

УДК 622.324.5:622.279.5

Агаев Р.А., канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
Клюев Э.С., канд. техн. наук,
Сапунова И.А., канд. техн. наук, ст. научн. сотр.
(ИГТМ НАН Украины)

АНАЛИЗ ГЕОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СПОСОБОВ ДОБЫЧИ ГАЗА ИЗ УГОЛЬНЫХ И ТЕХНОГЕННЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Агаєв Р.А., канд. техн. наук, ст. наук. співр.,
Клюєв Е.С., канд. техн. наук,
Сапунова І.О., канд. техн. наук, ст. наук. співр.
(ІГТМ НАН України)

АНАЛІЗ ГЕОТЕХНОЛОГІЧНИХ СПОСОБІВ ВИДОБУТКУ ГАЗУ ІЗ ВУГІЛЬНИХ ТА ТЕХНОГЕННИХ РОДОВИЩ

Agaiev R.A., Ph. D. (Tech.), Senior Researcher,
Kliuiev E.S., Ph. D. (Tech.),
Sapunova I.A., Ph. D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)

ANALYSIS OF GEOTECHNOLOGICAL METHODS OF GAS RECOVERY FROM THE COAL AND TECHNOGENEOUS DEPOSITS

Аннотация. В статье представлен анализ современных геотехнологических способов добычи метана из угольных и техногенных месторождений. Особое внимание уделено подземным и наземным способам комплексного освоения ресурсов, сосредоточенных в газонасыщенном углепородном массиве, в заполненных породных отвалах и илонакопителях углеобогащительных фабрик. Геотехнологические способы извлечения метана переводят разработку месторождений на новый качественный уровень, который обеспечит взаимосвязь между полным извлечением полезных ископаемых и повышением безопасности труда, улучшением экологического, экономического и социального состояния горнодобывающего региона.

В работе описаны физико-механические способы воздействия на газоугольный массив, которые учитывают постоянные изменения напряженно-деформированного состояния прилегающей зоны, способствующее интенсификации газовыделения.

Также предложены варианты физико-химических способов теплового воздействия на твердое углеродсодержащее сырье, которое рассматривается как бинарная смесь угля и породы, как в бескислородной среде, так и с применением окислителей. В статье представлены результаты исследований о каталитических превращениях, происходящих в структуре угольного вещества, что способствует оптимизации состава газовой фазы, снижению потребления окислителей и увеличению удельной производительности теплового процесса без повышения температуры. Предложены разнообразные варианты применения катализаторов в процессах физико-химических превращений угля.

Проведенные исследования позволили проанализировать существующие способы воздействия на горный массив, выделить их преимущества и недостатки и выявить наиболее перспективные направления разработки новых способов в области геотехнологических процессов добычи метана из угольных и техногенных месторождений.

Ключевые слова: физическое воздействие, тепловое воздействие, газоугольный массив,

углеродсодержащие материалы, геотехнология, метан.

Основой устойчивого функционирования топливно-энергетического комплекса Украины является собственная минерально-сырьевая база, базирующаяся на значительных запасах углеродсодержащего энергетического сырья. Рост дефицита угля и газа способствует тому, что освоение месторождений продолжается в сложных горно-геологических условиях на больших глубинах. Так, по имеющимся данным, средняя глубина разработки превышает 720 м, а 33 шахты добывают уголь на глубинах 1000-1400 м [1]. При этом возрастание глубины разработок усложняется увеличением шахтопластов, склонных к внезапным выбросам угля и газа [2].

В такой ситуации для увеличения объемов добычи газа необходимо разрабатывать новые и совершенствовать уже существующие геотехнологические способы освоения месторождений, которые отвечали бы современному развитию науки и техники, и были экономически выгодны и экологически безопасны (рис.1).



Рисунок 1 – Классификация геотехнологических способов добычи газа из углеродного массива

В некоторых случаях использование геотехнологий – это единственно возможный способ, позволяющий перевести полезное ископаемое в подвижное состояние на месте залегания с последующей выдачей через скважины на поверхность. Применение геотехнологий обеспечивает полную механизацию и автоматизацию технологических операций, способствует быстрому

освоению месторождения, улучшению условий труда и высокую степень извлечения полезных компонентов.

Анализ существующих геотехнологий разработки угольных и техногенных месторождений для получения газовой фазы показал, что самые существенные результаты отражены в научных трудах Аренса В.Ж, Булата А.Ф., Бондаренка В.И., Дичковського Р.О., Колоколова О.В., Крейнина Є.В., Софийского К.К., Табаченка Н.М. и др.

Разработка и совершенствование наземных геотехнологических способов добычи газа из твердого углеродсодержащего сырья активно проводятся как в Украине, так и за рубежом. Одним из перспективных направлений извлечения газа из угля и пород являются способы активного воздействия на углеродный массив через скважины с поверхности [3-4]. Все операции по вызову притока газа и освоению скважины сводятся к созданию на ее забое депрессии, т.е. давления ниже пластового [5].

Можно выделить шесть базовых способов вызова притока газа: тартание, свабирование (поршневание), замена скважинной жидкости на более легкую, компрессорный, прокачка газожидкостной смеси, откачка глубинными насосами.

Тартание – это извлечение из скважины жидкости желонкой, спускаемой на тонком (до 16 мм) канате с помощью лебедки. Желонка изготавливается из трубы длиной 8 м, имеющей в нижней части клапан со штоком, открывающимся при упоре штока на уровень жидкости или забоя. Тартание – малопроизводительный, трудоемкий способ с очень ограниченными возможностями применения, однако возможность извлечения осадка и глинистого раствора из забоя и контроля за положением уровня жидкости в скважине дают этому способу некоторые преимущества [5].

При свабировании (поршневании) поршень или сваб спускается на канате (стальной ленте) по насосо-компрессорным трубам (НКТ). Поршень представляет собой трубу диаметра (25,0-37,5 мм) с приемным клапаном в нижней части. На наружной поверхности трубы (в стыках) укреплены эластичные резиновые манжеты (3–4 шт.), армированные провололочной сеткой. При спуске поршня под уровень жидкость перетекает через клапан в пространство над поршнем. При подъеме клапан закрывается, а манжеты, распираемые давлением столба жидкости над ними, прижимаются к стенкам НКТ и уплотняются. Глубина погружения ограничена прочностью тартального каната и не превышает 75-150 м. Свабирование в 10 раз производительнее тартания, но устье при этом остается открытым, что связано с опасностями неожиданного выброса газа [6].

Замена скважинной жидкости на более легкую осуществляется при спущенных в скважину НКТ и герметизированном устье, что предотвращает выбросы и фонтанные проявления извлекаемого газа. Скважина после бурения обычно заполнена глинистым раствором. Производя промывку скважины (прямую или обратную) водой, можно получить уменьшение забойного давления. Так как разница в плотностях заменяемых жидкостях не превышает 25–30 %, то это обстоятельство является ограничением возможности способа.

Компрессорный способ освоения скважин нашел наиболее широкое распространение при освоении фонтанных, полужидкостных и частично механизированных скважин. В скважину спускается колонна НКТ, а ее устье оборудуется фонтанной арматурой. К межтрубному пространству присоединяется нагнетательный трубопровод от передвижного компрессора. При нагнетании газа жидкость в межтрубном пространстве оттесняется до башмака НКТ или до пускового отверстия в НКТ, сделанного заранее на соответствующей глубине. Газ (воздух), попадая в НКТ, дегасирует жидкость в них. В результате давление на забое сильно снижается. Регулируя расход газа (воздуха), можно изменять плотность газожидкостной смеси в трубах. Использование инертных или взрывобезопасных газов не позволяет применять данный способ освоения скважин.

Освоение скважин путем закачки газожидкостной смеси заключается в том, что вместо чистого газа или воздуха в межтрубное пространство закачивается смесь газа с жидкостью (обычно вода). Плотность такой газожидкостной смеси

зависит от соотношения расходов закачиваемых газа и жидкости. Поскольку плотность газожидкостной смеси больше плотности чистого газа, то это позволяет осваивать более глубокие скважины компрессорами, создающими меньшее давление.

Освоение скважинными насосами применяется на истощенных месторождениях с низким пластовым давлением, когда не ожидаются фонтанные проявления, откачка из них жидкости производится скважинными насосами, спускаемыми на проектную глубину. При откачке из скважины жидкости насосами забойное давление уменьшается, пока не достигнет величины, при которой устанавливается приток из пласта. Такой способ эффективен в тех случаях, когда скважина не нуждается в глубокой и длительной депрессии для очистки от разрушенной глинистой корки [7].

Среди химических способов освоения скважин особое место занимает солянокислотное воздействие и воздействие углекислым газом. Солянокислотные обработки призабойных зон скважин, вскрывших карбонатные пласты или пласты, содержащие карбонатный цементирующий материал, а также для растворения окалины. Для этого в пласт закачивают 0,8-1,5 м³ на 1 м толщины пласта 10–15%-го раствора ингибированной соляной кислоты и оставляют скважину на сутки. Затем после дренирования и промывки скважину переводят под нагнетание.

Способ нагнетания в угленосную толщу углекислого газа направлен на обеспечение возможности более полного извлечения метана из угольного пласта. Достигается это тем, что, после завершения процесса самоистечения метана из угольного пласта и пневмогидродинамической обработки, в последний закачивают вещество с большей, чем у метана, сорбционной способностью, в частности, углекислый газ [8].

Среди тепловых способов обработки прискважиной зоны особое внимание занимает обработка пороховыми генераторами и пневмотепловое воздействие. При воздействии на угольный пласт пороховыми генераторами давления происходит расширение естественных природных систем трещиноватости, создаются новые системы трещиноватости. В результате образуется единая гидравлическая сеть трещин, ориентированных к скважине, которая равномерно охватывает пласт в радиусе до 25 м, что ведет к значительному увеличению проницаемости прискважинной зоны и объема газа из пласта. При обработке угольного пласта генераторами радиус воздействия может достигать 40–50 м. Благодаря этому создаются благоприятные условия для последующего применения базовых способов воздействия на пласт [9].

Пневмотепловое воздействие заключается в нагнетании нагретого воздуха в ранее подвергнутый гидрорасчленению угольный пласт за счет повышения фазовой проницаемости для интенсификации извлечения метана, снижения сорбционной емкости угля вследствие повышения температуры в системе «уголь-метан» и образования дополнительной подсистемы трещин, ориентированных в нагнетательной скважине вследствие проникновения воздуха [10].

По мнению авторов [11] наиболее перспективными способами освоения уг-

леродосодержащих ресурсов являются гидро- и пневмодинамические воздействия на прискважинную зону газонасыщенного угленосного массива.

Гидравлический разрыв пласта (ГРП). Скважины, вскрывающие пласты с глинистыми прослоями, чередующимися с проницаемыми песчаниками малой суммарной мощностью и низкой проницаемостью обычно удается освоить только после ГРП и ряда последующих операций (дренаж, промывка). Однако в горизонтах, представленных чередованием глин и песчаников, ГРП не эффективен, так как трещины образуются в одном наиболее проницаемом прослое. Лучшие результаты получаются при поинтервальном ГРП, т.е. при гидроразрыве каждого прослоя. При этом необходимо применение двух пакеров, спускаемых на НКТ и устанавливаемых выше и ниже намечаемого для обработки мощности слоя.

Пневморасчленение пластов – наиболее перспективная схема при наличии мощных компрессоров, обеспечивающих темп нагнетания свыше $60\div 80 \text{ м}^3/\text{мин}$ и способных создавать давление до 20 МПа. В реальных условиях отсутствие компрессоров необходимой мощности (темп нагнетания, давление), а также соображения энергетической целесообразности определяют применение комбинированных воздействий, а именно – различных схем пневмогидровоздействий [12].

Гидрорасчленение с использованием газообразного азота применяют с целью интенсификации извлечения рабочей жидкости из пласта, для повышения равномерности обработки вокруг нагнетательной скважины за счет создания условий в процессе повторного гидрорасчленения пласта для раскрытия дополнительных трещин. Их первоначальное раскрытие временно блокируется ледяными перемычками. Данная технологическая схема позволяет поэтапно раскрывать все естественные системы трещин в угольном пласте [13].

Сущность технологии знакопеременного гидровоздействия в режиме кавитации с использованием геоэнергии углегазонасыщенного массива заключается в том, что после кавернообразования в призабойной зоне скважины нагнетание воды ведется в специальном режиме, инициирующем реализацию геоэнергии массива и образование взаимосвязанных каверн и высокопроницаемых трещин [14].

Способ гидравлической обработки угольного пласта с использованием обратного гидроудара. Воздействуют давлением рабочей жидкости на пласт скважиной с поверхности в режиме гидрорасчленения, затем при свободном истечении жидкости из скважины создают гидроудары, циклически перекрывая поток этой жидкости и сбрасывая ее в атмосферу. Величина амплитуды гидроудара должна соответствовать значению величины устьевого давления до ее первоначального истечения. Длительность перекрытия и сброса жидкости в каждом цикле принимают одинаковыми. Создание гидроударов прекращают, когда максимальное давление при воздействии в цикле становится меньше величины устьевого давления жидкости до ее первоначального истечения из скважины [15].

Способ электроразрядного воздействия на углегазонасыщенную породу заключа-

ется в следующем: в дегазационную скважину диаметром не менее 127 мм, заполненную водой, опускается электроразрядное устройство с помощью геофизического подъемника на каротажном кабель-тросе. После этого осуществляется подача напряжения к паре электродов. Частота подачи импульсов 0,2 Гц. В результате у стенки обсадной трубы создается давление до 40 МПа и скважинная жидкость проникает со скоростью 150 м/с в перфорационные отверстия, а затем в пористую газонасыщенную среду, что приводит к декольматации природных пор и трещин в скважине. За счет перепада давления волна сжатия трансформируется в волну сжатия-растяжения и возникают напряжения, превышающие предел прочности среды на растяжение [4].

Гидровоздействие на угольный пласт является базовой схемой скважинной технологии воздействия на высокогазоносные угольные пласты с поверхности для извлечения угольного метана. Сделать это можно лишь на основе увеличения трещинной проницаемости - а именно на раскрытии имеющихся систем трещин в пласте. В соответствии с технологией осуществляется сооружение технических скважин с дневной поверхности до угольного пласта и последующего нагнетания в него воды с расходом в пределах 60-90 л/с и под давлением до 15 МПа [16].

В течение ряд лет ИГТМ НАН Украины разрабатывались способы и средства гидродинамического воздействия (ГДВ) [17, 18] на напряженный газонасыщенный массив с целью предотвращения внезапных выбросов угля и газа при вскрытии крутых угольных пластов. В рамках реализации этой концепции на базе метода гидродинамического воздействия разработан способ пневмогидродинамического воздействия (ПГДВ) [4, 19, 20] на углепородный массив через поверхностную дегазационную скважину. ПГДВ в отличие от ГДВ не предусматривает разрушения углепородного массива. Его задачей является освобождение фильтрационной системы прискважинной зоны от кольматационных образований пластов с глинистыми прослоями, чередующимися с проницаемыми песчаниками разной суммарной мощности и низкой проницаемостью. Принцип воздействия заключается в знакопеременной фильтрации жидкости (воды) в обрабатываемой зоне массива. Еще одно отличие ПГДВ от ГДВ состоит в том, что знакопеременные нагрузки создаются изменением давления сжатого воздуха на столб воды, находящийся в нижней части скважины.

Все вышеперечисленные геотехнологические способы извлечения метана направлены на изменение напряженного состояния прискважинной зоны, а именно образование новых и декольматацию старых трещин и пор. При современных объемах потребления углеводородов возникла необходимость в получении дополнительного количества горючих газов за счет расширения области использования теплового воздействия на горный массив.

Анализ существующих работ показал, что тепловое воздействие на горный массив может проходить как в бескислородной среде, так и с применением окислителей. Эти процессы характеризуются, в первую очередь, расщеплением органической массы, рекомбинацией продуктов расщепления и образованием термодинамически устойчивых конечных веществ: твердого остатка, жидких

продуктов и газовой фазы. В ряде угледобывающих стран реализуются различные технологические схемы, направленные, преимущественно, на получение синтетического жидкого топлива и энергетического твердого остатка [21-23]. В зависимости от температуры и назначения получаемых продуктов различают следующие варианты:

- 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.

Еще в конце XIX века Д.И. Менделеев сформулировал принцип, положенный в основу подземного извлечения газов, полученных путем физико-химических превращений угля на месте его залегания: «Пробурив к пласту несколько отверстий, одно из них предназначено для введения – даже вдувания – воздуха, другое – для выхода – даже вытягивания – горючих газов, которые затем легко уже провести даже на далекие расстояния к печам». Существующая технология подземной газификации угольных пластов предусматривает бурение вертикальных, наклонных и наклонно-горизонтальных скважин, расположенных на расстоянии 20-36 м и соединенных по угольному пласту сбойками, для подачи дутья и отвода продуктов горения. При этом угольный пласт выгорает постепенно снизу вверх, по мере выгазовывания пласта выгоревшее пространство заполняется обрушившимися породами кровли и зольным остатком угля. Газ, получаемый с использованием воздушного дутья, используют как топливо в коммунально-бытовом секторе. Предложена технология извлечения метана, включающая тепловое и механическое воздействие на углепородный массив через горизонтальные скважины, благодаря чему коэффициент газопроницаемости возрастает в 100-1000 раз. Для этого на угольный пласт бурят вертикально-наклонные скважины и используют огневое расширение буровых каналов путем перемещения очага горения навстречу нагнетаемому воздуху. Получаемый газ, учитывая высокую концентрацию метана (до 95 %) и большой ожидаемый дебит, предполагается использовать в энергетических установках. Используемая технология имеет ряд специфических особенностей [24, 25]:

- зависимость процесса от горно-геологических условий месторождения (боковые породы играют роль стенок физико-химического реактора, на небольшой глубине они не обеспечат достаточную герметичность подземного газогенератора);
- отсутствие движения топлива (образующийся газ перемещается совместно с зоной горения и огневым забоем);
- протекание каталитических процессов (в зоне горения могут находиться горные породы, в состав которых входят включения, способствующие более

быстрому и эффективному протеканию физико-химических превращений);

– проникновение подземных вод в газогенератор (в зависимости от разных условий может привести либо к остановке процесса вследствие тушения угольного пласта, либо к росту эффективности, поскольку газификация проходила бы в присутствии водяного пара).

К недостаткам подземной газификации угольных пластов следует отнести: трудности в управлении и контроле процесса, проседание поверхности, результатом которого может быть прорыв газа при разгерметизации трубопроводов и оборудования; нарушение водоносных горизонтов и возможное загрязнение грунтовых вод; в случае получения газа с низкой теплотой сгорания его нерентабельно транспортировать на большие расстояния.

Особый интерес представляет комплексное освоение ресурсов, сосредоточенных в заполненных породных отвалах и илонакопителях углеобогатительных фабрик. Процессы разработки подобных техногенных месторождений осуществляют разными способами, а сырьем для них в зависимости от целевого назначения служат различные по гранулометрическому составу, физико-химическим и технологическим свойствам угли и породы.

Так, в работе [26] описан энерготехнологический комплекс по переработке угольных отходов с помощью теплового воздействия. Угольные отходы из накопителя попадают в реактор, где в непрерывном режиме осуществляется их нагрев при температурах 200 – 650 °С в бескислородной среде. При этом химические вещества в присутствии разогретого твердого остатка, участвующего в качестве катализатора, превращаются в газовую фазу количеством 300 м³/т, после чего подвергаются охлаждению и конденсации. Несконденсированный газ с теплотой сгорания более 30 МДж/кг характеризуется следующим составом (% об.): CO₂ – 1,5-2,5, CO – 11-18, H₂ – 12-28, CH₄ – 33-45, C₂H₆ – 19-20, и пригоден для сжигания в котлоагрегате. Основные недостатки данного решения связаны со сложностью организации процесса теплового воздействия и эффективного управления им. Также следует отметить отсутствие данных по вещественному составу и физическим свойствам исходного сырья, от которых напрямую зависит количество и химический состав конечных продуктов.

При тепловом воздействии в среде окислителя, в качестве которого можно использовать кислород, водяной пар, диоксид углерода, воздух или их смеси, органическая часть некондиционного угольного сырья непосредственно преобразуется в газовую фазу, которая, преимущественно, состоит из монооксида и диоксида углерода, водорода, метана, водяного пара и азота. Освоены различные технологии теплового воздействия в среде окислителя, наиболее распространенными из которых являются технологии Лурги (стационарный слой кускового топлива), Винклера (кипящий слой), Копперс-Тотцека (пылеугольный вихревой поток) и Тексако (водоугольная суспензия) [21-26]. В работе [26] представлены результаты разработки и реализации процесса переработки бурого угля в слоевом газификаторе с совместным производством твердого остатка и горючего газа. В основу положен технологический процесс тепловой переработки угля, в котором летучие компоненты угля газифицируются с использованием

нестационарного эффекта «тепловой волны». Степень конверсии при этом регулируется режимом подачи дутья. Максимальная температура в зоне реакции составляет 1123-1173 К. Проведенные опытно-промышленные испытания позволили получить из 1 т угля марки Б₂ 1700 м³ горючего газа с теплотой сгорания 3,6-3,8 МДж/м³. По энергетическому балансу 56 % теплоты сгорания исходного угля содержится в твердом остатке и 40 % – в горючем газе. Тепловые потери составили 4 %. По сравнению с существующими промышленно освоенными решениями вышеупомянутый процесс получения газовой фазы имеет ряд преимуществ: экологическая безопасность (удельные выбросы в атмосферу окислов азота, серы и пыли на два порядка ниже, чем у угольных ТЭЦ); вследствие низкой скорости фильтрации газов в реакторе процесс мало зависит от фракционного состава, гидравлического сопротивления слоя и позволяет перерабатывать мелкозернистые угли; отсутствие выноса летучей золы из слоя (газ без очистки может быть использован для производства электроэнергии и/или тепловой энергии); сброс газообразного теплоносителя в атмосферу отсутствует и поэтому не требуется сооружение дополнительных систем газоочистки и каталитического дожигания; для тушения твердого остатка не используется вода и не производится конденсация продуктов разложения, следовательно, отсутствуют технологические сточные воды, содержащие вредные вещества, в том числе 1–2 класса опасности.

В Институте геологии и геохимии горючих ископаемых НАН Украины на стендовой установке проведено ряд экспериментов по тепловому воздействию на некондиционный уголь Львовско-Волынского бассейна как на воздушном, так и водовоздушном дутье при температуре 1000-1100 °С и атмосферном давлении [27]. 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. В случае использования неоднородного кускового угля после завершения эксперимента отмечено, что не весь уголь подвергся тепловому и окислительному воздействию. В слое образовались проходные каналы, через которые окислитель проходил, не вступая в химическую реакцию. К недостаткам технологических решений по использованию теплового воздействия для получения горючих газов в среде окислителей следует отнести: сложность организации процесса; подвод значительного количества теплоты для поддержания постоянного нагрева; невозможность получать высококалорийный газ из-за использования окислителей, увеличивающих количество балластных компонентов газа; дополнительные затраты на производство и хранение кислорода.

Проведенный анализ показал, что высокая зольность и значительное содержание серы в некоторых марках углей и пород являются положительными факторами, если их рассматривать с позиций некоторых современных технологий переработки углей на основе процесса теплового воздействия с получением га-

за. Следовательно, существующие процессы теплового воздействия на твердое углеродсодержащее сырье характеризуются существенным снижением количества горючих компонентов в газовой фазе, значительным загрязнением окружающей среды и сложностями в контроле процесса.

В последнее время большое внимание уделяется разработке принципиально новых, нетрадиционных подходов, отличительной чертой которых является не только совершенствование технологических схем, но и ускорение физико-химических превращений компонентов исходного материала за счет использования катализаторов. Осуществление теплового воздействия в присутствии катализаторов способствует оптимизации состава газовой фазы, снижению до минимума потребления окислителей и увеличению скорости и удельной производительности процесса без повышения температуры. При этом применимы два основных метода. Один из них включает непосредственное взаимодействие катализатора и угольного вещества на границе раздела их фаз. Другая группа методов отличается тем, что каталитические превращения происходят по механизму «опосредованного» катализа путем передачи действия катализатора через жидкие или газообразные компоненты реакционной среды [28-30]. Установлено, что наиболее лучший контакт достигается при введении катализатора методами химического связывания с реакционно-способными функциональными группами на поверхности угля, внедрения в объем угольного вещества, а также при использовании катализаторов в растворенном, расплавленном или летучем состоянии. Высокую эффективность процесса можно достичь, применяя механические смеси измельченного или разведенного в жидкой среде твердого катализатора и угля, а также стационарный или кипящий слой частиц катализатора.

В результате установлена принципиальная возможность интенсификации физико-химических превращений, происходящих при тепловом воздействии в присутствии различных катализаторов (табл. 1).

Таблица 1 – Зависимость относительного выхода газа и скорости процесса теплового воздействия на бурый уголь в присутствии различных катализаторов при 850 °С

Катализатор	Выход газа	Скорость процесса
Без катализатора	1	1
CO(OH) ₂	1,16	1,09
V ₂ O ₅	1,23	1,18
Fe ₃ O ₄	1,28	1,23
MgO	1,29	1,28
PbO ₂	1,35	1,28
ZnO	1,48	1,39
K ₂ CO ₃	1,95	1,78

Уменьшение температуры позволяет снизить требования к конструкционным материалам и отказаться от применения дорогостоящего кислородного дутья, необходимого для достижения высоких температур. Также катализатор способствует более интенсивному протеканию реакции метанирования. Введе-

ние солей калия позволило повысить производительность реакционного объема на 65 % и снизить себестоимость газов на 15 %.

Перспективным считается использование катализаторов в процессах теплового воздействия на основе оксидов металлов. Так, благодаря каталитическому действию калия процесс осуществляется при температуре 700 °С вместо 1100-1600 °С в традиционных процессах. При 800-1000 °С скорость физико-химических превращений бурого угля увеличивается на два порядка при использовании никелевого катализатора. Его недостатком является дезактивация в присутствии серы и необходимость использования сравнительно высокой концентрации никеля (от нескольких процентов от массы угля).

Ведутся разработки процессов теплового воздействия в расплавах солей, которые могут играть роль как катализатора, так и теплоносителя. В таких процессах в расплав соли подают уголь, кислород (или воздух) и пар. Сера и компоненты золы переходят в расплав, поэтому часть его выводят из цикла, и охлаждают водой; соль регенерируется и возвращается в цикл. Преимуществом процесса является возможность использования угля любой степени метаморфизма, отсутствие стадий его подготовки (в частности, измельчения), полная очистка газа от сероводорода и паров смолы, ускорение физико-химических превращений под воздействием соды.

Однако использование каталитического эффекта в физико-химических превращениях угольного вещества связано с проблемой разработки простых и надежных методов введения катализатора в реакционную смесь и регенерации его для повторного использования. В качестве каталитически активных материалов оказалось возможным использовать дешевые и доступные металлургические и котельные шлаки, ускоряющие реакции окисления, метанирования и конверсии угля. Было обнаружено, что при осуществлении процесса газификации в кипящем слое мартеновского шлака конверсия угля возрастает с 40 до 76 %. Применение циркулирующего слоя приводит к еще большему каталитическому эффекту, что позволяет сохранить высокую степень конверсии угля при увеличении скорости потока реакционной смеси в 2,3 раза и повысить производительность газогенератора.

Таким образом, проведенные исследования показали, что эффективность процессов физико-химических превращений углей в экологически чистые газообразные топлива может существенно повышаться при использовании соответствующих катализаторов, позволяющих снижать температуру при сохранении высокой скорости процесса и регулировать состав продуктов. При этом во многих случаях экономически оправданно и технически возможно применение дешевых катализаторов одноразового использования.

В результате выполненного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Извлечение метана из газугольных месторождений эффективно при использовании пневмодинамического и пневмогидродинамического воздействий, когда пробуренная скважина с поверхности вместе с перфорационной зоной пересекает смешанные пласты с глинистыми прослоями, чередующимися с проницаемыми песчаниками разной мощности и низкой проницаемости. Их

преимущества заключаются в удовлетворении горнотехнических условий обработки газонасыщенного углеродного массива, в соблюдении требований безопасности труда и низкой себестоимости проведения воздействия.

2. Большой интерес представляет комплексное освоение ресурсов, сосредоточенных в заполненных породных отвалах и илонакопителях углеобогачительных фабрик. В зависимости от температуры процесса теплового воздействия на твердое углеродсодержащее сырье и назначения получаемых продуктов различают следующие варианты:

– при температурах 450-550 °С достигается максимальный выход жидкой фазы и твердого остатка, а также минимальный выход газовой фазы с высокой теплотой сгорания;

– при температурах 600-800 °С наблюдается увеличение выхода газовой фазы с уменьшением ее теплоты сгорания и уменьшением выхода жидких продуктов и твердого остатка;

– при температурах 900-1100 °С выход жидких и твердых продуктов достигает минимума, а выход газовой фазы с невысокой теплотой сгорания максимален.

3. Существующая технология подземной газификации угольных пластов применима в тех случаях, когда процесс горения легко управляем и контролируем, а также будет отсутствовать существенное проседание земной поверхности без нарушения водоносных горизонтов с минимальным загрязнением грунтовых вод.

4. При тепловом воздействии в среде окислителя, в качестве которого можно использовать кислород, водяной пар, диоксид углерода, воздух или их смеси, органическая часть углеродсодержащего сырья непосредственно преобразуется в газовую фазу, которая, преимущественно, состоит из монооксида и диоксида углерода, водорода, метана, водяного пара и азота. Поэтому для получения газовой фазы с высоким содержанием горючих компонентов рекомендовано использовать тепловое воздействие на твердое углеродсодержащее сырье в бескислородной среде.

5. Использование каталитического эффекта в физико-химических превращениях угольного вещества связано с проблемой разработки простых и надежных методов введения катализатора в реакционную смесь и регенерации его для повторного использования. В качестве каталитически активных материалов возможно использование металлургических и котельных шлаков, ускоряющих реакции окисления, метанирования и конверсии угля. Так, при осуществлении процесса газификации в кипящем слое мартеновского шлака конверсия угля возрастает на 30 %. Применение циркулирующего слоя приводит к еще большему каталитическому эффекту, что позволяет сохранить высокую степень конверсии угля при увеличении скорости потока реакционной смеси в 2,3 раза и повысить производительность газогенератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ефремов, И.А. Комплексная дегазация угольных пластов и их спутников в шахтах / И.А. Еф-

ремов // Горноспасательное дело – 2012. – Вып. 49. – С. 36-45.

2. Бакаев, О.В. Методы и модели мониторинга геодинамических процессов в углепородном массиве угольных шахт / О.В. Бакаев. – Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2012. – № 6 (58). – С. 219-223.

3. Фізико-хімічна геотехнологія / М.М. Табаченко, О.Б. Владико, О.С. Хоменко, Д.В. Мальцев – Д.: Національний гірничий університет, 2012. – 310 с.

4. Динамические способы декольматации поверхностных скважин / К.К. Софийский, П.Е. Филимонов, Б.В. Бокий [и др.]. – Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2014. – 248 с.

5. Теория и практика закачивания скважин / А.И. Булатов, П.П. Макаренко, В.Ф. Будников [и др.]. – М.: Недра, 2002. – т. 5. – 373 с.

6. Никитин, О. Освоение скважин свабированием / О. Никитин // Нефтегазовый комплекс. – 2006. – №1 (32). – С. 25-28.

7. Оборудование для добычи нефти и газа: учебное пособие в 2-х частях / В.Н. Ивановский, В.И. Дарищев, А.А. Сабиров [и др.]. - М.: Нефть и газ, 2002. – Ч.1. – 768 с.

8. Каркашадзе, Г.Г. Технология секвестрирования углекислого газа в угольных пластах и извлечения метана / Г.Г. Каркашадзе, П.В. Ларионов // Нефть, газ и бизнес. – 2010. – № 11. – С. 69-73.

9. Пороховые генераторы давления, / А.В. Литвинов, В.В. Кодолов, Р.Р. Курбатов, А.В. Черкасов // Бурение и нефть. – 2008. – №2. – С. 37-43.

10. А.с. 1511435 SU, E 21 F 5/00. Способ дегазации угольного пласта / Н.В. Ножкин, С.В. Сластунов, В.М.Карпов и А.И. Буханцев. - №4306754/23-03; заявл. 18.09.87; опубл. 30.09.89, Бюл. №36. – 5 с.

11. Пучков, Л.А. Перспективы добычи метана в Печорском угольном бассейне / Л.А. Пучков, С.В. Сластунов, Б.И. Федунец // М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – 557 с.

12. А.с. 1548463 SU, E21 F 5/00. Способ дегазации угольного пласта/ Н.В. Ножкин, С.В. Сластунов, В.М. Карпов. – № 4263063/23-03; заявл. 08.04.87; опубл. 07.03.90, Бюл. № 9. – 3 с.

13. А.с. 1375839 SU, E 21 F 7/00. Способ дегазации угольного пласта / Н.В. Ножкин, С.В. Сластунов. - №4104735/22-03; заявл. 22.05.86; опубл. 23.02.88, Бюл. №7. – 3 с.

14. Пат. № 2159333 (13) RU, МПК E21F 7/00, E 21 B 43/295 (2000.11). Способ дегазации угольного пласта / Л.А. Пучков, С.В. Сластунов, Г.Н. Фейт; заявитель и патентообладатель: Московский государственный горный университет. – 2000111181/03; заявл. 05.05.2000; опубл. 20.11.2000.

15. Пат. № 2298650 (13) RU, МПК E21F 7/00, (2006.01). Способ гидравлической обработки угольного пласта / Л.А. Пучков, С.В. Сластунов, Г.Г. Каркашадзе, К.С. Коликов; патентообладатель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный горный университет». – 2005131268/03; заявл. 11.10.2005.

16. Анпилогов, Ю.Г. Развитие и совершенствование технологических схем заблаговременной дегазации и снижения выбросоопасности угольных пластов путем их гидрорасчленения на шахтах Донбасса / Ю.Г. Анпилогов, В.Н. Королева // ГИАБ. – 2004. – №8. – С. 232-236.

17. Ping, Guan. Mechanism of instantaneous coal outbursts / Ping Guan, Haoyue Wang, Youxue Zhang // Geology – 2009. – № 37 (10). – С. 915-918.

18. Пат № 68258 UA, МПК E 21 F 7/00, u201107332 Спосіб гідродинамічної дії на вугільні пласти, схильні до газодинамічних явищ / К.К. Софийский, В.В. Власенко, Д.М. Житльенок, В.І. Гаврилов, О.П. Петух, С.Г. Барадудлін, О.В. Московський заявл. 07.07.2011; опубл. 26.03.2012, Бюл. № 6.

19. Agaiev, R. Methane receiving from coal and technogenic deposits” / R.Agaiev, V.Vlasenko and E.Kliuev // Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining, CRC Press/Balkema: EN Leiden, The Netherlands, 2014. - pp. 113–119.

20. Способы интенсификации дегазации угольных пластов и предотвращения выбросов угля и газа: монография/ К.К. Софийский К.К., Д.М. Житленок, А.П.Петух [и др.]. - Донецк: ТОВ «Східний видавничий дім», 2014. – 460 с.

21. Крейнин, Е.В. Нетрадиционные термические технологии добычи трудноизвлекаемых топлив: уголь, углеводородное сырье / Е.В. Крейнин. – М.: МГГУ, 2004. – 300 с.

22. Основи хімії та фізики горючих копалин / В.І. Саранчук, М.О. Ільяшов, В.В. Ошовський, В.С. Білецький. – Донецьк: Східний видавничий дім, 2008. – 640 с.

23. Обґрунтування технологічних схем експериментального шахтного газогенератора / В.С. Фальштинський, Р.О. Дичковський, К. Станьчик [та ін.] / Науковий вісник НГУ, 2010. - № 3. – С. 34-38.

24. Younger, P. Hydrogeological and Geomechanical Aspects of Underground Coal Gasification and its Direct Coupling to Carbon Capture and Storage / P.Younger // Mine Water Environ, 2011. - no. 30. - P. 127-140.

25. Кузнецов, Б.Н. Новые подходы к химической переработке ископаемых углей / Б.Н. Кузнецов

// Соросовский образовательный журнал. – 1996. – № 6. – 50-57.

26. Брик, Д.В. Газифікація некондиційного вугілля Львівсько-Волинського басейну / Д.В. Брик, Ю.В. Стефанік // Углекислотный журнал. – 2010. – № 1-2. – С. 20-32.

27. Reactivity and structural change of coal char during steam gasification / Sekine Yasushi, Ishikawa Kiyohiro, Kikuchi Eiichi, Matsukata Masahiko, Aki-moto Akemitsu // *Fuel*, 2006. - Vol. 85, no. 2, pp. 122-126.

28. Zubek, K. The influence of catalytic additives on kinetics of coal gasification process” / Katarzyna Zubek, Grzegorz Czerski and Stanisław Porada, *Energy and fuels*, 2016. - No. 14,02012, pp. 1-10.

29. Кусумано, Д. Каталитические процессы переработки угля / Д. Кусумано, Р. Делла-Бетта, Р. Леви. – М.: Химия, 1984. - 288 с.

30. Орлова, В.М. Інтенсифікація процесу газифікації малометаморфізованого вугілля України з використанням металургійних шлаків: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.17.07 "Хімічна технологія палива і пально-мастильних матеріалів" / В.М. Орлова. – Харків, 2005. – 19 с.

REFERENCES

1. Yefremov, I.A. (2012) “Complex degassing of coal seams and their satellites in mines”, *Gornospasatelnoe delo*, no. 49, pp. 36-45.

2. Bakaev, O.V. (2012) “Methods and models for monitoring geodynamic processes in coal-bearing coal mine mass”, *Radioelektronni i kompiuterni systemy*, no. 6(58), pp.219-223.

3. Tabachenko, M.M., Vladyko, O.B., Homenko, O.Ye. and Maltsev, D.V. (2012), *Fiziko-khimichna geotekhnologiya* [Physical-and-chemical geotechnology], National mining university, Dnipropetrovsk, Ukraine.

4. Sofiyskiy, K.K., Filimonov, P.E., Bokiy, B.V. and Shvets, I.S. (2014), *Dinamicheskiye sposoby dekolmatatsii poverkhnostnykh skvazhyn* [Dynamic methods of surface boreholes decolmatation], TOV “Shidnyi vydavnychiy dim”, Donetsk, Ukraine.

5. Bulatov, A.I., Makarenko, P.P. and Budnikov, V.F. (2002), *Teoriya i praktika zakachivaniya skvazhyn* [Theory and practice of pumping boreholes], vol. 5, Nedra, Moscow, Russia.

6. Nikitin, O. (2006), “Boreholes development by swabbing”, *Neftegasoviy kompleks*, no. 1(32), pp. 25-28.

7. Ivanovskiy, V.N., Daryshchev, V.I. and Sabyrov A.A. (2002), *Oborudovaniye dlya dobychi nefty y gaza* [Equipment for oil and gas production], vol. 1, Neft i gaz, Moscow, Russia.

8. Karkashadze, G.G. and Larionov, P.V. (2010), “Technology of sequestration of carbon dioxide in coal seams and extraction of methane”, *Neft, gaz i biznes*, no. 11, pp. 69-73.

9. Litvinov, A.V., Kodolov, V.V., Kurbatov, P.P. and Cherkasov, A.V. (2008), “Powder pressure generators”, *Burenkiye i neft*, no. 2, pp. 37-43.

10. Nozhkin, N.V., Slastunov, S.V., Karpov, V.M. and Bukhantsev, A.I. (1989), *Sposob degazatsii ugolnogo plasta* [Method for degassing the coal seam], Copyright certificate of Soviet Union, SU, Pat.№ 1511435.

11. Puchkov, L.A., Slastunov, S.V. and Fedunets, B.I. (2004), *Perspektivy dobychi metana v Pechorskoy ugolnoy basseynе* [Prospects for methane extraction in the Pechora Coal Basin], Publishing house of Moscow State Mining University, Moscow, Russia.

12. Nozhkin, N.V., Slastunov, S.V. and Karpov, V.M. (1990), *Sposob degazatsii ugolnogo plasta* [Method for degassing the coal seam], Copyright certificate of Soviet Union, SU, Pat.№ 1548463.

13. Nozhkin, N.V. and Slastunov, S.V. (1988) *Sposob degazatsii ugolnogo plasta* [Method for degassing the coal seam], Copyright certificate of Soviet Union, SU, Pat.№ 4104735.

14. Puchkov, L.A., Slastunov, S.V. and Feyt, G.N., Moscow State Mining University (2000) *Sposob degazatsii ugolnogo plasta* [Method for degassing the coal seam], State Register of Patents of Russia, Moscow, RU, Pat. № 2159333.

15. Puchkov, L.A., Slastunov, S.V., Karkashadze, G.G. and Kolikov, K.S., Moscow State Mining University (2006), *Sposob gidravlicheskoj obrabotki ugolnogo plasta* [Method hydroprocessing coalbed] State Register of Patents of Russia, Moscow, RU, Pat. № 2298650.

16. Anpilogov, Y.G. and Koroleva, V.N.(2004), “Development and improvement of technological schemes for early degassing and reduction of the ejection hazard of coal seams by their hydrodynamics in the mines of Donbass”, *GIAB*, № 8, pp. 232-236.

17. Ping, Guan, Haoyue, Wang, Youxue, Zhang (2009), “Mechanism of instantaneous coal outbursts”, *Geology*, № 37 (10), pp. 915-918.

18. Sofiyskiy, K.K., Vlasenko, V.V., Zhytlnok, D.M., Havrylov, V.I., Petukh, O.P., Baradulin, Ye.H., Moskovskuy O.V., Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (2012), *Sposib hidrodinamichnoi dii na vugilni plasty, skhylni do gazodynamichnykh yavlyshch* [Method of hydrodynamic impact on coal beds, prone to gas-dynamic phenomena], State Register of

Patents Ukraine, Kiev, UA, Pat. № 68258.

19. Agaiev, R., Vlasenko, V. and Kliuev, E. (2014), "Methane receiving from coal and technogenic deposits", *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining, CRC Press/Balkema: EN Leiden, The Netherlands*, pp. 113–119.

20. Sofiysky, K.K., Filimonov, P.E. and Bokiy, B.V. (2014), *Dinamicheskie sposoby dekolmatatsii poverkhnostnykh skvazhin*, [Dynamic methods of surface wells decolmatization], «Oriental Publishing House», Doneck, Ukraine.

21. Kreynin, Ye.V. (2004), *Netraditsionnye termicheskiye technologii dobychy trudnoizvlekayemykh topliv: ugol, uglevodородное сырье* [Nontraditional thermal technologies of difficulty extracting fuels: coal, coal-hydrogen raw material], MGGU, Moscow, RU.

22. Saranchuk, V.I., Piyashov, M.O., Oshovskiy, V.V. and Biletskiy, V.S. (2008), *Osnovi khimiy ta fiziki goryuchikh kopalyn* [Fundamentals of Chemistry and Physics of Combustible Minerals], TOV "Shidnyi vydavnychiy dim", Donetsk, Ukraine.

23. Falshtinskiy, V.S., Dychkovskiy, R.O., Stanchik, K., Svyadrovskiy E. and Lozinskiy, V.G. (2010), "Justification of technological schemes of the experimental coal mine gas generator", *Naukoviy visnik National Mining University*, no. 3, pp. 34-38.

24. Younger, P. (2011), "Hydrogeological and Geomechanical Aspects of Underground Coal Gasification and its Direct Coupling to Carbon Capture and Storage", *Mine Water Environ*, no. 30, pp. 127-140.

25. Kuznrtsov, B.N. (1996), "New approaches to chemical processing of fossil coals", *Sorosovskiy obrazovatelnyi zhurnal* [Soros Educational Journal], no. 6, pp. 50-57.

26. Bryk D.V. and Stefanyk, Yu.V. (2010) "Gasification of low-grade coal of Lviv-Volyn basin", *Uglekhimicheskyy jurnal* [Coal-chemical Journal], no 1-2, pp. 20-32.

27. Sekine, Yasushi, Ishikawa, Kiyohiro, Kikuchi, Eiichi, Matsukata, Masahiko, Aki-moto, Akemitsu (2006), "Reactivity and structural change of coal char during steam gasification", *Fuel*, vol. 85, no. 2, pp. 122-126.

28. Katarzyna, Zubek, Grzegorz, Czernski and Stanisław, Porada (2016), "The influence of catalytic additives on kinetics of coal gasification process", *Energy and fuels*, no. 14.02012, pp. 1-10.

29. Kusumano, D., Della-Beta, R. and Levy, R. (1984), *Kataliticheskie protsessy pererabotki uglya* [Catalytic processes of coal processing], Khimiya, Moscow, USSR.

30. Orlova, V.M. (2005), "The intensification of low-grade coal gasification of Ukraine using steel slags", Abstract of Ph.D. dissertation, Chemical technology of fuel and fuel lubricants, Ukrainian State Research Institute for Carbochemistry, Kharkiv, Ukraine.

Об авторах

Агаев Руслан Агагулеви́ч, кандидат технических наук, старший научный сотрудник в отделе проблем технологий подземной разработки угольных месторождений, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальная академия наук Украины, Днепр, Украина, rru755@gmail.com.

Клюев Эдуард Сергееви́ч, кандидат технических наук, 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), Днепр, Украина, eduard.igtmanu@gmail.com.

Сапунова Ирина Александровна, кандидат технических наук, старший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальная академия наук Украины, Днепр, Украина, eduard.igtmanu@gmail.com.

About the authors

Agaiev Ruslan Agaguluevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher in Department of Underground Coal Mining, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, rru755@gmail.com.

Kliuev Eduard Sergeevich, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Junior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine, eduard.igtmanu@gmail.com.

Sapunova Iryna Aleksandrovna, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Senior Researcher, Senior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, Institute of Geotechnical Mechanics name by N. Polyakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepr, Ukraine

eduard.igtmanu@gmail.com.

Анотація. В статті представлено аналіз сучасних геотехнологічних способів видобутку метану з вугільних і техногенних родовищ. Особливу увагу приділено підземним і наземним способам комплексного освоєння ресурсів, що зосереджені в газонасиченому вуглепородному масиві, в заповнених породних відвалах і мулонакопичувачах вуглезбагачувальних фабрик. Геотехнологічні способи видобування метану переводять розробку родовищ на новий якісний рівень, який забезпечує взаємозв'язок між повним вилученням корисних копалин і підвищенням безпеки праці, поліпшенням екологічного, економічного та соціального стану гірничодобувного регіону.

В роботі описані фізико-механічні способи дії на газовугільний масив, які враховують постійні зміни напружено-деформованого стану присвердловинної зони, що сприяють інтенсифікації газовиділення. Також запропоновано варіанти фізико-хімічних способів теплової дії на тверду вуглецевмісну сировину, яка розглядається як бінарна суміш вугілля і породи, як в безкисневому середовищі, так із застосуванням окисників. У статті представлено результати досліджень каталітичних перетворень, що відбуваються в структурі вугільної речовини, які сприяють оптимізації складу газової фази, зниженню споживання окисників і збільшенню питомої продуктивності теплового процесу без підвищення температури. Запропоновано різноманітні варіанти застосування каталізаторів в процесах фізико-хімічних перетворень вугілля. Проведені дослідження дозволили проаналізувати існуючі способи дії на гірниче середовище, виділити їх переваги та недоліки і виявити найбільш перспективні напрямки розробки нових способів у сфері геотехнологічних процесів видобутку метану з вугільних і техногенних родовищ.

Ключові слова: фізична дія, тепла дія, газовугільний масив, вуглецевмісні матеріали, геотехнологія, метан.

Annotation. The article presents analysis of modern geotechnological methods of methane extraction from coal and technogeneous deposits. Special attention is focused on underground and surface methods of complex development of resource, which are concentrated in the gas-saturated coal-rock mass, in filled rock dumps and sludge accumulators of coal-processing factories. Geotechnological methods of methane extraction convert deposit development to a new quality level, which provides interconnection between full extraction of mineral resources, improvement of labor safety and environmental, economic and social conditions in the mining regions.

The work describes physical and mechanical methods of gas-coal mass development, which take into account constant changes of stress-strain state in zone near the borehole, contributing to the intensified gas escaping. Further, several variants of physical and chemical methods are proposed for thermal treatment of solid carbon-containing raw materials, which are considered as a binary mixture of coal and rock, in oxygen-free medium and with the use of oxidants. The article presents results of researches of catalytic transformations occurred in the coal structure; the findings help to optimize composition of the gas phase, decrease oxidant consumption and increase specific productivity of thermal process without increasing the temperature. Various ways of use of catalysts in the processes of physical and chemical transformations of coal are also proposed.

The conducted researches allows to analyze existing methods of impact on the mine medium, specify their advantages and disadvantages and identify the most promising directions for development of new methods in the field of geotechnological processes of methane extraction from coal and technogeneous deposits.

Keywords: physical impact, thermal impact, gas-coal mass, carbon-containing materials, geotechnology, methane.

Стаття поступила в редакцію 05.10.2017

Рекомендовано к публикации д-ром технических наук Софийским К.К.