

**К ВОПРОСУ ОБ ИНТЕНСИФИКАЦИИ СЖИГАНИЯ ТВЕРДОГО
ТОПЛИВА В ПУЛЬСИРУЮЩЕМ КИПЯЩЕМ СЛОЕ**

Показано, що одним з найбільш перспективних шляхів інтенсифікації процесу спалювання твердого палива є пульсаційна подача повітря в киплячий шар, що забезпечує підвищення швидкості горіння палива на 20 - 40 %. Виконано аналіз різних конструкцій пульсаторів. Показано, що найбільше повно вимогам, пропонованим до технічних засобів створення пульсаційного киплячого шару, відповідає пульсатор із трилопатеvim ротором, що містить один вхідний і два вихідних канали.

**TO A PROBLEM ON INTENSIFICATION OF INCINERATION SOLID
COMBUSTIBLE IN A PULSATORY BOILING BED**

There's shown, that one of the most perspective trajectories intensification of process incineration solid combustible is the pulsation air delivery in a boiling bed, which ensures pinch of burning rate of combustible on 20 - 40 %. The analysis of different constructions of pulsators is carried out. There's shown, that is fullest to the requirements shown to means of making of a pulsation boiling bed, will match to a pulsator with a three-blade curl containing one input and two output channels.

Необходимость диверсификации деятельности нерентабельных угледобывающих предприятий в направлении углубленной переработки угля на месте его добычи путем производства тепловой и электрической энергии с внедрением высокоэффективных теплоэнергоемких технологий определяет актуальность разработки способов и средств интенсификации процессов сжигания твердого топлива в топках кипящего слоя, входящих в состав шахтных энергокомплексов [1]. Анализ существующих способов, схем и средств интенсификации процесса сжигания твердого топлива позволили сделать вывод о предпочтительности наложения пульсаций на подаваемый в топку оживающий воздух для интенсификации тепло- и массообменных процессов и повышения теплопроизводительности топки [2]. В этой связи в последнее время пристальное внимание уделяется способам и средствам наложения пульсаций на поток оживающего воздуха, подаваемого в топку циркулирующего кипящего слоя (ЦКС) в виде первичного воздуха, подводимого снизу под слой топлива, и вторичного воздуха, вводимого в верхнюю часть надслоевого пространства. Основными параметрами, характеризующими пульсирующий кипящий слой, являются скважность ψ и период пульсаций T . Так, в работе [3] было проведено исследование влияния периода пульсаций T и скважности ψ на уменьшение времени сгорания угольной частицы по сравнению с постоянным потоком воздуха, равного расхода за период. Результаты данного исследования сведены в табл.1, где время горения частицы t_g определялось в результате решения математической модели, рассмотренной в [3] и решенной с помощью программного обеспечения MathCad 2001 методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Относительное уменьшение времени горения θ определялось по формуле

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

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

Поверхностная скорость горения определялась по формуле

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

где d_0 - начальный диаметр угольной частицы; ρ_m – плотность частицы.

Таблица 1 – Показатели интенсивности горения угольной частицы при различных параметрах пульсаций скорости оживающего агента

Показатели	Скважность			
	$\psi = 0,1$	$\psi = 0,25$	$\psi = 0,5$	$\psi = 1,0$
Период пульсаций $T = 0,5$ с				
Время горения t_g , с	4,378	3,696	3,485	3,957
Относительное уменьшение времени горения θ	0,194	0,32	0,359	0,272
Поверхностная скорость горения K_s	0,143	0,169	0,179	0,158
Период пульсаций $T = 1$ с				
Время горения t_g , с	4,521	4,128	3,883	4,44
Относительное уменьшение времени горения θ	0,168	0,24	0,286	0,183
Поверхностная скорость горения K_s	0,138	0,151	0,161	0,141
Период пульсаций $T = 2$ с				
Время горения t_g , с	4,488	4,351	4,435	5,203
Относительное уменьшение времени горения θ	0,174	0,199	0,184	0,043
Поверхностная скорость горения K_s	0,139	0,144	0,141	0,12
Период пульсаций $T = 4$ с				
Время горения t_g , с	4,433	4,639	4,944	5,719
Относительное уменьшение времени горения θ	0,184	0,146	0,09	-0,052
Поверхностная скорость горения K_s	0,141	0,135	0,126	0,109

Анализ данных, приведенных в табл.1 показывает, что влияние изменения скважности на скорость горения угольной частицы можно описать как монотонную функцию, имеющую минимум, причем при увеличении периода пульсаций этот минимум смещается в сторону меньших скважностей. Увеличение периода пульсаций при малых скважностях ($\psi = 0,1$) практически не влияет на время сгорания угольной частицы. Однако, при больших значениях скважности ($\psi \geq 0,1$) увеличение периода пульсаций приводит к снижению эффективности пульсационного воздействия и увеличению времени сгорания угольной части-

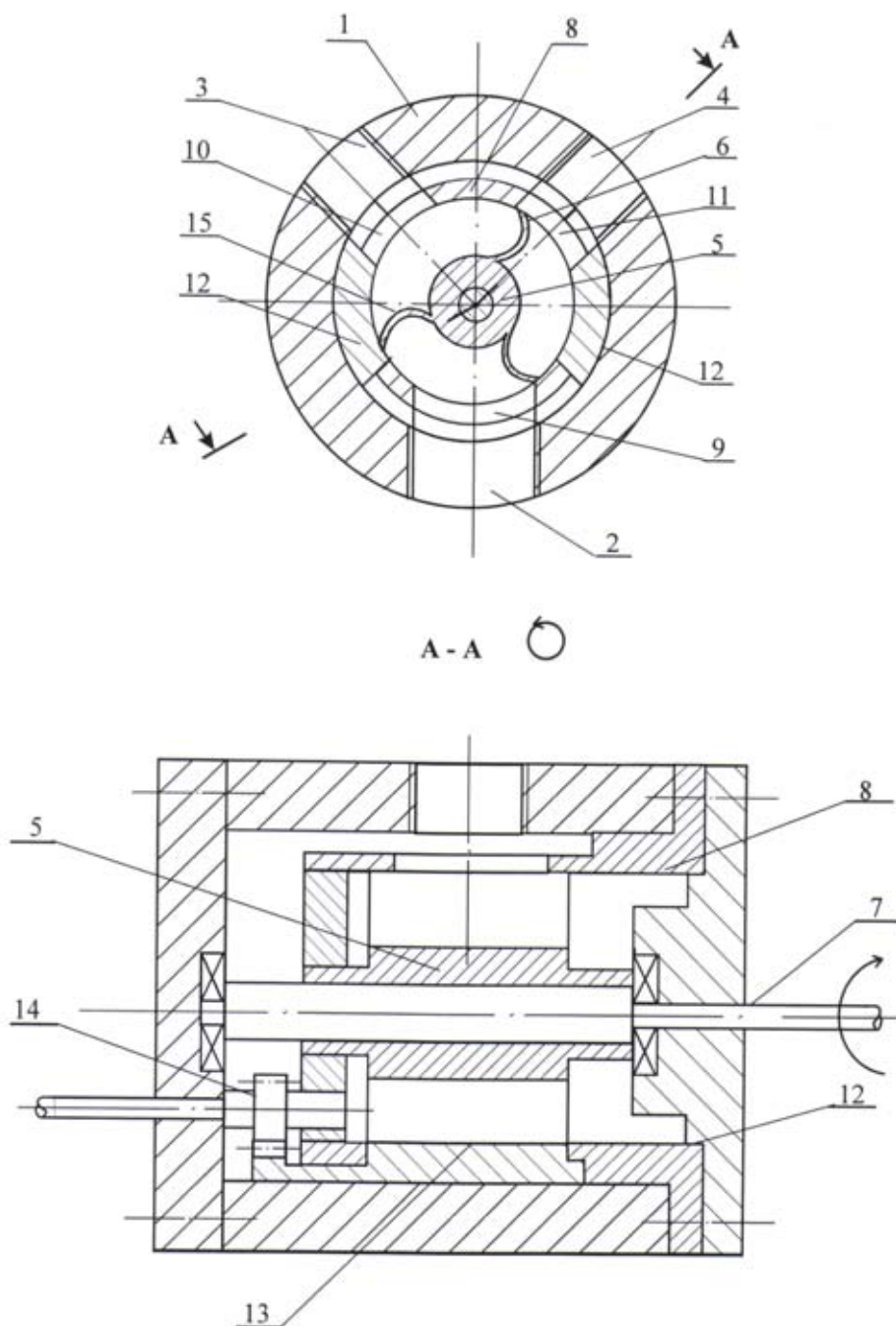
цы. Наиболее рациональными параметрами пульсаций являются период пульсаций $T = 2 - 10$ с и скважность пульсаций $\psi = 0,3 - 0,4$, что обеспечивает повышение скорости горения твердого топлива на 20 – 40 %. Приведенные данные свидетельствуют о том, что реализация принципа пульсирующей подачи оживающего воздуха в топку ЦКС может обеспечить достаточно высокую степень интенсификации процесса горения.

Из существующих технических средств реализации способа сжигания твердого топлива в кипящем слое, обеспечивающих указанные параметры пульсаций оживающего воздуха, наиболее перспективными являются пульсаторы шибберного и роторного типа. При использовании пульсаторов шибберного типа в воздухоподающем трубопроводе по диаметру его поперечного сечения устанавливается круглая заслонка (шибер), ось вращения которой расположена вдоль ее диаметра и кинематически связана с приводом, размещенным за пределами воздухоподающего трубопровода [4]. Примером пульсатора роторного типа, является конструкция, содержащая цилиндрический корпус с входным и выходным каналами и ротором, установленным по оси корпуса и выполненным в виде усеченного цилиндра, а выходной канал выполнен в виде прямоугольного участка на боковой поверхности корпуса, равномерно перфорированного идентичными по геометрическим размерам отверстиями круглой формы, продольные оси которых ориентированы по радиусу корпуса [5]. Достоинствами шибберных и роторных пульсаторов является их простота, дешевизна, удобство обслуживания, низкое аэродинамическое сопротивление; возможность получения низких частот. Недостатками существующих шибберных и роторных пульсаторов являются: невозможность регулирования скважности импульсов подаваемого воздуха; большая металлоемкость при пульсационной подаче первичного и вторичного воздуха, обусловленная необходимостью установки отдельного пульсатора на каждый воздухоподающий канал; существенная сложность синхронизации или фиксированного (заданного) сдвига по фазе между импульсами первичного и вторичного воздуха.

Учитывая вышеперечисленные недостатки существующих пульсаторов, в ИГТМ НАН Украины была разработана конструкция роторного пульсатора с трехлопастной крыльчаткой. Выбранное количество лопастей обусловлено тем, что при реализации пульсирующего потока трехлопастной роторный пульсатор обеспечивает работу со скважностью в пределах $\psi = 0,25 - 0,5$, при которой достигается наибольший эффект интенсификации процесса горения твердого топлива в пульсирующем кипящем слое.

Общий вид разработанного пульсатора представлен на рис.1. Пульсатор содержит: цилиндрический корпус 1 с входным 2 и выходными 3 и 4 каналами, оси симметрии которых расположены в одной плоскости под углом α относительно входного канала; ротор 5, выполненный в виде крыльчатки с лопастями 6 и установленный по оси корпуса 1 связан с приводным валом 7; неподвижную втулку 8 с окнами 9, 10 и 11, поперечная ось которых совпадает с продольными осями каналов 2, 3 и 4 корпуса 1 соответственно; сегменты 12, установленные между внутренней поверхностью корпуса 1 и неподвижной втулкой 8 с

возможностью углового поворота относительно продольной оси корпуса 1 и перекрытия выходных каналов 3 и 4. Сегменты 12 выполнены с выступами 13, входящими в окна 10 и 11 неподвижной втулки 8, а внутренняя поверхность сегментов 12, вне выступов 13 связана с регулировочным механизмом 14, выполненным в виде зубчатой передачи. Лопасть 6 крыльчатки ротора 5 выполнена с выпуклостью 15 в сторону направления вращения приводного вала 7.



1 – корпус; 2 – входной канал; 3, 4 – выходные каналы; 5 – ротор; 6 – лопасть крыльчатки; 7 – приводной вал; 8 – неподвижная втулка; 9, 10, 11 – окна; 12 – сегменты; 13 – выступы сегментов; 14 – регулировочный механизм; 15 – выпуклость лопасти крыльчатки

Рис. 1 – Пульсатор роторного типа

Пульсатор работает следующим образом. Воздушный поток поступает на вход канала корпуса 1 и через окно 9 попадает на внутреннюю полость неподвижной втулки 8 при вращающемся роторе 5 с крыльчаткой 6. Ротор 5 поочередно соединяет или отсекает окна 9, 10 и 11 неподвижной втулки 8, регулируя пульсацию воздушного потока на выходе каналов 3 и 4 корпуса 1. За один оборот ротора 5 в каналах 3 и 4 воздушный поток пульсирует трижды. При необходимости изменения скважности потока, т.е. отношения продолжительности одного импульса к продолжительности периода пульсации, включается регулировочный механизм 14, кинематически связанный с сегментами 12, расположенными между внутренней стенкой корпуса 1 и неподвижной втулкой 8. Сегменты 12, поворачиваясь на заданный угол в окнах 10 и 11, уменьшают или увеличивают проходное сечение выходных каналов 3 и 4 корпуса 1, позволяя регулировать скважность потока и величину смещения импульсов по фазе.

Для определения оптимальных параметров входных и выходных каналов, их расположения относительно друг друга, а также выбора формы лопастей крыльчатки ротора были проработаны и проанализированы варианты, которые представлены в табл. 2 и на рис. 2. На рис. 2 верхняя часть диаграммы соответствует полному открытию выходных каналов, нижняя часть диаграммы соответствует перекрытию выходных каналов на 50 %. Выходные каналы обозначены цифрами 1 и 2, входной – цифрой 3. Вращение ротора осуществляется по часовой стрелке. Число пульсаций за один оборот ротора равно 3.

Анализируя приведённые в табл. 2 параметры роторного пульсатора необходимо отметить следующее:

а) чем меньше угол расположения осей выходных каналов по отношению к входному каналу, тем больше аэродинамическое сопротивление воздушному потоку, так как коэффициент сопротивления зависит от угла поворота струи;

Коэффициент местного аэродинамического сопротивления для поворота струи воздуха от входящего канала к одному из выходных каналов определяется по формуле

$$\xi_{сб} = 1 + \left(\frac{w_6}{w_c} \right)^2 - 2 \cdot \frac{w_6}{w_c} \cdot \cos \alpha - K'_6 \cdot \left(\frac{w_6}{w_c} \right)^2,$$

где w_6 , w_c – скорость потока во входном и выходном каналах, отклонённом на угол α от оси входного канала; K'_6 – коэффициент сжатия потока [6]

$$K'_6 = \frac{1 - 2\mu}{\mu^2} \cdot \sin^2 \alpha,$$

где μ – коэффициент расхода.

При типичном $w_6/w_c = 1$ для $\alpha_1 = 60^\circ$ и $\alpha_2 = 45^\circ$, получим значения $\xi_{сб_1} = 0,36$ и $\xi_{сб_2} = 0,24$.

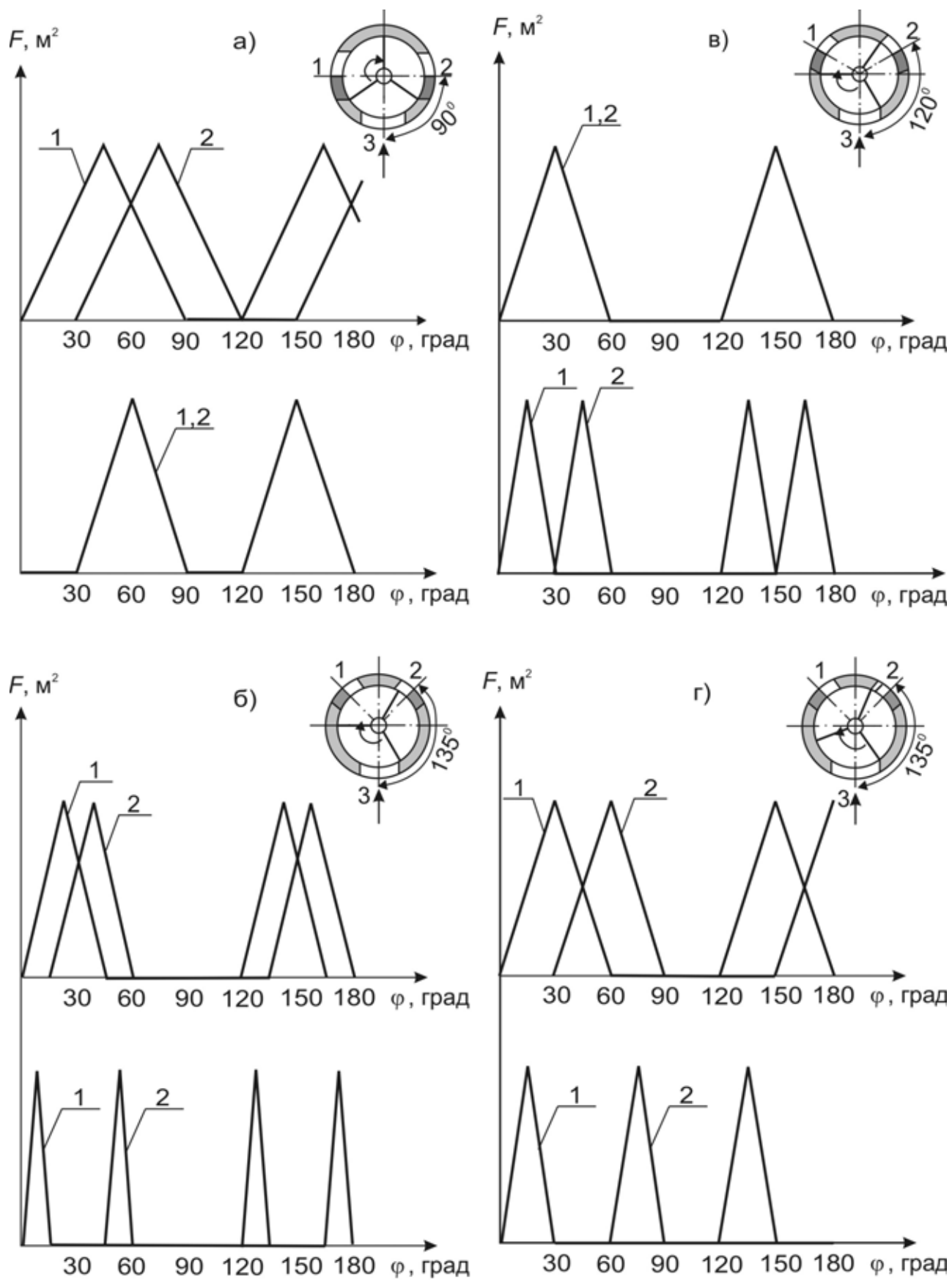


Рис. 2 – Диаграммы изменения расхода воздуха в функции угла поворота ротора

Таблица 2 – Технические параметры роторного пульсатора

Параметры	Угол между осями входного и выходных отверстий, град.							
	90 (рис.2 а)		120 (рис. 2 б)		135 (рис.2 в)		135 (рис.2 г)	
	Степень открытия выходных каналов, %							
	100	50	100	50	100	50	100	50
1. Угол отверстия, град.:								
- входного;	60	60	60	60	60	60	90	90
- выходного.	60	60	60	60	60	60	60	60
3. Период пульсации, град.	120	120	120	120	120	120	120	120
4. Длительность одного импульса	90	60	60	30	45	15	60	30
5. Сквозность	0,75	0,5	0,5	0,25	0,375	0,125	0,5	0,25
6. Сдвиг импульсов по фазе, град.	30	0	0	30	15	45	30	60

Отношение коэффициентов местных сопротивлений составляет существенную величину отношения $\xi_{сб_1}/\xi_{сб_2}=1,5$. Отсюда следует, что предпочтение следует отдать, при прочих равных условиях, конструктивной схеме, представленной на рис.2 г с расположением выходных каналов по отношению к входному под углом 135^0 ;

б) была также проанализирована форма лопастей крыльчатки в поперечном сечении: выпуклая в сторону направления вращения приводного вала и выпуклая в сторону, обратную направлению вращения приводного вала.

В соответствии с математическим выражением теоремы об изменении количества движения и её применении в случае взаимодействия струи и твёрдой преграды [7] имеем:

- при выпуклости в сторону, обратную направлению вращения приводного вала

$$P_1 = \rho \cdot Q \cdot v \cdot (1 - \cos \alpha),$$

где P_1 – сила, действующая на лопасть, кг; ρ – плотность воздушного потока, кг/м³; Q – расход, м³/мин; v – скорость струи, м/с; α – угол схода струи с преграды.

- при выпуклости в сторону, совпадающую с направлением вращения приводного вала

$$P_2 = 2\rho \cdot Q \cdot v$$

Как видно из приведённых формул, сила P_2 превышает силу P_1 более чем в 2 раза. Это способствует раскручиванию ротора, что значительно сокращает расходы по мощности приводного двигателя;

в) немаловажным фактором в технологическом процессе сжигания топлива в топках с ЦКС является сдвиг вторичного пульсирующего потока по фазе относительно первичного с целью лучшего перемешивания топлива для более полного его сжигания. Из рассмотрения конструктивных схем, приведённых на рис.2 б и 2 г, следует, что в момент полностью открытых выходных каналов сдвиг импульсов воздушного потока по фазе на рис.2 б равен 0^0 , а на рис.2 г – 30^0 . Следовательно, возможность сдвига по фазе импульсов первичного и вторичного воздуха, при прочих равных условиях, лучше по конструктивной схеме, приведённой на рис.2г.

Для проверки принятых конструктивных решений был разработан и изготовлен макетный образец роторного пульсатора с трехлопастной крыльчаткой и проведены его экспериментальные исследования, которые подтвердили теоретические обоснования создания такой конструкции пульсатора для интенсификации процесса горения твердого топлива в кипящем слое.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чемерис И.Ф. Техничко-экономические аспекты работы шахтных энергетических комплексов. Геотехническая механика: Сб.науч. трудов ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск: Полиграфист.- 1999. – № 15.- С. 55-61.
2. Северянин В.С. Горение частицы в пульсирующем потоке. Известия ВУЗов. Энергетика. – 1975. № 6. С. 144 – 147
3. Чемерис И.Ф., Головки Ю.Н. Слободяникова И.Л. Исследование математической модели процесса горения угольной частицы при переменных параметрах пульсирующего потока газовзвеси // Геотехническая механика. Межведомств.сб.науч.трудов. – Днепропетровск, - 2001.- № 29. - С. 176 – 182
4. А.С. СССР № 1449768, F23 C 11/04. Устройство для сжигания топлива в пульсирующем потоке / А.П. Шелякин, И.С. Капошин, А.С. Клепач, Ю.Б. Емцев. - № 4212847/24-06; Заявлено 19.03.87; Опубликовано 07.01.89, Бюл. № 1.- 1989.
5. А.С. СССР № 1418521, F 15B 21/12. Пульсатор/ Л.Н. Бессалов, В.А. Дрозд, К.И. Зенченко, В.Е. Ходурский. - № 4053857/25-06; Заявлено 09.04.86; Опубликовано 23.08.88, Бюл. № 31. - 1988.
6. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1975 - 559 с.
7. Маковозов М. И. Гидравлика и гидравлические машины. М.: Машгиз, 1962. – 248 с.