

УДК [622:33.003.658.05](0.43.3)

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ФИЗИКИ ГОРНЫХ ПРОЦЕССОВ

Гринев В. Г., Деуленко А. И.

(ИФГП НАНУ, г. Донецк, Украина)

Николаев П. П.

(Донецкая облгосадминистрация, г. Донецк, Украина)

Череповский П. В.

(ГП «Орджоникидзуголь», г. Енакиево, Украина)

Технологічні аспекти фізики гірничих процесів були показані на прикладах досліджень процесу газовиділення при очисній виїмці вугілля і вивчення раціональної експлуатації гірничо-шахтного устаткування. Такий підхід забезпечує безпечну і ефективну розробку вуглегазових родовищ.

The technological aspects of physics of mountain processes are shown on the examples of researches of process selection of gas at the cleansing coulisse of coal and study of rational exploitation of mountain-mine equipment. Such approach provides safe and effective development deposits of coal.

В настоящее время научные исследования горных процессов проводятся в формате специальностей 05.15.02 – «Подземная разработка месторождений полезных ископаемых» и 05.15.09 – «Геотехническая и горная механика» (ранее: «Физические процессы горного производства», в самом начале: «Физика твердого тела (горных пород)»). В период формирования второй специальности (более 40 лет назад) между двумя специальностями была очень тонкая грань. Сейчас есть разница, хотя и небольшая – смотря как интерпретировать результаты.

В паспорте специальности «по разработке» декларируются исследование и оптимизация главных параметров технологических процессов, совершенствование технологических процессов. В паспорте «по механике» – исследование закономерностей механических процессов, прямые и обратные процессы при переходе сред... при ведении горных работ. Выражения «горные процессы» нет в обоих паспортах специальностей.

Формулировка задачи технологии как науки представлена в энциклопедии [1]. Горная же технология, по определению, является совокупностью приемов и способов изменения природного состояния недр Земли [2]. Но чтобы что-то изменять – надо знать количественную оценку этого «что-то». И получается, что технологи должны либо сами выявлять физико-механические закономерности, происходящие в горных породах, либо хотя бы их знать и учитывать результаты исследований проводимых специалистами смежных специальностей.

Технологическая схема горнодобывающего предприятия реализуется в виде цепи последовательно осуществляемых процессов и включает ряд звеньев – основных и вспомогательных.

Управление и контроль технологическими процессами осуществляется посредством параметров. Таким образом, параметр - величина характеризующее какое-либо свойство процесса, явления или системы, машины, прибора [2]. У горняков при эксплуатации месторождений полезных ископаемых возникает необходимость учитывать большое количество технологических параметров, потому что горное дело предполагает много процессов.

Так, при разработке угольных месторождений параметры характеризуют следующие горные процессы [2]:

- проведение вертикальных, наклонных и горизонтальных горных выработок;
- вскрытие угольных пластов;
- порядок разработки пластов и режим горных работ;
- подготовка системы разработки (размеры и ориентация очистных забоев, столбов, целиков);
- механизированная выемка угля (ограничения связанные с физическими параметрами);

- управление кровлей выработанного пространства (процессы в горном массиве);
- крепление очистных и подготовительных забоев;
- транспортировка угля и породы;
- проветривание выработок (связь технологических и физических параметров);
- дегазация углепородного массива (управление физическими параметрами) и т.д.

При проектировании эксплуатации конкретных угольных месторождений, а также в случае возникновения отличий во время производственных процессов от запроектированных горно-геологических и горнотехнических условий возникает проблема выбора значений необходимых технологических параметров.

Однозначно, в современных условиях выбирать технологические параметры эксплуатации угольного месторождения следует, исходя из возможного по техническим и финансовым условиям объема производства угольной продукции, в привязке к диапазону равновесных предельных издержек и доходов [3]. В мировой практике такой объем производства считается рациональным, при котором производитель получает максимум прибыли или минимум убытков [4].

На достижение определенного объема добычи угля при эксплуатации углегазового месторождения в значительной степени оказывает влияние метанообильность угля. Стабильную и безопасную работу на опасных по метану пластах может обеспечить контроль времени формирования опасной концентрации метана в очистных забоях.

Управление процессом газовыделения в очистном забое возможно через связь физического параметра в виде коэффициента массопереноса метана в угле, значение которого поддается контролю в натуральных условиях, и технологического параметра – скорости движения очистного забоя, которая регулируется [5]. Связь технологических и физических параметров сформулирована в виде условий (рис. 1):

$$0,0001 \div 0,0000000000000001$$

$D_f > 10^{-6}$ $D_f < 10^{-10}$

Рис. 1. Предельные значения коэффициента массопереноса метана при оценке области влияния фактора метана на скорость подвигания очистного забоя

Главными физическими параметрами, которые влияют на эффективность технологии добычи угля, являются количество метана в угле и коэффициент его массопереноса в угольном веществе D_f ($\text{м}^2/\text{с}$), уровень которого изменяется в пределах от 10^{-4} до 10^{-14} $\text{м}^2/\text{с}$. При значении $D_f < 10^{-10}$ $\text{м}^2/\text{с}$ фактор метана не оказывает влияния на скорость подвигания очистного забоя и она может ограничиваться только техническими возможностями добывающей техники. При уровне коэффициента массопереноса $D_f > 10^{-6}$ $\text{м}^2/\text{с}$ фактор метана сильно оказывает влияние на скорость подвигания очистного забоя и она должна ограничиваться объемом воздуха, который можно подать для вентиляции горных работ.

Для реализации описанного в настоящей работе подхода при выборе технологических параметров добычи угля было разработано устройство для определения количества метана и его давления в угольных пластах опасных по газу и угольной пыли. Способ определения давления и газоносности угольных пластов основан на результатах фундаментальных исследований фазового состояния и механизмов десорбции метана угольного штыба с использованием принципов интегральной десорбметрии. Данный способ и устройство защищены патентами Украины [6-8] и поддерживаются в силе.

Был пройден путь, который включал две модификации экспериментального образца устройства по измерению давления и количества метана, третью модификацию с дополнительной функцией измерения непосредственно коэффициента массопереноса метана (или коэффициента эффективной диффузии) и опытный образец прибора. На рисунке 2 показан прибор, который

имеет все необходимые документы для перевода из экспериментальной серии в промышленную и объединяет все обязательные признаки опытного и промышленного образца прибора [9].



Рис. 2. Шахтный измеритель массопереноса метана ШИММ (ДС-03)

Вторая часть проблемы обоснованности объема производства связана с финансовыми условиями производства угольной продукции. Но сейчас, как правило, оптимизация параметров систем разработки, связанных с управлением горным давлением и выемкой угольного пласта, а также параметров организации очистных работ производится либо вообще без экономических критериев, либо только по критерию минимума затрат при максимально возможном объеме добычи угля.

Если цель оптимизации – отыскание наилучшего решения, то на практике происходит лишь улучшение известных решений. Другими словами, оптимизация – это стремление к совершенству, которое возможно и не будет достигнуто.

Возьмем произвольную систему, которая описывается m уравнениями с n неизвестными. Возможны три варианта:

1. $m = n$, алгебраическая задача, имеем одно решение (если описывается линейными уравнениями);
2. $m > n$, задача переопределена, нет решения, уравнений больше чем неизвестных;

3. $m < n$, задача недоопределена, имеем бесконечное множество решений.

На практике чаще всего приходится иметь дело с задачами 3-го типа. Горному инженеру чаще всего помогает интуиция, позволяющая сформулировать условия для выбора оптимального варианта, а еще здравый смысл, *rationalis* (латынь) – разумно обоснованный.

Вернемся к параметрам, в нашем случае, проектные параметры это независимые переменные, которые определяют решаемую задачу. Число проектных параметров характеризует степень сложности данной задачи: $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$. Целевой функцией будет $(n + 1)$ -мерная поверхность:

$$M = M(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n).$$

Известно один параметр – кривая на плоскости. Два параметра – поверхность в трехмерном пространстве. Три и более – гиперповерхность, она не поддается изображению обычными средствами [10]. Выше перечислялось не менее 20 технологических параметров при добыче угля.

Иногда задачи оптимизации требуют введения нескольких целевых функций, и они могут быть несовместимы одна с другой. Тогда необходимо вводить систему приоритетов – в результате появляется функция компромисса (одна составная целевая функция).

Область, которая определяется всеми n проектными параметрами, формирует пространство проектирования. Оно не столь велико, как может показаться, поскольку оно обычно ограничено рядом условий, связанных с физической сущностью задачи. Ограничения могут быть столь сильными, что задача не будет иметь ни одного удовлетворительного решения.

Для горных задач было введено понятие область рационального проектирования (у некоторых авторов – граница жизнеспособности проекта) [4]. Эта область ограничена возможностями разработчика и показателями месторождения.

С одной стороны: субъект в роли владельца лицензии, с его финансовыми возможностями, материальными и трудовыми ресурсами, возможностью сбыта продукции.

С другой стороны – объект эксплуатации соответствующей классификации запасов и ресурсов полезного ископаемого с конкретными горно-геологическими условиями для добычи сырья по определенной технологии, с извлекаемой ценностью из недр и возможностью обогащения сырья.

На этом материале, используя известные методы оптимизации и критерии эффективности, можно обосновывать пространство проектирования – область рациональной эксплуатации месторождения.

При разработке угольных месторождений в такой постановке задачи ставятся впервые. В этом направлении можно получить много интересных результатов и сфер приложения сил для геологов, физиков, технологов и математиков.

Наряду с газовым, одним из главных факторов эффективности технологии угледобычи является также проблема рациональной эксплуатации горно-шахтного оборудования. В настоящей работе в качестве примера приводится решение сложной прикладной задачи выбора комплектации очистного оборудования, которая не решается обычными методами.

Иллюстрацией деятельности вне области рационального проектирования являются результаты оснащения угольной отрасли комплексами нового технического уровня. Предусматривалось, что создание комплексов нового поколения для добычи угля, позволит обеспечить стабильно высокие нагрузки в сложных горно-геологических условиях, но, несмотря на явный прогресс в создании очистной техники, на украинских государственных шахтах объем добычи угля продолжает снижаться [5]. Комплексы горного оборудования у нас в стране созданы хорошие, но работают плохо.

Следует отметить два момента. Во-первых, очистная техника нового поколения является условием обязательным, но совершенно не достаточным для возрождения уровня угледобычи. Изучение условий эксплуатации современного горного оборудования свидетельствует о необходимости разработки технологических параметров для определенных горно-геологических условий и конкретного оборудования, в том числе с учетом газообильности пластов.

Во-вторых, при низкой отдаче весьма дорогостоящего оборудования такая механизация привела к повышению убыточности угледобычи из-за скачка в повышении себестоимости.

Была поставлена актуальная задача – изучить условия применения угледобывающих комплексов и рекомендовать область рационального проектирования наиболее распространенного отечественного оборудования. Анализ специальной литературы показывает, что выбор области рациональной эксплуатации горношахтного оборудования входит в класс задач, характерной особенностью которых (если только они правильно отображают реальную ситуацию) является большая размерность, обуславливающая необходимость поиска более эффективных алгоритмов оптимизации. О значительном количестве альтернатив вариантов выбора оборудования сейчас говорит факт существования в нашей стране чрезвычайно большого количества типов очистного оборудования: механизированных крепей – 10, выемочных машин – 11 и забойных конвейеров – 19.

Поиск эффективных методов выбора очистного оборудования для конкретных условий позволил установить, что результаты совместной работы разных типов оборудования в значительной степени зависят от уровня взаимосвязи типов очистного оборудования (взаимной обусловленности типов такого оборудования друг другом [1]).

Идея работы заключается в решении многомерной комбинаторной задачи эффективного выбора комплекса типов очистного оборудования на основе классических алгоритмов оптимизации на сетях и графах. В этих исследованиях необходимо следовать от физического смысла задачи к алгоритмическим построениям.

Для наглядности масштаба реальных альтернатив при добыче угля в Донбассе был построен универсальный альтернативный граф фактической области применения комплексов очистного оборудования [11], на котором представлены варианты взаимодействия всех типов очистного оборудования фактически используемого сейчас на шахтах Донбасса, а так же некоторые условия их применения.

В конечном итоге для достижения цели поставленной задачи был построен граф выбора рациональных технологических

цепочек, в которых представлены варианты эффективной разработки угольных пластов для диапазона мощности пласта от 0,8 до 2,2 м с разбивкой на 7 отдельных областей [12]. С данным графом можно работать по выбору горно-шахтного оборудования в конкретной области рационального проектирования. Если выбирать вариант по критерию максимальной добычи, то это можно сделать графо-аналитическим способом. Если же выбирать область рационального проектирования с учетом капитальных затрат и себестоимости добычи угля, то такую задачу можно решить путем применения алгоритмов оптимизации графов Дейкстры и Флойда [13, 14].

В первом случае находится кратчайший путь между двумя выделенными вершинами, а во втором – кратчайший путь между каждой парой вершин. Алгоритм, который предложил в 1959 году Дейкстра, считается одним из наиболее эффективных алгоритмов решения подобных заданий. Описание алгоритма Дейкстры приведено в работе [12].

При решении задачи выбора цепочки горно-шахтного оборудования можно задавать в качестве ограничения верхнюю границу по капитальным расходам на приобретение оборудования, учитывать предельные значения участковой себестоимости, газового фактора, пропускной способности транспортной цепочки, вводить ограничения с графа худших вариантов эффективности технологических цепочек и т.д.

В качестве объекта для примера выбора структуры технологической цепочки при добыче угля выступает ОП «Шахта «Трудовская» ГП «Донецкая угольная энергетическая компания», где поставлено задание подбора оборудования для нового участка по пласту l_4 мощностью 1,55 м.

После отбора компонента графа выбора рациональной технологической цепочки, построения соответствующей сетевой модели и ее матричного представления был реализован алгоритм Дейкстры для выбора кратчайшего пути. В результате решения алгоритма получена сеть, которая представлена на рисунке 3.

Кратчайший путь от вершины а к b11 пролегает через вершины 2-6-8-11 и составляет 759,3; к b12 по маршруту 2-6-9-11 и равняется 757,3; b13 через вершины 5-7-10-13, что равняется

672,9. Поскольку $757,3 > 672,9 < 759,3$, то кратчайшим путем сетевой модели выбора очистного оборудования есть путь с а в b13 через вершины 5-7-10-13.

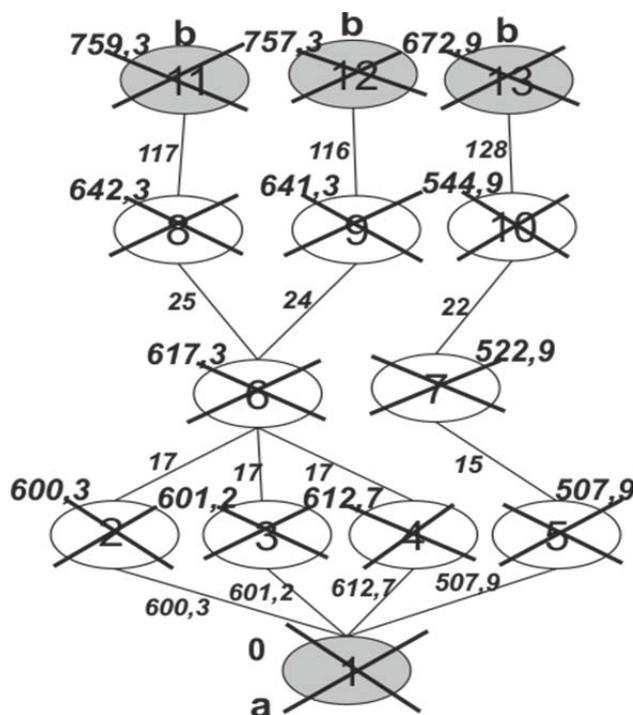


Рис. 3. Сетевая модель выбора очистного оборудования путем поиска кратчайшего пути алгоритмом Дейкстры

После перевода данной сети в натуральный граф, полученная визуализация рациональной цепочки очистного оборудования: Лл = 310 м - ЗКД90Т - 2ГШ68Б - СПЦ271, с ожидаемой добычей 1870 т/сут. и себестоимостью 508 грн/т. Годовая прибыль от реализованного угля составит более 18 млн грн.

Таким образом, в настоящей работе приведено два примера решения сложных технологических задач на базе исследований по физике горных процессов:

– технически возможный объем добычи угля при эксплуатации углегазового месторождения можно оценивать путем контроля физического параметра в виде коэффициента массопереноса метана специально созданным прибором ШИММ (ДС-03);

– выбор комплекса очистного оборудования для добычи необходимого объема угля с учетом капитальных затрат и себестоимости добычи угля можно сделать путем оптимизации графа

выбора рациональной технологической цепочки алгоритмом Дейкстры.

СПИСОК ССЫЛОК

1. Советский энциклопедический словарь. М : Советская энциклопедия. Изд. четвертое, 1998. — 1599 с.
2. Горная энциклопедия / Гл. ред. Е. А. Козловский. Ред. кол. : М. И. Агошков, Л. К. Антоненко, К. К. Арбиев и др. — М. : Сов. энциклопедия в 5 т. 1991.
3. Макконнелл К. Р. Экономикс: принципы, проблемы, политика / К. Р. Макконнелл, С. Л. Брю. — В 2-х т. Пер. с англ. 11-го изд. Т I — М. : Республика, 1993. — 399 с.
4. Гринев В. Г. Оценка и выбор рациональных параметров подземной разработки рудных месторождений Якутии. — Автореф. дис... д-ра наук: 05.15.02 // Институт горного дела СО РАН, Новосибирск, 1993. — 30 с.
5. Гринев В. Г. Обоснование технологических параметров выемки угля на углегазовых месторождениях / В. Г. Гринев, Г. П. Стариков, С. Е. Дегтярь, П. П. Николаев // Материалы II межд. конф. «Подземные катастрофы: модели, прогноз, предупреждение». — Днепропетровск. — 2011. — НГУ — С. 24—30.
6. Пат. України № 89740, МПК (2009):E21F7/00. Спосіб визначення тиску і метаноносності вугільного пласта / А. Д. Алексеев, В. О. Васильковский, Г. П. Стариков, В. З. Брюм: заявник і патентотримач Інститут фізики гірничих процесів НАН України. — заяв. 23.03.2009; опубл. 10.07.2009, Бюл. № 13.
7. Пат. України № 96884, МПК (2010):E21F7/00. Пристрій для виміру тиску й газоемності вугільного пласта / А. Д. Алексеев, В. О. Васильковский, Г. П. Стариков, В. З. Брюм, В. Г. Гриньов, Я. В. Шажко, Л. М. Прокоф'єва: заявник і патентотримач Інститут фізики гірничих процесів НАН України. — заяв. 06.12.2010; опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.
8. Заявка на пат., МПК (2013):E21F5/00:G01L7/00. Пристрій для вимірювання ефективної дифузії газу в вугіллі / В. Г. Гриньов, Г. П. Стариков, В. В. Завражин, Ю. О. Службин, О. Г. Худолей, Е. А. Навка: заявник і патентотримач Інститут фізики гірни-

- чих процесів НАН України. — заяв. 29.03.13; реєстр. № а201303910.
9. Закон України «Про охорону прав на промислові зразки» / Введено в дію Постановою ВР №5460 (5460-17) від 16.10.2012.
 10. Шуп Т. Решение инженерных задач на ЭВМ: Практическое руководство / Т. Шуп. — Пер. с англ. — М. : Мир, 1982. — 238 с.
 11. Николаев П. П. Исследование области рациональной эксплуатации очистного оборудования на шахтах Донбасса с помощью теории графов и программы STATISTICA / П. П. Николаев // Материалы международной конференции «Форум горняков 2012». — Днепропетровск, 2012. — с. 56.
 12. В. Г. Гринев. Алгоритмы оптимизации сетевых моделей для выбора рациональных технологических цепочек очистного оборудования / В. Г. Гринев, П. П. Николаев // материалы 3-й межд. науч.-техн. конф. «Техногенные катастрофы: модели, прогноз, предупреждение». — Днепропетровск. — 2013. — НГУ — С. 90—95.
 13. Dijkstra E. W. A note on two problems in connexion with graphs, Numer Math., 1, 1959. — pp. 269—271.
 14. Floyd R. Z., Algorithm 97, Shortest Path, Comm. ACM, 5, 1962. — p. 345.