

УДК 622.411.322.004:831.325

**Воробьев Е.А., к.т.н.¹, Демченко В.Б., к.т.н.², Петух А.П., к.т.н.²,
Софийский К.К., д.т.н.²**

**1 — АДИ ДонНТУ, г. Горловка; 2 — ИГТМ им. Н.С. Полякова НАНУ,
г. Днепропетровск**

КОМПЛЕКСНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ БАКТЕРИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ВЫБРОСОВ ШАХТНОГО МЕТАНА В АТМОСФЕРУ

Приведено обоснование экономической целесообразности использования шахтного метана для производства кормового белка. Выращенные бактерии эффективно применены для дегазации выработанных пространств шахт и местных скоплений метана. Комплексное применение бактерий позволяет полнее использовать природные ресурсы и снизить выбросы шахтного метана в атмосферу.

Введение

Одной из важнейших проблем при охране окружающей среды является защита воздушного бассейна от загрязнений. Следовательно, развитие новых технологических процессов должно быть сбалансировано с разработкой технологии, предотвращающей выбросы в атмосферу либо ограничивающей их до допустимых уровней.

Расходы на защиту атмосферы неуклонно возрастают, что выдвигает на первый план требование максимальной эффективности и экономичности внедряемых технологий. От успеха решения этой двуединой задачи в конечном счете зависят перспективы экономического развития не только отдельных регионов, но и целых государств.

В промышленно развитых регионах Украины имеет место мощное негативное влияние предприятий на окружающую среду. В частности, в Донецкой области большинство угольных шахт для обеспечения безопасности горных работ вынуждены применять дегазацию. Однако, вследствие ряда причин низкая и нестабильная концентрация метана в извлекаемой (капотируемой) газовой смеси не позволяет использовать шахтный метан в народном хозяйстве. Поэтому в Украине из ежегодно капотируемых на земную поверхность до 800 млн. м³ метана, используется в народном хозяйстве менее 20 %.

Актуальность вопроса

К настоящему времени угледобывающими государствами мира накоплен богатый опыт использования метана, капотируемого угольными шахтами. Его используют в качестве топлива в паровых котлах, в металлургическом производстве, в качестве сырья в химической промышленности, топлива для двигателей внутреннего сгорания, в коммунально-бытовом хозяйстве, для производства электроэнергии и кафеля [1, 2, 3, 4].

В последние годы в Украине наблюдается повышенное внимание к проблеме использования шахтного метана. Однако в целом приходится констатировать, что шахтный метан используют в неоправданно малых количествах. Поэтому актуальной является разработка новых технологий утилизации шахтного метана. При этом необходимо комплексное решение проблем: 1) охраны окружающей среды от шахтных выбросов; 2) максимального извлечения и использования угля и шахтного газа; 3) обеспечение безопасных условий труда.

Цель статьи

Целью статьи является рассмотрение вопроса использования шахтного метана, как отхода угледобычи, для производства кормового белка для нужд сельского хозяйства и применения бактерий для дегазации угольных шахт.

Основной раздел

Одной из перспективных областей использования шахтного метана может стать его применение в биотехнологических процессах в качестве углеродного сырья для получения биомассы метанооксиляющих бактерий. Известно, что интенсификация животноводства требует резкого увеличения производства кормового белка, поскольку сельское хозяйство нуждается в дополнительных источниках белка, компенсирующих его недостаток в традиционных растительных кормах.

Основным путем снижения и ликвидации дефицита белка является производство биомассы с помощью микробного синтеза, имеющего следующие преимущества перед другими источниками белковых веществ: микроорганизмы обладают высокой скоростью накопления биомассы, микробные клетки способны накапливать очень большое количество белка, сам процесс биосинтеза менее трудоемок по сравнению с получением сельскохозяйственной продукции и органическим синтезом белков.

В качестве продуцентов на метане используются метанооксиляющие бактерии. В составе питательной среды для культивирования бактерий необходимо наличие источников азота, фосфора, калия, микроэлементов и других ростовых факторов.

Получаемая из метана кормовая бактериальная биомасса (гаприн) имеет следующий состав (% по массе): протеин – до 75; липиды – до 5; зола – до 10; нуклеиновые кислоты – до 10. Полученный таким образом кормовой белок по своей питательной ценности и сбалансированности по аминокислотному составу сравнивают с рыбной мукой или соевым шротом.

В большинстве развитых стран основным источником дополнительного белка для кормопроизводства служат соевые бобы или шрот, аминокислотный состав которых принят за стандарт с точки зрения его оптимальности для сельскохозяйственных животных. (Для справки: цена 1 т соевого шрота, содержащего 47 % протеина, равна 1900 грн, цена 1 т костной муки, содержащей 65 % протеина, – 4100 грн в ценах 2001 г.)

До 1997 года в СНГ осуществлялось промышленное производство белка одноклеточных микроорганизмов. Единственным крупнейшим производителем белково-витаминного концентрата (БВК) из природного газа в бывшем СССР был Светлоярский завод (г. Светлый Яр Волгоградской области), выпускавший до 200 тыс. т сухого белка в год для реализации во всех республиках. Биомасса бактерий, выращенных на метане и метаноле, кроме белка, полноценного по своему аминокислотному составу, содержит целый ряд биологически активных веществ типа витаминов, кофакторов и т.п., что определяет его высокую кормовую ценность. Микробный белок включает все необходимые аминокислоты, а по содержанию большинства незаменимых аминокислот практически не уступает или даже превосходит стандарт.

При всестороннем исследовании микробной биомассы была выявлена ее чрезвычайно высокая технологическая и экономическая эффективность для мясного и молочного животноводства, птицеводства и целого ряда других направлений народного хозяйства. Кормовой белок содержит в 5 раз больше белка, чем ячмень или овес. Кроме того, в нем имеются практически все витамины группы В и целый ряд ростовых факторов. В результате этого 1 т кормовых дрожжей, добавленных в корма сельскохозяйственных животных, обеспечивает экономию до 7 т зерна и эквивалентна дополнительному производству 0,8 т свинины, 0,5 т мяса птицы или до 15 тыс. яиц. Включение 1 т БВК в рацион телят и поросят высвобождает для питания населения 6 т цельного или 1,5 т сухого обезжиренного молока.

В Украине нет заводов, производящих БВК на газе метане (гаприн). В то же время наблюдается острый дефицит БВК, цена 1 тонны которого в пересчете на сырой протеин составляет около \$680.

Выполненное нами экспериментальное производство метанооксиляющих бактерий на шахтном метане показало техническую возможность его использования, как отхода угледобычи, для производства БВК (рис. 1).

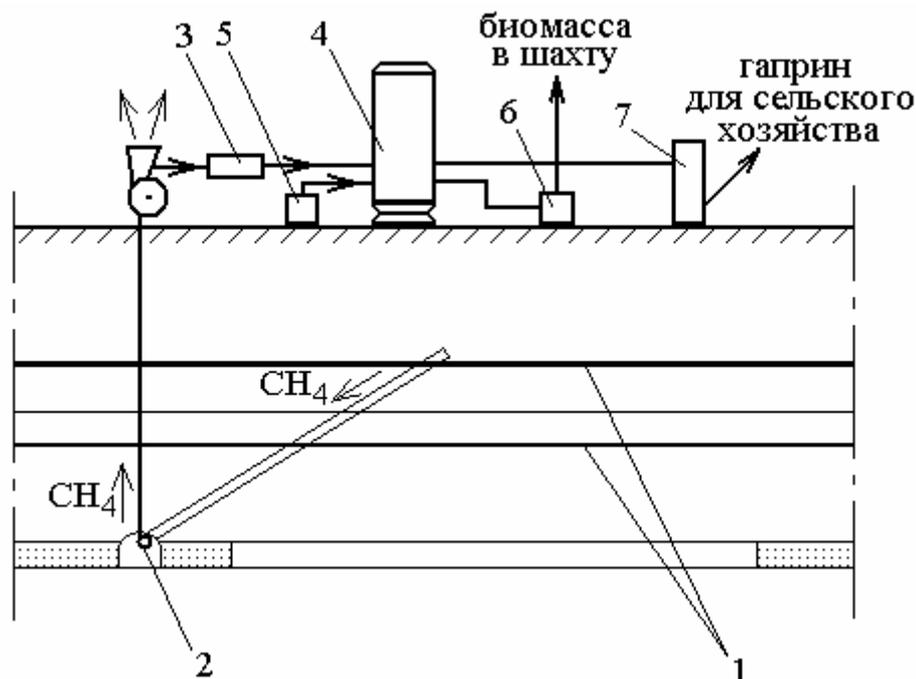


Рис.1. Технологическая схема извлечения и использования шахтного метана:
 1 – угольные пласты; 2 – дегазационная система шахты; 3 – узел подготовки метано-воздушной смеси; 4 – ферментер; 5 – узел подготовки питательной среды; 6 – пункт приготовления суспензии; 7 – пункт обезвоживания и сушки суспензии

Помимо кормовых качеств, метанооксилюющие бактерии являются эффективным средством борьбы с метаном в угольных шахтах, что будет показано ниже. Для выполнения дегазационных работ биомассу доставляли с заводов БВК (Волгоградская область и Кабардино-Балкария). Транспортирование биомассы на тысячи километров, естественно, снижало ее метаноокислительную активность. Поэтому Институтом геотехнической механики и Институтом микробиологии и вирусологии НАН Украины были выполнены комплексные работы по использованию шахтного метана для получения биомассы метанотрофных бактерий из шахтного метана.

Экспериментальная установка для культивирования метанооксилюющих бактерий на шахтном метане впервые была испытана в условиях шахты «Ясиновская-Глубокая». Полученная биомасса применялась для дегазации шахты [5]. В настоящее время ферментационная установка построена и апробирована на базе дегазационной системы шахты им. В.М. Бажанова ГХК «Макеевуголь» (рис. 2).

Таким образом, к настоящему времени разработаны технологии производства БВК на шахтном метане и применения ее для дегазации шахт. При этом снижается выброс метана в атмосферу и повышается безопасность горных работ, что является комплексным решением социальных и экономических вопросов. Однако, при всей технической возможности и привлекательности использования биомассы в шахтах и в сельском хозяйстве, возникает вопрос оценки экономической целесообразности применения этой технологии.

Для решения этого вопроса на дегазационной установке одной из действующих шахт Донбасса были отобраны пробы газовоздушной смеси и воды. Анализы проб показали, что в составе капируемых метановоздушных смесей концентрация метана изменяется от 7 до 57 %, составляя в среднем около 20 % за 2000 г. Анализы показали, что принципиальных ограничений для применения ферментационной технологии по газовому фактору на данной шахте нет.

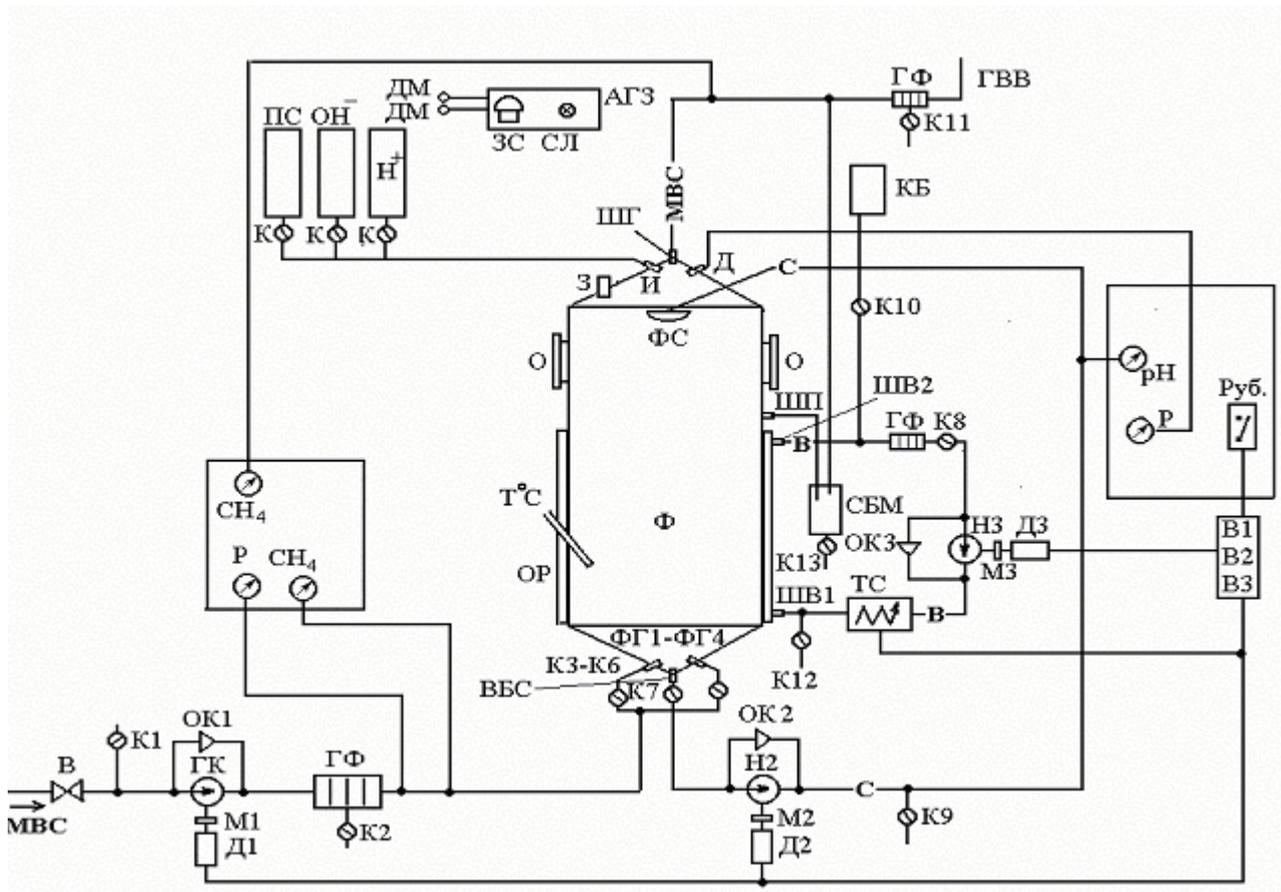


Рис.2. Технологическая схема ферментации бактерий на основе метано-воздушной смеси, каптируемой шахтой им. В.М. Бажанова:

Ф – ферментер; ГФ – фильтр; Н – насос; ОР – охлаждающая рубашка; К – кран

Анализами химического состава технических вод установлено, что они практически стабильны. Сравнение состава вод с комплексом химических элементов, необходимых для жизнедеятельности метанооксиляющих бактерий, показало, что технически возможным является применение в ферментерах технической воды из скважин. Эта вода содержит также достаточное количество микроэлементов.

Технико-экономические показатели производства белка

Остановимся подробнее на основных расчетных технико-экономических показателях для условий получения биомассы бактерий из метана АП «Шахта им. А.Ф. Засядько».

В качестве исходных данных использованы данные института "Южмедбиосинтез", информация о деятельности шахты в 2000 г., данные ИМВ НАНУ, ИГТМ НАНУ, Светлоярского завода БВК и завода "Фармахим", данные специализированных магазинов, Интернет и другие источники информации.

Расчеты включали три варианта применения данной биотехнологии, по каждому из которых выполнены: расчет производительности ферментационного оборудования, расчет капитальных вложений на строительство ферментационной установки, расчет эксплуатационных затрат. Кроме того, выполнен технико-экономический расчет для варианта использования ферментационной установки стандартного объема 400 м^3 и установлены технико-экономические показатели технологии при использовании метано-воздушной смеси концентрацией от 5 до 25 %. Основные результаты расчетов приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

Сводная таблица расходов на производство белка в объеме 3110 т/год

Наименование элементов затрат	Годовые затраты, тыс. грн	
	Вариант I	Вариант II
Вспомогательные материалы	215,6	215,6
Вода и канализация	167,0	167,0
Тепловая энергия	630,5	630,5
Электроэнергия	1617,2	1617,2
Зарплата основная и дополнительная	170,7	170,7
Отчисления на социальное страхование	64,0	64,0
Отчисления в пенсионный фонд	3,4	3,4
Амортизационные отчисления	567,4	567,4
Метан природный	—	3396,1
Кислород	3069,6	30695,7
Химреактивы	483,7	483,7
И т о г о	6989,1	38011,3
10 % на прочие неучтенные расходы	698,9	3801,1
В с е г о	7688,0	41812,5
Себестоимость 1 т белка, грн/т (\$/т)	2472,0 (464,7)	13444,5 (2527)

Таблица 2

Сводная таблица затрат при использовании ферментера объемом 400 м³

Наименование элементов затрат	Годовые затраты, тыс. грн
Вспомогательные материалы	508,1
Вода и канализация	386,6
Тепловая энергия	1459,6
Электроэнергия	3744,0
Зарплата персонала	170,7
Отчисления на соцстрах	64,0
Отчисления в пенсионный фонд	3,4
Амортизационные отчисления	1367,5
Кислород	8226,3
Химреактивы	1120,0
И т о г о	17050,3
Прочие неучтенные расходы	1705,0
В с е г о	18755,3
Себестоимость 1 тонны белка, грн/т (\$/т)	2604,9 (489,6)

Технико-экономическими расчетами установлено следующее. Получение БВК с приобретением полного комплекса минеральных солей, метана и кислорода является убыточным и нецелесообразным.

Вариант использования капируемой метано-воздушной смеси в объеме $90 \text{ м}^3/\text{мин}$ со средней концентрацией метана 32 % является экономически выгодным. При этом объем капируемого метана составит $12441 \text{ тыс. м}^3/\text{год}$, из него будет произведено 3110 т БВК на общую сумму $7,69 \text{ млн. грн}$. При рентабельности производства 32 %, срок окупаемости строительства ферментационной установки составит около 3 лет. Себестоимость 1 т произведенного гаприна составит 2472 грн при рыночной цене БВК эквивалентной энергетической ценности по сырому протеину 3622 грн . Прибыль от реализации произведенного белка составит $3,57 \text{ млн. грн/год}$. В структуре себестоимости продукта наибольшие затраты (44 %) связаны с приобретением кислорода для разбавления капируемой метано-воздушной смеси до оптимальной концентрации.

При варианте производства гаприна на ферментационной установке объемом $400 \text{ м}^3/\text{год}$ может быть произведено 7200 т сухого белка. При этом его себестоимость составит 2605 грн/т , прибыль – $7,3 \text{ млн. грн/год}$, а срок окупаемости строительства – $3,4$ года.

Таким образом, расчетами установлено, что в условиях шахты им. А.Ф. Засядько технически возможным и экономически целесообразным является получение гаприна из капируемой метано-воздушной смеси.

Нами также были выполнены расчеты экономических показателей производства белка метанооксиляющих бактерий при концентрации метана в капируемой смеси от 5 до 25 % при ее расходе $90 \text{ м}^3/\text{мин}$ (табл. 3).

Таблица 3

Технические показатели получения биомассы

Концентрация метана в капируемой смеси, %	Коэффициент изменения активности роста от максимальной	Производительность установки по метану, $\text{м}^3/\text{сут}$	Коэффициент использования метана при биосинтезе	Производительность установки по белку, кг/сут	Геометрический объем ферментеров, м^3	Производительность установки по белку, т/год
5	0,09	6480	0,1	324	5,85	97
10	0,35	12960	0,2	1296	23,4	389
15	0,72	19440	0,3	2916	52,7	875
20	0,92	25920	0,4	5184	93,6	1555
25	1,00	32400	0,5	8100	146,3	2430

Из таблицы следует, что увеличение концентрации метана в капируемой смеси в 5 раз сопровождается увеличением производительности ферментационной установки в 25 раз. При низких концентрациях метана в смеси и увеличении содержания кислорода снижается интенсивность роста бактерий.

В табл. 4 приведены экономические показатели получения биомассы при тех же концентрациях метана. Анализ результатов расчетов показывает, что при концентрации метана в капируемой смеси менее 12 % получение из шахтного метана биомассы бактерий в качестве БВК является убыточным. При большей концентрации метана строительство на шахте ферментационной установки является рентабельным.

Применение бактерий для дегазации угольных шахт

Как упоминалось выше, кроме кормовых добавок метанооксиляющие бактерии могут служить эффективным средством борьбы с метаном в шахтах. В ИГТМ НАН Украины и ИМВ НАН Украины разработаны научные основы управления газовой выделением на выемочных участках угольных шахт.

Нами разработан нормативный документ «Альбом технологических схем ведения очистных работ с применением биогеотехнологических способов окисления метана на выемочных участках угольных шахт». Суть технологий дегазации выработанного пространства шахт бактериями состоит в следующем. На основе шахтной воды с добавлением питательных веществ из концентрированной биомассы готовится суспензия, которой увлажняются породы в выработанном пространстве, обрушаемые по мере продвижения лавы.

Таблица 4

Общие экономические показатели получения биомассы

Концентрация метана в капτιруемой смеси, %	Себестоимость 1 т белка, грн/тонну	Прибыль (+) или убытки (-), грн/год	Срок окупае- мости, лет
5	10923,3	-708,2	-
10	4337,4	-278,3	-
15	3121,4	438,0	20,4
20	2695,6	1440,6	6,3
25	2498,9	2729,1	3,4

ИГТМ НАН Украины впервые в мировой практике осуществил микробиологическую дегазацию выработанного пространства на ряде выемочных участков шахт Центрального района Донбасса и Западного Донбасса.

Впервые дегазация бактериями была выполнена в 5-й лаве при отработке пласта l_8^1 на шахте «Ясиновская-Глубокая» объединения «Советскуголь». Бактерии ежедневно наносили из лавы на обрушенные породы выработанного пространства. В зоне микробиологического воздействия на сопряжении лавы с вентиляционным штреком в результате биохимической реакции местные скопления метана были снижены на 58 %.

Позже работы по микробиологическому окислению метана выполнялись совместно с институтами ИМВ НАН Украины, ИБФМ РАН и ВНИИсинтезбелок. С их участием бактерии были применены для дегазации выработанных пространств 2-й западной лавы пласта l_6 , 5-й восточной лавы пласта l_8^1 , во 2-й западной лаве пласта l_6 шахты «Ясиновская-Глубокая». Результаты испытаний в промышленных условиях приведены в табл. 5.

В дальнейшем способ микробиологического окисления метана применяли в Западном Донбассе на шахте «Западно-Донбасская», «Павлоградская», «Самарская» в условиях семи лав и в трех тупиках погашаемых штреков [6]. В экспериментах использовали биомассу метанооксиляющих бактерий Нарткалинского химкомбината. На шахте им. В.М. Бажанова применяли биомассу Светлоярского завода БВК. На шахтах Западного Донбасса использовали также биомассу, выращенную на ферментационной установке шахты «Западно-Донбасская».

Анализ данных, приведенных в таблице, показывает, что при дегазации выработанного пространства лав бактериями в различных горно-геологических условиях обеспечивается снижение газообильности на 16-57 %, что позволяет безопасно обрабатывать угольные пласты.

Для выполнения дегазационных работ в шахту систематически доставляли суточный объем биомассы (до 4 кг АСВ). На добычном участке в специальной емкости биомассу сме-

шивали с шахтной водой, куда вносили химические компоненты питательной среды. Приготовленную суспензию насосом по трубопроводу подавали в призабойное пространство лавы и оросительными форсунками наносили на обрушаемые породы. Были апробированы также нанесение суспензии на породы через подработанные дегазационные скважины. С помощью форсунок бактерии наносили на породы в тупиках штреков и в другие зоны скопления метана.

При дегазации выработанного пространства лавы, в нем формировался микробиологический фильтр длиной 25-30 м вдоль лавы и 50-60 м вдоль вентиляционного штрека. Метан выработанного пространства, проходя через фильтр вместе с утечками воздуха, окислялся бактериями, чем достигался эффект дегазации.

Технология дегазации тупиков погашаемых штреков состояла в периодическом нанесении суспензии на породы, обрушаемые при их погашении. Применение микробиологического воздействия обеспечило снижение газообильности выработанных пространств участков на 36-57 % и концентрации метана в зонах его скопления в 10-19 раз (см. табл. 5). Благодаря физиологическим свойствам бактерий, с увеличением глубины ведения горных работ, температуры и влажности среды эффективность биогеотехнологических способов дегазации угольных шахт повышается.

Таблица 5

Результаты применения бактерий для дегазации шахт

Лавы (штрек), пласт	Период воздействия, сутки	Относительная газообильность*, m^3/m	Эффективность способов, %
2 зап., l_6	10	22,0	37
5 вост., $l_8^{1'}$	14	12,4	38
2 зап., l_6	14	27,4	16
905, C_8^H	46	8,5	36
912, C_8^e	52	8,5	55
804, C_8^H	88	8,0	57
919, C_8^e	47	8,5	18
907, C_8^e	22	8,5	36
935, C_8^e	30	25,2	47
923-я, C_8^e	14	23,1	41
5 зап., $l_8^{1'}$	10	12,4	(58)
2 вост., m_3	8	19,5	35(63)
807-й, C_8^e	9	(3,2)	10,4раза
730-й, C_7^H	15	(5,3)	19 раз
419-й, C_4	8	(18,5)	12,5 раз

Примечание: *В скобках приведены средние начальные концентрации метана в зонах его скопления.

В результате дегазации участка бактериями, например на шахте им. В.М. Бажанова ежесуточно предотвращалось выделение в атмосферу около $4,35 \text{ тыс. м}^3$ метана. Расчеты показали, что при ежесуточном расходе 4 кг бактерий себестоимость дегазации составляет около 8 грн/сутки с учетом стоимости биомассы, химреактивов, электроэнергии и зарплаты исполнителей работ.

Остается добавить, что на технические решения, связанные с микробиологической дегазацией шахт и использованием каптируемого метана для производства белка получены ряд авторских свидетельств на изобретения и патентов Украины.

Выводы

Технико-экономические расчеты показывают, что технически возможным и экономически целесообразным является использование шахтного метана для производства БВК при концентрации метана в смеси более 12 %.

Микробиологическая дегазация выработанных пространств шахт позволяет снизить их относительную газообильность на 36-57 %, что дает возможность увеличения нагрузки на забой по газовому фактору и обеспечить безопасность труда шахтеров. Применение бактерий для дегазации местных скоплений метана обеспечивает устойчивое снижение его концентрации в 10-19 раз.

Применение бактерий позволяет снизить выбросы шахтного метана в атмосферу. При этом в ферментере можно утилизировать около 16 тыс. м^3 метана в сутки, а в шахтных условиях – снизить газовыделение из выработанных пространств по 4 тыс. м^3 /сутки на каждом выемочном участке.

Предложенные и апробированные технологии обеспечивают снижение негативного влияния выбросов угольных шахт на окружающую среду, повышение безопасности горных работ, комплексное использование ресурсов и улучшение кормовой базы сельского хозяйства Украины.

Список литературы

1. Иванов В.М. Расширение путей использования шахтного метана // Уголь Украины. — 1979. — № 5. — С. 35 – 37.
2. Использование рудничного газа в производстве кафеля // *Mine and Quarry*.— 1985. — 14. — № 3 – 9.
3. Булат А.Ф., Чемерис И.Ф. О проблеме энерготехнологической переработки метана угольных месторождений // Уголь Украины. — 2002. — № 6. — С. 6 – 9.
4. Метан угольных пластов: конверсия ресурсов в энергию // *World Coal*.— 2002.— Т.11. — № 12. — С.50 – 51.
5. Шахтные экспериментальные исследования микробиологического окисления метана в выработанном пространстве / В.И. Мякенький, А.П.Петух, П.С.Литвинов, Б.И.Мягкий // Техника безопасности, охрана труда и горноспасательное дело: Науч.-техн. реф. сб. / ЦНИЭИуголь. — 1979. — № 12. – С. 8.
6. Эффективность микробиологического окисления метана в выработанных пространствах угольных шахт / В.И. Мякенький, И.К. Курдиш, В.Б. Демченко, А.П. Петух, А.В. Шмиголь, Л.Ф. Трунов // Микробиологический журнал. — 1992. — Т. 54. — № 1. — С. 67 – 73.

Стаття надійшла до редакції 02.10.06

© Вороб'йов Є.О., Демченко В.Б., Петух О.П., Софійський К.К., 2006