

**РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ
СЖИГАНИЯ УГОЛЬНЫХ ШЛАМОВ И НЕКОНДИЦИОННЫХ УГЛЕЙ**

В роботі наведено результати теоретичного моделювання спалювання вуглепородних сумішей згідно з основними принципами термодинаміки, що стосуються динаміки виходу газоподібних речовин CH_4 , CO , CO_2 , H_2 і N_2 в залежності від температури нагріву.

**RESULTS OF THEORETICAL DESIGN OF PROCESSES
INCINERATIONS OF COAL SHLAMOV AND NO STANDARD COALS**

In work the results of theoretical design of incineration of ugleporodnih mixtures pursuant to basic principles of thermodynamics, touching the dynamics of output of the gaseous matters CH_4 , CO , CO_2 , H_2 and N_2 depending on the temperature of heating, are resulted.

Функционирование добывающей отрасли сопровождается образованием больших масс отходов, складированных в виде некондиционных углей или жидких угольных шламов, заполняющих шламонакопители. Многолетнее накопление углепородных масс приводит к всестороннему загрязнению окружающей среды: атмосферы, почвы и водных объектов. В то же время, данные отходы с наличием углерода представляют собой техногенные поверхностные месторождения, удобные для разработки или переработки.

С целью энерготехнологической переработки угольных шламов и некондиционных углей, предложенной ИГТМ НАНУ, проведены теоретические исследования терморазложения исходного углепородного сырья для определения конечных продуктов разложения в виде газообразных и конденсированных веществ при различных температурах нагрева [1].

Для теоретического анализа разнообразных химико-технологических и теплотехнических процессов, которые протекают при нагреве углепородных масс, необходимо учитывать большое число факторов, как внутри, так и вне системы «исходная масса – печь (реактор)». Упростить многофакторные связи позволяет компьютерное термодинамическое моделирование при известном составе исходного сырья и заданных режимах температуры и давления.

Существует и используется ряд программ, реализующих законы термодинамики в однородной изотропной системе, в которой распределения температуры и давления одинаковы во всех точках. К следующему упрощению относится то, что свойства идеального газа присущи всем газообразным веществам системы, а также то, что полученные составы веществ на определенной температуре соответствуют стабильному состоянию системы с равномерным распределением в ней всех ее компонентов. Для упрощения принимается также, что компенсация тепловых эффектов проводится за счет внешних источников тепла.

Все эти допущения могут привести к увеличению погрешности расчетов параметров термодинамических процессов при термопереработке углепородного сырья, однако при проведении научных исследований крайне важно выявить основные тенденции распада исходной массы с образованием твердых, жидких и газообразных продуктов.

Поскольку в энерготехнологическом варианте термопереработки нас интересует, прежде всего, состав и количество газообразных веществ и их соответствие энергетическим газам, которые могут использоваться в различных технологических процессах и отраслях промышленности, рассмотрим результаты теоретического моделирования высокотемпературных процессов на примере расчетов программы АСТРА–3 [1, 2].

В указанной программе используются основные законы термодинамики, сохранения массы, энергии и заряда, которые представляют математическую модель образования газообразных и конденсированных веществ в сложной многокомпонентной системе, которой является угольный шлам.

Система алгебраических уравнений взаимосвязи параметров состояния системы приведена в [1, 2]. Здесь же кратко следует упомянуть, что программа АСТРА–3 в соответствии с вышеприведенными допущениями использует уравнения: концентрации газообразных отдельных веществ; концентрации отдельных конденсированных компонентов; состояния идеального газа; общей электронейтральности термодинамической системы; сохранения массы химических элементов; энтропии термодинамической системы и определения энтальпии.

Поскольку согласно программе обрабатывается равновесный состав термодинамической системы по 20-ти химическим элементам, то в этих же пределах задан химический состав угольных шламов Червоногвардейской ЦОФ и углей Львовско-Волынского бассейна (ЛВБ). Углеотходы обогащения отобраны с поверхности и глубины шламонакопителя №1, а в качестве проб углей отобраны высокозольный сапропелевый и низкозольный гумусовый уголь. Их исходные химические составы заданы как основа расчетов и полностью приведены в [3].

Результатом теоретических термодинамических расчетов явились показатели концентраций, образованных на определенной температуре (по мере ее роста) газообразных и конденсированных веществ – продуктов терморазложения исходной массы.

По газообразным компонентам изучена динамика основных составляющих газа: водорода H_2 , окисла углерода CO , двуокиси углерода CO_2 , метана CH_4 , азота N_2 и сероводорода H_2S . Именно их суммарное содержание составляет 92–95 %.

Температура нагрева исходной массы задана в пределах 200–2500 °С. Помимо углепородной массы (уголь + минеральная часть) в расчете также задано небольшое количество окислителя H_2O , чтобы промоделировать вероятное сжигание угольного шлама с его жидкой фракцией без предварительного осушения, как это требуется в некоторых процессах.

В качестве результатов термодинамических расчетов при ожидаемом сжигании угольного шлама приведен рис. 1, на котором представлена динамика выхода отдельных компонентов газа с увеличением температуры нагрева t , °С.

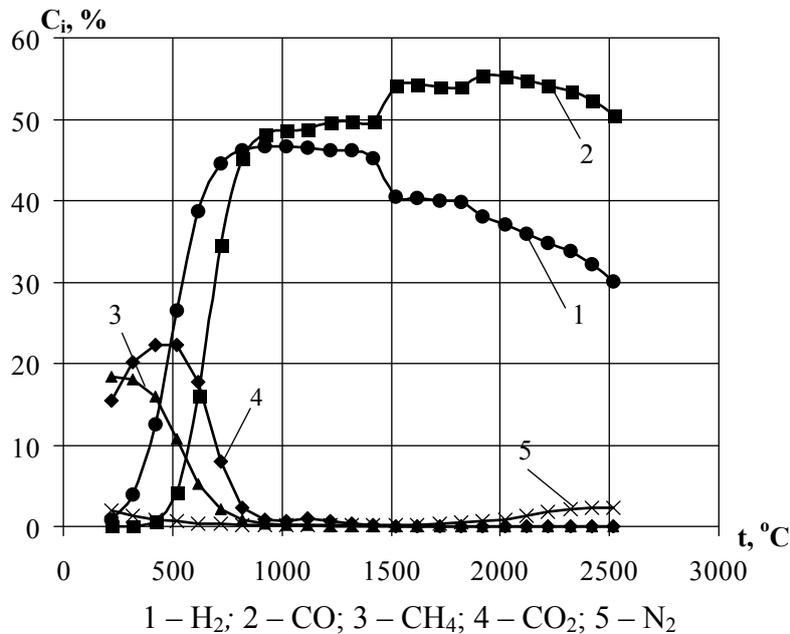


Рис. 1 – Выход компонентов газа при термической обработке шлама

Как показано на рис. 1, содержание водорода H₂ в газе возрастает при нагреве от 200 °С до 800 °С, что непосредственно связано с присутствием в шламе угля и разложением его органической массы. Затем при дальнейшем нагреве шлама до 2500 °С концентрация водорода плавно снижается, что можно представить аппроксимационной иррациональной функцией вида $C_{H_2} = \frac{a_1 t}{\sqrt{1 + t^4}}$, где

a_1 – коэффициент пропорциональности; t – температура нагрева исходной смеси.

При этом в режиме нагрева 200–800 °С наблюдается резкое уменьшение объемов выхода метана в газе, что можно объяснить за счет прохождения реакции пиролиза $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$.

С достижением температуры нагрева 1000 °С содержание одного из наиболее энергетического компонента в газе – метана CH₄ (теплота его сгорания свыше 36 МДж/м³) снижается практически до нуля, что описывается показательной функцией $C_{CH_4} = a_2 \frac{e^t}{e^{t^2}}$, где a_2 – коэффициент пропорциональности.

Оксид углерода СО – ядовитый горючий газ с теплотой сгорания более 13 МДж/м³, который не поддерживает горения, но является одним из основных компонентов газа при сгорании углерода в условиях недостаточного притока воздуха. При нагреве и сжигании угольного шлама от 200 °С до 1000 °С СО наиболее активно выделяется практически синхронно с водородом, и с ростом температуры до 2500 °С постепенно увеличивается в объеме. Описание данной тенденции по мере увеличения температуры возможно с помощью показательной функции $C_{CO} = a_3 e^{-1/t^2}$, где a_3 – коэффициент пропорциональности.

Эти тенденции при наличии окислителя H₂O объясняет реакция $C + 2H_2O \rightarrow CO + H_2$, а также при имеющейся двуокиси углерода СО₂ следует реакция вида $C + CO_2 \rightarrow 2CO$, что в совокупности дает наблюдаемое увеличение окиси угле-

рода.

На графиках рис. 1 при терморазложении шлама показана динамика выхода двуокиси углерода CO_2 , которая является бесцветным и негорючим газом, которая, согласно вышеприведенной реакции, лишь увеличивает содержание CO . Двуокись углерода имеет максимум выделения при $t^\circ = 500^\circ\text{C}$ с постоянным снижением до 1000°C в соответствии с показательной функцией $C_{\text{CO}_2} = \frac{a_4}{e^{t+t^2}}$,

где a_4 – коэффициент пропорциональности.

Динамика выхода азота практически постоянна и с учетом погрешности расчетов находится на минимальном уровне.

С помощью компьютерного моделирования проведены расчеты выходов тех же компонентов газа при сжигании проб гумусового и сапропелевого угля, приведенные на рис. 2.

По результатам расчетов получены выходы водорода из углей (рис. 2,а), которые превышают расчетные значения из шламов. При этом водород из гумусового угля выделяется в 1,8 раза больше и динамика его выхода на высоких температурах (свыше 1000°C) отличается от динамики выхода из шлама, т.к. практически стабилизируется до 2000°C .

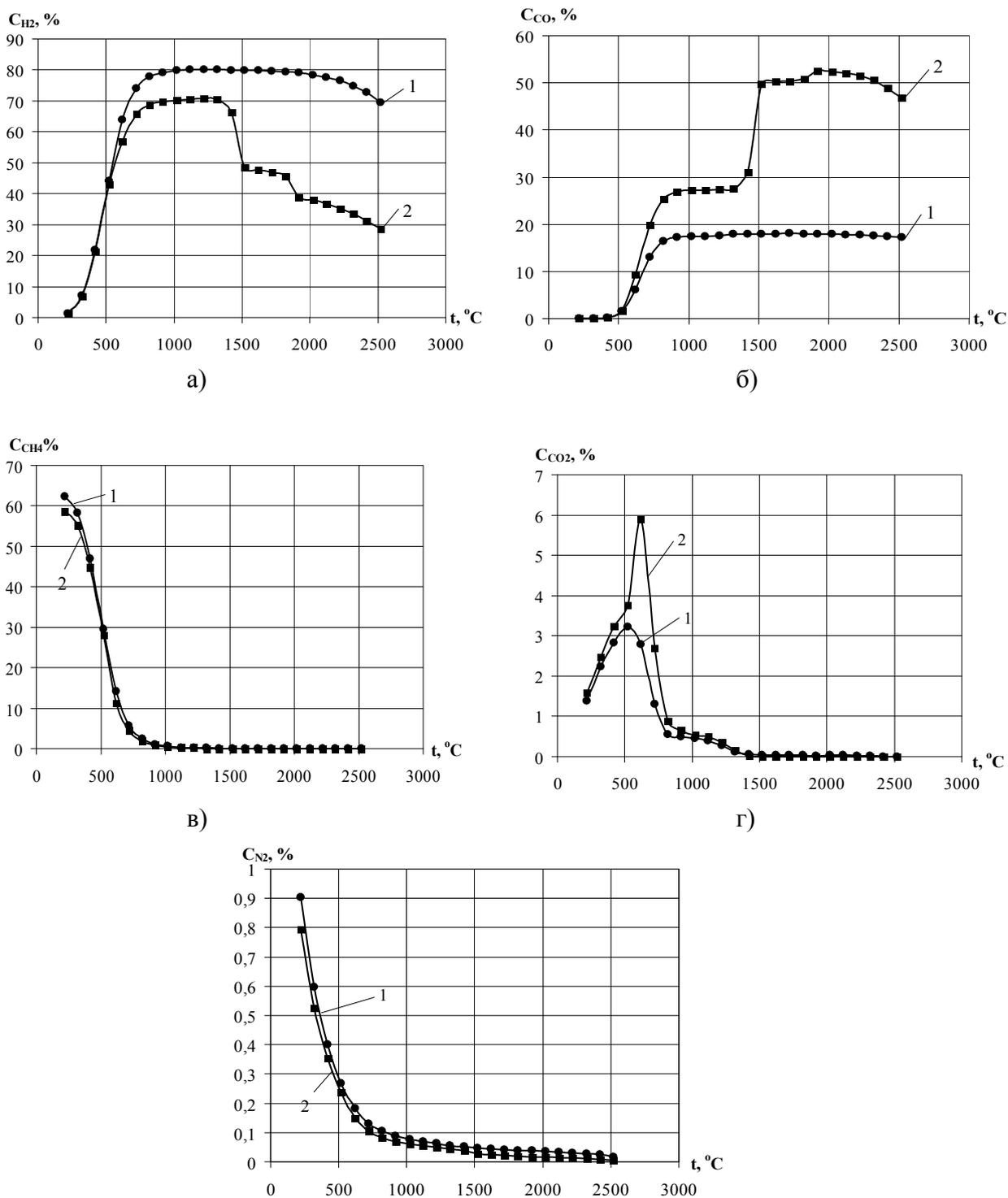
Динамика выхода H_2 из сапропелевого угля сходна по характеру с выходом из шламов, однако его максимальный выход достигает 70 % на температурах нагрева $800\text{--}1400^\circ\text{C}$, в то время как из шламов – всего лишь 48 %. Это еще раз подтверждает факт высокозольности шламов и сапропелевого угля.

Выходы метана из углей при температурах $200\text{--}300^\circ\text{C}$ находятся в пределах 59–62 %, в то время как из шламов максимальный выход не доходит до 20 %, что непосредственно сказывается на температуре сгорания газа из шлама в начале нагрева. Выходы метана из углей также резко снижаются до нуля к 1000°C (рис. 2,в).

Выходы CO также показывают непосредственное влияние исходного состава сырья, т.к. высокозольные сапропелевый уголь и шламы характеризуются практически одинаковой динамикой, однако первый максимум выхода CO у сапропелевых углей в диапазоне температур $750\text{--}1300^\circ\text{C}$ составляет 30 %, в то время как у шламов – 50 %, что приводит к повышению теплоты сгорания газа. У гумусовых углей выход CO достигает максимума при 800°C и остается на постоянной величине – 18 % (рис. 2,б).

Распределения CO_2 из углей с ростом температуры, показанные на рис. 2,г, повторяют характер выхода из шламов, однако из гумусового угля максимальное количество CO_2 составляет 3,1 % при температуре нагрева 500°C , в то время как у шламов – 23 %.

Содержание азота в газе из углей максимально в начале нагрева (0,8–0,9 %) и так же, как и из шламов, снижается к 1000°C .



д)

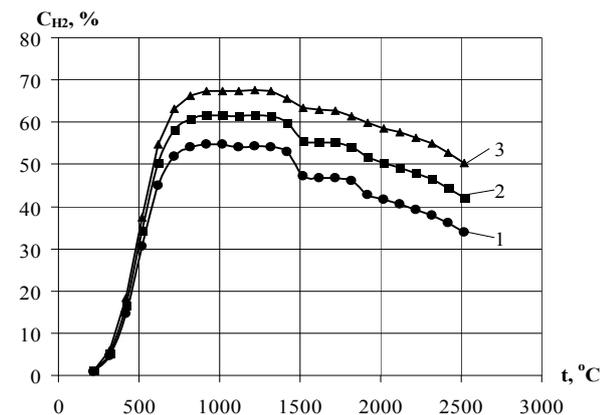
а) H₂; б) CO; в) CH₄; г) CO₂; д) N₂

1 – гумусовый уголь; 2 – сапропелевый уголь

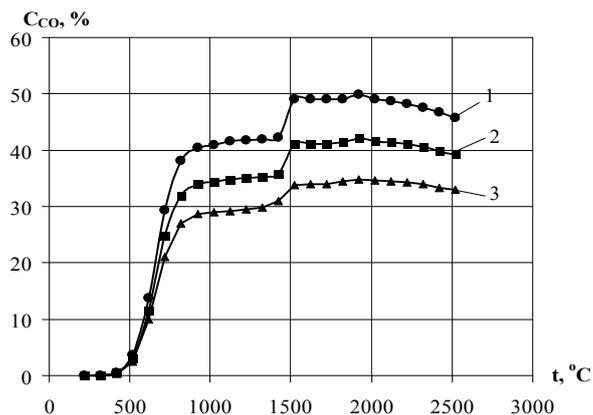
Рис. 2 – Выход компонентов газа при термической переработке углей ЛВБ

Анализы расчетов выхода основных компонентов газа из комплексных проб шлам–уголь различного состава в разных соотношениях приведены на рис. 3 и 4, которые также показывают влияние исходного состава сырья на выход газо-

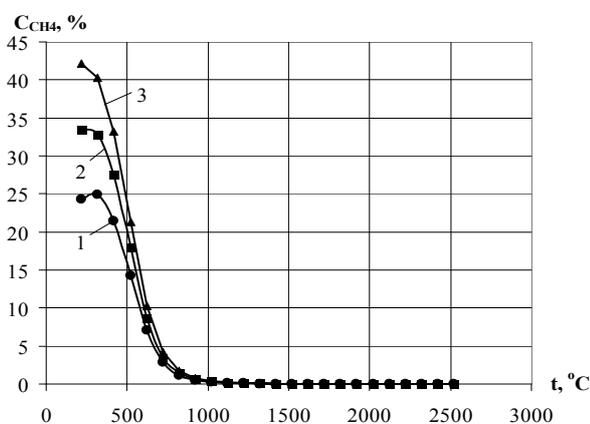
образных продуктов.



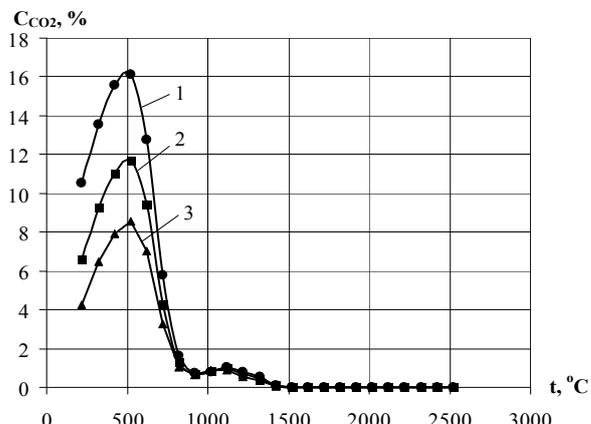
а)



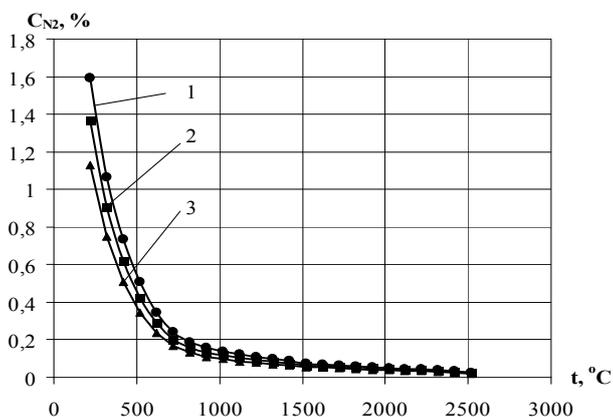
б)



в)



г)



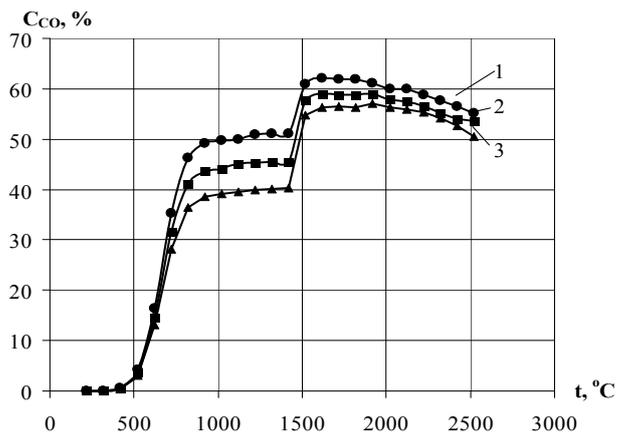
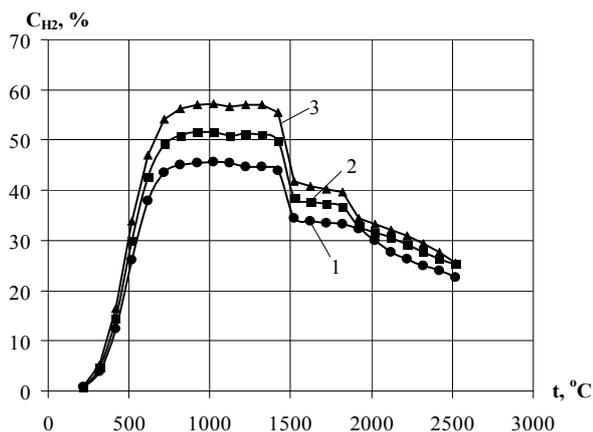
д)

а) H_2 ; б) CO ; в) CH_4 ; г) CO_2 ; д) N_2

1 – шлам-уголь – 2: 1; 2 – шлам-уголь – 1: 1; 3 – шлам-уголь – 1: 2

Рис. 3 – Выход компонентов газа при термической переработке пробы гумусового угля и шлама в различных соотношениях

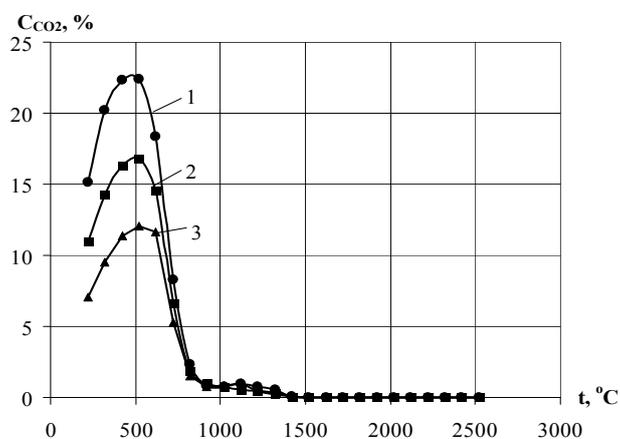
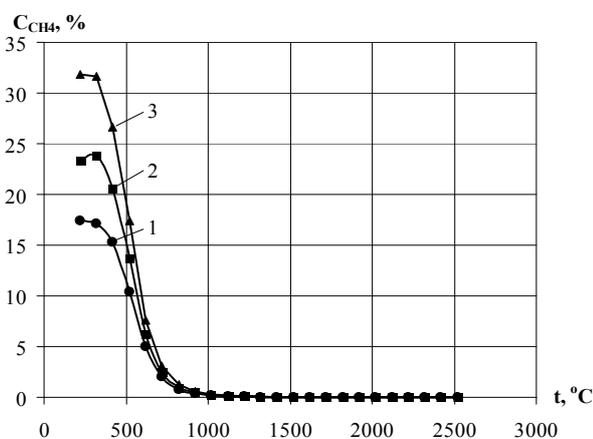
У наиболее важных энергетических составляющих газа – метана и водорода видна зависимость наибольших выходов от увеличения количества угля в пробе, в то время как максимальные выходы CO и CO_2 наблюдаются в результате



наибольшего количества шлама в составе исходного сырья.

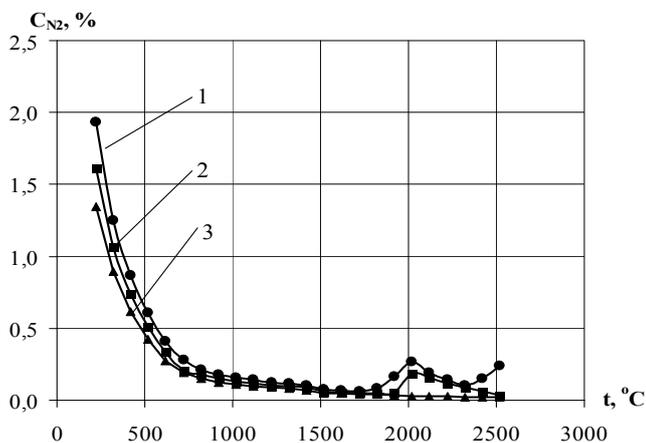
а)

б)



в)

г)



д)

1 – шлам-уголь – 2: 1; 2 – шлам-уголь – 1: 1; 3 – шлам-уголь – 1: 2

Рис. 4 – Выход компонентов газа при термической переработке комплексной пробы сапропелевого угля и шлама в различных соотношениях

Результатами проведенных расчетов компьютерного моделирования являются:

– состав исходного углеродного сырья влияет на объемы и состав газа, образующегося при их сжигании, что особенно сказывается на начальной стадии нагрева до 1000 °С;

- выявлены отличия в динамике выхода основных компонентов газа при терморазложении шламов, углей и их комплексных проб различного состава;
- показано увеличение выхода водорода и метана из углей по сравнению со шламами;
- получена наибольшая динамика выхода CO и CO₂ из шламов по сравнению с углями;
- в комплексных пробах шлам–уголь в различных соотношениях показано увеличение выхода водорода и метана с увеличением в составе пробы углей, и рост выхода оксида и диоксида углерода с увеличением в составе пробы шлама.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разработать исходные данные на проектирование энерготехнологического комплекса утилизации шламов и некондиционных углей: Отчет о НИР (заключительный) ИГТМ НАН Украины; Руководитель А.Ф. Булат. – Днепропетровск, 2010. – 255 с. – №0107U002003; Инв. №6959.
2. Применение ЭВМ для термодинамических расчетов металлургических процессов / Г.Б. Синярев, Н.А. Ватолин, Б.Г. Трусов, Г.К. Моисеев. – М.: Наука, 1982. – 221 с.
3. Влияние условий нагрева низкосортных углей и отходов углеобогащения на продукты термодеструкции / В.Л. Приходченко, Е.А. Слащева, В.Я. Осенний, Н.В. Коваль, Э.С. Клюев // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2010. – Вып. 89. – С. 63–72.

УДК 622.454:622.831.325.3

Д-р техн. наук Б.В. Бокий
(ПАО «Шахта им. А.Ф. Засядько»)

ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСНОЙ ДЕГАЗАЦИИ ВЫЕМОЧНЫХ УЧАСТКОВ

Викладені результати шахтних досліджень по керуванню аерогазодинамічним процесом на високопродуктивних виймальних ділянках, що відпрацьовують газоносні вугільні шари по стовповій системі. Розглянуті особливості застосовуваних схем провітрювання і комплексної дегазації. Наведені значення участі на паях вентиляції та способів дегазації (у тому числі нетрадиційного) у газовому балансі виймальної ділянки при адаптивним керуванні повітерерозподілом

FEATURES INTEGRATED DEGASSING WORKING AREAS

The results of studies on the mine management of aero gas-dynamic process in the working areas of high-performance, gas-bearing coal seams were working on the pillar system. The features used ventilation circuits and integrated drainage. The values of the equity of ventilation and drainage ways (including nontraditional) in the gas balance of the excavation site in adaptive management of air distribution

Газообильность шахт определяется, в основном, суммарной интенсивностью источников газовой выделености на действующих выемочных участках. Снижение газообильности участков требует больших затрат на усиленную вентиляцию выработок, а также на осуществление мероприятий по управлению газовой выделености и газораспределености. Применение таких мероприятий коренным образом изменило ранее сложившееся представление об ограничении нагрузки на очистной забой по газовому фактору. В результате границы этого фактора значительно отодвинуты, подвигание очистного забоя достигло 5-6 м/сут, а нагрузка на забой – 3000-4000 и более тонн угля в сутки.

Газообильность добычных участков, как известно [1], зависит от горно-