© Н.Н. Красюк, С.Н. Кашкарев, С.С. Решетов, 2006

УДК 622.272

Н.Н. Красюк, С.Н. Кашкарев, С.С. Решетов

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ГАЗА В РАЗГРУЖЕННОМ ГОРНОМ МАССИВЕ К СКВАЖИНЕ

Семинар № 11

Эффективное извлечение метана угольных месторождений для промышленного использования возможно при разгрузке газонасыщенных угольных пластов от горного давления и перехода значительной части газа в свободное состояние. Обеспечить максимальную полноту извлечения газа необходимой кондиции возможно применением аккумулирующей емкости значительного объема, в качестве которой рекомендуется объем разгруженного горного массива. Основные свойства объема – нестабильность размеров, фильтрационных и коллекторских характеристик, а также требований потребителей к извлекаемому газу – потребовали исследований газодинамических процессов в массиве при извлечении газа скважиной.

На основе фундаментальных законов газовой динамики нами разработана адаптивная математическая модель движения метана в разгруженном горном массиве, установлены основные закономерности газодинамического состояния газонасыщенного массива при извлечении метана скважинами

Математическое моделирование притока газа из сближенного пласта в выработанное пространство осуществляется на основе решения задачи в вертикальной плоскости в области KLMN (рис. 1.), при этом на границе с пластом-спутником задается поток газа:

$$\frac{\partial P}{\partial x}\Big|_{x=0} = -\frac{\mu}{\rho \cdot k} \cdot f \cdot \left(\bar{y}\right); \quad \bar{y} = L_{упл} - y$$

где: $f = (\overline{y})$ - интенсивность газовыделе-

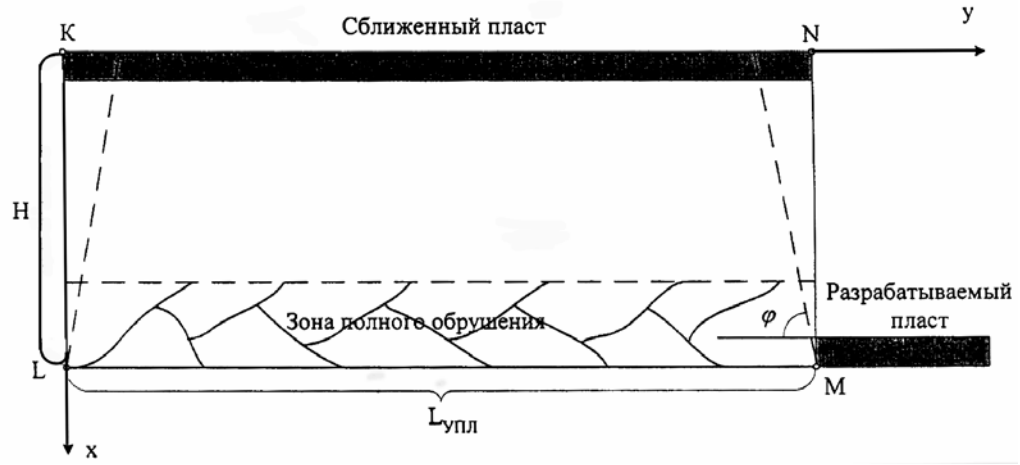

Рис. 1. Область решения задачи

Исходные данные для экспериментальных участков

Шахта, лава	J, кг/с	H, м	y_m, м
«Октябрьская»			
886	0,021	66	62
884	0,044	66	62

ния из сближенного пласта, кг/м^2.с.

Эта функция в зависимости от расстояния от лавы $\bar{y}$ определялась по формуле:

$$f(\bar{y}) = \frac{J}{y_m l_{04}} \cdot \frac{\bar{y}}{y_m} \exp\left(-\frac{\bar{y}}{y_m}\right) f(\bar{y}),$$

где J - общее газовыделение из подработанного горного массива, кг/с; y_m - расстояние от лавы, при котором $f(\bar{y})$ имеет максимум, м.

Для оценки y_m применялась эмпирическая формула:

$$y_m = 9 + 0{,}81H$$

При отработке пласта «Полысаевский» на шахте «Октябрьская» газовыделение из подработанного горного массива складывается из метана, поступающего из сближенных пластов, а также из остатков извлеченного ранее пласта «Полысаевский-1». Эти источники метановыделения заменяются эквивалентами, расположенным на расстоянии «Н» от разрабатываемого пласта; это расстояние рассчитывается по формуле:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^{3} m_i H_i \left(1 - \frac{H_i}{H_p}\right)}{\sum_{i=1}^{3} m_i \left(1 - \frac{H_i}{H_p}\right)}$$

где H_p - расстояние по нормали между разрабатываемым и смежным пластами, при котором газовыделение из последнего практически равно нулю.

Таким образом, для экспериментальных участков исходные данные для моделирования притока газа в выработанное пространство представлены в таблице.

Кроме исходных данных, представленных в таблице, необходимо задать распределение проницаемости в рассматриваемой области. Для этого воспользуемся формулой:

$$K(H - x) = K(H) \cdot \exp\left[-0{,}025(H - x)\right]$$

где m_i - мощность соответствующего сближенного пласта; H_i - расстояние между сближенным и разрабатываемым пластом;

По данным ВостНИИ значение проницаемости в зоне полного обрушения:

$$K(H) \approx 10^{-10}, \text{м}^2.$$

Результаты моделирования движения газа из подработанного сближенного пласта в выработанное пространство для экспериментальных участков представлены на рис. 2. Математическое моделирование движения газа в выработанном пространстве к горным выработкам и к скважине осуществляется на основе задачи в плоскости, параллельной плоскости напластования на уровне разрабатываемого пласта. Для решения задачи необходимо задать распределение проницаемости в выработ-

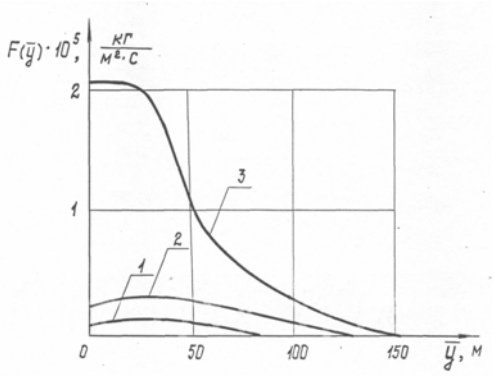

Рис. 2. Результаты математического моделирования

танном

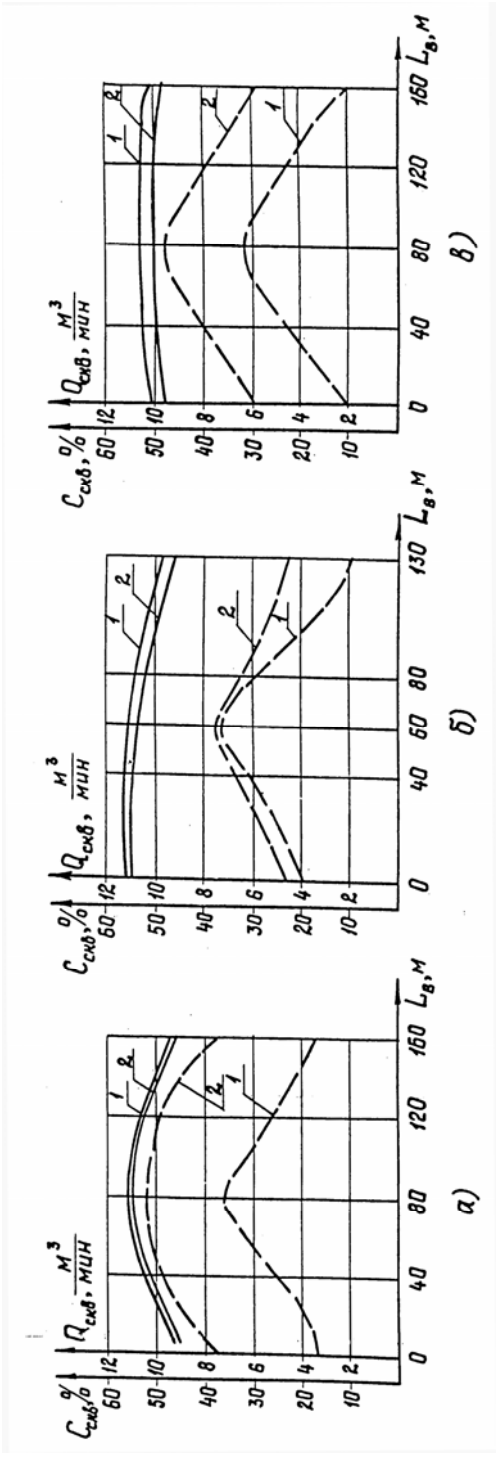

Рис. 3. Зависимость расхода и концентрации метана от расстояния до вентиляционной выработки: а) – лава 886, шахта «Октябрьская»; б) - лава 884, шахта «Октябрьская»; в) - лава 1725, шахта «Комсомолец»

пространстве. Для этого можно воспользоваться эмпирической зависимостью проницаемости от расстояния до лавы:

$$K(x)=\frac{b}{x^c}$$

Для определения значений коэффициентов *b* и *c* на каждом выемочном участке необходимо пронаблюдать работу одной вертикальной скважины, получить экспериментально ее расходы и концентрацию метана в извлекаемой смеси при различных положениях скважины относительно очистного забоя. Коэффициенты *b* и *c* выбрать из условия минимума для погрешностей расчетов. Для этого определяются значения коэффициентов d_1 и d_2 соответственно расчетами и по фактическим данным наблюдений. Например, d_2 определяется по формуле:

$$d_2(b,c)=\frac{\left[\sum_{i=1}^{n}\left(C^{p}_{скві}-C^{э}_{скві}\right)^2\right]^{1/2}}{\sum_{i=1}^{n} C^{э}_{скві}}\cdot 100\%$$

где $C^{p}_{скві}$, $C^{э}_{скві}$ - расчетная и экспериментальная концентрации метана в извлекаемой смеси; *n* - количество исследованных положений скважины относительно очистного забоя.

После серии численных экспериментов установлены следующие значения коэффициентов:

$b=5\cdot10^{-9}$ $c=0{,}4$ (лава 886)

$b=10^{-10}$ $c=0{,}4$ (лава 884)

При таких значениях коэффициентов погрешность d_1 не превышала 8 %, а d_2 - 10 %.

При моделировании движения газа на выемочных участках с прилегающими старыми выработанными пространствами

необходимо задать приток газа из этих старых выработок, а также содержание метана в этих притоках.

После идентификации модели для каждого выемочного участка моделировалось движение газа в выработанном пространстве при наличии вертикальной скважины, пересекающей почву разрабатываемого пласта. При этом исследовалось влияние на формирование потоков газа таких технологических параметров, как расстояние от точки заложения скважины до вентиляционной выработки, расстояние между скважинами, диаметр скважины, разрежение на ее устье, высота перфорированной зоны скважины. Для каждого рассчитанного варианта в исследуемой области стоились поля давлений и линий тока. Эти поля устанавливают зону подсосов воздуха в скважину из рабочего пространства в призабойное, соотношение этих областей для различных параметров скважины и режимов ее работы. Для выемочных участков, подготовительные выработки которых проведены вприсечку к старым выработанным пространствам, эти поля устанавливают также наличие и интенсивность подсосов газа в скважину из этих погашенных выработок. Изменение параметров скважины влияет на формирование состава газа, выносимого в призабойное пространство, а также извлекаемого скважиной; здесь особое значение имеет расстояние от скважины до старых выработанных пространств и изменение разрежения на устье скважины по мере подвигания очистного забоя. В результате исследования построенных изолиний для каждого варианта получены приток метана в лаву и его концентрация на исходящей с учетом газовыделения из разрабатываемого пласта, а также расход скважины и концентрация метана в извлекаемой смеси на весь период работы скважины.

В результате серии численных экспериментов, проведенных для выбранных участков, установлены зависимости изменения расхода и концентрации метана в извлекаемой смеси при изменении одного из параметров, при остальных фиксированных. На рис. 3 представлены зависимости расхода и концентрации от расстояния между скважиной и вентиляционной выработкой; расстояние до лавы в первом случае составляет 15 м, а во втором – 45 м, т.е. наблюдается сильная аэродинамическая связь между скважиной и очистной выработкой. В этих условиях расход скважины меняется слабо по мере удаления скважины от вентиляционной выработки. Концентрация метана имеет ярко выраженный максимум в середине выработанного пространства для случая лавы в целиках, особенно при небольших расстояниях между скважиной и лавой.

Аналогичные зависимости наблюдаются и в симметричном случае, когда выемочный столб располагается между погашенными очистными выработками, причем в этом случае увеличение расстояния до лавы сказывается слабее. Это связано с тем, что при сдвиге скважины от центра увеличиваются подсосы газа из соответствующей старой выработки, и это является решающим фактором, обуславливающим падение концентрации. В этом случае, когда с одной стороны лавы располагается целик, а с другой – старое выработанное пространство, также существует область максимальных значений концентрации. Она определяется минимальным расстоянием от погашенной вентиляционной выработки, при котором нет потока метана из выработанного пространства в лаву со стороны целика. При разрежении на устье скважины 265 гПа это расстояние составило 60 м.

На рис. 4. представлены зависимости расхода и концентрации от диаметра скважины, которая располагалась в 15 м от лавы, а расстояние до вентиляционной выработки выбиралось для каждого участка из условия извлечения газа с максимальной концентрацией.

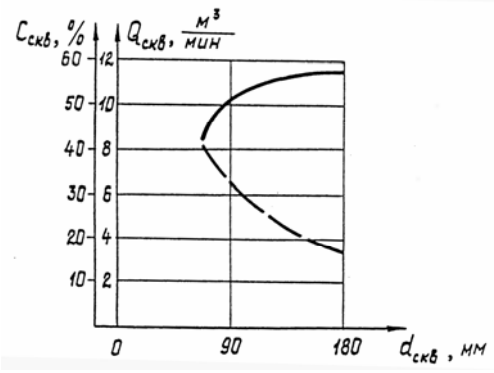

Рис. 4. Зависимость расхода и концентрации метана от диаметра скважины:
———расход; - - - - концентрация

Анализ этих зависимостей показывает, что скважины малых диаметров (76 м) извлекают газ с высокой концентрацией метана, но их расходы столь невелики, что не могут обеспечить допустимую концентрацию метана в лаве. Значительное увеличение диаметра скважины (до 180 м и более) ухудшает показатели попутной добычи метана, т.к. расходы растут незначительно, а концентрация метана в извлекаемой смеси падает ниже требуемой.

На рис. 5. представлены зависимости расхода и концентрации метана в смеси от разрежения на устье скважины, которое, в свою очередь, зависит от количества извлекаемого газа. Поэтому при моделировании задается разрежение у забоя скважины, а затем по полученному расходу с учетом глубины скважины и ее диаметра устанавливается разрежение на устье скважины. Приведенные зависимости построены для случая работы скважины на расстоянии 15 м от лавы. Для симметричных выемочных участков при расположении скважины в середине выработанного пространства эти зависимости имеют близкий характер. Для лавы 886 характер зависимостей отличается при изменении расстояния между скважиной и вентиляционной выработкой.

расстояние до вентиляционной выработки уменьшается, подсосы воздуха увеличиваются, и концентрация метана в извлекаемой смеси резко падает. Если расстояние между скважиной и вентиляционной выработкой составляет 40 м, то с увеличением разрежения концентрация газа в смеси даже несколько возрастает (кривая

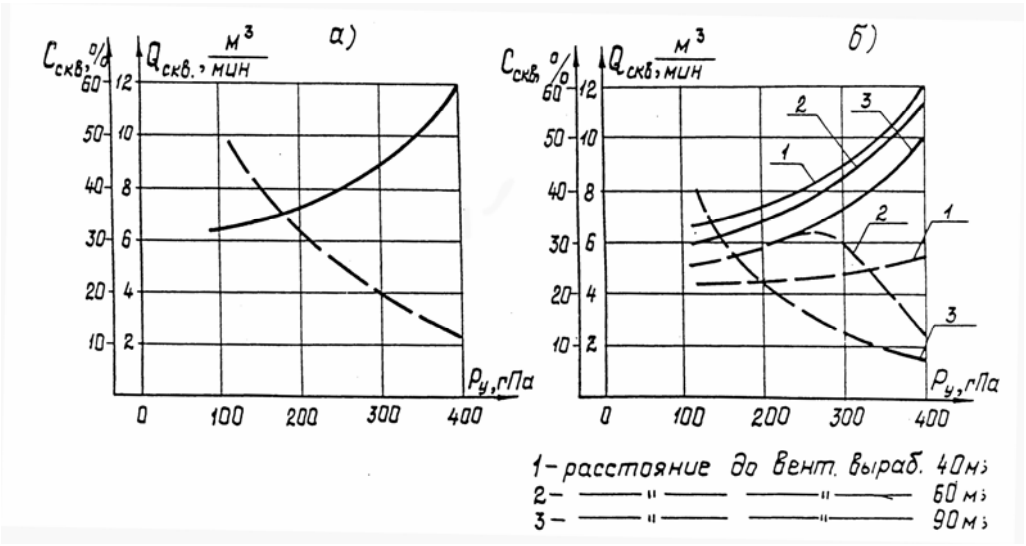

Рис. 5. Зависимость расхода и концентрации метана от разрежения на устье скважины

1), то как это расстояние становится оптимальным при разрежении около 400 гПа.

Расстояние 90 м до вентиляционной выработки близко к оптимальному при разрежении около 135 гПа; рост разрежения изменяет оптимальное расстояние и увеличивает подсосы воздуха из рабочего пространства лавы – концентрация метана в смеси резко падает (кривая 3).

Аналогичные исследования зависимости концентрации газа в смеси от разрежения на устье были проведены для различных положений скважины относительно очистного забоя; эти расстояния составляли 35 м,70 м, 100 м. Для каждого случая получен диапазон значений разрежения, при которых извлекаемый газ будет содержать не менее 30 % метана. Режим работы скважины по мере подвигания очистного забоя, заданные разрежения можно поддерживать с помощью запорной арматуры, установленной на каждой скважине.

Таким образом, подземное аккумулирование метана заключается в следующем: в результате отработки запасов угля создается область повышенной газопроницаемости, содержание метана, в которой изменяется от долей процента до 90-95 %.

Параметры создаваемого коллектора определяются на основе математического моделирования газодинамических процессов разгруженного горного массива и уточняются на основе натурных исследований по разработанной методике с учетом развития горных работ и параметров вентиляции.

Извлечение кондиционного метана осуществляется вертикальными скважинами с поверхности, определенной конструкции и параметров заложения, которые на первом этапе эксплуатации обеспечивают необходимую степень дегазации добычного участка.

Коротко об авторах

Красюк Н.Н. – профессор, доктор технических наук,
Кашкарев С.Н., *Решетов С.С.*

кафедра «Подземная разработка пластовых месторождений», Московский государственный горный университет.