

Дякун І.Л., мл. науч. сотр.
(ІГТМ НАН України)

**ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В КИПЯЩЕМ СЛОЕ ПРИ
ТЕРМИЧЕСКОЙ ПЕРЕРАБОТКИ ТВЕРДОГО ТОПЛИВА**

Дякун І.Л., мол. наук. співр.
(ІГТМ НАН України)

**ИНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСІВ В КИПЛЯЧОМУ ШАРІ ПРИ
ТЕРМІЧНІЙ ПЕРЕРОБЦІ ТВЕРДОГО ПАЛИВА**

Dyakun I.L., M. Sc. (Tech)
(IGTM NAS of Ukraine)

**INTENSIFICATION OF PROCESSES IN A FLUIDIZED BED AT
THERMAL PROCESSING OF SOLID FUEL**

Аннотация. Интенсификация технологических процессов является одной из важных задач науки и техники. Особенно актуально вопросы интенсификации стоят для тепло-массообменных процессов, в частности для термической переработки твердого топлива. Одной из перспективных технологий термической переработки твердого топлива разной зольности и степени метаморфизма является кипящий слой с экономическими и экологическими показателями, соответствующих лучшим мировым стандартам. В статье рассмотрены вопросы усовершенствования технологии кипящего слоя посредством организации пульсирующей подачи воздуха (газа) в слой. Предложены модель и методика расчета рациональных параметров пульсирующего потока, а также движения и горения твердой частицы в кипящем слое. Проведены исследования закономерностей влияния амплитудно-частотных характеристик пульсирующей подачи воздуха на полноту выгорания твердых топливных частиц в слое. Разработаны конструкции технических средств (пульсаторов), реализующих подачу пульсирующего воздуха в кипящий слой и обеспечивающих регулирование формы колебаний, а также скважности воздушного потока.

Ключевые слова: интенсификация, пульсирующий кипящий слой, пульсатор.

Интенсификация технологических процессов является одной из важных задач науки и техники. Основой увеличения производительности оборудования и снижения энергозатрат на проведение технологических процессов может служить создание и внедрение эффективных технологических аппаратов с малой удельной энергоемкостью и материалоемкостью, высокой степенью воздействия на обрабатываемые вещества.

Особенно актуально вопросы интенсификации стоят для тепло-массообменных процессов, в частности для термической переработки твердого топлива. Старение шахтного фонда страны, износ угледобывающего оборудования, использование несовершенных технологий добычи, усложнение горно-геологических условий добычи с переходом на глубокие горизонты – все эти факторы привели к существенному ухудшению качества добываемого твердого

топлива. Это положение усугубляется технологически недостаточным совершенством и неготовностью энергогенерирующих установок основных потребителей твердого топлива (электростанций, промышленных и шахтных котельных, коксохимических заводов) к работе на топливе с качеством, значительно худшим расчетного. В связи с этим становится актуальным все более широкое использование «чистых» угольных технологий. Одной из таких технологий является способ термической переработки твердого топлива в кипящем слое. Применительно к твердому топливу способ позволяет эффективно и экологически безопасно перерабатывать топливо различного качества, например, низкосортные угли и отходы углеобогащения [1]. Технология привлекательна также возможностью создания компактного топочного оборудования и автоматизации топочного процесса. Однако, несмотря на значительные преимущества этих установок, они не являются универсальными и имеют ряд существенных недостатков. В частности, при обработке серьезные трудности возникают в основном из-за аэродинамической неустойчивости кипящего слоя, проявляющейся в образовании каналов, залегании части перерабатываемого топлива на решетке и т.д. Осложняющим фактором зачастую является значительный унос мелких частиц топлива из слоя.

Возможности повышения эффективности термической переработки твердого топлива в кипящем слое напрямую связаны с применением его разновидностей, в частности пульсирующего (импульсного) слоя.

Использование активных нестационарных режимов в процессе термической переработки твердого топлива значительно интенсифицирует процесс [2], т.к. позволяет увеличить поверхность контакта между частицами материала и ожижающим агентом, что влияет на полноту выгорания частиц топлива и позволяет снизить удельные затраты тепловой энергии. Кроме того, рядом исследователей [3-5] показано, что наложение на обрабатываемый материал пульсационных воздействий ожижающего агента, способствует стабилизации аэродинамики слоя, препятствует образованию крупных газовых пузырей и сквозных каналов в слое, предотвращает образование застойных зон при сохранении подвижности всех частиц в слое и значительном уменьшении уноса мелких фракций материала из аппарата.

Таким образом, обладая всеми преимуществами кипящего слоя, пульсирующий позволяет стабилизировать аэродинамику, улучшить перемешивание обрабатываемого материала и уменьшить его унос.

При расчете и проектировании технологических аппаратов важно знать закономерности влияния колебаний несущей фазы на интенсивность тепломассообменных процессов. Однако многие как теоретические, так и прикладные вопросы, связанные с исследованием пульсационного процесса в литературе либо недостаточно освещены или характеризуется отсутствием научно-методических основ

В связи с вышесказанным, целью исследования является изучение возможности применения техники пульсирующего слоя для совершенствования про-

цесса термической переработки твердого топлива в кипящем слое.

Вопросы скорости горения и времени сгорания представляют большой теоретический и практический интерес. Решение их позволяет раскрыть основные особенности процесса и тем самым дает возможность управлять им, выявляя пути его интенсификации и создавая методику инженерного расчета.

При использовании пульсационных режимов, являющихся мощным интенсификатором различных тепловых процессов, важным фактором необходимо считать взаимодействие частицы топлива с пульсирующим газовым потоком.

Оценка траектории и скорости движения частицы необходима при расчетах выгорания частиц топлива, оптимизации аэродинамики топочной камеры с целью уменьшения выноса недогоревших частиц, при расчете сепарации частиц топлива и их транспортировки и решении других практических задач современной топочной техники. Следующей важной задачей является определение относительной скорости движения частиц в потоке, так как она определяет интенсивность тепломассообмена частиц в потоке и, следовательно, скорость выгорания.

Рассмотрим математическую модель горения твердой частицы при пульсирующей подаче оживающего агента (газа, воздуха). Динамические характеристики, а именно траектории, скорости перемещения частиц получены на основе анализа силового состояния потока и описывается системой уравнений [6]

$$\frac{d\delta}{dt} = -\frac{1}{2 \cdot \tau_0 \cdot \delta} \cdot \left[1 + 0,276 \cdot \sqrt{\frac{d_0}{v_g}} \cdot |V - u| \cdot \delta \right] \quad (1)$$

$$\frac{du}{dt} = g \cdot \frac{\rho_g - \rho}{2 \cdot \rho + \rho_g} + \frac{36 \cdot \mu_g \cdot (V - u)}{d_0^2 \cdot \delta^2 \cdot (2 \cdot \rho + \rho_g)} \left(1 + \frac{1}{6} \cdot \left(\frac{d_0 \cdot \delta}{v_g} \cdot |V - u| \right)^{2/3} \right) \quad (2)$$

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

где $\delta = d/d_0$ - относительный диаметр частицы; d_0 - начальный диаметр частицы; u - скорость перемещения частицы; x - координата частицы; t - время; V - переменная скорость газозвеси, описывающая форму импульса; где τ_0 - время горения частицы без проскальзывания

$$\tau_0 = \frac{\beta \cdot \rho_c \cdot d_0^2}{8 \cdot D \cdot (c - c_0)};$$

D - коэффициент диффузии кислорода и воздуха к поверхности горячей твердой топливной частицы; c_0, c - концентрация кислорода в потоке и на поверхности частицы соответственно; $\beta = 12/32$ - отношение молекулярных масс уг-

лерода и кислорода; ρ_g, ρ - плотность газа и твердых частиц, соответственно; μ - вязкость газозвеси; ν_g - кинематическая вязкость газа.

Размер частицы уменьшается в процессе горения, что приводит к уменьшению скорости проскальзывания. Вместе с тем, сила вязкости увеличивает скорость проскальзывания. Поэтому эффективность от проскальзывания можно оценить, лишь рассчитав суммарное время горения частицы уменьшающегося размера в пульсирующем потоке газозвеси, состоящем из оживающего агента (воздуха) и инерта.

В качестве параметра, характеризующего влияние пульсаций на скорость горения частицы при переменных параметрах пульсирующего потока по отношению к постоянному используем относительное уменьшение времени горения

$$\theta = \frac{\Delta t_g}{t_{g_0}} = \frac{t_{g_0} - t_g}{t_{g_0}},$$

где t_g - время сгорания частицы в пульсирующем потоке; t_{g_0} - время сгорания частицы в постоянном потоке. Очевидно, что чем больше значение θ , тем более эффективным можно считать соответствующие параметры пульсирующего потока.

Система уравнений (1)-(3) решается методом Рунге-Кутты с начальными условиями $\delta = 1, U = 0, x = 0$ при $t = 0$.

Пульсационная скорость оживающего агента задавалась следующей зависимостью

$$V = \begin{cases} V_{const} + V_a \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\psi} \cdot t\right) & \text{если } t \leq T \cdot \psi \\ V_{const} & \text{если } T \cdot \psi < t \leq T \end{cases}$$

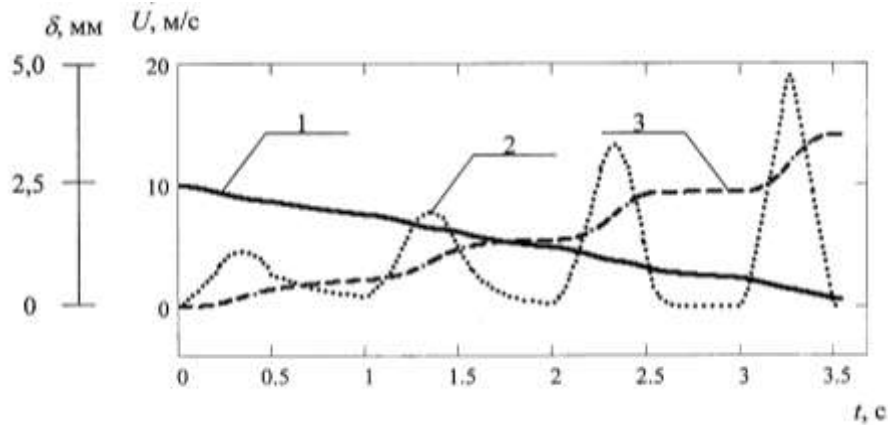
где $V_{const} = u_{cp} \cdot 20\%$, - постоянная составляющая гармонической зависимости, м/с; V_{cp} - средняя скорость газа, м/с; $V_a = (V_{cp} - V_{const}) \cdot \pi/2 \cdot \psi$ - амплитуда гармонической зависимости, определяемая из равенства расходов постоянного и пульсирующего потока газа, м/с; ψ, T - скважность (доля времени импульса подачи воздуха в период пульсаций) и период потока соответственно.

Целью исследования являлось определение влияния таких основных параметров пульсирующего потока, как скважность ψ и период T на уменьшение времени сгорания твердой топливной частицы по сравнению с постоянным потоком газозвеси при равном расходе за период.

При проведении расчетов значения параметров принимали следующие значения: для твердой топливной частицы - начальный диаметр $d_0 = 2,5$ мм; плотность $\rho = 1,5 \cdot 10^3$ кг/м³; для частиц инерта - диаметр $d_i = 0,3$ мм; плотность $\rho_i = 2 \cdot 10^3$ кг/м³; для оживающего агента (газа) - плотность и вязкость определе-

ны по таблице для сухого воздуха при температуре $T_g = 900 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\rho_g = 0,301 \text{ кг/м}^3$; $\mu_g = 46,7 \cdot 10^{-6} \text{ Па}\cdot\text{с}$; средняя расходная скорость газа $V = 5 \text{ м/с}$; для параметров пульсирующего потока - период пульсаций $T = 0,5 \text{ с}$; 1 с ; 2 с ; 4 с ; скважность $\psi = 0,1$; $0,25$; $0,5$; $1,0$; время сгорания частицы в потоке постоянной скорости ($\psi = 1$) равна $5,435 \text{ с}$.

На рис. 1 приведены результаты решения поставленной задачи.



1 – диаметр частицы; 2 – скорость частицы; 3 – путь частицы

Рисунок 1 - Параметры процесса горения твердой топливной частицы при $T = 1 \text{ с}$, $\psi = 0,5$

Как видно из рис. 1, твердая частица вначале плавно поднимается относительно точки ввода ее в поток, но через некоторый промежуток времени масса частицы уменьшается настолько, что вязкостные силы значительно превышают силу тяжести, и координата частицы начинает резко возрастать. То же происходит и с амплитудой колебаний скорости частицы.

Кроме того, было проведено исследовано влияние параметров газозвеси и формы пульсаций скорости воздуха на увеличение времени нахождения твердой топливной частицы в слое по сравнению с постоянным потоком газозвеси при равном расходе за период: с наложением поличастотной составляющей (рис. 2) и в режиме реверс-пульсирующей подачи воздуха (рис. 3).

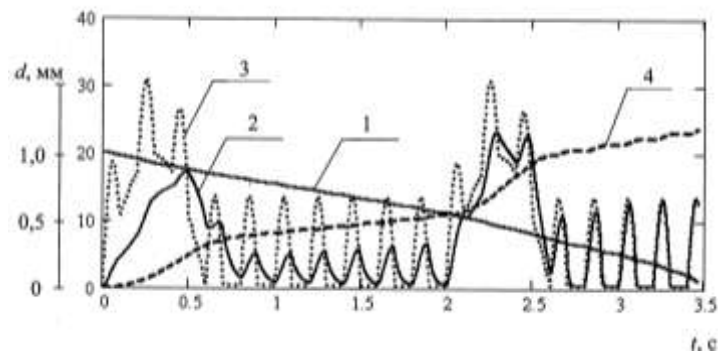
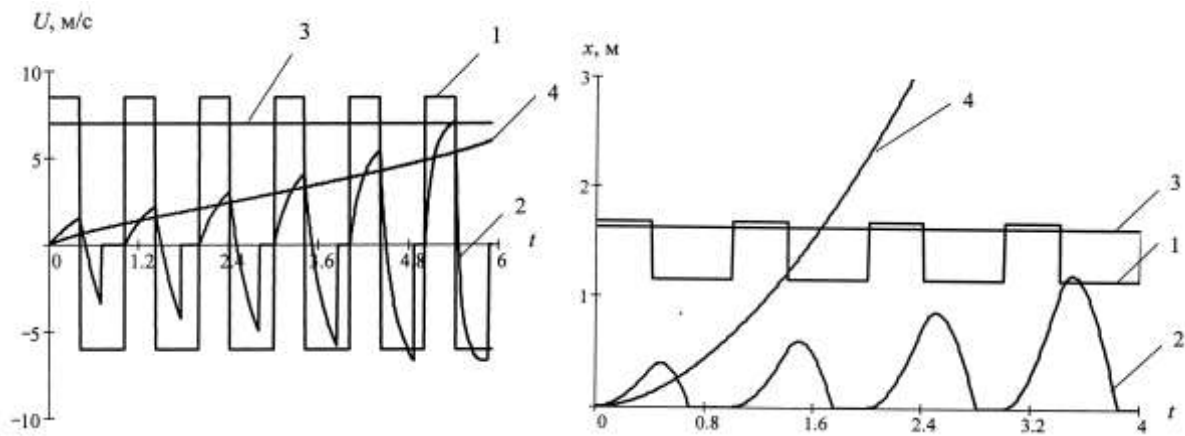


Рисунок 2 – Параметры процесса в поличастотном пульсирующем потоке



1, 2 – при реверс-пульсирующей подаче воздуха в слой;
3, 4 – при постоянной подаче воздуха в слой

Рисунок 3 – Параметры процесса

Анализ результатов исследований модели пульсирующего движения кипящего слоя показал, что рациональными параметрами пульсаций являются период $T = 2 - 10$ с и скважность пульсаций $\psi = 0,2 - 0,4$.

Проведенные исследования позволили разработать специалистам ИГТМ НАН Украины конструкции пульсаторов следующих типов: пульсатор с трехлопастной крыльчаткой [7], пульсатор с дополнительными крыльчатками [8], пульсатор трехлопастной с шестью одинаковыми отверстиями по корпусу [9], пульсатор со щелевым ротором [10], дисковый пульсатор [11], реализующие различные формы импульсов, представленные на рис. 4.

Разработанные конструкции пульсаторов обеспечивают регулируемую форму колебаний воздушного потока, а также скважность потока, т.е. отношение продолжительности одного импульса к продолжительности периода пульсации, в пределах $0,25 - 0,5$ и возможную скорость потока воздуха, проходящего через пульсатор, которая может составлять $10 - 12$ м/с.

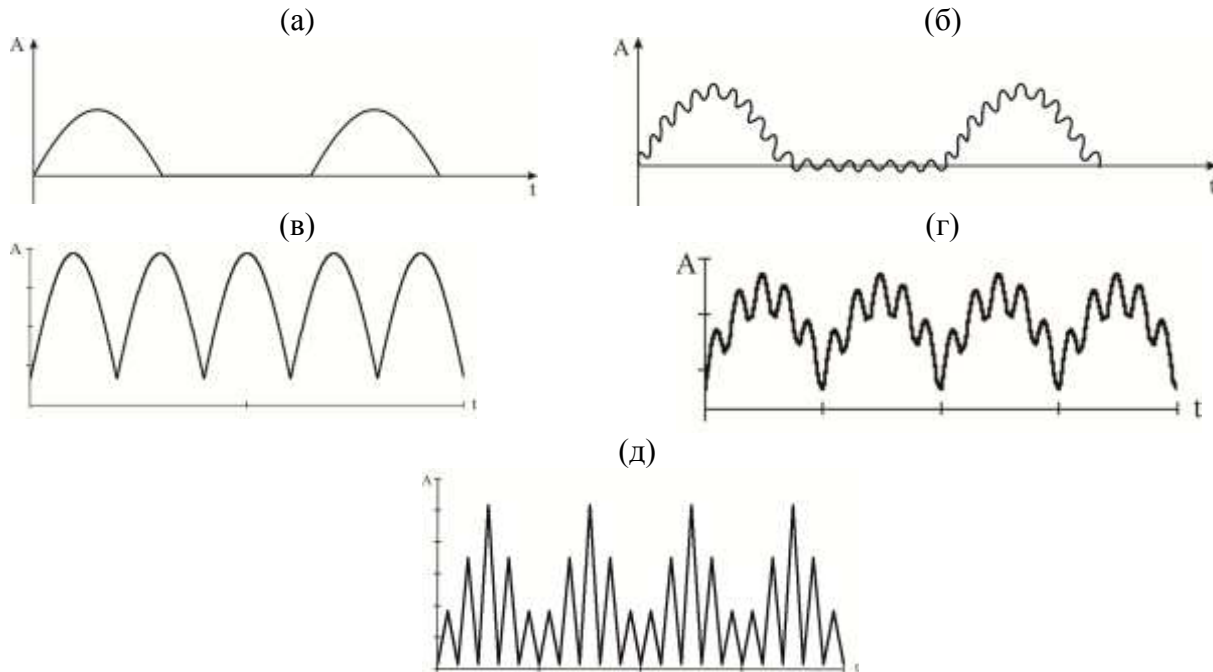
Выводы:

1. На основе анализа результатов исследований модели пульсирующего кипящего слоя показано, что рациональными параметрами пульсаций являются период $T = 2 - 10$ с и скважность пульсаций $\psi = 0,2 - 0,4$. Также показано, что во всем диапазоне исследуемых параметров слоя газозвеси пульсационное воздействие интенсифицирует процессы термической переработки твердого топлива в кипящем слое до 50 %.

2. Применение пульсирующего режима с рациональными амплитудно-частотными характеристиками пульсирующей подачи воздуха позволяет повысить эффективность термической переработки твердого топлива в топках с кипящим слоем за счет полноты выгорания твердых топливных частиц в слое и уменьшения механического недожога.

3. Впервые разработаны конструкции пульсаторов следующих типов: пульсатор с трехлопастной крыльчаткой, пульсатор с дополнительными крыльчат-

ками, пульсатор трехлопастной с шестью одинаковыми отверстиями по корпусу, пульсатор со щелевым ротором, дисковый пульсатор, обеспечивающие регулирование формы колебаний воздушного потока, а также скважности потока, т.е. отношения продолжительности одного импульса к продолжительности периода пульсации, в пределах 0,25 – 0,5.



(а) - [7]; (б) - [8]; (в) - [9]; (г) - [10]; (д) - [11]

Рисунок 4 - Пульсации воздушного потока на выходе устройства

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Корчевой Ю.П. Экологически чистые угольные энерготехнологии / Ю.П. Корчевой, А.Ю. Майстренко, А.И. Топал. – К : Наукова думка, 2004. – 186 с.
2. Бокун И.А. Газификация низкосортных топлив в пульсирующем слое/ И.А. Бокун // Перспективы развития энергетики в XXI веке: Материалы Республиканской научно-практической конференции, 12-14 мая 2010 г. – Минск: БНТУ, 2011. – С.40-45.
3. Гичев Ю.А. Анализ влияния пульсационно-акустического сжигания топлива на характеристики парового котла и разработка технических решений / Ю.А. Гичев, Д.С. Адаменко // Металургійна теплотехніка: Збірник наукових праць Національної металургійної академії України. – Дніпропетровськ: Нова ідеологія, 2008 – С.69 – 80.
4. Накорчевский А.И. Динамика пульсирующей монодисперсной смеси / А.И. Накорчевский // ТОХТ – 2000. – Т.34, № 1 – С. 11 – 15.
5. Акулич П.В. Волновое движение твердых частиц в пульсирующем потоке газа / П.В. Акулич, П.С. Куц // ИФЖ. – 2003. – Т.76, № 4 – С. 40 – 45.
6. Дякун И.Л. Повышение эффективности энергетической переработки угля / И.Л. Дякун. – К.: Наукова думка, 2014. – 126 с.
7. Пат. 57662А Україна, МПК G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Булат А.Ф., Чемерис І.Ф., Возиянов В.С.; заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. - № 2002107844; заявл. 03.10.2002; опубл. 16.06.2003, Бюл. № 6.
8. Пат. 66646А Україна, МПК G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Чемерис І.Ф., Булат А.Ф., Возиянов В.С., Слободянникова І.Л.; заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. - № 2003087753; заявл. 15.08.2003; опубл. 17.05.2004,

Бюл. № 5.

9. Пат. 4290 Україна, МПК G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Чемерис І.Ф., Булат А.Ф., Возиянов В.С., Слободяникова І.Л.; заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. - № 20040402818; заявл.16.04.2004; опубл. 17.01.2005, Бюл. № 1.

10. Пат. 4855 Україна, МПК G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Чемерис І.Ф., Булат А.Ф., Возиянов В.С., Слободяникова І.Л.; заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. - № 20040503291; заявл. 05.05.2004; опубл. 15.02.2005, Бюл. № 2.

11. Пат. 7783 Україна, МПК G01L27/00, F15B21/12. Пристрій для створення пульсуючих повітряних потоків у топці з киплячим шаром / Чемерис І.Ф., Булат А.Ф., Возиянов В.С., Слободяникова І.Л.; заявник та патентовласник ІГТМ НАНУ. - № 20041108903; заявл. 01.11.2004; опубл. 15.07.2005, Бюл. № 7.

REFERENCES

1. Korchevoy, Yu.P., Maystrenko, A.Yu. and Topal, A.I.(2004) *Ekologicheski chistyie ugolnyie energetologii* [Ecologically clean coal energytechnologies], Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.

2. Bokun, I.A. (2011) "Gasification of low-grade fuels pulsed layer", *Proc. of the Republican Scientific and Practical Conference "Prospects of Energy Development in the XXI Century"*, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 12-14 May 2010, pp.40-45.

3. Gichev, Yu.A. and Adamenko, D.S. (2008) "Analysis of the impact-acoustic pulsating combustion characteristics on the boiler and the development of technical solutions", *Metallurgiyina teplotehnika*, New ideology, Dnepropetrovsk, UA, pp.69 – 80.

4. Nakorchevskiy, A.I. (2000). "Dynamics pulsating monodisperse mixture", *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tehnologii*, Vol.34, № 1, pp. 11 – 15.

5. Akulich, P.V.(2003) "The wave motion of solid particles in a pulsating gas stream", *Inzhenernofizicheskii zhurnal*, Vol.76, № 4, pp. 40 – 45.

6. Dyakun, I.L. (2014) *Povyishenie effektivnosti energeticheskoy pererabotki uglya* [Increase of efficiency energy coal processing] Naukova dumka, Kyiv, Ukraine.

7. Chemeris, I.F., Bulat, A.F. and Voziyanov, V.S., M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine (2003), *Pristriy dlya stvorenniya pulsuyuchih povitryanih potokiv u toptsi z kipyachim sharom* [Device for creating pulsating air flows in fluidized bed furnace], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 57662A.

8. Chemeris, I.F., Bulat, A.F., Voziyanov, V.S. and Slobodyannikova, I.L., M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine (2004), *Pristriy dlya stvorenniya pulsuyuchih povitryanih potokiv u toptsi z kipyachim sharom* [Device for creating pulsating air flows in fluidized bed furnace], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 66646A.

9. Chemeris, I.F., Bulat, A.F., Voziyanov, V.S. and Slobodyannikova, I. L., M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine (2005), *Pristriy dlya stvorenniya pulsuyuchih povitryanih potokiv u toptsi z kipyachim sharom* [Device for creating pulsating air flows in fluidized bed furnace], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 4290.

10. Chemeris, I.F., Bulat, A.F., Voziyanov, V.S. and Slobodyannikova, I.L., M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine (2005), *Pristriy dlya stvorenniya pulsuyuchih povitryanih potokiv u toptsi z kipyachim sharom* [Device for creating pulsating air flows in fluidized bed furnace], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 4855.

11. Chemeris, I.F., Bulat, A.F., Voziyanov, V.S. and Slobodyannikova I.L., M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the NAS of Ukraine (2005), *Pristriy dlya stvorenniya pulsuyuchih povitryanih potokiv u toptsi z kipyachim sharom* [Device for creating pulsating air flows in fluidized bed furnace], State Register of Patents of Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 7783.

Об авторе

Дякун Інна Леонидовна, младший научный сотрудник отдела проблем шахтных энергетических комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ІГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, dyakun@ukr.net

About the author

Dyakun Inna Leonidovna, Master of Science (M. Sc.), Junior Researcher in Department of Mine Energy Complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science

Анотація. Інтенсифікація технологічних процесів є однією з важливих задач науки і техніки. Особливо актуально питання інтенсифікації стоять для тепло-масообмінних процесів, зокрема для термічної переробки твердого палива. Однією з перспективних технологій термічної переробки твердого палива різної зольності і ступеня метаморфізму є киплячий шар з економічними та екологічними показниками, що відповідають кращим світовим стандартам. У статті розглянуті питання удосконалення технології киплячого шару за допомогою організації пульсуючої подачі повітря (газу) в шар. Запропоновано модель і методика розрахунку раціональних параметрів пульсуючого потоку, а також руху та горіння твердої частинки в киплячому шарі. Проведено дослідження закономірностей впливу амплітудно-частотних характеристик пульсуючої подачі повітря на повноту вигорання твердих паливних частинок в шарі. Розроблено конструкції технічних засобів (пульсаторів), що реалізують подачу пульсуючого повітря в киплячий шар і забезпечують регулювання форми коливань, а також шпаруватості повітряного потоку.

Ключові слова: інтенсифікація, пульсуючий киплячий шар, пульсатор.

Abstract. Intensification of production processes is one of the important problems of science and technology. Especially important is intensification of heat and mass transfer processes and, in particular, thermal processing of solid fuel. One of the most promising technologies of thermal processing of solid fuels with different ash content and degree of metamorphism is a fluidized bed whose economic and ecological indicators correspond to the best world standards. The article focuses on improving of the fluidized bed technology by providing pulsating air (gas) supply into the bed. The article presents a model of and a method of rational parameter calculation for the pulsating flow and solid particle motion and combustion in the fluidized bed. An effect of amplitude-frequency characteristics of the pulsating air supply on the completeness of solid fuel particles combustion in the fluidized bed was studied. Technical facilities (pulsators) were designed which can supply pulsing air flow into the fluidized bed and regulate mode shape and porosity of the air flow

Keywords: intensification, pulsing fluidized bed, pulsator.

Стаття постуила в редакцію 6.04.2015

Рекомендовано к печати д-ром техн. наук Е.В. Семененко