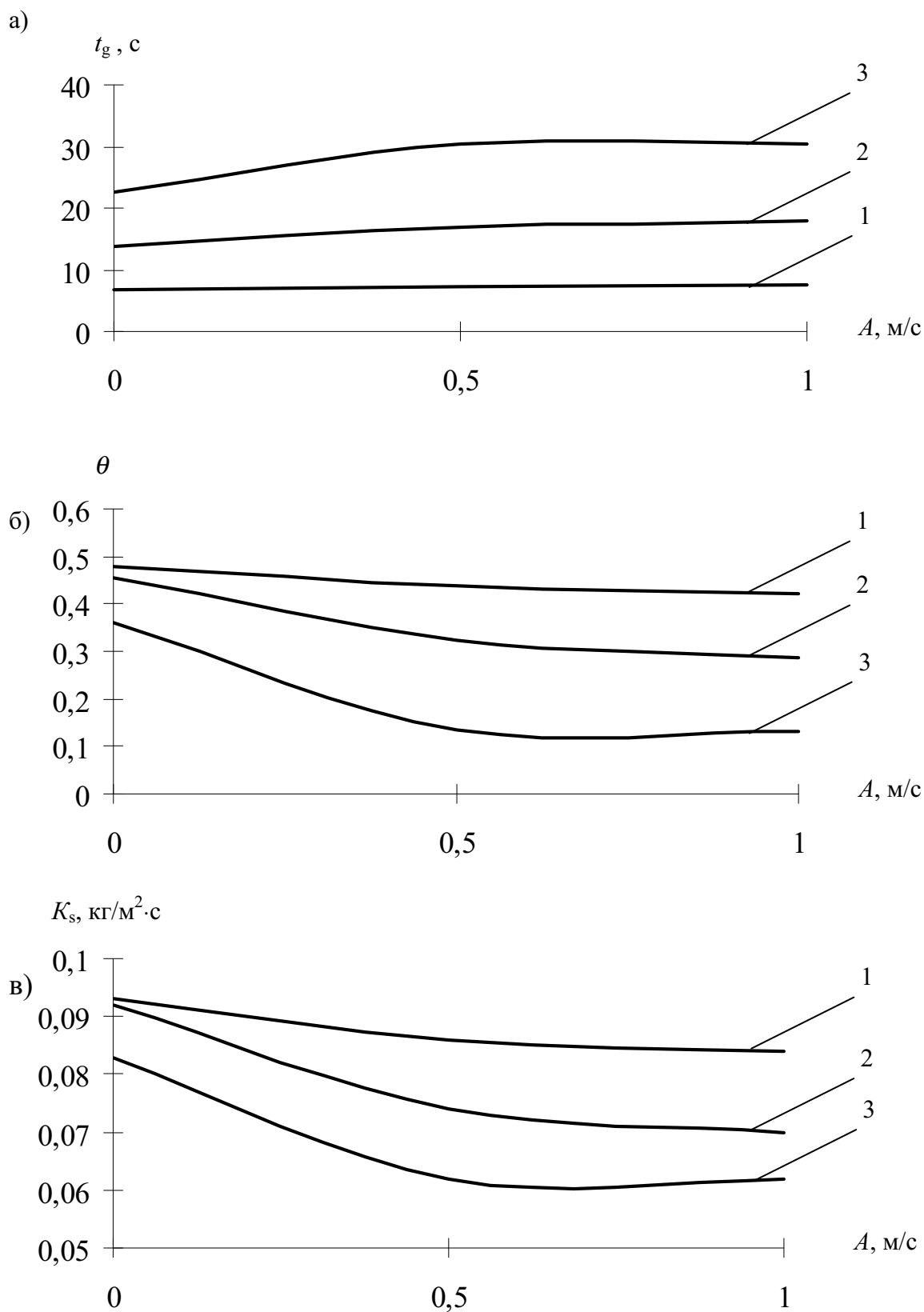
Как видно из рис.1 влияние формы импульса скорости оживающего агента при переменных параметрах кипящего слоя для всех показателей интенсивности горения угольной частицы незначительно. Так при скорости  $U_g = 3$  м/с, диаметре частицы  $d_0 = 7,5$  мм и диаметре инерта  $d_i = 0,65$  мм показатели  $t_g$ ,  $\theta$  составляют соответственно при форме импульса в виде равнобедренной трапеции 59,23 с и 0,389, а при форме импульса в виде прямоугольного треугольника 55,96 с и 0,422. Дальнейший анализ полученных данных для всех параметров кипящего слоя будем рассматривать при форме импульса в виде прямоугольного треугольника.

Показатели  $t_g$ ,  $\theta$ ,  $K_s$  определялись также при исследовании влияния постоянной составляющей скорости оживающего агента  $A$  на интенсификацию процесса горения угольной частицы при закрепленных параметрах кипящего слоя, таких как  $d_i = 0,5$  мм,  $U_g = 5$  м/с, форме импульса в виде прямоугольного треугольника и переменном параметре  $d_0$ . Результаты решения данной задачи представлены на рис.2.

Наименьшее время горения угольной частицы, а также наибольшая поверхностная скорость горения при любом из трех диаметров угольной частицы (рис.1) наблюдается при скорости газа  $U_g = 7$  м/с и диаметре инерта  $d_i = 0,35$  мм. При этих же параметрах относительное уменьшение времени горения угольной частицы  $\theta$  при диаметре частицы  $d_0 = 2,5$  мм составляет 0,46, при  $d_0 = 5,0$  мм  $\theta$  равно 0,215, а при  $d_0 = 7,5$  мм  $\theta$  принимает отрицательное значение, что свидетельствует об уменьшении влияния пульсаций оживающего агента на скорость горения при увеличении диаметра угольной частицы.

Наибольшее время горения и наименьшая поверхностная скорость горения при всех диаметрах угольной частицы наблюдается при  $U_g = 3$  м/с и  $d_i = 0,65$  мм. При этом величина  $\theta$  при  $d_0 = 2,5$  мм, составляет 0,32, а при  $d_0 = 5,0$  мм и  $d_0 = 7,5$  мм этот показатель принимает значение, равное 0,42. Наиболее эффективными параметрами пульсирующего потока по показателю  $\theta$  можно считать скорость газа  $U_g = 7$  м/с при диаметре инерта  $d_i = 0,65$  мм, так как  $\theta$  при любом из трех рассматриваемых диаметров угольной частицы имеет наибольшее значение.

Из рис.1 также следует, что увеличение диаметра инерта ведет к ухудшению показателей интенсивности горения угольной частицы, причем показатели интенсивности горения угольной частицы уменьшаются с увеличением скорости оживающего агента  $U_g$ . Так при скорости газа  $U_g = 3$  м/с и диаметре угольной частицы 5 мм изменение диаметра инерта с  $d_i = 0,35$  мм до  $d_i = 0,65$  мм приводит к увеличению времени горения уголь-



**Рис. 2.** *Время горения (а), относительное уменьшение времени горения (б) и скорость горения угольной частицы (в) при изменении постоянной составляющей скорости: 1 –  $d_0 = 2,5$  мм; 2 –  $d_0 = 5,0$  мм; 3 –  $d_0 = 7,5$  мм*



ной частицы  $t_g$  в 2,25 раза и уменьшению величины  $\theta$  с 0,42 до 0,32. При  $U_g = 5$  м/с и том же диаметре угольной частицы изменение диаметра инерта с  $d_i = 0,35$  мм до  $d_i = 0,65$  мм приводит к увеличению времени горения в 2,13 раза и уменьшению величины  $\theta$  с 0,5 до 0,28. При  $U_g = 7$  м/с и диаметре угольной частицы 5 мм изменение диаметра инерта с  $d_i = 0,35$  мм до  $d_i = 0,65$  мм приводит к увеличению времени горения угольной частицы  $t_g$  в 2,0 раза и уменьшению величины  $\theta$  с 0,53 до 0,22.

Анализ влияния постоянной составляющей скорости ожигающего агента  $A$  (рис.2) на интенсификацию горения угольной частицы показал, что ее введение ухудшает исследуемые показатели, причем влияние этого параметра сильнее при больших диаметрах угольных частиц. Так при  $U_g = 5$  м/с и диаметре угольной частицы  $d_0 = 2,5$  мм введение постоянной составляющей скорости  $A = 1$  м/с приводит к увеличению времени горения частицы в 1,1 раза и уменьшению величины  $\theta$  в 1,14 раз. При той же скорости ожигающего агента и диаметре угольной частицы  $d_0 = 7,5$  мм введение постоянной составляющей скорости  $A = 1$  м/с приводит к увеличению времени горения частицы в 1,4 раза и уменьшению величины  $\theta$  в 2,74 раз.

Проведенный анализ свидетельствует о том, что рациональный выбор параметров пульсирующего потока может обеспечить достаточно высокую степень интенсификации процесса горения угольной частицы в кипящем слое.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Северянин В.С. Горение частицы топлива в пульсирующем потоке. Известия Вузов. Энергетика. 1975. № 6.с. 144-147.
2. Рудингер Г. Влияние скорости проскальзывания частиц топлива на скорость горения. Труды американского общества инженеров-механиков. Серия Д. Теоретические основы инженерных расчетов: Изд-во «Мир», 1975. № 3.с. 139-144.
3. Чемерис И.Ф., Головки Ю.Н., Слободяникова И.Л. Исследование математической модели процесса горения угольной частицы при переменных параметрах пульсирующего потока газозвеси./Геотехническая механика. Межведомств.сб.науч.трудов, вып.29.2001
4. Анштейн В.Г. О расширении псевдоожигенного слоя. Химия и химическая технология. 1997, том 40, вып.1.стр.129-131
5. Рождественский О.И., Злобина Г.А., Колтун Е.М., Михайлов П.И. Определение скорости начала ожигения сыпучего материала. ЖПХ. 1978, том LI, вып.10. стр.2357-2359
6. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения. Гостоптехиздат. М.-Л.1940

7. Грек Ф.З., Грек А.С. Уравнение для расчета «кажущейся» вязкости псевдоожигенного слоя. ЖПХ. Том XLIX, вып.9. 1976. Стр. 1982-1985
8. Северянин В.С., Кацнельсон Б.Д. Некоторые вопросы вибрационного горения твердого топлива. Из-во казанского ун-та. 1970. 143-166.

УДК 621.165:697.34:620.92

И.Ф. Чемерис, Ю.И. Оксень, И.Л. Слободяникова,  
ИГТМ НАН Украины

### **МЕТОД ИДЕНТИФИКАЦИИ ХАРАКТЕРИСТИК ПАРОВЫХ ТУРБИН ШАХТНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ**

*Запропоновано спрощений метод ідентифікації характеристик парових турбін, які входять у склад шахтних енергетичних комплексів, за даними про їх номінальний режим. Метод засновується на доказі про можливість еквівалентної заміни реального потоку пара двома паралельними потоками, один з котрих ізоентропно розширюється в турбіні, виконуючи таку ж роботу, що і реальний потік, а другий – дроселюється. Витрата пари в потоці, що дроселюється, приймається на перемінних режимах роботи турбіни сталою.*

### **THE METHOD OF IDENTIFICATION OF THE CHARACTERISTICS OF A STEAM TURBINE OF THE MINE ENERGETIC COMPLEXES**

*A simplified method of identification of the steam turbine characteristics included in mine energetic complexes are proposed according to their data on their nominal mode. This method is based on the evidence of possible equivalent exchange of the real steam flow by two parallel steam flows, one of which is isoentropically widened in a turbine fulfilling the same job as the real flow, and the second is throttled down. The steam discharge in the throttled-down flow is considered as stable at variable modes of work.*

Создание шахтных энергетических комплексов является одним из перспективных направлений диверсификации деятельности угледобывающих предприятий [1]. Принципы паротурбинной когенерации, реализуемые в тепловых схемах энергетических комплексов, определяют использование паровых противодавленческих турбин с промотбором. Режимы нагружения этих турбин по теплу являются существенно переменными (зима – лето). Для анализа переменных режимов работы паротурбинных энергетических установок необходимо иметь так называемые паровые характеристики турбин, представляющие собой зависимости расхода пара на турбину  $m$  от вырабатываемой электрической мощности  $N_e$  и расходов пара в