

УДК 662.87:533.92

Пигида Е.Ю., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Холявченко Л.Т., канд. техн. наук, ст. науч. сотр.,
Демченко С.В., магистр,
Давыдов С.Л., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

**ВЛИЯНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ РЕАКЦИОННОЙ КАМЕРЫ НА
ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКИХ ПРЕВРАЩЕНИЙ
УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИХ СРЕД**

Пігіда Є.Ю., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Холявченко Л.Т., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Демченко С.В., магістр,
Давидов С.Л., магістр
(ІГТМ НАН України)

**ВПЛИВ ТЕПЛОВИХ ПАРАМЕТРІВ РЕАКЦІЙНОЇ КАМЕРИ НА
ЕФЕКТИВНІСТЬ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ
СЕРЕДОВИЩ, ЩО МІСТЯТЬ В СОБІ ВУГЛЕЦЬ**

Pigida Ye.Yu., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Kholiavchenko L.T., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Demchenko S.V., M.S. (Tech.),
Davydov S.L., M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

**HOW THERMAL PARAMETERS OF REACTION
CHAMBER INFLUENCES THE THERMAL CONVERSION EFFICIENCY
IN THE CARBON-BEARING ENVIRONMENT**

Аннотация. Исследован высокотемпературный нагрев углеродсодержащего топлива с размерами частиц от 50 до 200 мкм с целью установления рациональных кинетических и тепловых параметров, влияния их на тепло – и массообмен и эффективность процесса термических превращений в реакционной камере при изменении удельного теплового потока $q_c = 10^4 \div 10^7$ Вт/м² и температуре газа $T_k = (2 \div 6) \cdot 10^3$ К. Влияние тепловых параметров на процесс газификации твердого топлива определено на примере нагрева частиц угля и водяного пара при конвективном и лучистом теплообмене.

Дана сравнительная оценка результатов расчетов и сделан вывод о преобладающем влиянии лучистого теплообмена в суммарном тепловом потоке при $T_k > 5 \cdot 10^3$ К в плазменном реакторе.

Приведены результаты расчета объема реакционной камеры и режима ее работы с учетом тепловых и кинетических параметров высокотемпературного нагрева топлива. Показано, что эффективный процесс термических превращений топлива необходимо проводить при температуре $T_k \leq 3000$ К в плазмохимическом реакторе совмещенного типа.

Ключевые слова: углеродсодержащая среда, камера, нагрев, температура, кинетические параметры, термические превращения, объем, эффективность процесса.

Введение. Процессы тепло- и массообмена, агрегатных и фазовых превращений в минералах и породах при тепловом воздействии, окислительно-восстановительные процессы с выделением или поглощением тепла являются сопутствующими при различных технологических процессах переработки углеродсодержащих сред. С развитием различных способов переработки и увеличением требований к качеству целевого продукта тепловые процессы все в большей степени переходят из разряда сопутствующих в разряд чисто технологических.

В последние годы возрос интерес к гетерогенным плазмохимическим процессам, в которых исходное сырье поступает в плазму в виде мелкодисперсной твердой или жидкой фазы, а в результате реакций образуются газообразные продукты.

Прогрессивным направлением переработки низкосортных углей и отходов углеобогащения является пароплазменная газификация, которая наиболее полно отвечает требованиям современного производства и экологии.

Исследованиями, выполненными в ИГТМ НАН Украины, показана возможность получения синтез-газа с заданными физико-химическими свойствами путем регулирования отношения основных компонентов топлива – «уголь-вода». Получен синтез-газ с повышенным содержанием водорода (55 – 57 %) и окиси углерода (35 – 36 %). Такие результаты получены при газификации угля в электродуговом реакторе с применением в качестве окислителя водяного пара. В сравнении с традиционными способами переработки предложенный способ позволяет осуществить экологически чистый процесс без выбросов оксида азота и серы в окружающую среду [1].

Высокая температура газа-теплоносителя в электродуговом реакторе обеспечивает нагрев введенного в него порошкообразного материала (например, углеродсодержащая среда) со скоростью порядка 10^6 град/с [2]. В то же время конечная температура твердой фазы в ряде случаев практического применения электродугового нагрева не превышает температуру 2500 К, то есть существенно ниже среднemasсовой температуры газа-теплоносителя. Поэтому во избежание перегрева обрабатываемый материал (порошок угля) необходимо своевременно вывести из зоны нагрева. Время контакта твердой фазы с газом-теплоносителем можно регулировать изменением расхода последнего или длины реакционной камеры.

Следует отметить, что технология гетерогенных плазмохимических процессов (т.е. система «плазма – дисперсные материалы») в настоящее время разработана еще недостаточно и требует дальнейшего обобщения и анализа результатов, полученных в процессе исследований и технологических разработок.

В связи с тем, что разработанный метод переработки углеродсодержащей среды обладает сравнительно высокой энергоемкостью процесса, дальнейшие исследования должны быть направлены на изыскание способов повышения эффективности переработки и улучшения экономических показателей пароплазменной газификации. Центральным вопросом, который необходимо решить в первую очередь, является научно-обоснованный выбор и исследование метода

интенсификации процесса тепло- и массообмена в реакционной камере плазмо-химического реактора.

Целью данной работы является установление рациональных кинетических и тепловых параметров высокотемпературного нагрева дисперсных систем и влияния их на тепло- и массообмен и эффективность процесса термических превращений в реакционной камере.

Изложение основного материала. Для практических целей большой интерес представляет время пребывания частиц угля в реакционной камере с момента поступления в нее и до полного завершения процесса газификации коксового остатка. Достаточно строгий теоретический расчет времени пребывания угольных частиц в общем случае представляет сложную задачу. Химические и физические превращения частиц угля в период их разогрева, выгорание летучих веществ – все это пока не поддается строгому теоретическому расчету. Однако для тощих углей типа антрацита задача несколько упрощается и с рядом допущений ее можно сформулировать. Так, если принять теплоемкость частицы постоянной, пренебречь изменением массы и горением летучих, то при малых значениях числа *Био* ($Bi < 1$) уравнение скорости разогрева частицы может быть преобразовано к виду [3]

$$\tau_n = \frac{(T_q - T_0) \cdot d_q \cdot \rho_q \cdot c_q}{6q_c} \quad (1)$$

где τ_n - время нагрева частицы, с; T_0 , T_q - температура частицы соответственно в начальный и конечный момент времени, К; d_q - диаметр частицы, м; ρ_q - плотность частицы, кг/м³; c_q - удельная теплоемкость частицы, Дж/(кг·К); q_c - суммарный (конвективный + лучистый) тепловой поток, Вт/м².

Рассмотрим влияние параметров плазмодугового потока на нагрев угольной частицы. Уравнение (1) позволяет оценить влияние плотности теплового потока на время нагрева частицы в зависимости от ее теплофизических свойств и размера. Расчеты выполнены для следующих исходных данных: $T_q = 1800$ К; $T_0 = 273$ К; $d_q = (5 \div 20) \cdot 10^{-5}$ м; $\rho_q = 1600$ кг/м³; $c_q = 1400$ Дж/(кг·К); $q_c = 10^4 \div 10^7$ Вт/м².

В результате расчетов установлено, что при возрастании плотности теплового потока в реакционной камере свыше 10^5 Вт/м² наблюдается плавное уменьшение времени нагрева угольных частиц до предельной температуры $T_q = 1800$ К. При $q_c < 10^5$ Вт/м² имеет место резкий рост времени нагрева угольных частиц всех размеров. Следовательно, при таких значениях плотности теплового потока нецелесообразно проводить газификацию углеродсодержащего твердого топлива.

Температура частицы зависит от плотности потока, времени нагрева и ее размера. Варьируя этими параметрами можно найти условия, обеспечивающие нагрев частицы до заданной температуры. Установлено, что температура раз-

личных по размеру частиц ($d_c = 50 \div 200$ мкм) колеблется в широких пределах. Мелкие частицы ($d_c = 50$ мкм) имеют температуру, близкую к температуре теплоносителя, в то время температура крупных частиц ниже принятой температуры реакции, например 2000 К, а время их нагрева не превышает 0,05 с.

Влияние тепловых параметров реакционной камеры на процесс газификации твердого топлива можно определить на примере нагрева частиц угля и пара до температуры $T_c = 1073$ К, свыше которой начинается устойчивый процесс конверсии коксового остатка [4]. Расчет выполнен для нагрева в камере плазмохимического реактора при температуре газа $T_g = 2000$ К с учетом только конвективной составляющей суммарного теплового потока. Для расчета приняты следующие теплофизические параметры топлива: $T_g = 373$ К – температура кипения воды; $T_{c,0} = 300$ К; $T_n = 1900$ К – температура начала заметной диссоциации пара [5]; $T_c = 1073$ К – температура воспламенения частицы угля [4]; $\lambda_g = 0,213$ Вт/(м·К) – коэффициент теплопроводности газа; $d_n = 0,5 \div 5,0$ мкм – диаметр частицы пара; $d_c = 10 \div 200$ мкм; $\rho_n = 0,17$ кг/м³; $c_n = 2113$ Дж/(кг·К); $c_c = 1400$ Дж/(кг·К); $\rho_{c,0} = 1600$ кг/м³. Расчет времени нагрева частиц пара и угля в реакционной камере выполнен по методике, приведенной в работе [6].

Анализ результатов расчета показывает, что в условиях высоких температур газа в реакционной камере нагрев мелких частиц пара и угля ($d_c \leq 5$ мкм) происходит практически мгновенно. При этом перегрев пара до температуры 1900 – 2000 К сопровождается заметной диссоциацией на водород и кислород, которые в дальнейшем участвуют в реакциях окисления. Мелкие частицы угля ($d_c \leq 50$ мкм) при достижении температуры 1100 К газифицируются очень интенсивно. Температура частиц практически одинакова с температурой газов в реакционной камере, при этом положительное влияние оказывает процесс выделения и горения летучих веществ.

Крупные частицы угля ($50 \leq d_c \leq 200$ мкм) нагреваются до температуры воспламенения за время $\tau = 0,0013 \div 0,02$ с. Результаты расчета дают представление о механизме плазмоструйной переработки водоугольного топлива по следующим основным реакциям на поверхности частицы. Вначале идет реакция окисления углерода за счет водяного пара $C + H_2O = CO + H_2$, а затем, по мере очень быстрого перегрева пара и его диссоциации при $T_g \geq 1900$ К, образуется кислород и водород. Образовавшийся кислород соединяется с углеродом по реакциям $C + O_2 = CO_2$ и $2C + O_2 = 2CO$.

Наряду с этими реакциями у поверхности углеродной частицы возможно взаимодействие образовавшейся окиси углерода с диффундирующим из объема камеры кислородом $2CO + O_2 = 2CO_2$, а на поверхности частицы возможно восстановление образовавшейся углекислоты $C + CO_2 = 2CO$.

Влияние высоких температур ($T_g > 2000$ К) в реакционной камере на нагрев частиц топлива определялось при изучении отдельно конвективного и лучистого теплообменов. Расчеты проводились по следующим зависимостям [3]

- при конвективном теплообмене

$$\ln \frac{T_2 - T_{c,0}}{T_2 - T_c} = \frac{6Nu\lambda_2}{c_c \cdot \rho_c \cdot d_c^2} \cdot \tau_H; \quad (2)$$

- при лучистом теплообмене

$$\tau_H = \frac{\rho_c \cdot c_c \cdot \delta_c}{6 \cdot \sigma_0 \cdot \varepsilon_c \cdot \varphi} \cdot \frac{1}{4T_p^3} \left\{ \ln \frac{(T_1 + T_p)(T_p - T_0)}{(T_p - T_1)(T_p + T_0)} + 2 \operatorname{arctg} \frac{T_1}{T_p} - 2 \operatorname{arctg} \frac{T_0}{T_p} \right\} \quad (3)$$

где Nu – тепловой критерий Нуссельта; где T_p - радиационная температура окружающего пространства (в нашем случае температура столба дугового разряда), К; T_0 , T_1 - соответственно начальная температура угольной частицы и заданная температура нагрева частицы, К; φ - угловой коэффициент облучения частицы; $\sigma_0 = 5,76$ – коэффициент излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²·К⁴); ε_c - степень черноты частицы.

Результаты исследований приведены в таблице 1 для угольных частиц размером $d_c = 50 \div 200$ мкм при температуре газа в реакционной камере $T_2 = 2000 \div 5000$ К. В этом диапазоне температуры коэффициент теплопроводности газа изменялся от 0,213 до 0,599 Вт/(м·К).

Таблица 1 - Расчетные значения времени нагрева частицы угля марки АШ-1 до $T_H = 1073$ К

Диаметр частицы d , мкм	Температура газа T_2 , К			
	2000	3000	4000	5000
	Время нагрева частицы $\tau_H \cdot 10^3$, с			
50	1,33 / 20,04	0,60 / 3,88	0,32 / 1,22	0,18 / 0,50
100	5,31 / 40,08	2,39 / 7,76	1,27 / 2,44	0,74 / 1,00
150	11,95 / 60,12	5,38 / 11,64	2,85 / 3,66	1,66 / 1,50
200	21,24 / 80,16	9,57 / 15,52	5,08 / 4,88	2,95 / 2,00

Примечание: перед чертой – конвективный; после черты - лучистый теплообмен

Из таблицы 1 следует, что время нагрева частицы угля колеблется в широких пределах в зависимости от их размера и температуры источника нагрева. В диапазоне температуры газа в реакционной камере от 2000 К до 5000 К с увеличением размера частиц от 50 до 200 мкм время их нагрева возрастает в 16 раз при конвективном теплообмене, а при лучистом – в 4 раза.

Независимо от размера частиц при повышении температуры газа в реакционной камере наблюдается уменьшение времени нагрева при обоих видах теп-

лообмена: конвективном – в 7 раз; лучистом - 40 раз. Резкое уменьшение времени нагрева имеет место при изменении температуры газа от 2000 до 4000 К. С повышением температуры $T_g > 4 \cdot 10^3$ К наблюдается плавное уменьшение времени нагрева частицы. Время нагрева имеет максимальное значение для всех размеров частиц при температуре газа $T_g = 2 \cdot 10^3$ К. С увеличением размера частиц наблюдается резкое возрастание времени нагрева, причем темп роста выше при конвективном теплообмене.

Сравнительная оценка результатов расчетов показывает, что в процессе нагрева угольной частицы роли различных способов подвода теплоты к ней меняются. При низких температурах частицы важную роль играет конвективный теплообмен. При дальнейшем нагреве возрастает роль лучистой составляющей в подводе теплоты, а влияние конвективного теплообмена ослабевает. Это обстоятельство можно объяснить выходом паро- и газообразных веществ с поверхности угольных частиц при их разогреве. Образующаяся у поверхности частицы прослойка выделяющихся газов и паров существенно ослабляет конвективный теплообмен, но значительно меньше препятствует лучистому теплообмену между частицей и окружающей средой.

На основе выполненных исследований следует ожидать, что в реальных условиях нагрева и газификации углеродсодержащего топлива в плазменных реакторах при температуре газовой среды $T_g > 5 \cdot 10^3$ К превалирующее влияние в суммарном тепловом потоке будет играть лучистый теплообмен. Это приведет к ускорению процесса термических превращений и, как следствие, повышению производительности пароплазменной установки.

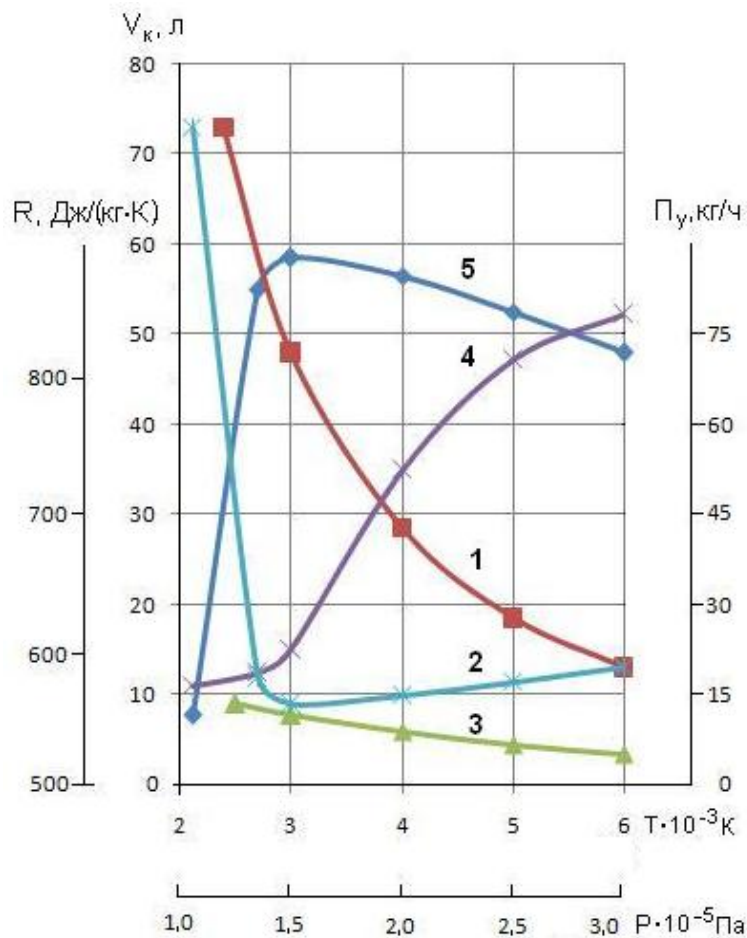
Тепловые и кинетические параметры высокотемпературного нагрева дисперсных систем положены в основу определения геометрических параметров реакционной камеры пароплазменной установки. Важным параметром является ее объем, в котором протекает сложный комплекс процессов по обеспечению максимальной степени превращения углерода при минимальных энергозатратах, быстрого выделения тепла и устойчивого протекания процессов, необходимых для надежной и безопасной работы реактора.

Объем реакционной камеры V_k определяется по формуле

$$V_k = \frac{\tau \cdot m_g \cdot R_g \cdot T_g}{P_g} \quad (4)$$

где m_g - расход газа, кг/с; R_g - удельная газовая постоянная смеси газов в реакционной камере, Дж/(кг·К); P_g - давление газа, Па.

Влияние кинетических, тепловых и режимных параметров реакционной камеры на ее объем при расходе топлива (уголь + водяной пар) $m_T = 125$ кг/ч приведено на рисунке 1. Время нагрева топлива τ_n определяется по соотношениям кинетики процесса термических превращений при заданных режимных параметрах работы плазмохимического реактора [3].



- 1 - $V_k = f(P_2)$ при $T_2 = 2073$ К; 2 - $V_k = f(T_2)$, $P_2 = 1,2 \cdot 10^5$ Па;
 3 - $V_k = f(P_2)$ при $T_2 = 3000$ К; 4 - $R_2 = f(T_2)$, $P_2 = 1,2 \cdot 10^5$ Па;
 5 - $P_y = f(T_2)$, $P_2 = 1,2 \cdot 10^5$ Па, $V_k = 0,013$ м³

Рисунок 1 - Зависимости объема реакционной камеры и ее производительности от тепловых и режимных параметров работы

Из анализа рисунка 1 следует, что существенное влияние на объем реакционной камеры оказывают давление и температура газа. При увеличении давления от $(1,2 \div 3,0) \cdot 10^5$ Па наблюдается значительное (в 7,5 раз) уменьшение объема при $T_2 = 2073$ К. Темп уменьшения объема выше при $T_2 = 2073$ К - в 1,7 раза по сравнению с таковым при $T_2 = 3000$ К. Однако, при $T_2 = 3000$ К объем реакционной камеры существенно ниже при изменении давления от $(1,2 \div 3,0) \cdot 10^5$ Па. Это обстоятельство объясняется тем, что при высокой температуре значительно изменяются параметры кинетики процесса термических превращений топлива. В первую очередь это относится к параметру время нагрева частиц топлива до завершения процесса их конверсии. Ранее установлено, что при повышении температуры газа в реакционной камере с 2000 до 3000 К время газификации частиц кокса размером $d_v = 50 \div 200$ мкм уменьшается соответственно в 8 ÷ 3 раза [3]. С повышением температуры газа в камере реактора ($T_2 > 3000$ К) наблюдается низкий темп уменьшения времени газификации.

При изменении температуры газа в диапазоне от $(2 \div 6) \cdot 10^3$ К существенно

повышается удельная газовая постоянная. Наблюдается низкий темп роста R_2 при повышении температуры газа от 2000 до 3000 К, а при $T_2 > 3000$ К темп роста R_2 значительно возрастает. Это является свидетельством того, что при $T_2 > 3000$ К происходит заметное изменение состава и выхода газовой смеси и, как следствие, ее молекулярной массы.

Таким образом, при постоянном значении расхода топлива и внутрикамерного давления, незначительном (в 1,05 раза) повышении удельной газовой постоянной и существенном уменьшении времени газификации (для $d_ч = 50$ мкм в 8 раз) в диапазоне температуры от 2000 до 3000 К наблюдается резкое уменьшение объема реакционной камеры в 7,6 раза. При возрастании температуры $T_2 > 3000$ К имеет место плавное увеличение объема камеры за счет, в основном, резкого роста значения удельной газовой постоянной.

Для настоящего исследования представляет интерес определение производительности реактора по углю при заданном объеме реакционной камеры (например, $V_k = 0,013 \text{ м}^3 = 13 \text{ л}$). При условии $m_2 = m_T$ производительность по углю равна $P_y = m_2/1,9$ для коэффициента расхода окислителя $\alpha = 0,45$. На этом режиме работы реактора на 1 кг угля (марки АШ) необходимо подавать 0,9 кг окислителя водяного пара. Тогда, определив по зависимости (4) значение m_2 при заданных V_k , P_k и кинетических параметрах τ_n и R_2 при температуре T_2 рассчитывается производительность по углю P_y . На рисунке 1 приведена зависимость $P_y = f(T_k)$ для давления газа $P_k = 1,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и частиц угля $d_ч = 50$ мкм. Видно, что изменение температуры газа от 2000 до 3000 К приводит к резкому увеличению производительности реактора по углю до максимального значения. Дальнейшее повышение температуры газа ($T_2 > 3000$ К) приводит к возрастанию объемного содержания газа, но при постоянном объеме камеры и давлении газа в ней необходимо уменьшать расход топлива, что видно из рисунка 1.

Таким образом, можно сделать вывод: при пароплазменной газификации углеродсодержащих топлив эффективность процесса их переработки зависит от тепловых параметров (удельный тепловой поток, температура газа) реакционной камеры. Изменение температуры газа от 2000 до 3000 К и, как следствие, констант скоростей химических реакций существенно влияет на кинетические характеристики процесса газификации топлива. Для обеспечения эффективности работы реактора процесс термических превращений топлива необходимо проводить при температуре $T_k \leq 3000$ К. Способ пароплазменной газификации углеродсодержащих твердых топлив целесообразно реализовывать в плазмохимическом реакторе совмещенного типа, открытая электрическая дуга которого значительно ускоряет процесс тепло- и массообмена в реакционной камере за счет высокой температуры и плотности радиационного излучения. При $T_2 > 5 \cdot 10^3$ К в реакционной камере будет иметь место превалирующее влияние лучистого теплообмена в суммарном тепловом потоке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Физико-технические основы процессов конверсии и газификации углеродсодержащих минеральных сред при воздействии высокотемпературных концентрированных потоков энергии: отчет о

НИР (заключ.): ПІ–19–06 / ИГТМ НАН Украины; рук. Булат А.Ф.; исполн.: Пигида Е.Ю. [и др.]. – Днепропетровск, 2008. – 154 с. – № ГР 0106U003274. - Инв. 6947.

2. Круковский, В.К. Исследование процесса нагрева полидисперсного угля высокотемпературным газовым теплоносителем / В.К. Круковский, В.В. Лебедев, Е.А. Колобова // Химия твердого топлива. – 1976. - №6. – С. 26-30.

3. Исследование и анализ способов и технических средств энергопревращений дисперсных углеродсодержащих сред путем интенсификации тепло- и массопереноса в газовом потоке высокотемпературной плазмы: отчет о НИР (промежуточный): ПІ–67–15 / ИГТМ НАН Украины; рук. Булат А.Ф.; исполн.: Холявченко Л.Т. [и др.]. – Днепропетровск, 2015. – 154 с. – № ГР 0115U002283. - Инв. 7687.

4. Куваев, Ю.В. Горение угольной пыли и расчет пылеугольного факела / Ю.В. Куваев, В.М. Бабий. - М.: Энергоатомиздат, 1986. – 208 с.

5. Теоретические основы теплотехники / Под ред. В. А. Григорьева. –М.: Энергоатомиздат, 1988. – 557с.

6. Некоторые аспекты кинетики процесса плазмо-струйной переработки водоугольных дисперсных систем /Л.Т. Холявченко, Е.Ю. Пигида, С.Л. Давыдов [и др.] // Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: матер. XXIII Межд. научн. школы им. Христиановича. – Симферополь, 2013. – с. 285 – 288.

REFERENCES

1. Bulat, A.F., Pigida, Ye.Yu. et al. (2008), *Fiziko-tekhnicheskie osnovy protsessov konversii i gazifikatsii uglerodosoderzhashchikh mineralnykh sred pri vozdeystvii vysokotemperaturnykh kontsentrirrovannykh potokov energii: otchet o NIR* [Physical and technical bases of conversion and gasification processes carbonaceous mineral medium under the influence of high concentrated energy flows: Report of research], IGTM of the NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.

2. Krukovskiy, V.K., Lebedev, V.V., Kolobova, E.A. (1976), “Study of coal polydisperse heating process high-temperature gas-cooled”, *Khimiya tverdogo tela*, no 6, p. 26-30.

3. Bulat, A.F., Kholiyavchenko, L.T. et al. (2015), *Issledovanie i analiz sposobov i tekhnicheskikh sredstv energoprevrashcheniy dispersnykh uglerodsoderzhashchikh sred putem intensifikatsii teplo- i massopere-nosa v gazovom potoke vysokotemperaturnoy plazmy: otchet o NIR* [Investigation And Analysis Of Ways And Technical Meansenergy Conversion Disperse Carbon-Containing Media By Intensifying Heat And Mass Transfer In A Gas Stream High-Temperature Plasma: Report of research], IGTM of the NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, Ukraine.

4. Kuvaev, Ju.V. and Babiy, V.M. (1986), *Gorenie ugolnoy pyli i raschet pyleugolnogo fakela* [The burning of coal dust and coal-dust torch calculation], Energoatomizdat, Moscow, USSR.

5. Grigorev, V. A. (1988), *Teoreticheskie osnovy teplotekhniki* [Theoretical basics of heat], Energoatomizdat, Moscow, USSR.

6. Kholiyavchenko, L.T., Pigida, Ye.Yu., Davydov, S. L., Ukolova, T.M. and Vasilev, L.M. (2013), “Some aspects of the kinetics of plasma-jet processing of coal-water dispersions process”, *Materialy XXIII Mezhdunarodnoy Nauchnoy shkoly Khristianovicha* [Materials XXIII International Scientific School named Khristianovich], *Deformirovanie i razrushenie materialov s defektami i dinamicheskimi yavleniyami v porodakh i vyrabotkaakh* [Deformation and destruction of materials with defects and dynamic phenomena in rocks and workings], Simferopol, Ukraine, p. 285 – 288.

Об авторах

Пигида Евгений Юрьевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, demchik@bk.ru.

Холявченко Леонид Тимофеевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, demchik@bk.ru.

Демченко Сергей Вячеславович, магистр, младший научный сотрудник в отделе Проблем разрушения горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, demchik@bk.ru.

Давыдов Сергей Леонидович, магистр, младший научный сотрудник в отделе Проблем разруше-

ния горных пород, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина, dsl77@ua.fm.

About the authors

Pigida Yevgeniy Yurevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, demchik@bk.ru.

Kholiavchenko Leonid Timofeevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, demchik@bk.ru.

Demchenko Sergey Vyacheslavovich, Master of Science (M.S.), Junior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, demchik@bk.ru.

Davydov Sergey Leonidovich, Master of Science (M.S.), Junior Researcher in Department of Rock Breaking Problems, N.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, dsl77@ua.fm.

Анотація. Досліджено високотемпературний нагрів палива, що містить в собі вуглець, з розмірами частинок від 50 до 200 мкм з метою встановлення раціональних кінетичних та теплових параметрів, впливу їх на тепло - і масообмін і ефективність процесу термічних перетворень в реакційній камері при зміні питомого теплового потоку $q_c = 10^4 \div 10^7$ Вт / м² і температурі газу $T_k = (2 \div 6) \cdot 10^3$ К. Вплив теплових параметрів на процес газифікації твердого палива визначено на прикладі нагрівання частинок вугілля і водяної пари при конвективному і променистому теплообміні.

Надано порівняльну оцінку результатів розрахунків і зроблено висновок про переважаючий вплив променистого теплообміну в сумарному тепловому потоці при $T_k > 5 \cdot 10^3$ К в плазмовому реакторі.

Наведено результати розрахунку об'єму реакційної камери та режиму її роботи з урахуванням теплових і кінетичних параметрів високотемпературного нагріву палива. Показано, що ефективний процес термічних перетворень палива необхідно проводити при температурі $T_k \leq 3000$ К в плазмохімічному реакторі поєданого типу.

Ключові слова: середовище, що містить в собі вуглець, камера, нагрів, температура, кінетичні параметри, термічні перетворення, об'єм, ефективність процесу.

Abstract. The high-temperature heating of carbon-bearing fuels with particle size of 50-200 microns was investigated in order to establish rational and kinetic thermal parameters, their influence on the heat-and-mass transfer and efficiency of thermal reactions in the reaction chamber at a changed specific heat flow $q_c = 10^4 \div 10^7$ W/m² and gas temperature $T_k = (2 \div 6) \cdot 10^3$ K. The thermal parameter influence on the solid fuel gasification process was determined on the example of coal particles and water vapor heating at convective and radiant heat transfer.

The calculation results were compared, and it was concluded that influence of radiative heat transfer prevailed in the total heat flow in plasma reactor when $T_k > 5 \cdot 10^3$ K.

Volume of the reaction chamber and its operation are calculated with taking into account thermal and kinetic parameters of the fuel high-temperature heating. It is shown that a process of the fuel thermal transformations is effective at temperature $T_k \leq 3000$ K in the plasma-chemical reactor of the combined type.

Keywords: carbon-bearing environment, chamber, heating, temperature, kinetic parameters, thermal conversion, volume, efficiency of the process.

Статья поступила в редакцию 05.12.2016

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Васильевым Л.М.