

УДК 622.277.3; 622.278

Б.А. Анферов, Л.В. Кузнецова

ПОДЗЕМНАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ УГЛЯ – ПЕРСПЕКТИВНОЕ НАПРАВЛЕНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ КУЗБАССА

Комплексное освоение месторождения полезных ископаемых включает не только наиболее полное извлечение из недр основного полезного ископаемого, например, угля при разработке угольного месторождения, но и сопутствующих, обладающих, зачастую, более ценными потребительскими свойствами. В Кузбассе угольные пласты мощностью до 2 м, особенно залегающие в сложных горно-геологических условиях (нарушность вмещающих пород, невыдержанность пласта по мощности, гипсометрии, по углу залегания и т.п.) отнесены к некондиционным запасам и традиционными средствами механизации и технологиями не разрабатываются. Отработка таких запасов способом подземной газификации углей (ПГУ) может позволить получить не только горючий газ, но и ценные химические элементы-примеси, которые содержатся в ископаемом угле [1].

В Институте угля СО РАН проведена предварительная оценка запасов угля Терсинского геолого-экономического района (ГЭР) Кузбасса на пригодность к отработке способом ПГУ на основе данных геологоразведочных работ, проведенных в 1969 и 1976 гг., [2]. Анализ горно-геологических условий залегания угольных пластов позволил выявить 16 пластов на участках Увалььных 5-6, 7-8 и 9-10 для отработки способом ПГУ, непригодных для эффективной отработки существующими тра-

диционными технологиями, (табл. 1). Запасы и ресурсы угля этих участков по отраслевому балансу 1996 г. (до настоящего времени данные не пересматривались) отнесены к категориям С₂ и Р₁ и составляют, соответственно, 995,1 и 852,9 млн.т.

При подземной газификации угля температура газообразных продуктов на выходе из газоотводящей скважины составляет 600-700 °С. Это означает, что из этих пластов может быть получен не только генераторный газ и тепловая энергия, но и ценные или токсичные элементы, переходящие в газообразное состояние при таких температурах. Это, прежде всего, рений (Re), который уже при температурах выше 300°С окисляется (а при температурах выше 600°С интенсивность окисления резко повышается), переходя в летучее состояние в виде окислов (например, Re₂O₇); мышьяк (As), который сублимирует при температурах до 600°С и в дымовых газах ПГУ будет находиться в виде оксида мышьяка (As₂O₃); ртуть (Hg), которая кипит при температуре 356,58°С и в газообразных продуктах ПГУ будет находиться в виде паров; селен (Se), который кипит при температуре 685°С и в дымовых газах будет находиться в виде паров, и платина (Pt), которая реагирует с газообразным фтором с образованием гексафторида платины (PtF₆), который кипит при температуре 68°С, и таким образом переходит в газообразное состояние.

Таблица 1. Угольные пласты, пригодные для отработки способом ПГУ [2]

Пласт	Участки Увалььные 5-6			Участки Увалььные 7-8			Участки Увалььные 9-10		
	Мощ- ность, м	Золь- ность, %	Марка	Мощ- ность, м	Золь- ность, %	Марка	Мощ- ность, м	Золь- ность, %	Марка
49	-	-	-	-	-	-	0,75-1,50	27,8	Ж
49a	-	-	-	-	-	-	0,71-1,97	21,0	Ж
51	0,94-1,85	8,8	Ж	0,90-1,65	11,2	Ж	0,70-1,78	29,2	Ж
62	0,83-1,88	10,7	ГЖ	0,88-2,63	9,9	ГЖ	-	-	-
64	-	-	-	-	-	-	0,70-1,73	25,4	ГЖ
66	-	-	-	1,74-2,08	7,4	Г, ГЖ	1,25-4,84	16,9	Г
67	-	-	-	1,76-3,31	6,8	Г	-	-	-
68	0,49-1,81	11,1	ГЖ	0,90-1,49	7,8	Г	-	-	-
70	0,82-1,45	12,8	Г	0,97-2,65	9,4	Г	-	-	-
73	-	-	-	1,03-2,22	8,2	Г	1,28-2,35	18,8	Г
74	0,74-2,04	8,0	Г	0,94-1,47	9,9	Г	0,85-1,84	18,8	Г
76	0,98-1,37	8,1	Г	0,92-2,02	9,1	Г	-	-	-
78	1,55-2,10	8,1	Г	1,51-3,38	8,9	Г	1,28-2,22	14,0	Г
79a	-	10,0	-	-	-	-	0,97-2,33	14,7	Г
90	1,38-1,77	7,7	Г	1,37-1,77	7,0	Г	-	-	-
91	1,43-2,08	-	Г	1,24-1,51	7,2	Г	-	-	-

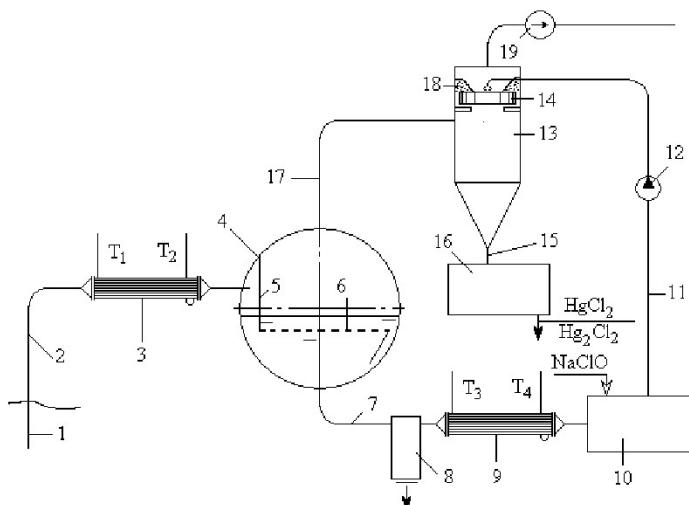


Рис. 1. Технологическая схема попутного извлечения ртути при ПГУ
 1 – газоотводящая скважина ПГУ; 2, 7, 11, 17 – трубопровод; 3, 9 – теплообменный аппарат; 4 – горизонтальная цилиндрическая емкость; 5 – глухой щит; 6 – погружной перфорированный щит; 8, 16 – осадитель; 10 – растворный узел; 12 – насос; 13 – эмульгатор; 14 – тарелка; 15 – патрубок; 18 – пеноное кольцо; 19 – дымосос

Эти ценные (Re, Se, Pt) и токсичные (As, Hg) элементы при подземной газификации углей будут находиться в состоянии паров, в виде летучих соединений, а также в составе пыли и аэрозолей твердых частиц. Авторами разработан ряд технических решений по извлечению ценных и токсичных элементов из газов ПГУ [3-8].

Ртуть. Газообразная ртуть в составе дымовых газов ПГУ, при поступлении в водное пространство горизонтальной цилиндрической емкости конденсируется и в виде жидкой ртути оседает на перфорированный щит (рис. 1) [3]. За счет наклона перфорированного щита в сторону противоположную стороне ввода продуктов газификации в емкость и поступления газовых пузырьков из-под щита капельки ртути скатываются по перфорированному щиту к противоположной стенке цилиндрической емкости и попадают в зазор между этим щитом и стенкой емкости. За счет сил гравитации тяжелые капли ртути устремляются к нижней точке водного пространства горизонтальной цилиндрической емкости. Из цилиндрической емкости ртуть с водой поступает в осадитель; за счет резкого падения скорости движения потока, ртуть оседает на его дно и может быть удалена из циркуляционного контура с небольшим количеством воды.

Очищенную от металлической ртути воду направляют в теплообменный аппарат системы теплоснабжения и далее в растворный узел, где к ней подмешивают гипохлорид натрия ($NaClO$).

Частично очищенные от ртути и охлажденные газообразные продукты из газового пространства горизонтальной емкости поступают в эмульгатор, в котором закручиваются, устремляются вверх к тарелке с лопаточным аппаратом и раскручиваются. Сверху на тарелку подают раствор гипохлорита натрия. Под действием центробежной силы раствор растекается по тарелке и попадает в зазор между стенкой цилиндрической части эмульгатора и тарелкой, где взбивается в пенное кольцо, перекрывая свободный проход газа через лопаточный аппарат. С этого момента пары ртути в

составе газообразных продуктов, проходя через лопаточный аппарат, вступают в контакт с пенным кольцом, взаимодействуют с гипохлоритом натрия с образованием твердых солей $HgCl_2$ и Hg_2Cl_2 , которые стекают вместе с водой по внутренней стенке эмульгатора и далее поступают в осадитель. В осадителе твердые соли $HgCl_2$ и Hg_2Cl_2 отделяются от воды и направляются на рециклинг, а воду, после дополнительного охлаждения, возвращают в горизонтальную емкость.

Мышьяк. В горизонтальной цилиндрической емкости (рис. 2) глухим щитом газообразные продукты направляются в водное пространство – под погружной перфорированный щит, где они охлаждаются до температуры значительно ниже температуры конденсации паров мышьяка [4]. Газообразный мышьяк и его соединения, содержащиеся в продуктах ПГУ, конденсируются и растворяются в воде.

Далее водный раствор мышьяка и его соединений поступает в испаритель, в котором, за счет снижения давления до атмосферного происходит кипение водного раствора. При этом за счет испарения воды концентрация соединений мышьяка в водном объеме испарителя непрерывно повышается. Для поддержания кипения водного раствора в испарителе включают электронагревательные элементы. За счет повышенной температуры поверхности нагревательного элемента на его стенке кристаллизуются мышьяк и его соединения. По мере увеличения слоя кристаллов мышьяка и его соединений на нагревательных элементах, последние меняют на чистые по очереди, тем самым выводя мышьяк и его соединения из циркуляционного контура.

Очищенные от мышьяка и его соединений и охлажденные продукты ПГУ из газового пространства горизонтальной цилиндрической емкости направляют для использования в качестве топлива или сырья химического производства.

Рений. Газообразные окислы рения в составе продуктов ПГУ (рис. 3) направляют в водное про-

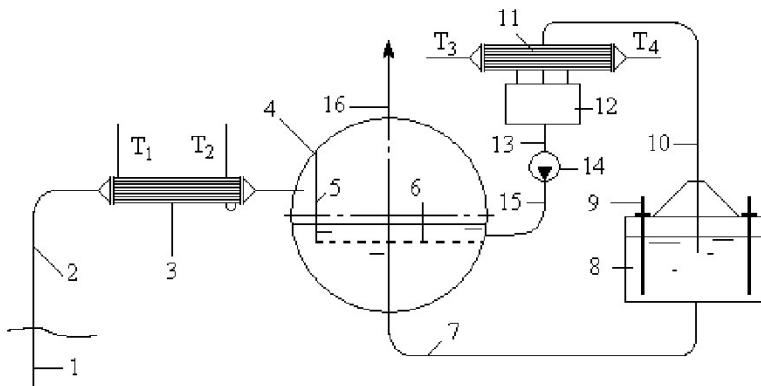


Рис. 2. Технологическая схема попутного извлечения мышьяка при ПГУ

1 – газоотводящая скважина ПГУ; 2, 7, 10, 13, 15, 16 – трубопровод; 3 – теплообменный аппарат; 4 – цилиндрическая емкость; 5 – глухой щит; 6 – погружной перфорированный щит; 8 – испаритель; 9 – нагревательный элемент; 11 – конденсатор; 12 – конденсатный бак; 14 – насос

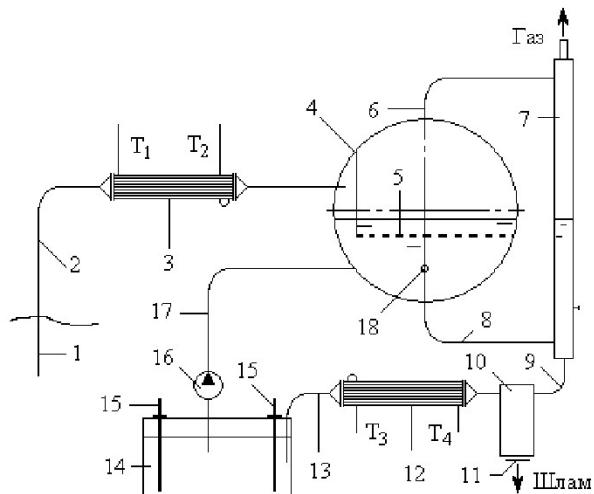


Рис. 3. Технологическая схема попутного извлечения рения при ПГУ

1 – газоотводящая скважина ПГУ; 2, 6, 8, 9, 13, 17 – трубопровод; 3, 12 – теплообменные аппараты; 4 – цилиндрическая емкость; 5 – перфорированный щит; 7 – выносной циклон; 10 – осадитель; 11 – съемное донышко; 14 – электролизная ванна; 15 – электрод; 16 – насос; 18 – патрубок

странство горизонтальной цилиндрической емкости под перфорированный щит на промывку [5]. За счет наличия большого количества отверстий малого диаметра перфорированный щит распределяет газовый объем по всей своей площади и пропускает его к поверхности воды маленькими пузырьками, увеличивая тем самым площадь контакта газа с водой.

Пройдя к поверхности через слой воды над перфорированным щитом, газ охлаждается до температуры значительно ниже температуры конденсации окислов рения. При промывке газа в воде остаются механические примеси и растворяются окислы рения, образуя ренийсодержащий раствор. Пройдя к поверхности воды, газ образует кипящий слой, выделяющий в газовое пространство цилиндрической емкости некоторое количество водяного пара, который способствует растворению в нем оксидов рения, не растворившихся в воде. Влажный газ поступает в выносной циклон, где происходит его осушение. Осущеный газ направляют потребителю.

Ренийсодержащий раствор из цилиндрической емкости по трубопроводу также поступает в выносной циклон, но в его водное пространство, где смешивается с аналогичным раствором, полученным при сепарации влажного газа. Далее ренийсодержащий раствор по трубопроводу поступает в осадитель, где из потока выделяются механические примеси, оседая на его дне. Очищенный ренийсодержащий раствор поступает в теплообмен-

ный аппарат, включенный в систему, например, горячего водоснабжения Т3-Т4, где охлаждается до температуры ниже температуры кипения при атмосферном давлении.

После теплообменника охлажденный ренийсодержащий раствор направляют в электролизную ванну с электродами для извлечения рения. Отработанную технологическую воду из электролизной ванны насосом подают в водное пространство цилиндрической емкости.

При многократном прохождении ренийсодержащего раствора по циркуляционному контуру «электролизная ванна – емкость – циклон – осадитель» концентрация соединений рения в нем непрерывно растет и в какой-то момент времени становится достаточной для выделения рения методом электролиза. Для этого к электродам электролизной ванны подводят электрический ток, за счет чего на одном из электродов происходит отложение рения.

Селен. Продукты подземной газификации, содержащие пары селена, направляют во внутреннее пространство циклона тангенциально – газовый поток закручивается, прижимаясь к стенке циклона (рис. 4) [6].

Шнековым питателем из бункера в пространство между циклоном и вращающимся конусом равномерно подают хладагент, например, дробленый лед (H_2O), сухой лед (CO_2) или их смесь, который за счет вращения конуса равномерно распределяется по площади наружной поверхности

циклона. За счет низкой температуры сухого льда стенка циклона сильно охлаждается. В связи с этим газовый поток, вращающийся во внутреннем пространстве циклона, также охлаждается до температуры ниже температуры конденсации селена и его окислов. Селен и его окислы из газообразной формы перейдут в аморфные (порошкообразная, коллоидная, стекловидная) формы селена. Вместе с селеном на стенке циклона будет происходить конденсация водяных паров; часть селена и его окислов растворится в воде с образованием селенистой кислоты. Селен и селенистая кислота за счет гравитации начнут стекать по стенке циклона в воронку в нижней части циклона и через ее патрубок могут быть выведены из циклона. Далее из селенистой кислоты выделяют селен. Очищенный от селена и его окислов и охлажденный газовый поток дымососом вытягивается из внутреннего пространства циклона и направляется для использо-

ром с образованием гексафторида платины (PtF_6), который кипит при температуре 68°C, и таким образом переходит в газообразное состояние.

Продукты подземной газификации после теплообменного аппарата (T1-T2) с температурой не ниже температуры конденсации гексафторида платины направляют во внутреннее пространство гидроциклона, где газовый поток закручивается, прижимаясь к стенке циклона, в который также подводят воду с пониженной температурой (рис. 5) [7]. Поскольку PtF_6 – это кристаллическое вещество, обладающее высокой гигроскопичностью и растворимостью, гексафторид платины растворяется в воде. Образование слабого раствора плавиковой кислоты (HF) и оксидов платины, с большей плотностью, чем раствор плавиковой кислоты, обусловливает выпадение оксидов платины в осадок. Из гидроциклона жидккая составляющая в виде пульпы поступает в осадительную

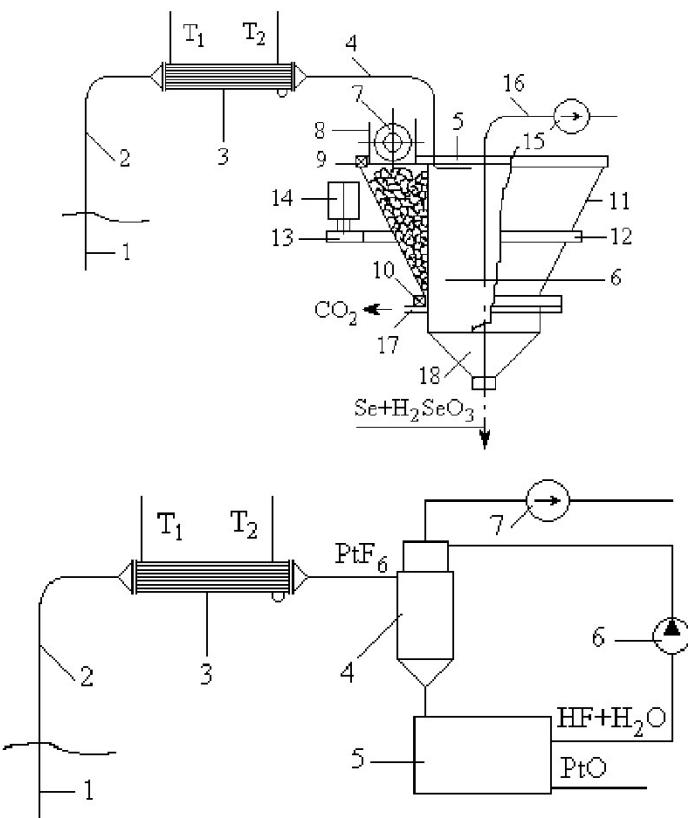


Рис. 4. Технологическая схема по-путного извлечения селена при ПГУ
1 – газоотводящая скважина; 2, 4, 16 – трубопровод; 3 – теплообменный аппарат; 5 – крышка; 6 – циклон; 7 – шинековый питатель; 8 – бункер; 9, 10 – подшипники; 11 – вращающийся конус; 12 – зубчатое колесо; 13 – редуктор; 14 – привод; 15 – дымосос; 17 – патрубок; 18 – воронка с патрубком

Рис. 5. Технологическая схема по-путного извлечения платины при ПГУ
1 – газоотводящая скважина; 2 – трубопровод; 3 – теплообменный аппарат; 4 – гидроциклон; 5 – осадитель; 6 – насос; 7 – дымосос

зования в качестве топлива или сырья химического производства.

Сухой лед в пространстве между циклоном и вращающимся конусом от контакта со стенкой циклона испаряется и в виде газа выводится для повторного использования – сжижения и прессования до образования сухого льда.

Платина. В составе угольного вещества всегда присутствует некоторое количество фтора в виде его соединений, например, с кальцием (CaF_2), которые при нагревании распадаются. При температурах подземной газификации угля металлическая платина реагирует с газообразным фто-

камеру, где расслаивается и может быть разделена на слабый водный раствор плавиковой кислоты и оксиды платины – сырье для восстановления платины.

Водный раствор плавиковой кислоты повторно направляют в гидроциклон насосом и т.д. до тех пор, пока ее концентрация не достигнет промышленного значения. В этом случае полученную плавиковую кислоту реализуют как товар, циркуляционный контур переводят на резервную осадительную емкость и новый объем циркулирующей в системе воды.

Однако количества фтора, входящего в состав угольного вещества, зачастую, недостаточно для перевода всей платины в подвижное состояние. Для более полного извлечения платины необходимо доставить к очагу образования газообразных продуктов подземной газификации угля избыточное количество минерала, содержащего фтор, например, флюорит, для обеспечения перевода всей платины, входящей в состав угольного вещества пласта, в соединения с фтором, переходящие в газообразное состояние при температурах подземной газификации угля.

На участке, намеченном для осуществления подземной газификации угля, осуществляют направленное бурение дутьевой скважины с поверхности до пласта и далее по пласту до границы участка. Затем от границы участка в обратном порядке осуществляют гидродинамическое воздействие на пласт методом гидроразрыва с образованием вокруг пластового участка дутьевой скважины зоны искусственных полостей и трещин. На границе участка осуществляют бурение с поверхности газоотводящей скважины, которой сбивают пластовый участок дутьевой скважины с дневной поверхностью. В пространстве между дутьевой и газоотводящей скважинами, с поверхности, на равном расстоянии друг от друга, бурят питающие скважины в зону искусственных полостей и трещин. В питающих скважинах устанавливают датчики температуры газов в зоне искусственных полостей и трещин.

В пластовой части дутьевой скважины до первой по ходу очага горения питающей скважины

осуществляют огневое воздействие на пласт – создают очаг горения, который затем перемещают в направлении газоотводящей скважины путем подачи дутьевого воздуха с избыточным давлением по дутьевой скважине и отвода газообразных продуктов подземной газификации угля посредством создания разрежения в газоотводящей скважине. Положение очага горения на траектории его перемещения контролируют измерением температуры газов в питающих скважинах.

После розжига газогенератора (очага горения) по дутьевой скважине начинают подавать флюоритовую пыль (CaF_2), которая дутьевым воздухом под избыточным давлением доставляется не только в очаг горения, но и дальше – в зону искусственных полостей и трещин. Здесь, из-за наличия большой площади поверхности, флюоритовая пыль оседает и под действием высокой температуры от близкого очага горения CaF_2 взаимодействует с платиной, входящей в состав угольного вещества данного пласта, образуя гексафторид платины PtF_6 , испаряющийся при температуре выше 68 °C. Так как температура газообразных продуктов подземной газификации угля значительно выше, то гексафторид платины, двигаясь с продуктами газификации, выводится на дневную поверхность.

При подходе очага горения к первой по ходу очага горения питающей скважине (это определяют по достижении максимальной температуры газов в указанной скважине), подачу флюоритовой пыли осуществляют по этой скважине, прекратив ее подачу по дутьевой скважине и т.д.

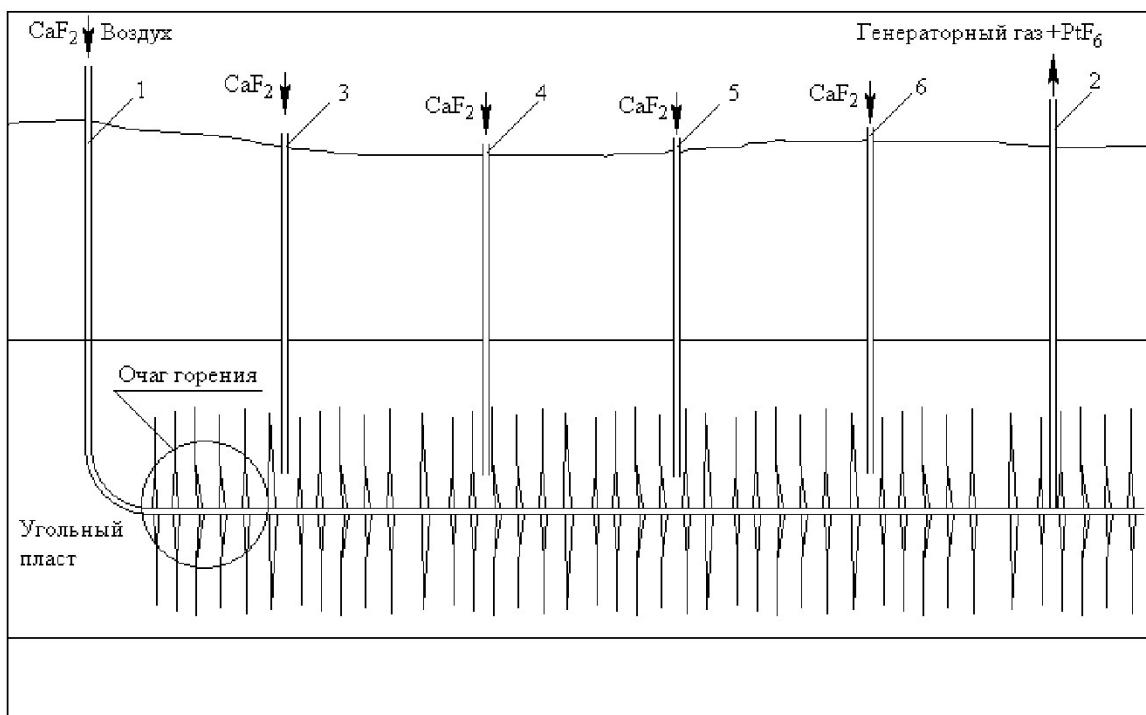


Рис. 6. Технологическая схема организации подземной газификации угля с гарантированным избытком флюорита: 1 – скважина дутьевая; 2 – скважина газоотводящая; 3, 4, 5, 6 – скважина питающая

Продукты подземной газификации угля, выданные на дневную поверхность по газоотводящей скважине, направляют в гидроциклон, в котором их сепарируют, растворяя соединения платины в воде. Далее раствор, содержащий соединения платины, направляют на извлечение самой платины.

Поскольку фтор - очень активный химический элемент, взаимодействующий не только с платиной, но и другими химическими элементами, фториды которых также испаряются при температурах протекания процессов подземной газификации, то на выходе из гидроциклона будет получен раствор полиметаллической руды.

Представленные технические решения позволяют комплексно освоить угольное месторождение: вовлечь в отработку некондиционные для традиционных физико-технических технологий запасы углей, получить ценное топливо – генераторный газ и сырье для извлечения ценных элементов. Кроме того, извлечение токсичных элементов,

например ртути и мышьяка, позволит снизить вредное воздействие на природную среду.

Угольные пласты участков Увальных 5-6, 7-8, 9-10 Терсинского ГЭР Кузбасса потенциально перспективны для отработки способом ПГУ по обеспеченности запасами, мощности, марочному составу, зольности, глубине залегания, величинам водопритоков в зону горения пластов, проникаемости горных пород [2]. Участки могут быть освоены с минимальной экологической нагрузкой для территории ГЭР, так как находятся вне охранной буферной зоны Государственного заповедника «Кузнецкий Алатау». Предприятия ПГУ должны быть удалены на безопасное расстояние от месторождения минеральных вод типа «Боржоми» в долинах рек Макариха и Верхняя Терсь, представляющего практический интерес для создания бальнеологического комплекса, которое находится на севере участков Увальных 5-6.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ по научному проекту № 13-05-98030.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Угольная база России. Угольные бассейны и месторождения Западной Сибири (Кузнецкий, Горловский, Западно-Сибирский бассейны; месторождения Алтайского края и Республики Алтай). – Т. II. – М. – ЗАО «Геоинформцентр», 2003. – 604 с.
2. Обоснование целесообразности освоения нового угленосного района Кузбасса (Терсинского): отчет о НИР (заключ.) / Институт угля и углехимии Сибирского отделения РАН; рук. темы В. А. Федорин, исп. С. Н. Лазаренко. – Кемерово, 2005. – 150 с. – № ГР 0120.0 412567.
3. Пат. 2392431 Российской Федерации, МПК E21C 41/18, E21B 43/295. Способ комплексного освоения угольного месторождения / Анферов Б. А., Кузнецова Л.В.; заявитель патентообладатель ИУ СО РАН. № 2009106545; заявл. 24.02.2009; опубл. 20.06.2010, бюл. № 17. 6 с.
4. Пат. 2392432 Российской Федерации, МПК E21C 41/18, E21B 43/295. Способ комплексного освоения угольного месторождения / Анферов Б. А., Кузнецова Л.В.; заявитель патентообладатель ИУ СО РАН. № 2009106360; заявл. 24.02.2009; опубл. 20.06.2010, бюл. № 17. 5 с.
5. Пат. 2391508 Российской Федерации, МПК E21C 41/18. Способ комплексного освоения угольного месторождения / Анферов Б. А., Кузнецова Л.В.; заявитель патентообладатель ИУ СО РАН. № 2009108240; заявл. 06.03.2009; опубл. 10.06.2010, бюл. № 16. 5 с.
6. Пат. 2390634 Российской Федерации, МПК E21C 41/18. Способ комплексного освоения угольного месторождения / Анферов Б. А., Кузнецова Л.В.; заявитель патентообладатель ИУ СО РАН. № 2009107503; заявл. 02.03.2009; опубл. 27.05.2010, бюл. № 15. 5 с.
7. Пат. 2448250 Российской Федерации, МПК E21C 41/18, C22B 11/00. Способ комплексного освоения месторождения энергетических углей / Ницантов Б. Ф., Анферов Б. А., Кузнецова Л. В.; заявитель патентообладатель ИУ СО РАН. № 2010141233; заявл. 07.10.2010; опубл. 20.04.2012, бюл. № 11. 7 с.
8. Анферов Б. А., Кузнецова Л. В. Способ комплексного освоения угольного месторождения: заявка № 2013123303 от 12.05.2013 на выдачу патента Российской Федерации на изобретение [Электронный ресурс] / Федеральный институт промышленной собственности. – Режим доступа: <http://www.fips.ru>. – Дата доступа 23.07.2013.

□Авторы статьи

Анферов Борис Алексеевич, канд. техн. наук, вед. науч. сотр. ИУ СО РАН, доц. каф. теплоэнергетики Института энергетики КузГТУ. Телефон: 8-906-989-5508	Кузнецова Людмила Васильевна, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Ин- ститута угля СО РАН. Тел.: 8(384-2) 741-741
---	---