Ю.В.Шувалов, И.А.Павлов, В.Н.Бобровников, М.М.Попов, А.П.Веселов

УДК 622.817:622.33.012.2

ГЕОДИНАМИКА И ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА НА ШАХТАХ ВОРКУТЫ

Приведены результаты анализа характера нарастания с глубиной метаноносности пластов и вмещающих пород угольных месторождений Печорского бассейна и влияющих на него факторов. На базе данных натурных измерений динамики метановыделения в выработки выемочных участков ряда шахт Воркутского месторождения и их статистической обработки показано влияние на увеличение относительного метановыделения роста размеров выработанного пространства – числа отработанных столбов и удаления очистного забоя от разрезной выработки. Проанализирована эффективность применяемых схем дегазации для снижения газовыделения из окружающего разрабатываемый пласт горного массива. Предложены геомеханическая и газодинамическая модели подработанного горного массива сложного строения, позволяющие обосновано рассчитывать параметры распределения проницаемости по его объему, потоков утечек воздуха из очистного забоя и газовоздушной смеси в выработанных пространствах.

Results of a character analysis of depth methane increase in beds and bearing strata at the Pechora coal fields and influencing factors are stated. On the basis of in-situ measurements and statistical treatment of methane discharge at mining levels of several shafts at the Vorkuta coal field the influence of open area expansion (e.g. the number of worked-out pillars and breakage face movement off the gallery) on the increase of relative methane discharge. Effectiveness of degassing schemes for reducing gas discharge from the rock massif surrounding the mined bed has been analysed. Geo-mechanical and gas-dynamic models of a complicated underworked massif have been developed that enable valid parametric calculation of volumetric permeability, air leak flows from breakage face and air-gas mixture in the open area.

* * *

Печорский угольный бассейн включает ряд угленосных районов, в том числе Воркутский, в котором продуктивные части разреза угленосной толщи представлены Воркутской и Печорской сериями. Средний коэффициент их угленосности 1,7-1,8. В разрезе Воркутской серии насчитывается до 160 угольных пластов и пропластков суммарной мощностью до 50-70 м. Наиболее угленасыщенной является средняя часть – Рудницкая подсвита. Печорская серия включает более 110 пластов и пропластков угля общей мощностью около 70 м. Углевмещающие породы представлены преимущественно песчаниками, алевролитами и аргиллитами. Во всех разностях пород имеются включения угольного вещества.

Воркутское месторождение представляет собой крупную брахисинклинальную складку (мульду) длиной 34 км и шириной до 13 км (300 км^2). Максимальная глубина залегания восьми промышленных угольных пластов 1200 м. Наиболее стабильными по мощности и площади распространения являются пласты Мощный, Тройной, Четвертый, Пятый и Восьмой. Расстояние между пластами Тройной-Четвертый достигает 18-30 м, Четвертым-Пятым – 33-35 м, Мощным и Пятым – 32-35 м. При этом пласт Мощный включает в себя пласт Четвертый на отдельных участках шахтного поля и разделяется на пласты Тройной и Четвертый на остальной площади. Мощность пластов колеблется: Мощный 3,5-4,5 м, Тройной 2,0-2,9, Четвертый 1,4-1,7 м, Пятый 0,9-1,1 м; углы падения от 0 до 26°; зольность угля от 15 до 23 %.

Разрабатываемые пласты Мощный, Тройной, Четвертый и Пятый находятся в зоне интенсивного газового влияния угленосной толщи вмещающих пород, в верхней

части которой (подрабатываемой) выделяются пласты m_1 (0,6 м) на расстоянии 30-40 м от пласта Тройного ($n_{12+13+14}$) и m_2 (0,7 м) на расстоянии 40-50 м. В нижней части (надрабатываемой) под пластом Четвертым (n_{11}) находятся пласты n_7 (0,5 м на расстоянии 10-15 м), n_9 (0,1-0,5 м на расстоянии 20-25 м), n_8 (0,3 м, расстояние 30-35 м), Пятый (n_7 – до 1,0 м, расстояние 40-50 м).

Газовый режим Воркутского месторождения достаточно сложный и определяется высокой природной газоносностью угленосной толщи, низкой газопроницаемостью и наличием экранирующего слоя многолетней мерзлоты (40-130 м), совпадающей по размерам с мощностью зоны газового выветривания (30-200 м). В метановой зоне природная метаноносность угольных пластов имеет криволинейную зависимость от глубины погружения пластов (считая по вертикали от поверхности метановой зоны), причем происходит постепенное увеличение ступени нарастания метаноносности с глубиной, от 10-15 до 70-90 м. Для большинства месторождений эта зависимость описывается эмпирическими уравнениями гиперболического вида, а для пластов Воргашорского месторождения – параболическими уравнениями.

Выявленный на Воркутском, Воргашорском, Усинском и Сейдинском месторождениях характер нарастания метаноносности с глубиной, с постоянным уменьшением градиента, обусловлен прежде всего нелинейной зависимостью изменения газоносности углей от газового давления (рис.1), линейный рост которого в угольных пластах прослежен на Воркутском месторождении до глубин 600-700 м.

Для шахтных полей Воркутского месторождения по результатам многолетних исследований ПечорНИИПроекта установлены эмпирические зависимости изменения газоносности угольных пластов на тонну сухой беззольной массы $X_г$ от глубины ΔH залегания по отношению к зоне газового выветривания $H_{гв}(\Delta H = H - H_{гв})$,

$$X_г = A - \frac{B}{\Delta H + C},$$

где A, B, C – эмпирические коэффициенты, значения которых изменяются для шахт соответственно 22,9-45,0; 5678-17879; 228-447.

Количественные данные о метаноносности основной углесодержащей Интинской свиты в зависимости от глубины и зольности угля приведены в табл.1.

Таблица 1

Метаноносность пластов Интинской свиты

Абсолютные отметки, м	Метаноносность ($м^3$/т) при среднепластовой зольности, %		
	20	30	40
–100	3,4	3,0	2,6
–200	4,4	3,9	3,4
–300	4,9	4,4	3,8
–400	5,6	4,9	4,2
–600	6,5	5,6	4,8

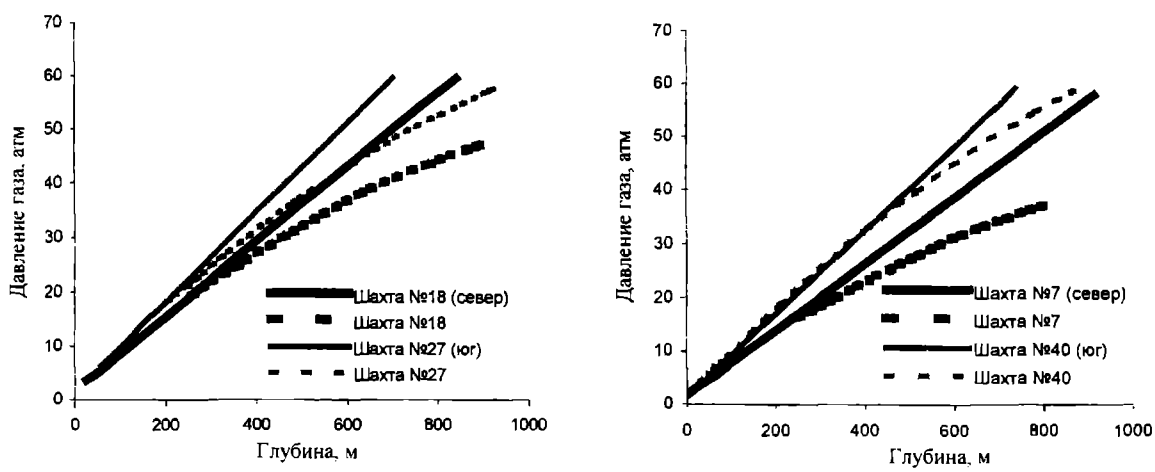


Рис.1. Давление газа в зависимости от глубины (по данным В.Я. Коровиной)

Связь газовыделения с газоносностью угля в пластах имеет линейный характер (рис.2).

Если в угольных пластах основное количество газа находится в связанном состоянии (до 90-95 %), то угленосная толща содержит значительные количества его в свободном состоянии, а газоемкость пород определяется пористостью. При этом не исключается и нахождение газа, сорбированного рассеянной органикой. В первом случае подвижность газа определяется возможными путями его миграции по трещинам, выработкам (скважинам) и прочим фильтрационным путям. Содержание газа в полостях и трещинах может достигать сотен кубометров. При этом газопроницаемость углей Воркутского месторождения оценивается десятыми долями дарси, а пород – тысячными долями миллидарси.

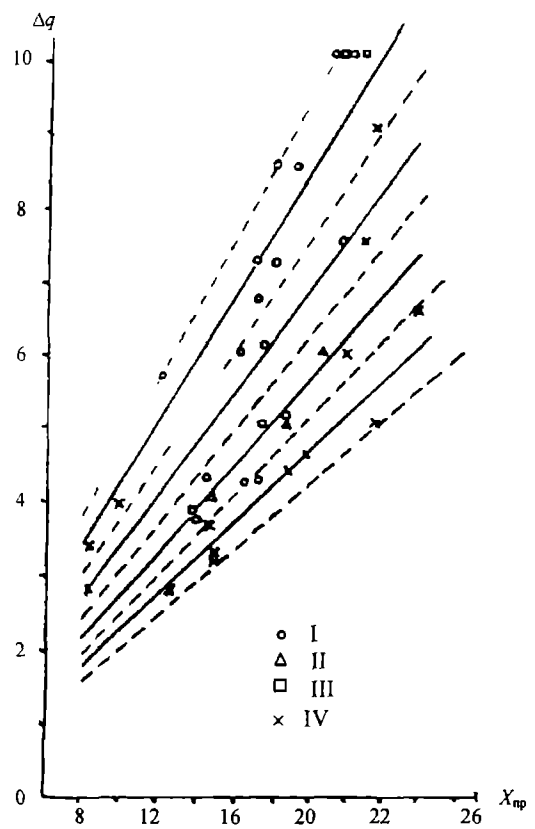


Рис.2. Удельные газовыделения в зависимости от газоносности угля (по данным В.И.Фомичева – 35 лав)

I – пласт Тройной ($\Delta q = 0{,}241X - 0{,}59$); II – пласт Четвертый ($\Delta q = 0{,}287X - 0{,}75$); III – пласт Первый ($\Delta q = 0{,}345X - 0{,}82$); IV – пласты Двойной. Восьмой, Пятый ($\Delta q = 0{,}423X - 0{,}89$)

Существенное влияние на газоносность оказывает литологический состав пород и содержание в них углистого вещества. При содержании горючей массы 20-40 % метаноносность аргиллитов составляет 3,5-5,6 $м^3/т$ на глубинах 230-1040 м и снижается до 2,4 $м^3/т$ при уменьшении горючей массы на 15-18 %. При отсутствии органики содержание метана в песчаниках колеблется от 0,05 до 0,25 $м^3/т$, в аргиллитах – от 0,5 до 0,95 $м^3/т$. Более высокое содержание метана в аргиллитах можно объяснить также наличием органического вещества, служащего сорбентом для газа.

Газовыделение на выемочных участках, разрабатывающих угольные пласты в углеродсодержащей толще, зависит не только от газоносности самого разрабатываемого пласта, но, в большей мере, от газовыделения из окружающего массива: угольных пластов и пропластков, пород и т.д. При этом играют важную роль естественная и техногенная газопроницаемость толщи, зависящие от систем разработки, способа управления кровлей, мощности разрабатываемого пласта, угла падения, литологического состава и строения массива вмещающих пород и т.д.

Оценка газовыделения в горные выработки и прогнозные расчеты выполняются в большинстве случаев на основе эмпирических зависимостей.

Прогноз ожидаемой газообильности шахт Воркутского месторождения выполнялся многими исследователями (Э.М.Шейман, Ю.Н.Бессонов, Д.Е.Разварин, Ю.И.Калимов и др.). По их данным для всех шахт прослеживается линейная зависимость метанообильности от глубины работ до отметки 600-700 м с последующим асимптотическим уменьшением градиента. Характерными значениями ступени метанообильности являются 7 м на севере, до 20 м на юге и 12-15 м на западе месторождения. Линейные зависимости газообильности шахт Воркуты от глубины работ H приведены в табл.2.

На газообильность выемочных участков существенное влияние оказывает порядок выемки пластов: при отработке участков пластов первыми в свите газообильность в

Таблица 2

Газообильность шахт Воркуты

Шахта	Диапазон глубин от наносов H, м	Газообильность, м^3/т
«Воркутинская»	80-649	0,1H-4,2
«Северная»	67-611	0,068H-6,15
«Юр-Шор»	50-450	0,08H-15,0
«Центральная»	108-734	0,065H-11,9
«Промышленная»	47-610	0,42H-2,6
«Комсомольская»	48-671	0,083H-3,0
«Южная»	60-402	0,14H-1,83
«Заполярная»	40-444	0,12H-4,9
«Аяч-Яга»	40-232	0,2H-9,05

7-9 раз выше, чем после их под- или надработки (рис.3).

Ступень роста метанообильности участка на 1 м^3/т на глубинах 400-600 м составляет по вертикали 8 м, а на 600-800 м – 10 м. Газообильность очистных выработок изменяется с глубиной аналогично газоносности, но темпы роста с глубиной замедляются. Длина лавы оказывает косвенное влияние. Ее оптимальная величина 200-220 м. Более существенным является расстояние лавы до разрезной печи и число ранее (выше) отработанных столбов.

Шахтные наблюдения за газообильностью выемочных участков велись на шахте «Заполярная» в лавах 124-ю, 224-ю, 324-ю, 424-ю пласта Четвертого и шахте «Комсомольская» в лавах 141-с, 241-с, 341-с пласта «Мощного». Длина выемочных столбов на шахте «Заполярная» 611-838 м, длина лавы 155-165 м, мощность пласта 1,4-1,5 м, глубина работ от зоны метановых газов 487-595 м. На шахте «Комсомольская» длина выемочных столбов 1320-1420 м, лавы 95-120 м, мощность пласта 3,9-4,2 м, глубина 775-812 м.

По пласту Мощному на шахте «Комсомольская» газовыделение с 20,8 м^3/т в лаве 141-с увеличилось до 48,6 м^3/т в лаве 341-с. Степень нарастания газовыделения существенно ниже, чем по пласту Четвертому, где фактическая газообильность изменялась от 58,3 до 86,2 м3/т при росте глубины работ на 115 м.

При отработке столба 524-ю, расположенного на 17,1 м ниже 424-ю, метанообильность по выемочному участку достигла более 90 м^3/т (табл.3).

По мере удаления лавы от монтажной камеры относительная метанообильность участков изменялась по экспоненциальной зависимости: на шахте «Заполярная» от 8 до 70 м^3/т при расстоянии 700 м и на шахте «Комсомольская» от 12 до 40-50 м^3/т при расстоянии 1000-1200 м.

В первом приближении линеаризация функций $q = f(L_в, \Sigma L_л)$ от длины выработанного пространства $L_в$ и суммарной длины отработанных столбов $\Sigma L_л$ (пролетов) позволяет получить эмпирические зависимости вида

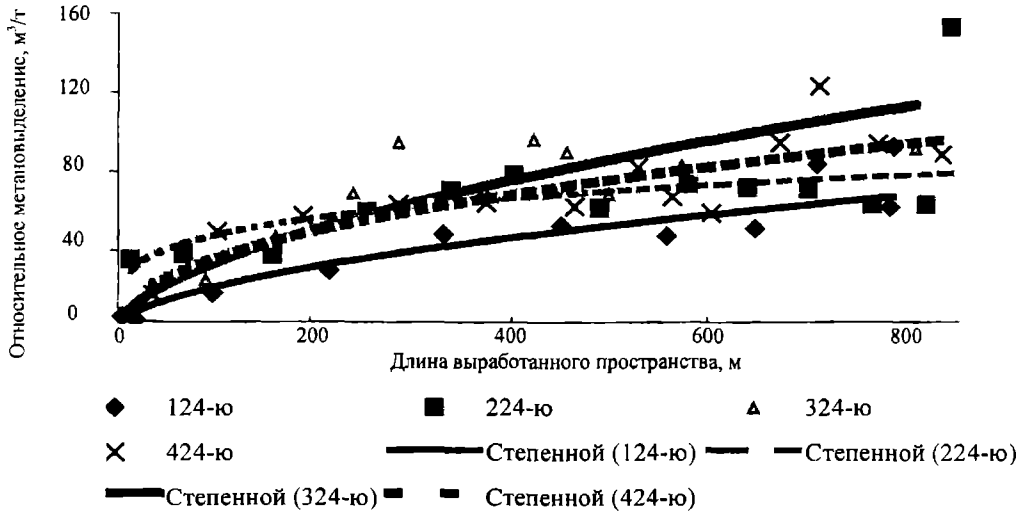
$$q = aL_в + b\sum L_л$$

Таблица 3

Характеристика газового режима добычных участков шахт с учетом дегазации подрабатываемой толщи

Шахта, пласт, лава	Глубина, м	Добыча, т/сут.	Метаноносность, м^3/т	Газовыделение		Газовый баланс, м^3/т			Расход воздуха, м^3/мин
				м^3/мин	м^3/т	Пласт	Верх	Низ	
«Аяч-Яга», J-4, 134-ю	417	1000	16,4	10,4		1,5 (1,5)	4,1 (2,9)	4,8 (4,8)	700
«Заполярная», пл.4, 114-с	662	770	26,3	48	20	4,22 (4,22)	33,8 (4,86)	9,46 (9,46)	1800-2000
«Северная», пл.4, 812-ю	835	1300	22,3	51-77,5	26,6	7,05 (7,05)	43,35 (6,5)	13,1 (13,1)	1500-1800
«Воркутинская», пл.4, 613-ю	858	820-980	29,02	52	20	6,4 (6,4)	23-38 (8,8)	27,2 (27,2)	1800
«Комсомольская», пл.4, 322-Ю	1030	2000	23,5	35,2		2,9 (2,9)	27,4 (2,3)	4,9 (4,9)	2800

а



б

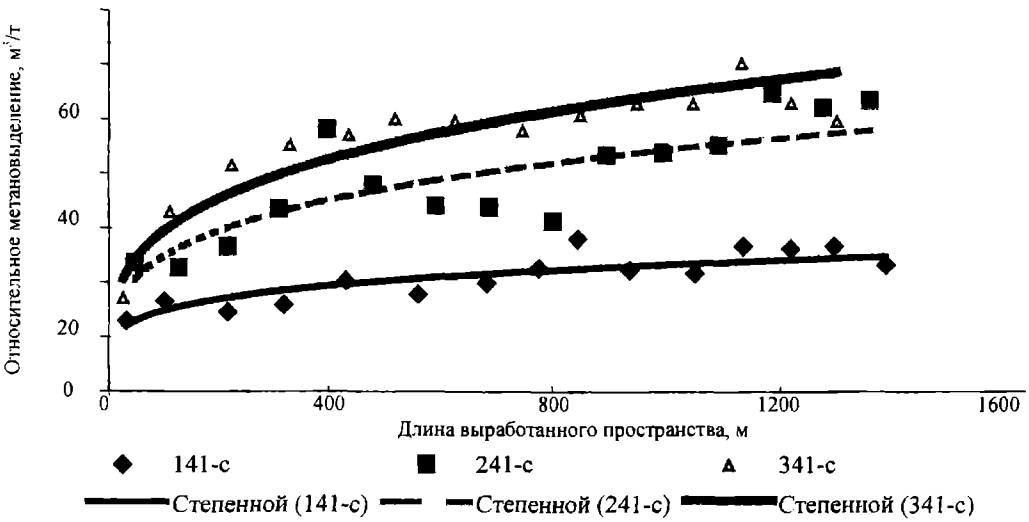


Рис.3. Динамика относительной метанообильности добычных участков на шахтах «Заполярная» (*а*) и «Комсомольская» (*б*)

Общая газообильность выемочных участков по пластам Четвертый и Мощный при нагрузках 1000-1500 т/сутки в среднем доставляет 60-70 м^3/мин, по пласту Пятому на шахте «Северная» – до 90-95 м^3/мин.

Газоносность на глубине 300 м 10-12 м^3/т, на глубине 800-1000 м – 25-28 м^3/т; относительная газообильность, соответственно – 9-10 м^3/т и 60-100 м^3/т.

Газообильность выработок возрастает при подработке угольных пластов. Так, при подработке шахтой «Северная» пластов на шахте «Аяч-Яга» (H = 400 м) газообильность при проходке выработок возросла в 4-5 раз, а газообильность выемочных участков – в 2-3 раза.

В табл.3 приведены данные о газовом режиме добычных участков шахт, разрабатывающих первый пласт в свите (Четвер-

тый) на различных глубинах. Основную роль в газовом балансе выработок участка играют вмещающие углесодержащие породы (угольные пласты и пропластки). Характерным примером являются данные об относительном газовыделении из надрабатываемых спутников пласта Четвертого (табл.4.).

Снижение газовыделения из окружающего разрабатываемый пласт горного массива на шахтах Воркуты достигается дегазацией его восходящими и нисходящими скважинами (рис.4), которые бурят из: 1) выработок, параллельных разрезным, с охраной буровых ниш целиком угля (фланговые выработки); 2) вентиляционных штреков впереди очистного забоя с подключением скважин к сети после прохода лавы; 3) вентиляционных штреков позади очистного забоя (180-200 м).

В двух последних вариантах скважины охраняются лишь многорядной органной крепью, обеспечивающей сохранность сечения выработки для повторного ее использования при отработке соседнего столба (бесцеликовое поддержание).

Дебит метана из скважин зависит от способа охраны, качества и длины обсадки устья скважины, угла наклона скважины при восходящем и нисходящем расположении, расстояния до очистного забоя, обводненности подстилающей толщи и т.п.

В общем случае наиболее стабильной является работа скважин в выработках, охраняемых целиками. Их дебит, в среднем, 5-10 м^3/мин при концентрации метана 70-100 %, зона эффективной работы до 900-1000 м после отхода лавы. Дебит в конечной стадии 4-5 м^3/мин, концентрация метана до 60 %. Практически работа скважин длится 1,5-2 года и даже в ряде случаев 10-15 лет.

Дебит скважин, пробуренных позади лавы, в наибольшей степени зависит от качества бурения (углы наклона, обсадка и пр.). Их дебит, в период стабильной работы (подвигание лавы около 200 м) составляет 7-8 м^3/мин при средней концентрации 70-80 %.

Скважины, пробуренные впереди очистного забоя и подключаемые к газопроводу после прохода забоя, имеют начальный дебит 3-4 м^3/мин с концентрацией метана 60-70 %, в дальнейшем проходят максимум и завершают работу на расстоянии 200-250 м позади лавы при снижении концентрации до 60 %.

Таблица 4

Горно-геологические показатели надрабатываемых пластов при отработке пласта Четвертого на исследуемых объектах

Шахта, лава	Пласт-спутник	Мощность пластов-спутников, м	Среднее расстояние от разрабатываемого пласта до спутника, м	Средний угол падения свиты, град.	Относительное газовыделение из спутников, м^3/т
«Воркутинская», 622-ю	n_{10}	0,3	13,25	6	3,39
	n_9	0,55	15,9		1,2
	n_8	0,3	33,5		1,03
	n_7 (Пятый)	1,2	42,4		6,31
	n_6 (Восьмой)	0,65	57,5		1,7
«Комсомольская», 312-с	n_{10}	0,5	10,27	4	3,79
	n_9	0,2	17,35		1,43
	n_7	0,8	33,61		4,95
	n_6	0,55	45,98		2,46
«Северная», 1012-с	n_{10}	0,35	4,08	6	3,38
	n_9	0,5	10,31		3,84
	n_7	1,15	32,87		6,02
	n_6	0,75	45,97		3,18

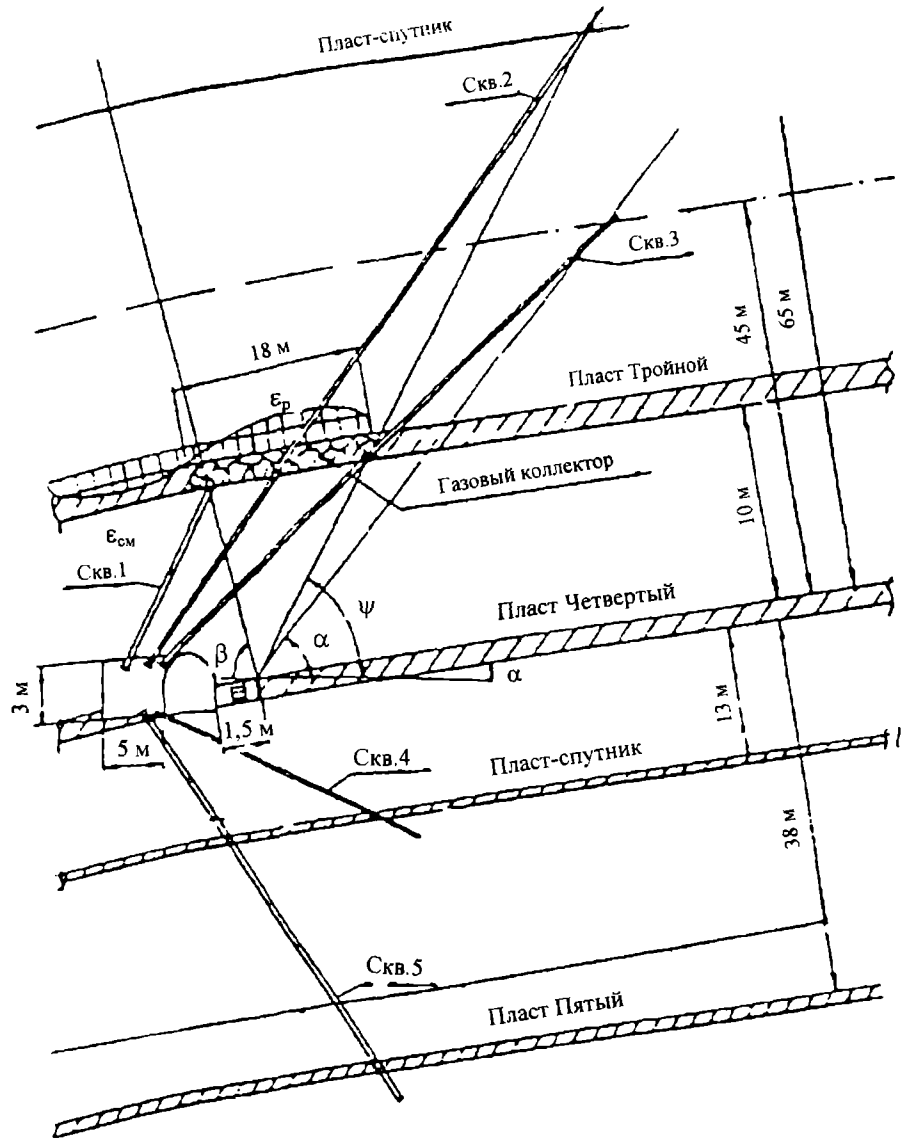


Рис.4. Схемы расположения дегазационных скважин

Принятый нижний предел концентрации метана (60 %) объясняется высоким уровнем подсоса воздуха при транспортировании газа по трубопроводам (0,001-0,004 м^3/м), что в целом снижает концентрацию метана в доставляемой смеси к потребителю на поверхность в 1,5-2 раза.

Нисходящие скважины отличаются значительно меньшей стабильностью работы, чем восстающие, а также существенно, в 2-10 раз, меньшим дебитом. Наиболее стабильны, как и восстающие, скважины, пробуренные в целиках угля у разрезных выработок. Их дебит – 0,6-2 м^3/мин, а продолжительность стабильной работы от 3 до 20 месяцев.

Нисходящие скважины, пробуренные впереди и позади лавы, работают нестабильно, что связано с различным уровнем обводненности, углом наклона, обсадкой и субъективными факторами. Срок их активной работы (концентрация метана более 60 %) не превышает 2-3 месяца (отход лавы на 200-300 м), а дебит 0,5-3 м^3/мин с максимумом в начальный период после прохода лавы (50-100 м) и плавным снижением дебита и концентрации метана.

Показатели работы дегазации шахт за 1992 г. приведены в табл.5. За последние годы, благодаря усилиям инженерно-технических работников ОАО «Воркутауголь», удалось существенно повысить эффективность дегазации как восходящих, так и нисходящих скважин, хотя остаются достаточно сложными проблемы управления газовым режимом выработанных пространств. Это связано, в первую очередь, с бесцеликовой схемой поддержания штреков (бремсбергов) на добычных участках, что способствует формированию хорошей аэродинамической связи между выработанными пространствами соседних блоков и панелей (рис.5).

Исследования геомеханики техногенных водопроводящих трещин В.Н.Гусевым [1] показали, что деформации массива над разрабатываемыми пластами происходят на значительном расстоянии (250-300 м от пласта до 20-30 см). Мощность зоны радиальных водопроводящих, а следовательно, и газопроводящих трещин $H_т$, по данным наблюдений на угольных пластах определяется мощностью пласта m и содержанием пород глинистого состава A в разрезе толщи: $H_т = 70\sqrt{me^{-A}}$ Максимум при наличии нескольких пластов, разрабатываемых в свите, определяется по наибольшему расстоянию влияния от одного из пластов. Для случая разработки пластов Четвертый и Тройной таким будет последний, имеющий большую мощность и расположенный выше пласта Четвертого, а размер зоны $H_т$ около 100 м. В пределах этой мощности подработанной толщи расположено значительное число газосодержащих пластов и пропластков, из которых газ может мигрировать как вдоль напластования (трещины расслоения), так и в вертикальном направлении (газопроводящие трещины).

Изменение во времени зоны проницаемости пород выше- и нижележащей толщи от разрабатываемых пластов ведет к формированию сложного по конфигурации объема проницаемого массива, как по падению лавы (рис.5), так и в направлении их простирания (по длине столба). С этим может быть связано увеличение газовыделения на участках по мере роста числа отработанных столбов, так же как и по мере удаления очистного забоя от разрезной выработки (см. рис.3).

Таблица 5

Основные горно-технические показатели работы дегазации на шахтах ОАО «Воркутауголь»

Шахта	Количество метана, каптируемого дегазационными установками, м³/мин	Содержание метана в смеси, %	Количество метана, удаляемого вентиляцией, м³/мин	Общее количество метана, удаляемое из пласта, м³/мин	Пробурено дегазационных скважин, м/год	Добыча угля за год, т	Эффективность дегазации по шахте, %
«Северная»	103,8*	36*	87,2	191,0	9817	1460200	54,3*
«Южная»	55,6	35	61,3	116,9	5240	665000	47,6
«Воркутинская»	54,2	37	95,5	149,7	7184	1526000	36,2
«Аяч-Яга»	20,3	30	47,5	67,8	6765	805300	29,9
«Воргашорская»	16,8	30	74,7	91,5	1401	4973400	18,4
«Комсомольская»	75,4	35	133,0	208,4	4440	1676000	36,2
«Заполярная»	79,9	41	105,9	185,8	8385	1372000	43,0
«Юр-Шор»	10,2	25	48,3	58,5	416	504000	17,4
«Центральная»	40,4	39	81,0	121,4	3616	974000	33,3
«Промышленная»	6,2	27	15,5	21,7	494	446400	28,6
ОАО «Воркутауголь»	462,8	36	749,9	1212,7	47750	14375300	38,2

* Совместно с шахтой «Аяч-Яга», так как ВНС общая.

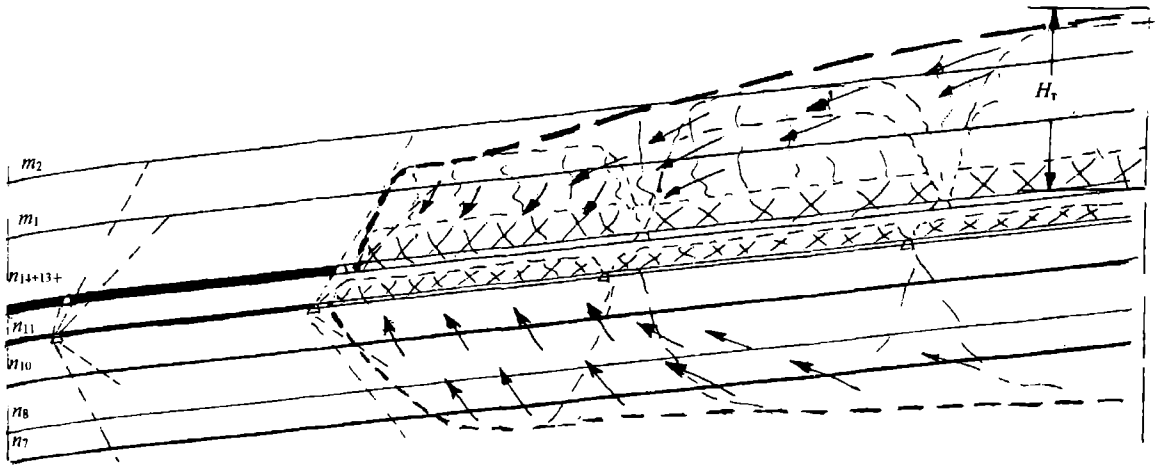


Рис.5. Геомеханическая модель развития зон сдвижения, трещинообразования и разгрузки

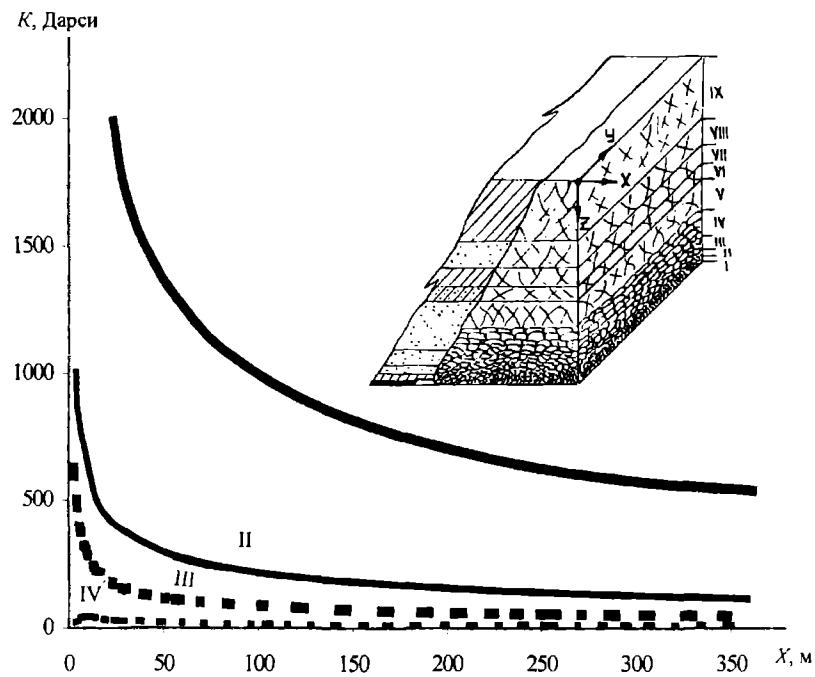


Рис.6. Изменение проницаемости массива

I – IV – слои пород выработанного пространства

Сложное строение горного массива с включением в него десятков и сотен угольных слоев и прослойков с различным содержанием газа, равно как и нахождение газа в породном массиве, не позволяют создать адекватную математическую модель для решения нестационарных газодинамических задач. Более простым и относительно надежным путем решения может быть метод эквивалентного газосодержащего массива с заданным по мощности (глубине) распределением давления и содержания газа, способного мигрировать через развивающиеся во времени системы проводящих трещин.

Подобные модели были реализованы для расчетов газовыделения из выработанного пространства шахт Воркуты [2-4]. На основании теоретических представлений о деформациях подрабатываемого горного

массива для характерных зон (беспорядочного обрушения, блочного обрушения, трещинообразования и расслоения) были рассчитаны параметры трещин и проницаемость пород. Это позволило создать геомеханическую и газодинамическую модели подработанного массива сложного строения с изменяющимися коэффициентами проницаемости по высоте и длине (рис.6) проницаемого горного массива.

Данные модели были положены в основу расчетов по программе «Modflow» газодинамических процессов в выработанных пространствах угольных шахт Воркуты, результаты которых подтверждены шахтными наблюдениями и свидетельствуют об эффективности предлагаемого способа прогноза газового режима выработок добычных участков.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Гусев В.Н.* Геомеханика техногенных водопроводящих трещин / СПГГИ. СПб, 1999.

2. *Шувалов Ю.В.* Аэродинамика выработок и выработанного пространства шахт Воркуты / Ю.В.Шувалов, А.П.Веселов, В.В.Соболев, И.А.Павлов // Горный информационно-аналитический бюллетень. М.: Изд-во МГГУ, 1999. № 3.

3. *Шувалов Ю.В.* Аэродинамика выработанных пространств с аэродинамическими сопротивлениями / Ю.В.Шувалов, И.А.Павлов, М.М.Попов // Научно-педагогическое наследие профессора И.И.Медведева: Сб. научных докладов. СПб: МАНЭБ, 1999.

4. *Шувалов Ю.В.* Управление метано-воздушными потоками из выработанных пространств выемочных участков на шахтах ОАО «Воркутауголь» / Ю.В.Шувалов, В.Н.Бобровников, А.П.Веселов, Э.М.Шейман, А.А.Энс // Народное хозяйство Республики Коми. 1998. Т.7. № 3.