

ko V.V. // *Razrabotka rudnykh mestorozhdeniy. Nauchno-tekhnicheskiiy sbornik*, 2010. – No.93. – P. 279–282

3. *Страшко Е.А.* Определение взаимозависимости возможной прибыли горно-обогатительного комбината за реализованный концентрат от бортового содержания железа в руде / Страшко Е.А., Панченко В.В. // *Материали міжнародної конференції „Форум гірників – 2010“ – Дніпропетровськ: НГУ, 2010 – С. 264–270.*

*Strazhko Ye.A.* Determination of interdependency between ore concentrate selling gain contingency of ore-dressing and processing enterprise and iron cutoff grade in ore / Strazhko Ye.A., Panchenko V.V. // *Materials of the International conference “Forum of Miners” – 2010”*. – Dnipropetrovsk: NGU, 2010. – P. 264–270

Определен механизм влияния бортового содержания железа в руде на текущий коэффициент вскрыши при разработке крутопадающих железорудных месторождений на стадии эксплуатации карьера. Его учет обязателен при определении возможной прибыли комбината от реализации концентрата. Выполнен анализ полученных результатов в ситуациях управляемого

повышения и понижения бортового содержания железа при колебании рыночных цен на концентрат. Анализ проиллюстрирован примером характерного расположения рабочей зоны и запасов руды в карьере.

**Ключевые слова:** *кондиции, бортовое содержание, железорудные месторождения, коэффициент вскрыши, содержание железа*

The influence mechanism of the cutoff grade of iron in ore on the current overburden ratio for steeply dipping iron deposits at stage of operation of open cast is defined. Account taken of this influence is obligatory for determination of possible factory's profit from concentrate realization. The analysis of the results in situations of operated increase and fall of the cutoff grade is made in terms of fluctuation of concentrate prices at the market. The analysis is illustrated by an example of the typical layout of a working zone of an opencast.

**Keywords:** *quality requirements, cutoff grade, ore deposits, overburden ratio, iron content*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Прокопенком. Дата надходження рукопису 25.02.11*

УДК 622.278.273.2

**Н.М. Табаченко, канд. техн. наук,  
Р.Е. Дычковский, канд. техн. наук,  
В.С. Фальштынский, канд. техн. наук,  
П.Б. Саик**

Государственное высшее учебное заведение  
„Национальный горный университет“,  
г. Днепропетровск, Украина, e-mail: dichre@yahoo.com

## КОГЕНЕРАЦИОННАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ГАЗА СКВАЖИННОЙ ГАЗИФИКАЦИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ НА ТРАДИЦИОННЫХ ЭНЕРГОУСТАНОВКАХ

**N.M. Tabachenko, Cand. Sci. (Tech.),  
R.Ye. Dychkovskiy, Cand. Sci. (Tech.),  
V.S. Falshtynskiy, Cand. Sci. (Tech.),  
P.B. Saik**

State Higher Educational Institution  
“National Mining University”,  
Dnipropetrovsk, Ukraine, e-mail: dichre@yahoo.com

## COGENERATION GAS UTILIZATION OF BOREHOLE COAL SEAMS GASIFICATION ON TRADITIONAL POWER STATION

Обоснованы возможности применения мембранных установок для очистки продуктов скважинной подземной газификации методом фильтрации. Применение современных мембранных газоразделителей позволяет отделить основные балластные газы (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S и N<sub>2</sub>) от горючих газов, которые образуются в процессе подземной газификации угля. Приведены конструктивные особенности выполнения данных установок и технологии процесса очистки генераторных газов. Предложены мероприятия по снижению экологической нагрузки на горнодобывающие регионы.

**Ключевые слова:** *газификация, когенерационная технология, парниковый эффект, угольный пласт*

Мировая энергетика в значительной степени формируется под влиянием двух аспектов. Во – первых, это непрерывный рост потребности в энергоносителях в сочетании с удорожанием их первичных

источников (природного газа, нефти, угля), запасы которых ограничены. В этой ситуации многие страны начали форсировать добычу нефти и газа (при наличии разведанных запасов), а также ускоренными темпами стали развивать ядерную и тепловую энергетику на базе твердого топлива.

© Табаченко Н.М., Дычковский Р.Е., Фальштынский В.С., Саик П.Б., 2011

Во – вторых, в последние годы особую острогу приобрела проблема охраны окружающей среды. Всевозрастающие вредные выбросы в атмосферу, твердые и жидкие отходы горного производства, образующиеся при сжигании органического топлива, побуждают разрабатывать новые безотходные и экологически чистые технологии в промышленности и энергетике. Особую актуальность приобретают поиски путей выработки энергии из возобновляющихся и энергоресурсосберегающих источников. Каждая тысяча кВт/час электроэнергии, которая вырабатывается из возобновляемых источников, в среднем, предотвращает выбросы в атмосферу 4,2 кг твердых частиц, 5,65 кг оксидов серы, 1,76 кг оксидов азота, а каждая выработанная Гкал тепла – 0,2 кг твердых частиц, больше 3 кг оксидов серы и около 1 кг оксидов азота.

Необходимость решения этих проблем привела к созданию прогрессивной и экологически щадящей технологии, которая может решить эти и другие задачи одновременно. Этой технологией является скважинная подземная газификация угля (СПГУ).

Скважинная подземная газификация угольных пластов – это термохимический процесс взаимодействия органической массы (углерода) твердых горючих ископаемых с окислителем (воздухом, водяным паром, кислородом, диоксидом углерода или их смесями при температуре 800 – 1300 °С) на месте залегания пластов, в результате которого часть топлива трансформируется в горючие газы, которые выдаются на поверхность по скважинам. Технологическая концепция СПГУ привлекательна своей простотой. По существу система газификации угольных пластов состоит из нескольких буровых скважин, включающих нагнетательную скважину, через которую с поверхности земли в угольный пласт подаются дутьевые реагенты. В пределах пласта высоко-температурные химические реакции превращают уголь в горючие газы. Затем эти газы поступают по газоотводной скважине к поверхностным установкам, где угольный газ можно использовать в качестве энергоносителя (топлива) при его сжигании, либо для производства продуктов химической промышленности.

Основным продуктом технологии подземной скважинной газификации угольных пластов является газ, состоящий из следующих компонентов: монооксид углерода CO, диоксид углерода CO<sub>2</sub>, водород H<sub>2</sub>, метан CH<sub>4</sub>, кислород O<sub>2</sub>, азот N<sub>2</sub> и сероводород H<sub>2</sub>S (если пласт вмещает серу). Потребительские свойства (теплота сгорания) этого газа снижаются, в основном, из-за присутствия в нем трех балластных газов (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S и N<sub>2</sub>), которые не горят в топках энергоустановок и выбрасываются через дымовые трубы в атмосферу. Горючими компонентами угольного газа являются CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и O<sub>2</sub>. Применение современных мембранных газоразделителей позволяет отделить балластные газы CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S и N<sub>2</sub> от остальных горючих газов, поэтому в топки энергоустановок подают только горючие компоненты. За счет этого качество газа (теплота сгорания) возрастает с 3–4 до 7–8 МДж/м<sup>3</sup>.

Сущность мембранного разделения газов состоит в следующем [1]. Процесс разделения смесей мембранным методом происходит в потоке вещества, движущегося вдоль разделительной мембраны. Исходная газовая смесь теряет отделяемые частицы (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S и N<sub>2</sub>), которые уходят через пористую разделительную мембрану. При этом возрастает концентрация газов (CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> и O<sub>2</sub>), остающихся в потоке (рис.1).

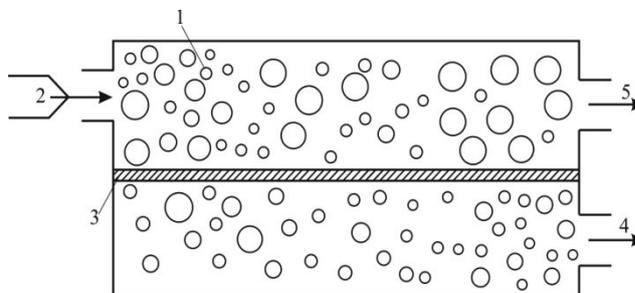


Рис.1. Схема процесса мембранного разделения газов методом фильтрации

За счет градиента гидростатического давления 2 концентрация балластных газов, проходящих через мембрану 3, возрастает в фильтре 4, а горючие газы исходной смеси 1 образуют концентрат 5. В упрощенном виде процесс разделения происходит при условии, что газы 3, 4, 5 (рис. 2) представляют частицы газовых молекул больших размеров, поэтому наименьшие частицы 2 проходят через маленькие отверстия (поры) разделительной мембраны 1, а частицы больших размеров 3, 4, 5 остаются в первоначальном (исходном) потоке газов.

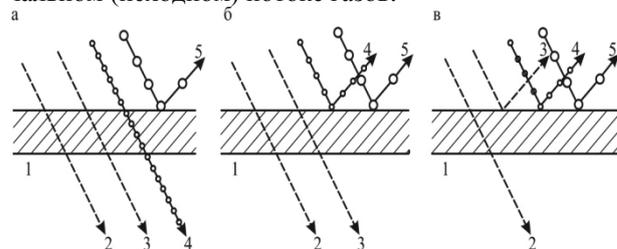


Рис. 2. Схемы потоков в процессах микрофильтрации: а – ультрафильтрация; б – обратный поток микрофильтрации; в – осмос.

Движущей силой разделения газовых смесей является избыточное давление со стороны исходного потока или градиента концентрации разделяемых веществ.

Степень разделения и производительность процесса зависят от материала и структуры мембран, а также от конструкции и технического обеспечения устройств и аппаратов, используемых в каждом конкретном случае [2].

Для разделения газов скважинной подземной газификации угольных пластов могут быть использованы мембранные промышленные установки, которые могут пропускать через себя большие объемы промышленных газов.

Конструкция промышленных установок состоит из отдельных стандартных модулей (элементов), которые компактны и взаимозаменяемы, состоят из капиллярных (волоконных) трубок (рис. 3).

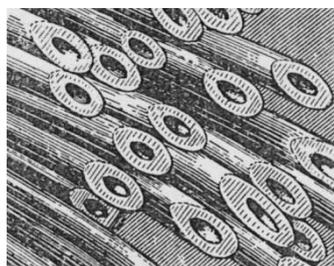


Рис. 3. Срезы пустотелых волоконистых мембран (внутренний диаметр 20 – 100 мкм, толщина стенки 10 – 50 мкм)

В аппарате, использующем полые волокна с непористыми стенками, волокна собраны в свободно свисающие пучки U – образной формы. Открытые концы волокон закреплены в шахматном порядке в диске, который выполняет функцию трубной доски. Расстояние между соседними пучками составляет от 1/4 до 1/2 толщины пучка. Такой зазор между пучками возможен при отсутствии специальных распределителей потоков. Применение полых волокон меньшего диаметра позволяет получать максимальную производительность.

В плоскорамном аппарате для разделения газов (рис. 4) мембраны 2 помещены между рамками 3, 4. Пакет рамок и мембран сжимается концевыми плитами 1. Исходный газ поступает в полость рамки 3, диффундирует через пористые мембраны и выводится через соответствующие отверстия в рамках 3.

Для удаления из газов возрастающих количеств  $CO_2$ ,  $N_2$  и  $H_2S$  необходимо наращивать производительность установки, что легко сделать простым увеличением числа мембранных модулей.

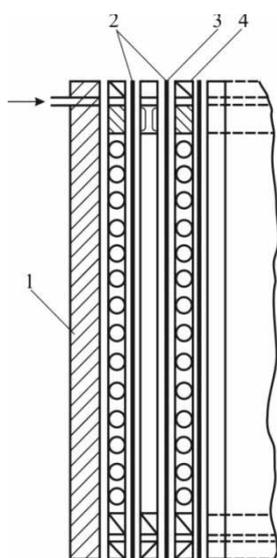


Рис. 4. Мембранный плоско-рамный аппарат для диффузионного разделения газов

Следует отметить, что эффективная работа мембранных элементов и модулей невозможна без предварительной обработки газовой смеси перед подачей ее непосредственно на мембранную установку очистки. Необходимо учитывать в исходной смеси газов наличие твердых частиц (угольно-породной пыли, золы, смол), капель насыщенных паров воды и самого пара, легкоконденсируемых углеводородов и т. д. Поэтому во всех промышленных системах обычно устанавливают аппараты для осушки газов (например гликолями): высокоэффективный сепаратор (рис. 5), фильтр (рис. 6).

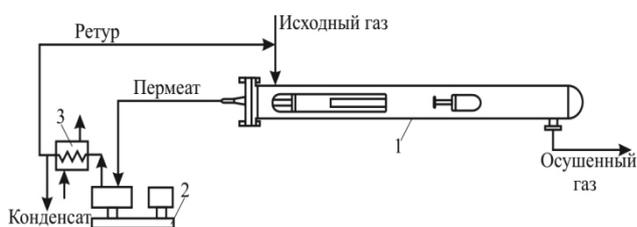


Рис. 5. Схема установки для осушения газа: 1 – рулонный модуль установки; 2 – компрессор; 3 – теплообменник

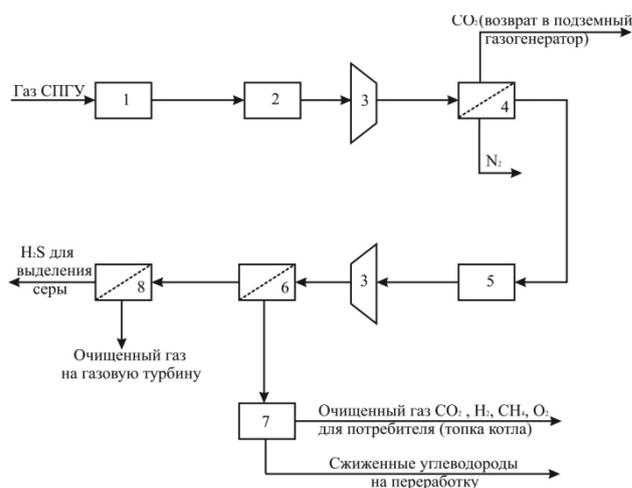


Рис. 6. Принципиальная схема мембранной установки с одновременным извлечением  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $N_2$ , очищенного газа и сжиженных углеводородов: 1 – гликолевая осушка газов; 2 – фильтр-сепаратор для абсорбционной очистки газов; 3 – компрессор; 4, 6, 8 – мембранные модули; 5 – конденсатор; 7 – каплеотделитель

Исходный газ скважинной газификации угольных пластов подают под давлением 0,2–0,5 МПа на гликолевую осушку 1 и фильтр-сепаратор 2 для очистки абсорбционным методом растворами хемосорбента или органическими поглотителями. Далее исходный газ сжимают компрессором 3 до 2,4–3,1 МПа и по-

дают на мембранную часть 4 установки. Из рис. 6 видно, что в результате одноступенчатой очистки можно получить высококонцентрированные газы  $\text{CO}_2$  и  $\text{N}_2$ . Исходный газ, насыщенный парами воды, проходит через конденсатор 5 и далее в мембранный очиститель 6, откуда через каплеотделитель 7 из него выделяются сжиженные углеводороды (смола, аммиак, влага, фенолы, пиридиновые основания, бензолные углеводороды и др.) Очищенный газ далее поступает в когенерационную установку шахтной котельной, где сжигается в топке котла. В мембранном газоотделителе 8 получают из исходного газа сероводород  $\text{H}_2\text{S}$  и очищенный газ подается для сжигания в газовой турбине.

Очищенный газ СПГУ может быть успешно реализован в модернизированных шахтных котельных установках для комбинированного (когенерационного) производства электрической, механической и тепловой энергии. Особенностью когенерационной технологии является то, что в ее основе лежит выработка электрической и тепловой энергии, которые являются базовыми, а механическая – вспомогательной, и ее использование улучшает показатели выработки энергоносителей.

Модернизация шахтных и коммунальных котелен под когенерационную технологию может быть осуществлена путем достройки к существующему теплоэнергетирующему оборудованию, которое сжигает органическое топливо (котлы, топки, печи), энергетических генерирующих двигателей (газовых турбинных или поршневых газовых двигателей), которые сбрасывают отработанные газы в топку котлов. Выработанная в когенерационной установке электрическая энергия

$$\bar{Q} = \frac{Q_э}{Q_э + Q_Т}$$

полностью определяется термодинамикой энергетического двигателя, который характеризуется коэффициентом избытка воздуха в его отработанных газах и коэффициентом тепловой нагрузки котла  $\varphi = \frac{\Psi_к}{q_к}$ , как отношение расхода сжигаемого в котле топлива к расходу  $q_к$ , при максимальной тепловой нагрузке котла, получаемой при сжигании газа с коэффициентом избытка воздуха равному 1.

При реконструкции шахтной котельной под когенерационную установку, тепловой водогрейный котел (например, ПТВМ-30) поднимается на своих опорах на 2–2,5 м и под котлом располагается газовая турбина с электрогенератором (рис. 7). В качестве газовой турбины может быть использована энергетическая газотурбинная установка ГТУ-2500 производства НПП „Машпроект“ (г. Николаев). По предварительным расчетам окупаемость сооружения когенерационной установки на базе отопительного водогрейного котла составит 2–3 года.

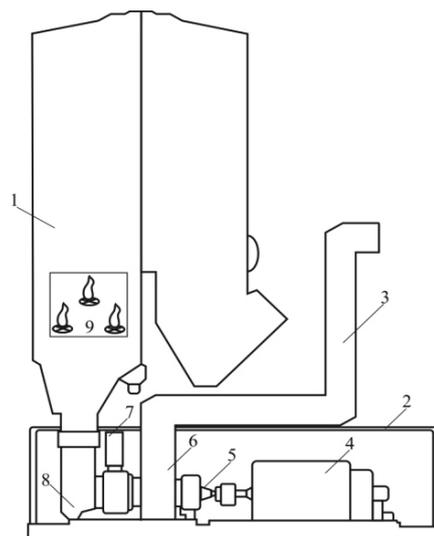


Рис. 7. Схема когенерационной установки на базе котла ПТВМ и ГТУ-2500: 1 – котел; 2 – контейнер турбогенератора; 3 – вход воздуха в ГТУ; 4 – электрогенератор; 5 – редуктор; 6 – компрессор; 7 – камера сгорания ГТУ; 8 – газовая турбина; 9 – система сжигания топлива в выхлопных газах ГТУ

В когенерационных схемах в качестве двигателя для привода электрогенератора кроме газовых турбин могут применяться также газопоршневые двигатели. Особенностью цикла на базе использования газопоршневого двигателя является более низкое содержание кислорода в продуктах сгорания двигателя, поскольку коэффициент избытка воздуха в них не превышает 2–2,2. Поэтому, для организации надежного сжигания топлива в котле к продуктам сгорания двигателя необходимо добавлять (дополнительно поддувать) свежий воздух, доводя содержание кислорода до 15% объемных единиц.

Применение газопоршневых двигателей по сравнению с газовой турбиной имеет ряд существенных преимуществ:

- более низкая удельная стоимость установленного кВт электрогенерирующих мощностей;
- большое соотношение номинальных электрических и тепловых мощностей, что сокращает сроки окупаемости установки;
- высокий коэффициент использования теплоты топлива на частичных нагрузках и при режиме утилизации.

Очень важное преимущество когенерационных установок состоит в том, что электроэнергия вырабатывается практически на месте ее потребления. Этим ликвидируются колоссальные потери (достигающие в некоторых случаях 16–18%) в линиях электропередач. Расчеты показывают, что в большинстве случаев превращение теплоэнергетирующих мощностей в когенерационные позволяет практически полностью обеспечить прилегающий к шахте жилой массив и частично саму шахту собственной электроэнергией.

Сжигание топлива в когенерационной установке обеспечивает существенное уменьшение вредных выбросов, по сравнению с сжиганием того же количества топлива отдельно, что приведет к улучшению экологической ситуации в горнодобывающих регионах.

Вышеприведенные преимущества убедительно свидетельствуют о том, что применение когенерационных технологий является на сегодняшний день одним из самых предпочтительных и результативных путей повышения эффективности использования топлива в теплоэнергетике. Недаром в последнее двадцатилетие этим технологиям уделяется в высокоразвитых странах пристальное внимание.

На сегодняшний день выходит на первые позиции новая глобальная экологическая проблема – борьба с парниковым эффектом, поэтому все новые технические решения должны учитывать эту проблему.

Многие ученые сходятся во мнении, что интенсивная экономическая деятельность человека и чрезмерное потребление природных ресурсов оказывает негативное влияние на состояние климата нашей планеты. Виной тому есть растущая в атмосфере концентрация парниковых газов, задерживающих инфракрасное излучение Земли. К парниковым газам антропогенного происхождения, выбросы которых необходимо контролировать, относятся: углекислый газ –  $\text{CO}_2$ ; метан –  $\text{CH}_4$ ; пар –  $\text{H}_2\text{O}$ ; окись азота –  $\text{N}_2\text{O}$  и другие.

Сущность парникового эффекта, по аналогии с обычной хозяйственной теплицей, состоит в следующем. Ограждающая пленка теплицы пропускает солнечные лучи и в пространстве под этой пленкой температура земли и воздуха значительно повышается, по сравнению с наружной температурой атмосферы. В результате этого под пленкой можно выращивать ранние овощи и другую зеленую продукцию. Примерно также происходит и в атмосфере Земли. Парниковые газы из атмосферы уходят в космос и образуют вокруг Земли плотное кольцо (как пленка в теплице). Это газовое кольцо легко пропускает солнечные лучи. Земля прогревается от солнечного излучения и тепло земли, а также образующееся тепло от деятельности человека, выделяется в атмосферу, но уйти в космос не позволяет парниковое газовое кольцо. Результатом такой ситуации является то, что атмосфера Земли становится теплее (как под пленкой теплицы), то есть происходит усиление парникового эффекта, приводящее к разбалансировке устоявшейся климатической системы. К наиболее очевидным и ощутимым последствиям изменения климата, которые отчасти проявляются уже сегодня, относятся:

- повышение средней температуры на поверхности Земли;
- таяние ледников и снежных покровов („шапок“) в горах;
- повышение уровня мирового океана и затопление прибрежных территорий, пригодных для нормальной жизни человека;
- увеличение частоты и силы экстремальных природных явлений (землетрясения, ураганы, цунами и т.п.).

В создавшейся ситуации дальнейшее развитие энергетики видится в двух направлениях: одновременно с развитием атомной энергетики будет нарастать использование угля. Запасы его на нашей планете еще велики. Сочетание угольной и атомной энергетики технически в состоянии обеспечить все области производства энергоресурсами и, в перспективе, полностью отказаться от нефти и природного газа как топлива.

Успешному развитию угольной энергетики препятствует проблема парникового эффекта. В результате сжигания все возрастающего количества угля, нефти и других видов углеводородного топлива в настоящее время в атмосферу ежегодно поступает примерно  $1,8 \cdot 10^{16}$  т  $\text{CO}_2$  [3].

Метан, как и диоксид углерода, а также пар пропускают солнечную энергию к Земле и задерживают тепловое инфракрасное излучение планеты. Таким образом,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  и  $\text{H}_2\text{O}$  действуют сообща, создавая на Земле теплицу. В результате, в будущем заметно переместятся современные природные зоны, исчезнут многолетние морские полярные льды, песчаные пустыни (например, Сахара) переместятся в зеленые зоны (в Европу и т.п.). В Украине в Херсонской области уже появилась небольшая песчаная пустыня.

Решение накопившихся проблем возможно только благодаря применению новейших технологий в производстве электрической и тепловой энергии. Наиболее весомым направлением повышения эффективности функционирования теплообеспечения является применение комбинированного (когенерационного) производства тепловой, электрической и механической энергии на базе скважинной подземной газификации угольных пластов с одновременным нагнетанием в подземный газогенератор парниковых газов ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) для их переработки в горючие газы [4].

Решить задачу по эффективной защите окружающей среды от парникового эффекта можно за счет снижения выбросов  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . Эти газы нужно не выбрасывать в атмосферу, а возвратить в подземный газогенератор в качестве дутьевых потоков для производства высококалорийного угольного газа (рис. 6). Рассматривая процесс газификации твердого топлива, следует отметить, что в огневом забое образуется две зоны. В окислительной зоне получают первичный продукт, а в восстановительной зоне происходит восстановление диоксида углерода до монооксида углерода (горючего газа) по реакции  $\text{CO}_2 + \text{C}$ . При добавлении пара в этой зоне также образуется горючий газ – водород  $\text{H}_2$  по реакции  $\text{H}_2\text{O} + \text{C}$ .

Проведенные стендовые испытания показали, что при получении угольного газа смесь  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  разбавляется азотом  $\text{N}_2$ , находящимся в воздушном дутье. Это приводит к снижению парциального давления суммы  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$  и создает условия, благоприятствующие восстановлению  $\text{CO}_2$  в  $\text{CO}$  и  $\text{H}_2\text{O}$  в  $\text{H}_2$  и  $\text{O}_2$ . Равновесный состав продуктов газификации методом воздушного дутья при повышении температуры газификации приведен в таблице.

Таблиця

Температура газификации, °С	Состав полученного газа на воздушном дутье, %		
	CO	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>
400	0,9	20,6	78,5
500	6,4	17,1	76,5
600	18,1	10,1	71,8
700	29,1	3,1	67,5
800	35,0	1,6	63,4
900	37,3	1,1	61,6
1000	39,0	0,6	60,4

Рост температуры газификации в реакционном канале способствует увеличению выхода горючих газов CO и H<sub>2</sub> при восстановлении CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> и снижению N<sub>2</sub>.

Тепловые электростанции также выбрасывают в атмосферу большие количества парниковых газов – дыма (CO<sub>2</sub>) и влаги (H<sub>2</sub>O). Значительную часть этих газов можно не выбрасывать в атмосферу, а подавать в качестве дутьевых потоков для выработки угольного газа. Также принципиально новое техническое решение обеспечивает снижение выбросов парниковых газов и может внести значительный вклад в борьбу с парниковым эффектом.

Поэтому электростанции (ТЭС) необходимо строить в комплексе со станциями подземной газификации углей, которые будут снабжать топливом топку котлов, дымовые выбросы ТЭС направлять в подземные газогенераторы для трансформации их в горючий искусственный газ.

ТЭС и „Подземгаз“ вполне могут работать как надежные партнеры, извлекая обоюдную выгоду и одновременно оберегая природу. Это позволит самым активным образом отходы превращать в доходы. Такое комплексное производство энергоносителей будет работать на безотходной технологии, когда отходы одного производства являются сырьем для другого производства. Это будет наивысший уровень индустриализации промышленности – безотходное и экологически „чистое“ производство. В частности, отходы действующих ТЭС и ТЭЦ, коммунальных котелен в виде золошлаков и дымовых газов могут быть превращены в сырьевой продукт предприятий ПГУ. Золошлаки и отходы обогатительных фабрик будут подаваться в подземный газогенератор вместе с дутьем для дожига и закладки выработанного пространства, а дымовые выбросы электростанций не будут загрязнять природу, обеспечивая комфортные условия жизни для населения.

Необходимо ответить еще на один важный и принципиальный вопрос: „Возможна ли реализация газа СПГУ в коммунально-бытовом секторе?“ Ответ будет однозначным – возможна, но при одном условии: необходимо заменить газовые горелки с открытым пламенем, которые применяются при сжигании природного газа, на беспламенные с горением газа в закрытой металлической полости. Это связано, в основном, с меньшей теплотой сгорания газа СПГУ (3,78–5,81 МДж/м<sup>3</sup>), по сравнению с природным га-

зом (25,5–30,6 МДж/м<sup>3</sup>). Газ СПГУ обладает одним важным преимуществом перед природным газом – очень высокой скоростью горения, что обеспечивает высокую теплотворность в беспламенных горелках.

По расчетам института ВНИПИподземгаз, интенсивность горения для стехиометрических смесей, отдельно взятых CO, H<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, при соответствующих скоростях горения (CO – 0,3 м/с, H<sub>2</sub> – 1,6 м/с и CH<sub>4</sub> – 0,28 м/с) будет характеризоваться следующим количеством выделяющегося тепла: для монооксида углерода (CO) – 4200 МДж/м<sup>3</sup>·ч; для водорода (H<sub>2</sub>) – 18480 МДж/м<sup>3</sup>·ч; для метана (природный газ) – 3444 МДж/м<sup>3</sup>·ч [5]. Таким образом, интенсивность горения водорода в 1,2–5 раз выше, чем монооксида углерода и метана.

Проведенные эксперименты с газом СПГУ в 30–40 гг. прошлого века на бывшей Подмосковной станции „Подземгаз“ показали, что скорость распространения пламени при горении газа составила 1,6 м/с при содержании водорода 10%, а при его содержании до 17% – скорость возросла в 1,5 раза.

Поэтому, ввиду наличия в газе СПГУ водорода, как основного горючего компонента, несмотря на низкую теплоту сгорания, энергетический газ СПГУ обладает высокой интенсивностью горения и, следовательно, хорошими теплотехническими качествами.

Применение горелок беспламенного горения для сжигания газа СПГУ увеличивает коэффициент полезного действия котлов коммунальных котелен на 18–22% по сравнению с обычными газовыми горелками.

В г. Тула (Россия) в одном из домов был проведен длительный опыт: газ СПГУ использовался для бытовых целей. Газ был подведен к газовым плитам жилого дома и в течение трех лет его жители успешно пользовались газом для бытовых целей.

В котельной Подмосковной станции „Подземгаз“ был проведен эксперимент, когда при сжигании газа (с теплотой сгорания 3,1–3,3 МДж/м<sup>3</sup>) с воздухом, подогретым до 500–600°C, температура в топке достигла 1200°C, а при теплоте сгорания 4 МДж/м<sup>3</sup> – возросла до 1350°C. Вышеприведенные примеры могут служить основанием для использования газа СПГУ при снабжении населенных пунктов при подземной газификации местных угольных месторождений.

**Выводы.** Украина смогла разработать первые технические решения по скважинной подземной газификации угольных пластов и наряду с Россией и Узбекистаном стала на путь ее практической реализации. Это перспективное направление по своей сути альтернативно традиционной энергетике и направлено на резкое оздоровление экологической обстановки, улучшение условий труда, гармоничное взаимодействие общества и природы, человека и окружающей среды. СПГУ успешно решает технологические и социальные проблемы и может снизить экологическую нагрузку на окружающую среду от негативного влияния существующего топливно-энергетического комплекса. В частности, скважинная газификация позволяет ликвидировать отвалы породы шахтной и открытой разработки, золы и шлака, шламы углеобогащения, твердые

и токсичные отходы городов, выбросы вредных продуктов сгорания органического топлива, кислотные дожди. Все это можно сделать путем их захоронения и переработки под землей по технологии СПГУ.

В настоящее время мембранные методы используются для концентрирования и очистки газовых смесей, растворов, сточных вод, соленых, отстойных промывных вод.

Мембранный метод разделения перспективен не только с технологических, но и с экономических позиций. Он наиболее близок к приемам разделения, используемых природой, которая в процессе эволюционного развития выработала наиболее рациональное расходование жизненной энергии для своего жизнеобеспечения и развития.

В США, Японии, Великобритании, Франции, Германии действуют несколько тысяч установок с процессами мембранного разделения производительностью от 1–3 до 17000 м<sup>3</sup>/сут.

Для успешной реализации горючих газов скважинной газификации угольных пластов предложена когенерационная технология совместного производства электроэнергии и тепла, которая уменьшает затраты топливных ресурсов почти в 1,5 раза и значительно улучшает состояние окружающей среды, создает резервные регулирующие мощности для энергетики. К сожалению, в Украине на сегодняшний день еще не построено ни одной когенерационной установки, реализующей рассматриваемый здесь подход, хотя возможность для широкого внедрения когенерации в нашей стране – уникальная. На протяжении многих десятилетий в стране создавалась система централизованного теплоснабжения на базе ТЭЦ и мощных коммунальных котелен, благодаря чему достигнута очень высокая концентрация теплогенерирующих мощностей. В котельных муниципального теплоснабжения установлены тысячи отопительных, главным образом водогрейных, котлов, пригодных для пристройки к ним электрогенерирующих газовых турбин и газопоршневых двигателей. Если половину из них превратить в когенерационные установки, то это позволит вырабатывать электроэнергию практически на месте ее потребления. При этом сжигание топлива в когенерационном цикле приводит к существенному уменьшению вредных выбросов, по сравнению с сжиганием того же количества топлива раздельно.

В настоящее время накопился научный потенциал знаний, чтобы заключить с вероятностью не менее 90%, что текущее резкое изменение климата последних тысячелетий вызвано антропогенными выбросами парниковых газов. Раз причина антропогенная и выбросы надо снижать – вопрос перешел в практическую плоскость

Главная роль снижения выбросов отводится энергосбережению и повышению энергоэффективности, развитию возобновляемых источников энергии, а в перспективе – улавливанию и переработке парниковых газов, образующихся при сжигании топлива на традиционных энергоустановках. Другая сторона вопроса – роль подземной газификации в нейтрализации парниковых газов, в стабилизации концентрации CO<sub>2</sub>,

H<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub>, в атмосфере. Идет успешно отладка и развитие рыночного подхода к регулированию выбросов на основе принятия Киотского протокола. Число и объемы проектов по снижению выбросов парниковых газов во всем мире быстро растут.

Альтернативная энергетика, основанная на использовании газов СПГУ и возобновляемых источниках энергии, наряду с традиционной, очень скоро станет неотъемлемой частью процесса глобализации мировой экономики и способность той или иной страны быстро и с возможно минимальными потерями отказаться от традиционных энергоносителей (за исключением угля) будет определять и расстановку сил в новом мировом энергетическом (точнее экологическом) порядке, где технологиям, нарушающим экологическое равновесие, места уже не будет.

### Список литературы / References

1. Гребенюк В.Д. Електропембранне розділення сумішей / В.Д. Гребенюк, Е.І. Пономарьов – Київ, Наук. думка, 1992. – 183 с.

*Hrebeniuk V.D. Electro-membrane separation of compounds / V.D. Hrebeniuk, E.I. Ponomarov. – Kyiv, Naukova Dumka, 1992. – 183 p.*

2. Рейтлингер С.А. Проницаемость полимерных материалов / Рейтлингер С.А. – М: Химия, 1995. – 269с.

*Reytlinger S.A. Transparency of polymers / Reytlinger S.A. – M: Khimiya, 1995. – 269 p.*

3. *Сучасний стан і перспективи розвитку енергетики України / [І.В. Плапков, А.К. Шидловський, Б.С. Стогній та ін.] Енергетика і електрифікація, 1997. – №3 – С. 1–15.*

*Present state and development prospects of Ukrainian energy sector. / [I.V. Plapkov, A.K. Shydlovskiy, B.S. Stohnii et al.]– Enerhetyka i elektryfikatsia, 1997. – No.3 – P. 1–15.*

4. Табаченко Н.М. Альтернативная когенерационная геосистема энергоснабжения в угольной отрасли / Табаченко Н.М – Уголь Украины, 2008.–№2–С. 3–7.

*Tabachenko N.M. Alternative cogeneration energy supply geosystem in coal industry / Tabachenko N.M. – Ugol Ukrainy, 2008. – No.2 – P. 3–7.*

5. Колоколов О.В. Теория и практика термохимической технологии добычи и переработки угля / [О.В. Колоколов, Н.М. Табаченко, А.М. Ейшинский и др.] – Днепропетровск, НГА Украины, 2000. – 281с.

*O.V. Kolokolov. Theory and practice of thermochemical technology of coal mining and processing / [O.V. Kolokolov, N.M. Tabachenko, A.M. Eyshinskiy et al.] – Dnepropetrovsk, NGA Ukrainy, 2000. – 281 p.*

Обґрунтовано можливість застосування мембранних установок для очищення продуктів свердловинної підземної газифікації методом фільтрації. Застосування сучасних мембранних газороздільників дозволяє відокремити основні баластні гази (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S і N<sub>2</sub>) від горючих газів, які утворюються в процесі підземної газифікації вугілля. Приведено конструктивні особливості виконання даних установок та технології процесу очищення генераторних газів. Запропонова-

но заходи зі зниження екологічного навантаження на гірничодобувні регіони.

**Ключові слова:** газифікація, когенераційна технологія, парниковий ефект, вугільний пласт

Possibilities of diaphragm installations application for depuration of underground coal gasification products by the method of filtration are substantiated. Application of modern diaphragm gas separator allows dissociating main ballast gases ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  i  $\text{N}_2$ ) from combustible gases appearing in the process of under-

ground coal gasification. The structural characteristics of implementation of the mentioned options and technology of power gas depuration are resulted. Measures reducing environment pollution load in mining regions are offered.

**Keywords:** gasification, cogeneration technology, greenhouse effect, coal seam

Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Бузилом. Дата надходження рукопису 11.02.11

УДК 624.041

О.О. Ткач, канд. техн. наук

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий університет“, м. Дніпропетровськ, Україна  
e-mail: mgstkach@ukr.net

## ДЕЯКІ ЗАДАЧІ ПРО ЗУСИЛЛЯ В БАЛКАХ

О.О. Tkach, Cand. Sci. (Tech.)

State Higher Educational Institution “National Mining University”, Dnipropetrovsk, Ukraine  
e-mail: mgstkach@ukr.net

## CERTAIN PROBLEMS CONCERNING INTERNAL FORCES IN BEAMS

Знайдено аналітичний розв'язок задачі про опорні реакції нерозрізних багатопрогонових балок, що завантажені рухомою групою сил. Запропоновано узагальнену розрахункову схему, яка дозволяє будь-яку балку після складання функцій опорних реакцій подати як консольну, і спеціальні функції розподілу вздовж балки внутрішніх зусиль від рухомої групи сил. Ортогональні до осей координат перерізи поверхневих графіків цих функцій є лініями впливу й епюрами внутрішніх зусиль. Показано також можливість застосування інших плоских перерізів поверхневих графіків для пошуку максимальних внутрішніх зусиль у нормальних перерізах балок.

**Ключові слова:** балки, епюри, лінії впливу, внутрішні зусилля, пошук максимуму, програмування

**Вступ.** Кожна науково-технічна теорія несе відбиток не тільки природних явищ і процесів, які вона описує, але й обчислювальних методів, що були поширені на час її становлення. Тому корисно час від часу переглядати існуючі теорії з метою пристосування їх до нових можливостей обчислювальної техніки і математичного забезпечення. У цій статті зроблена спроба переглянути з таких позицій задачі будівельної механіки про внутрішні зусилля в балках, керуючись принципом „від елементарного до складного, від складного до найскладнішого“, що є ефективним у програмуванні.

Оскільки балкові конструкції залишаються дуже поширеними в різних областях будівництва, можна сподіватися, що результати цієї роботи знайдуть застосування у відповідних обчислювальних програмах.

**Аналіз стану проблеми.** Усі більш-менш складні розрахунки будівельних конструкцій тепер виконують за допомогою комп'ютерних програм, що переважно, засновані на методі скінченних елементів. Але, як і всі чисельні методи, цей метод не підходить для аналітичного розв'язання задач.

Метод сил у вигляді рівнянь трьох моментів [1; с. 241–244], що до поширення комп'ютерних технологій використовувався для розрахунку нерозрізних балок, є також орієнтованим на чисельні результати.

Ще й досі послуговуються рівняннями трьох моментів, якщо недоступні програми типу SCAD або LIRA, але аналітичні [2; стб. 716] розв'язки рівнянь трьох моментів одержані лише для окремих випадків. Наприклад, у [3; с. 240] запропоновано аналітичний розв'язок задачі про згинальні моменти в нерозрізній балці з рівними прогонами, що завантажена зосередженим моментом сил на одному з кінців.

Для застосування результатів окремих елементарних обчислень у розв'язанні складніших задач часто користуються принципом незалежності дії сил [3; с. 28, 29]. Так, за допомогою цього принципу і функції згинальних моментів, що є розв'язком вищезгаданої задачі, можна записати функцію згинальних моментів у нерозрізній балці, що завантажена різними зосередженими моментами на обох своїх кінцях. Нажаль, подальші узагальнення аналітичного розв'язання задачі [3; с. 240] неможливі.

Назвемо *функцією внутрішнього зусилля* (згинального моменту або поперечної сили) функцію двох аргументів, один з яких задає розташування зовнішніх сил, а другий – перерізу, в якому визначається внутрішнє зусилля. Найпростіше складати функції зусиль для консольної балки. Цей окремий випадок не вимагає попереднього обчислення опорних реакцій. Можна записати функції внутрішніх зусиль для окремої одиничної зосередженої сили, що рухається