

УДК 66.096.5: 621.18.241

Клюев Э.С., магистр
(ИГТМ НАН Украины)

**АНАЛИЗ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ
ПРИ ТЕПЛОВОМ ВОЗДЕЙСТВИИ НА УГЛЕСОДЕРЖАЩИЕ ПОРОДЫ**

Клюев Е.С., магістр
(ИГТМ НАН України)

**АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ОТРИМАННЯ ГАЗОВОЇ ФАЗИ ПРИ
ТЕПЛОВІЙ ДІЇ НА ВУГЛЕВМІСНІ ПОРОДИ**

Kliuiev E.S., M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)

**ANALYSIS OF PROCESS PARAMETERS FOR OBTAINING A GAS-PHASE
UNDER THE THERMAL ACTION ON THE COAL-CONTAINED ROCKS**

Аннотация. В статье представлены результаты работ по изучению процессов получения технологических газов при тепловом воздействии на углесодержащие породы с целью разработки нового способа термической переработки некондиционный углей и угольных шламов. Проведен анализ экспериментальных исследований по определению параметров теплового воздействия на сапропелит и угольный шлам Львовско-Волынского бассейна. Установлены закономерности изменения содержания монооксида углерода, водорода и метана в газовой фазе при тепловом воздействии. Представлен новый способ термической переработки углесодержащих пород для получения технологических газов. Обоснованы параметры процесса получения технологических газов при тепловом воздействии на сапропелит, угольный шлам и их бинарные смеси.

Ключевые слова: тепловое воздействие, углесодержащие породы, бинарная смесь, газовая фаза, технологические газы.

На сегодняшний день в условиях дефицита природного газа возникает необходимость в переориентации топливно-энергетического комплекса Украины на комплексное освоение углесодержащих ресурсов, сосредоточенных в заполненных породных отвалах и илонакопителях углеобогадательных фабрик. А если учесть растущие потребности в создании и внедрении в промышленность высокоэффективных безотходных технологий с соблюдением экологических и ресурсосберегающих норм, то вопросы рационального использования углесодержащих пород возрастают в ранг государственной проблемы, требующей безотлагательного решения.

Общеизвестно, что процессы разработки техногенных месторождений осуществляют различными методами, а сырьем для них в зависимости от целевого назначения служат различные по гранулометрическому составу и физико-химическим свойствам материалы. Проведенные исследования показали [1-3], что высокая зольность и значительное содержание серы в некоторых марках углей и угольных шламах являются положительными факторами, если их рассматривать с позиций некоторых современных процессов переработки углей на

основе процесса теплового воздействия с изменением фазового состояния и получением технологических газов.

За последнее время значительное количество работ проведено по тепловому воздействию на углесодержащие материалы, как в бескислородной среде, так и с применением окислителей. Эти процессы характеризуются, в первую очередь, расщеплением органической массы углесодержащих материалов, рекомбинацией продуктов расщепления и образованием термодинамически устойчивых конечных веществ: твердого остатка, жидких продуктов и газовой фазы. В ряде угледобывающих стран (Россия, Китай, США, Австралия) реализуются различные технологические схемы теплового воздействия, направленные, преимущественно, на получение синтетического жидкого топлива и энергетического твердого остатка [4,5]. В зависимости от температуры и назначения получаемых продуктов различают следующие варианты процесса:

- низкотемпературное тепловое воздействие ($450-550^{\circ}\text{C}$), при котором достигается максимальный выход жидкой фазы и твердого остатка, а также минимальный выход газовой фазы с высокой теплотой сгорания;
- среднетемпературное тепловое воздействие ($600-800^{\circ}\text{C}$), при котором наблюдается увеличение выхода газовой фазы с уменьшением ее теплоты сгорания и уменьшением выхода жидких продуктов и твердого остатка;
- высокотемпературное тепловое воздействие ($900-1100^{\circ}\text{C}$), при котором выход жидких и твердых продуктов достигает минимума, а выход газовой фазы с невысокой теплотой сгорания максимален.

К примеру, в работе [4] для решения энергетических проблем предприятий углеперерабатывающей отрасли описан комплекс по переработке угольных отходов с помощью теплового воздействия.

Угольные отходы из накопителя попадают в реактор, где в непрерывном режиме при температурах $200-650^{\circ}\text{C}$ без доступа воздуха осуществляется их нагрев. При этом химические вещества в присутствии разогретого твердого остатка, участвующего в качестве катализатора, превращаются в газовую фазу в количестве $300 \text{ м}^3/\text{т}$, после чего подвергаются охлаждению и конденсации. Несконденсированный газ с теплотой сгорания более 30 МДж/кг , состав которого указан в табл. 1, сжигают в котлоагрегате для получения водяного пара.

Таблица 1 – Состав газовой фазы

№ п/п	Компоненты	Содержание, %
1	Углеводороды (C_nH_m)	19 – 20
2	Метан (CH_4)	33 – 45
3	Водород (H_2)	12 – 28
4	Монооксид углерода (CO)	11 – 18
5	Диоксид углерода (CO_2)	1,5 – 2,5

В работах [6,7] Института геологии и геохимии горючих ископаемых НАН Украины на стендовой установке проведено ряд экспериментальных исследований по тепловому воздействию на сапропелевый уголь Львовско-Волинского

бассейна как на воздушном, так и водовоздушном дутье при температуре 1000-1100°C и атмосферном давлении. В экспериментах соотношение расходов воды и воздуха составляло в среднем 165 г воды на 1 м³ воздуха. Анализ полученных результатов показал, что за счет нагрева угля в процессе воздействия наблюдалось выделение паров смолы, подсмольной воды и горючего газа с теплотворной способностью 6-10 МДж/м³ и следующим составом (% об.): N₂ – 3-7, O₂ – 0,2-1,0, CO₂ – 4-10, CO – 43-64, H₂ – 26-40, CH₄ – 1,01-1,18, C₂H₆ – 0,03-0,13.

Однако существуют и некоторые недостатки таких технологических решений. Среди них можно выделить следующие: отсутствие методик по оценке параметров промышленно освоенных технологий, сложность организации и низкая эффективность управления процессом теплового воздействия, значительная эндотермичность физико-химического процесса воздействия, что требует большого количества тепла для его поддержания, дополнительные затраты на производство и хранение кислорода [7].

Поэтому целью данной работы является оценка параметров процесса теплового воздействия на углесодержащие породы и разработка нового способа термической переработки некондиционных углей и угольных шламов для получения технологических газов. Для достижения поставленной цели решены следующие основные задачи:

- проанализированы результаты экспериментальных исследований по определению параметров теплового воздействия на углесодержащие породы, используемых для получения газовой фазы;
- разработан новый способ термической переработки некондиционных углей и угольных шламов для получения технологических газов;
- обоснованы параметры процесса получения технологических газов при тепловом воздействии на углесодержащие породы.

В качестве объектов для экспериментальных исследований использовали сапропелит Львовско-Волынского бассейна (шахта “Відродження”, пласт *n*₈) и угольный шлам, отобранный на ЦОФ “Червоноградская”, результаты лабораторных исследований которых представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Результаты элементного и технического анализа

Порода	$C^p, \%$	$H^p, \%$	$N^p, \%$	$O^p, \%$	$S_{обц}^p, \%$	$W^p, \%$	$A^d, \%$	$V^{daf}, \%$
Сапропелит	34,8	2,5	0,7	3,2	0,3	1,8	56,7	52,2
Шлам, проба № 2	26,9	3,1	2,8	19,5	1,7	2,1	43,9	33,1
Шлам, проба № 3	26,2	3,1	2,8	19,8	1,7	1,6	44,8	37,6
Шлам, проба № 8	25,6	3,0	2,9	19,9	1,8	1,4	45,4	34,7
Шлам усредненный	26,8	1,8	2,9	20,4	2,8	1,2	44,1	39,9

Методика, схема установки и порядок проведения экспериментальных исследований приведены в работе [8]. Результаты экспериментальных исследований по определению состава газовой фазы, образующейся при тепловом воздействии на углесодержащие породы, приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Количество и состав газовой фазы при тепловом воздействии на углисто-глинистые породы

Порода	Конечная температура, °С	ДЕЛЬНЫЙ ВЫХОД, М ³ /Т	Состав газовой фазы, % (об.)						
			CO ₂	C _n H _m	O ₂	CO	H ₂	CH ₄	N ₂
Сапропелит	400	37,3	4,4	1,2	13,2	19,7	11,7	6,5	43,3
	600	120,3	24,8	4,7	3,6	12,0	18,9	10,9	25,1
	800	189,5	18,5	2,3	2,8	23,6	32,8	7,2	12,8
	900	220,1	17,5	2,9	2,0	22,0	33,5	7,2	14,9
Шлам усреднённый	400	17,5	0	0	16,4	1,7	0	0,9	81,0
	600	96,0	4,9	4,1	6,4	4,7	1,9	25,1	52,9
	800	174,0	6,3	2,7	1,0	14,0	6,9	53,1	16,0
	900	210,0	7,3	2,6	0,6	17,9	48,5	14,0	9,1
Шлам: уголь = 1: 1	400	24,4	5,4	2,6	2,3	5,8	15,3	49,2	19,4
	600	107,0	19,0	3,2	2,2	7,5	19,3	26,7	22,1
	800	182,0	14,2	2,6	0,7	14,8	33,9	14,2	19,6
	900	221,5	9,8	2,2	2,0	18,5	44,9	13,6	9,0
Шлам: уголь = 1: 2	400	28,0	2,7	2,5	1,7	8,5	37,0	23,2	24,4
	600	114,0	5,5	3,5	0,8	9,5	40,0	25,5	15,2
	800	178,5	6,0	2,8	1,0	10,2	48,2	21,7	10,1
	900	227,0	4,7	1,9	1,3	14,8	45,0	20,9	11,4

Проведенные исследования показали, что диоксид углерода CO₂ начинает выделяться в начале процесса воздействия, и наибольшего выхода достигает при температуре 600-800°С, при дальнейшем повышении температуры его содержание в газовой фазе снижается. Максимальное количество CO₂ образуется при тепловом воздействии на сапропелит (24,8 %), а минимальное – при тепловом воздействии на угольный шлам (0 %). Как показал теоретический анализ, диоксид углерода в газовой фазе не должен содержаться, так как при высоких температурах в реакционной зоне и наличии раскаленного твердого остатка данное вещество должно восстанавливаться до монооксида углерода по реакции: $C + CO_2 \rightarrow 2CO$. Поскольку температура газовой фазы значительно ниже температуры твердого остатка, этот процесс практически не наблюдался, чем объяснялось присутствие заметного количества двуокиси углерода в начале процесса теплового воздействия.

Установлено, что для всех проб выход непредельных углеводородов C_nH_m наблюдался в незначительных количествах, а колебания его содержания обусловлены взаимно накладывающимися процессами их разложения и образования из метана и его гомологов. Максимальное количество C_nH_m – 5,8 % выдвинулось при тепловом воздействии на пробу шлама № 2, а минимальное – при тепловом воздействии на угольный шлам (0 %).

Установлено, что монооксид углерода CO начинает выделяться при 100-300°С. Повышение содержания CO с ростом температуры в большей степени зависит от совместного протекания многочисленных физико-химических реакций, связанных с разрушением слабых кислородсодержащих групп. Максимальное количество CO – 31 % выдвинулось при тепловом воздействии на пробу шлама № 2. количество его у разных проб составило от 1,7 % до 23,6 %.

Теоретическими исследованиями доказано, что рост выхода водорода H_2 во всем исследованном диапазоне температур объясняется пиролизом метана, идущего по реакции: $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$, что, помимо этого, способствует снижению содержания метана в газовой фазе. Максимальное количество водорода образуется при тепловом воздействии на пробу шлама № 8 при температуре $900^\circ C$ (54,7 %), а минимальное – при тепловом воздействии на угольный шлам при температуре $900^\circ C$ (0 %).

Метан образуется в достаточных количествах при температуре $600-700^\circ C$. При этом максимальное количество CH_4 – 53 % выделилось при тепловом воздействии на пробу усредненного шлама при температуре $800^\circ C$, количество его у разных проб составило от 0,9 % до 28,9 %.

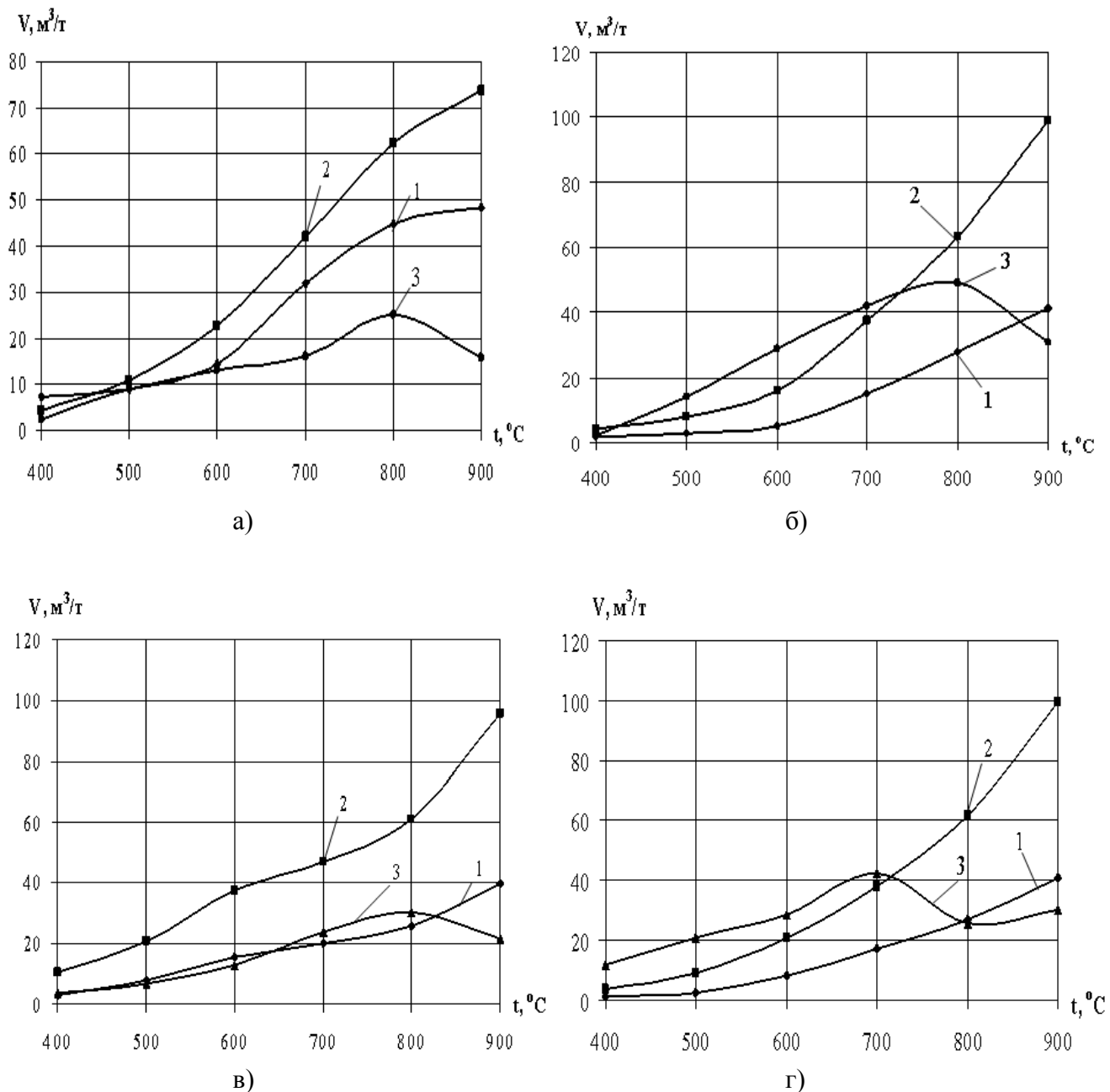
Азот появляется в газовой фазе при $400-600^\circ C$ и присутствует в небольших количествах. Исключение составляет лишь проба усредненного шлама.

Таким образом, доказано, что газовая фаза, образованная при тепловом воздействии на сапропелит, угольный шлам и их бинарные смеси в температурном интервале от 400 до $900^\circ C$, содержит значительные количества водорода, метана, монооксида углерода, азота, и в меньших количествах – диоксида углерода, кислорода, непредельных углеводородов. Поэтому целесообразным считается в дальнейшем изучить изменение количества выделившихся горючих газов, а именно: водорода, метана, монооксида углерода.

Результаты этих исследований представлены на рис. 1 в виде кривых изменения количества монооксида углерода, водорода и метана с ростом температуры воздействия, анализ которых позволил установить, что выход водорода, метана и монооксида углерода для различного вида исходного материала в диапазоне температур от 400 до $900^\circ C$ происходит по идентичным закономерностям (рис. 1). Причем, объемы образующегося водорода и монооксида углерода монотонно растут по кривой, близкой к гиперболической, а количество метана возрастает по кривой, близкой к параболической, и при температуре $700-800^\circ C$ имеет максимум с последующим снижением.

В результате проведенных экспериментальных исследований доказано, что в интервале температур $400-600^\circ C$ проходят физико-химические процессы, способствующие дальнейшему ускорению преобразования углефицированного вещества и росту количества горючих газов. В этом интервале из сапропелита выделяется больше водорода, а из угольного шлама – метана (рис. 1 а,б). Для бинарных смесей больше водорода выделилось при тепловом воздействии на смесь сапропелита со шламом при соотношении 2:1, в остальных случаях больше образовалось метана (рис. 1 в,г).

При температурах $600-800^\circ C$ наблюдалось значительное повышение выхода монооксида углерода и водорода, образующихся вблизи углеродной поверхности и наличии испаряющейся влаги.



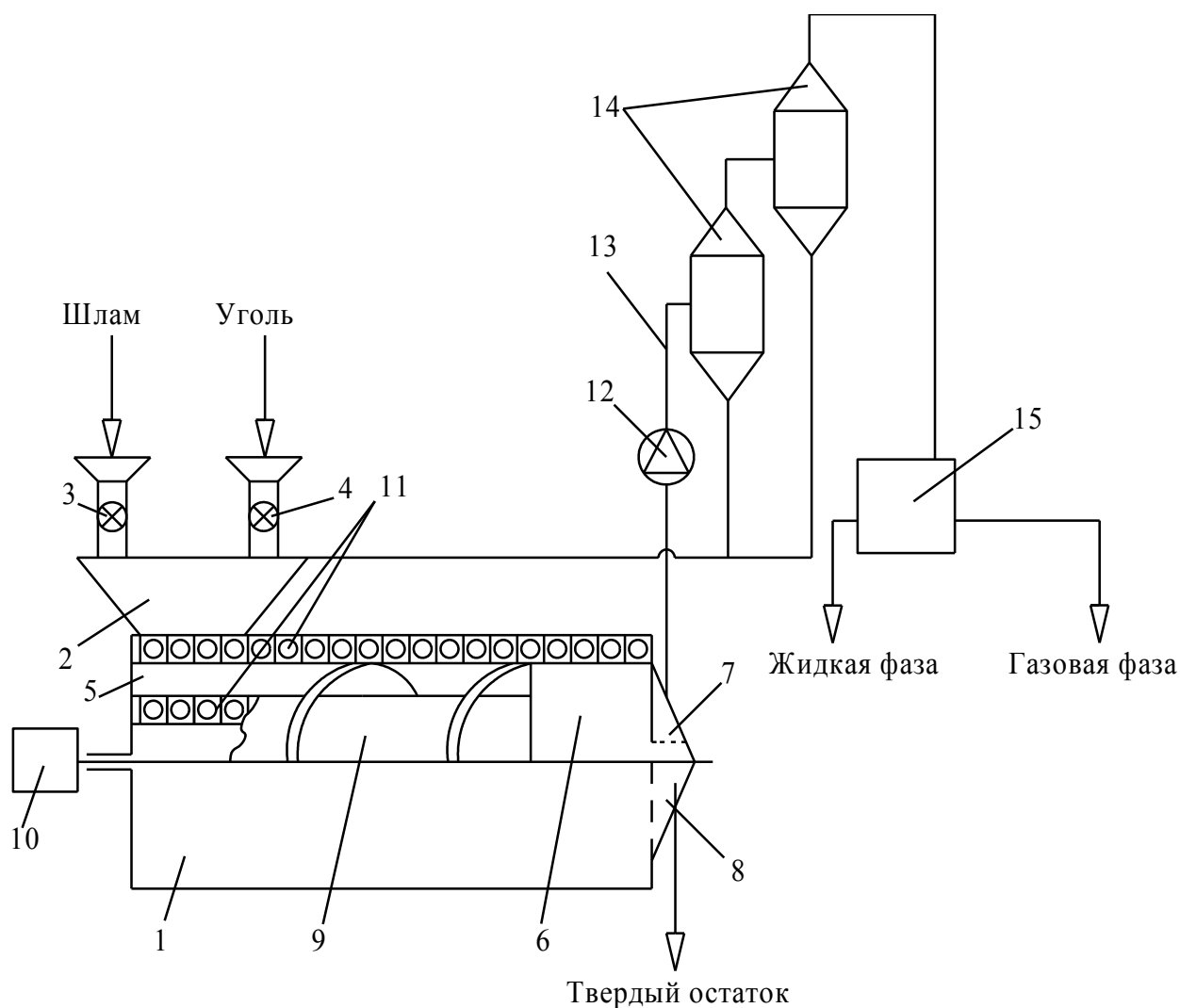
1 – CO ; 2 – H_2 ; 3 – CH_4

Рисунок 1 – Влияние температуры процесса воздействия на состав газовой фазы при переработке сапропелита (а) и угольного шлама (б), бинарной смеси сапропелита и угольного шлама при соотношении 1: 2(в) и при соотношении 2: 1 (г)

Установлено, что максимальный выход метана для всех исследованных проб происходит при температуре 800°C , наибольшее его количество – $51 \text{ m}^3/\text{t}$ образуется при тепловом воздействии на угольный шлам. После 800°C выделение метана снижается на 10-15%, но при этом наблюдается дальнейший рост содержания монооксида углерода и водорода. Так, наибольшее количество монооксида углерода ($49 \text{ m}^3/\text{t}$) образуется при тепловом воздействии на сапропелит, а водорода – при тепловом воздействии на бинарную смесь сапропелита со

шламом в соотношении 2: 1. При этом наименьшее количество монооксида углерода ($35 \text{ м}^3/\text{т}$) образуется при тепловом воздействии на бинарную смесь сапропелита со шламом в соотношении 2: 1, а водорода – при тепловом воздействии на сапропелит.

Таким образом, установленные экспериментальные закономерности изменения состава газовой фазы от температуры процесса теплового воздействия на углесодержащие породы позволили разработать новый способ термической переработки некондиционных углей и угольных шламов для получения технологических газов, общая схема которого представлена на рис. 2.



1 – корпус реактора, 2 – загрузочное устройство, 3,4 – дозаторы, 5 – транспортная камера, 6 – реакционная камера, 7 – газовая камера, 8 – поворотный люк, 9 – шнек, 10 – двигатель, 11 – термические блоки, 12 – насос, 13 – газовая магистраль, 14 – циклоны, 15 – камера охлаждения, 16 – магистраль для отвода твердых примесей

Рисунок 2 – Схема способа термической переработки некондиционных углей и угольных шламов для получения технологических газов

Установка по термической переработке углесодержащих материалов в виде сапропелита, угольного шлама и их бинарных смесей работает следующим образом.

В зависимости от конечной газовой фазы, необходимой для получения синтез-газа, водорода или метана, перед загрузкой углесодержащих материалов в реактор 1 производят регулировку загрузочного устройства 2 на определенное весовое соотношение сапропелита и угольного шлама с помощью дозаторов 3, 4. Смесь поступает в транспортную камеру 5 и шнеком 9 перемещается в реакционную камеру 6. В процессе перемещения смесь подвергается тепловому воздействию от термических блоков 11, расположенных снаружи корпуса реактора 1 и внутри шнека 9, благодаря чему смесь быстро нагревается.

Процесс пиролиза смеси с выделением газовой фазы в газовую камеру 7 происходит в реакционной камере 6, где температурный режим поддерживается на уровне 900°C. Из камеры 7 газовая фаза подается насосом 12 по газовой магистрали 13 в циклоны 14, где очищается от твердых примесей, которые затем поступают по магистрали 16 в загрузочное устройство 2, предварительно подогревая углесодержащие материалы.

Газовая фаза из циклонов 14 поступает в камеру охлаждения 15, откуда отбирается для дальнейшей переработки для получения конечного газа – синтез-газа, водорода или метана. Все процессы термической переработки углесодержащих материалов осуществляют в автоматическом режиме, при этом материал в реакционной камере 6 уплотняется под действием шнека 9 и при достижении определенного давления, поворотный люк 8 открывается, освобождая камеру 6 от шлаковых остатков процесса теплового воздействия, и цикл повторяется.

В результате проведения аналитических, теоретических и экспериментальных исследований установлено, что наибольшее количество синтез-газа (смеси монооксида углерода и водорода) образуется при тепловом воздействии на бинарную смесь сапропелита со шламом в соотношении 2: 1, наибольшее количество водорода – при воздействии на бинарную смесь сапропелита со шламом в соотношении 1: 1, а наибольшее количество метана – при воздействии на угольный шлак.

Сущность процесса получения синтез-газа, водорода и метана из углесодержащих пород заключается в следующем. Сапропелит и угольный шлак в необходимых пропорциях поступают на предварительную механическую обработку, где происходит их обезвоживание, грохочение и измельчение. Исходные данные для проведения процесса теплового воздействия для указанных углесодержащих пород показаны в табл. 4.

Затем обработанный материал поступает в реактор, где проводят тепловое воздействие при определенных температурах и давлении в течение заранее известного времени. В результате проведения процесса образуется твердый остаток, идущий на последующий анализ и переработку, а также газовая фаза, поступающая в систему охлаждения и конденсации, где конденсируются смолы и водяной пар.

Таблица 4 – Исходные данные для получения синтез-газа, водорода и метана

Параметр	Конечный результат		
	CO+H ₂	H ₂	CH ₄
Содержание углерода, %	30-32	30-33	35-37
Содержание серы, %	1,0-1,2	1,5-1,7	0-0,5
Содержание кислорода, %	8-9	11-12	3,0-3,5
Влажность, %	1,5-2,0	1-2	1,5-2
Зольность, %	50-55	50-52	55-57
Выход летучих, %	45-48	48-50	52-55

После этого компонентный состав газовой фазы характеризуется параметрами, приведенными в табл. 5.

Таблица 5 – Компонентный состав газовой фазы для получения синтез-газа, водорода и метана

Параметр, %	Конечный результат		
	CO+H ₂	H ₂	CH ₄
CO ₂	3,0-5,0	8,0-10,2	5,2-7,6
C _N H _M	1,5-2,0	2,0-3,2	1,3-3,6
O ₂	1,2-2,0	1,0-3,0	0,2-2,1
CO	14,0-16,2	17,2-19,2	12,0-16,0
H ₂	40,2-47,2	42,5-46,5	5,0-7,0
CH ₄	19,0-22,1	12,0-14,5	52,5-57,3
N ₂	10,0-12,0	8,0-10,0	12,0-18,0

Таким образом, в результате проведения процесса теплового воздействия образуется в достаточных количествах монооксид углерода, водород и метан. Основные технологические параметры процесса получения синтез-газа, водорода и метана из углесодержащих пород представлены в табл. 6.

Таблица 6 – Параметры процесса получения синтез-газа, водорода и метана при тепловом воздействии на углесодержащие материалы

Параметр	Конечный результат		
	CO+H ₂	H ₂	CH ₄
Температура процесса, К	1100-1173	1100-1173	900-1073
Давление процесса, Па	10 ⁵	10 ⁵	10 ⁵
Время процесса, мин	20-30	23-33	20-25
Удельный выход газовой фазы, м ³ /т	227-250	226-260	189-200
Удельный выход водорода, м ³ /т	102,2	105,2	–
Удельный выход окиси углерода, м ³ /т	33,6	–	–
Удельный выход метана, м ³ /т	–	–	50,2
Теплоемкость, Дж/кг·К	1470	1440	1445
Удельные энергозатраты, кВт·ч/т	2710	2810	2550

Анализ результатов экспериментальных исследований показал, что выход наибольшего количества газовой фазы наблюдается при тепловом воздействии на бинарную смесь сапропелита со шламом в соотношении 2: 1, а наименьшее количество образуется при тепловом воздействии на угольный шлам. По методикам, опубликованным в работах [9,10] произведены расчеты теплоемкости термодинамической системы и удельных энергетических затрат на процесс теплового воздействия.

Предварительные технико-экономические расчеты показали эффективность процесса теплового воздействия на сапропелит, угольный шлам и их бинарные смеси. Плановый расчетный экономический эффект от применения разработанных технологических решений составляет около 300 тис. грн. в год.

Таким образом, на основании выполненных аналитических, теоретических и экспериментальных исследований по изучению процессов получения технологических газов при тепловом воздействии на углесодержащие породы можно сделать следующие выводы.

1. Анализ результатов экспериментальных исследований по определению параметров теплового воздействия на углесодержащие породы показал, что газовая фаза, образованная при тепловом воздействии на сапропелит, угольный шлам и их бинарные смеси в температурном интервале от 400 до 900°C, содержит значительные количества водорода, метана, монооксида углерода, азота, и в меньших количествах – диоксида углерода, кислорода, непредельных углеводородов и азота.

2. Установлено, что выход водорода, метана и монооксида углерода для различного вида исходного материала в диапазоне температур от 400 до 900°C происходит по идентичным закономерностям, причем, объемы образующегося водорода и монооксида углерода монотонно растут по кривой, близкой к гиперболической, а количество метана возрастает по кривой, близкой к параболической, и при температуре 700-800°C имеет максимум с последующим снижением.

3. По анализу изменения состава газовой фазы от температуры процесса теплового воздействия на углесодержащие породы разработан новый способ термической переработки некондиционных углей и угольных шламов для получения технологических газов.

4. Проведенные исследования позволили обосновать параметры процессов получения трех технологических газов, а именно синтез-газа, водорода и метана и доказать, что для получения синтез-газа из углисто-глинистых пород наиболее рационально использовать бинарную смесь сапропелита со шламом в соотношении 2: 1, для получения водорода – бинарную смесь сапропелита со шламом в соотношении 1: 1, а для получения метана – угольный шлам.

5. Результаты аналитических, теоретических и экспериментальных исследований позволили установить, что при тепловом воздействии на сапропелит, угольный шлам и их бинарные смеси может образовываться до 140 м³/т синтез-газа, до 100 м³/т и до 50 м³/т метана, что обуславливает возможность и целесообразность их технологического использования.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Курченко, И.П. Состояние, проблемы и перспективы развития обогащения углей в Украине / И.П. Курченко, А.А. Золотко // *Збагачення корисних копалин*. – 2001. – № 20(61). – С. 3-13.
2. Федоров, В.И. Извлечение угля из отходов обогащения: техника, технология качества, возможные ресурсы / В.И. Федоров, И.П. Курченко // *Углехимический журнал*. – 1999. – № 1-2. – С. 15-16.
3. Ключев, Э.С. Взаимосвязь между зольностью и содержанием органического углерода в отходах флотации Червоноградской ЦОФ / Э.С. Ключев // *Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины*. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 90. – С. 79-85.
4. Петров, А.И. Исследование углеотходов России и разработка рекомендаций по их утилизации / А.И. Петров, М.Я. Шпирт, В.В. Пушканов // *Уголь*. – 1997. – № 3. – С. 56 – 58.
5. Mountouris, A. Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization / A. Mountouris, E. Voutsas, D. Tassios, // *Energy Conversion and Management*. – 2008. – № 49. – pp. 2264 – 2271.
6. Брик, Д.В. Газифікація некондиційного вугілля Львівсько-Волинського басейну / Д.В. Брик, Ю.В. Стефанік // *Углехимический журнал*. – 2010. – № 1-2. – С. 20-32.
7. Пат. 1460072, СССР, МПК⁷ С 10В 49/02, С 10J 3/14. Способ переработки высокозольного топлива / Чекалюк Э.Б., Стефанік Ю.В., Брик Д.В.; заявитель и патентообладатель Институт геологии и геохимии горючих ископаемых АН УССР. – № 3941415/31-26; заявл. 01.08.1985; опубл. 23.02.1989, Бюл. №7.
8. Ключев, Э.С. Динамика газовыделения из углесодержащих материалов под действием теплового поля // *Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины*. – Днепропетровск, 2013. – Вып. 111. – С. 49-59.
9. Ключев, Э.С. Оценка термических характеристик геоматериалов по данным компьютерного моделирования / Э.С. Ключев // *Геотехническая механика : межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ им. Н.С. Полякова НАН Украины*. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 95. – С. 63-71.
10. Булат, А.Ф. Учет удельных энергетических затрат при термической переработке отходов обогащения угля / А.Ф. Булат, Ключев Э.С. // *Материалы 8-ой Международной конференции «Социально-экономические и экологические проблемы горной промышленности, строительства и энергетики» (27-28 октября 2011 г.)*. – Тула: ТулГУ, 2011. – С. 401-405.

REFERENCES

1. Kurchenko, I.P. and Zolotko, A.A. (2001), "Position, problems and prospects of coal preparation development in Ukraine", *Zbagachennyya korysnyh kopalyn* [Enrichment of minerals], no 20(61), pp. 3-13.
2. Federov, V.I. and Kurchenko, I.P. (1999), "Coal extracting from enrichment wastes: engineering, quality technology and possible resources", *Uglehimicheskyyi jurnal* [Coal-chemical Journal], no 1-2, pp. 15-16.
3. Kliuiev, E.S. (2010), "Correlation between ash value and content of organic carbon in wash slurry wastes of CPF "Chervonogradskaya"", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no 90, pp. 79-85.
4. Petrov, A.I., Shpirt, M.Ya. фтв Pushkanov, V.V. (1997), "Investigation of coal wastes in Russia and recommendations development for their utilization", *Ugol* [Coal], no 3, pp. 56-58.
5. Mountouris, A., Voutsas, E. and Tassios, D. (2008), "Plasma gasification of sewage sludge: Process development and energy optimization", *Energy Conversion and Management*, no. 49, pp. 2264 – 2271.
6. Bryk, D.V. and Stefanyk, Yu.V. (2010), "Gasification of low-grade coal of Lviv-Volyn basin", *Uglehimicheskyyi jurnal*, no 1-2, pp. 20-32.
7. Chekaliuk, E.B., Stefanyk, Yu.V. and Bryk, D.V., Institute of geology and geochemistry of minerals of AS of USSR (1989), *Sposob pererabotky vysokozolnogo topliva* [The method of high-ash fuel refining], State Register of Patents of USSR, Moscow, SU, Pat. № 1460072.
8. Kliuiev, E.S. (2013), "Gas release dynamics of coal-contained materials under action of thermal field", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no 111, pp. 49-59.
9. Kliuiev, E.S. (2011), "The estimation of thermal characteristics of geomaterials using data of computer simulation", *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no 95, pp. 63-71.
10. Bulat, A.F. and Kliuiev, E.S. (2011), "Accounting of the specific energy consumption in the thermal processing of wash slurry wastes", *Proc. of 8-th Int. conf. "Socio-economic and environment problems of*

mining industry, building and energetics”, Tula State University, Tula, 27-28 October 2011, Vol. 2, pp. 401-405.

Об авторе

Клюев Эдуард Сергеевич, магистр, младший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепропетровск, Украина, eduard_2105@mail.ru.

About the author

Kliuiev Eduard Sergeevich, Master of Science, Junior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, eduard_2105@mail.ru.

Анотація. У статті представлено результати робіт з вивчення процесів одержання технологічних газів при тепловій дії на вуглевмісні породи з метою розробки нового способу термічної переробки некондиційного вугілля та вугільних шламів. Проведено аналіз експериментальних досліджень з визначення параметрів теплової дії на сапропеліт і вугільний шлам Львівсько-Волинського басейну. Встановлено закономірності зміни вмісту монооксиду вуглецю, водню і метану в газовій фазі при тепловій дії. Запропоновано новий спосіб термічної переробки вуглевмісних порід для отримання технологічних газів. Обґрунтовано параметри процесу отримання технологічних газів при тепловій дії на сапропеліт, вугільний шлам та їх бінарні суміші.

Ключові слова: тепла дія, вуглевмісні породи, бінарна суміш, газова фаза, технологічні гази.

Abstract. The article presents study results on processes of technological gases generation under the thermal action on the coal-contained rocks in order to develop a new method for thermal processing of low-grade coals and coal slurries. Experimental studies on determining parameters of the thermal action on sapropelite and coal slime in the Lvov-Volyn basin were analyzed. Regularities of carbon monoxide, hydrogen and methane content changing during the gas phase under the thermal action were formulated. A new method is proposed for thermal processing of coal-contained rocks and receiving technological gases. Parameters of process of technological gases receiving under the thermal impact on sapropelite, coal slime and their binary mixtures were grounded.

Keywords: thermal action, coal-contained rocks, binary mixture, gas phase, technological gases.

Статья поступила в редакцию 07.10.2014

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

УДК [622.268.2:519.237.8]:51.007.57

Бунько Т.В., д-р техн. наук, ст. научн. сотр.,
Кокоулин И.Е., канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
Головко С.А., магистр,
Новиков Л.А., магистр,
(ИГТМ НАН Украины),
Жалилов А.Ш., магистр
(ГП «Селидовуголь»),
Бокий А.Б., аспирант
(ГВУЗ «ДонНТУ»)

**ПОСТРОЕНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ КЛАСТЕРНОЙ МОДЕЛИ
СИСТЕМЫ «ГОРНЫЕ ВЫРАБОТКИ – ВЫРАБОТАННОЕ
ПРОСТРАНСТВО»**

Бунько Т.В., д-р техн. наук, ст. наук. співр.,
Кокоулін І.Є., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Головко С.А., магістр,
Новиков Л.А., магістр
(ІГТМ НАН України),
Жалілов О.Ш., магістр
(ДП «Селідоввугілля»),
Бокій О.Б., аспірант
(ДВУЗ «ДонНТУ»)

**ПОБУДОВА ІМІТАЦІЙНОЇ КЛАСТЕРНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ
«ГІРНИЧІ ВИРОБКИ - ВИРОБЛЕНИЙ ПРОСТІР»**

Bunko T.V., D.Sc. (Tech.), Senior Researcher,
Kokoulin I.Ye., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher,
Golovko S.A., M.S. (Tech.),
Novikov L.A., M.S. (Tech.)
(IGTM NAS of Ukraine)
Zhalilov A.Sh., M.S. (Tech.)
(SP «Selidovugol»)
Bokij A.B., Doctoral student
(SHEI “NMU”)

**CONSTRUCTION OF IMITATION CLUSTER MODEL OF
THE SYSTEM «MINE ROCKS – PRODUCED SPACE»**

Аннотация. Выработанное пространство угольной шахты представляет собой высокопроницаемую среду. Законы движения метановоздушной смеси в нем изучены недостаточно, что приводит к снижению точности расчета водухораспределения в вентиляционной сети шахты. Для описания выработанного пространства предложено использовать элементы кластерных структур. Характеристики кластеров описываются теоретико-множественными моделями. Особенностью кластерного моделирования выработанного пространства является