

УДК 622.831.325.3

**И.А. ЕФРЕМОВ** (д-р техн.наук, проф.)

**С.Н. АЛЕКСАНДРОВ** (д-р техн.наук, проф.)

**А.В. ПЕТРЕНКО** (ассистент)

Донецкий национальный технический университет, г. Покровск, Украина

## **ОПЕРЕЖАЮЩАЯ ДЕГАЗАЦИЯ ПОРОД КРОВЛИ ВЫСОКОНАГРУЖЕННЫХ ЛАВ**

Анализ газовыделения в выработки выемочных участков показывает, что до 80% общего количества метана поступает из углепородного массива кровли. Причем до 80% объема для углей марки Г, Ж, К сосредоточено в песчаниках. Пути решения задач по извлечению метана из песчаников привели к разработке новых технологий дегазации пород кровли.

В способе опережающей дегазации реализуется идея, заключающаяся в учете и использовании геомеханических процессов, происходящих в подрабатываемых газоносных породах кровли.

Опережающая дегазация пород кровли может осуществляться в двух вариантах: непосредственно в процессе проведения вентиляционного штрека и уже в сооруженном вентиляционном штреке без привязки к технологии его проведения. С точки зрения эффективности дегазации предпочтительнее является первый вариант технологии, так как продолжительность опережающей дегазации пород кровли будет максимальной - от момента бурения дегазационных скважин в период проведения вентиляционного штрека до момента подхода очистного забоя в створ со скважинами.

Результаты выполненных исследований показывают, что способ опережающей дегазации высоконагруженных лав является эффективным дегазационным мероприятием, позволяющим дегазировать газоносные песчаники до начала очистных работ, снижать поступление метана из пород кровли в выработки выемочных участков и извлекать газ высокого качества для дальнейшего его использования, обеспечивая безопасность ведения горных работ.

**Ключевые слова:** опережающая дегазация, углепородный массив, газовыделение, эффективность дегазации, дегазационная скважина, безопасность ведения горных работ.

Опережающая дегазация выполняется после начала горных работ на дегазированной площади – во время подготовки выемочного участка или же в процессе его эксплуатации, когда дегазированный массив находится впереди забоя вне зоны влияния очистных работ дегазированной лавы.

Дегазационные мероприятия опережающей дегазации могут выполняться как во время ведения подготовительных, так и очистных работ на добычном участке.

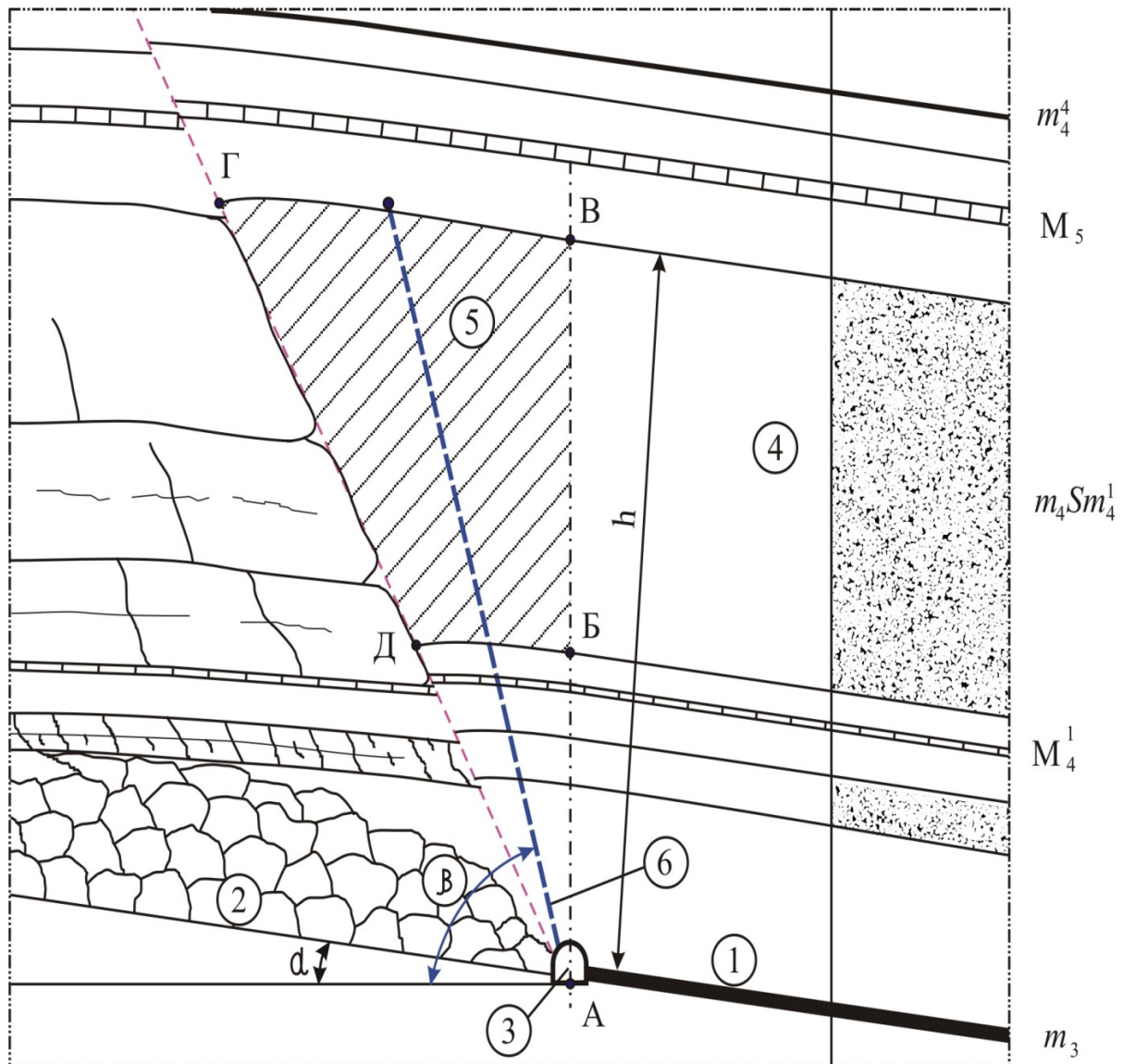
Сущность опережающей дегазации заключается в извлечении метана скважинами из зон его скопления в массивах с хорошими коллекторскими свойствами, образовавшимися в результате геомеханических процессов, происходящих во вмещающих породах при ведении работ по добыче угля. Углепородный массив здесь характеризуются повышенной пустотностью пород, снижением содержания воды в поровом пространстве и увеличением почти на два порядка проницаемости. Пониженное давление газа в этих зонах способствует дренированию метана из нетронутого массива в зону разуплотнения даже через породы с низкой (0,01–0,04 мД) проницаемостью. Учитывая, что площадь дренирования имеет большие размеры (прямоугольник высотой, равной мощности геологического объекта дегазации, и длиной, равной длине выемочного столба), объемы дренированного метана вполне приемлемы для его извлечения из этой части пород.

### **Потоки метана при опережающей дегазации пород кровли**

В способе опережающей дегазации реализуется идея, заключающаяся в учете и использовании геомеханических процессов, происходящих в подрабатываемых газоносных породах кровли. При последовательной отработке выемочных участков длинными столбами или сплошной системой разработки без оставления целиков на границе сопряжения нетронутого массива с подработанными породами кровли образуется зона наибольшего прогиба (ЗНП) пород кровли [4], в слоях которой возникают деформации растяжения в направлении, перпендикулярном напластованию. В результате происходит

расслоение пород, снижается газовое давление, увеличивается проницаемость и фильтрационная способность пород, особенно в направлении напластования. На рис. 1 ЗНП показана сечением БВГД.

В поперечном разрезе выемочного участка эта зона граничит с зоной полных сдвижений со стороны подработанного массива и с зоной опорного давления – со стороны нетронутого массива, где будет размещена новая лава, в которой планируется выполнение опережающей дегазации. На плане горных работ ЗНП размещена по всей длине выемочного участка на сопряжении отработанной старой лавы 2 с новой лавой 1.



**Рис. 1.** Вертикальный разрез сопряжения пород отработанной лавы и новой лавы и потока метана при опережающей дегазации

1 – угольный пласт новой лавы; 2 – отработанное пространство смежной старой лавы; 3 – подготовительная выработка; 4 – геологический объект дегазации; 5 – сечение зоны наибольшего прогиба пород; 6 – дегазационная скважина

Ширина полосы (см. рис. 1) определяется из выражения:

$$BG = h(0,7 - \operatorname{tg} \alpha), \text{ м}, \quad (1)$$

где  $h$  – расстояние по нормали от кровли пласта до кровли дегазируемого объекта, м;

$\alpha$  – угол падения горных пород, град.

Рассматриваемая полоса песчаника на протяжении всего выемочного столба является сборным коллектором свободного метана. Расположение дегазационных скважин в таких коллекторах позволяет извлекать метан высокой концентрации задолго до подхода очистных работ, то есть выполнять опережающую дегазацию.

Фильтрация происходит в направлении снижения градиента газового давления. В нетронутым горными работами угленосном массиве основное количество метана содержится в угольных пластах и песчаниках. В углях метан находится большей частью в сорбированном состоянии (до 90 %), а небольшая его газовая фаза закрыта в порах и трещинах вследствие высоких сжимающих напряжений. Поэтому газопроницаемость угольных пластов в нетронутым массиве практически отсутствует. Газоотдача углей происходит только после нарушения равновесного состояния, снижения напряжений и раскрытия трещин. В газоносных песчаниках метан, как правило, содержится в виде свободного газа и при наличии перепада давлений может дренировать, подчиняясь законам фильтрации. В фильтрационном процессе в нетронутым массиве при опережающей дегазации участвует только метан, находящийся в свободном состоянии.

Фильтрация метана происходит следующим образом (см. рис. 1). После прохода смежной старой лавы и посадки основной кровли метан из верхних газоносных слоев подработанного угленосного массива 5 перетекает в нижние слои и поступает в рабочее пространство старой лавы. Одновременно в ЗНП пород снижается газовое давление, и сюда поступает свободный метан из нетронутым массива газоносных пород 4 кровли новой лавы, который далее поступает в породы подработанного массива и затем в рабочее пространство вентиляционного штрека 3 новой лавы.

Через определенное время фильтрационный процесс стабилизируется и продолжается по изложенной выше схеме, то есть метан перетекает из газоносных пород кровли новой лавы через разуплотненные породы ЗНП в подработанные породы старой лавы и вентиляционный штрек новой лавы.

Теперь в схему движения метана добавим дегазационную скважину 6, пробуравив из вентиляционного штрека новой лавы в ЗНП, и подадим на неё разрежение от дегазационного трубопровода. Давление в скважине будет ниже, чем в пространстве пород ЗНП, подработанном массиве пород кровли старой лавы, и в нее будет поступать метан из газоносных пород 5 кровли новой лавы. Таким образом осуществляется опережающая дегазация пород кровли новой лавы. На рис. 1 направление и пути фильтрации метана показаны стрелками.

По результатам исследований разработаны параметры способа опережающей дегазации пород кровли высоконагруженных лав.

Скважины бурятся в направлении пород кровли отработанной лавы, смежной с лавой, которая будет обрабатываться, перебуравивая на полную мощность геологические объекты дегазации в полосе наибольшего прогиба пород, ограниченной зоной активного сдвижения пород со стороны отработанного пространства и зоной опорного давления – со стороны нетронутым массива. Угол разворота скважины от оси подготовительной выработки принимается равным  $90^\circ$ .

Угол подъема скважины к горизонту  $\beta$  выбирается из условия пересечения скважиной зоны наибольшего прогиба пород в ее срединной части и зависит от угла падения пород  $\alpha$  и угла полных сдвижений пород кровли  $\psi$  отработанной лавы. Для условий

Донбасса ( $\Psi = 55^\circ$ ) угол  $\beta$  определяется по формуле:

$$\beta = \frac{145 + \alpha}{2}, \text{ град.} \quad (2)$$

Длина скважины  $\ell_c$  должна обеспечить пересечение геологического объекта дегазации на полную его мощность, определяется по формуле:

$$\ell_c = \frac{h}{\sin(\beta - \alpha)}, \text{ м.} \quad (3)$$

$h$  – расстояние от кровли разрабатываемого пласта до кровли геологического объекта дегазации.

### Выбор геологического объекта опережающей дегазации

Геологический объект опережающей дегазации (г.о.о.д.) – это газоносная порода (например, песчаник или алевролит), содержащая свободный метан, расположенная в интервале эффективной подработки будущей лавой. Критериями выбора г.о.о.д. является содержание в нем не менее 50 % извлекаемых запасов метана углепородного массива кровли, а также залегание не выше 100 м от рабочего угольного пласта. Метод выбора г.о.о.д. базируется на расчетах плотности извлекаемых запасов метана в нем, в угольных пластах-спутниках и газоносных породах кровли, их анализе и сравнительной оценке.

Плотность извлекаемых запасов метана в каждом геологическом объекте, а также общая, рассчитываются по формуле:

$$P_{зан} = P_{зан.у} + P_{зан.п} = \sum_{i=1} q_{yi} \cdot \rho_{yi} \cdot m_{yi} + \sum_{i=1} q_{ni} \cdot m_{ni}, \quad (4)$$

где  $P_{зан}$  – плотность извлекаемых запасов метана,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;

$P_{зан.у}$ ,  $P_{зан.п}$  – плотность запасов соответственно в угольных пластах-спутниках и в газоносных породах,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ ;

$q_{yi}$  – количество метана, извлекаемое из одной тонны подработанного угольного пласта-спутника,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;

$\rho_{yi}$  – пластовая плотность угольного пласта-спутника,  $\text{т}/\text{м}^3$ ;

$q_{ni}$  – количество метана, которое может быть извлечено из  $1 \text{ м}^3$  подработанной породы,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$m_{yi}$ ,  $m_{ni}$  – мощность соответственно угольного или породного пласта, м.

$$q_{yi} = (x_{yi} - x_{oi}) \cdot \left( 1 - \frac{M_{yi} \varepsilon_{кр.у} 10^3}{250 K_{у.к} K_l m_{в.п.}} \right) \quad (5)$$

$$q_{ni} = x_{ni} \left( 1 - \frac{M_{ni} \varepsilon_{кр.п} 10^3}{250 K_{у.к} K_l m_{в.п.}} \right) \quad (6)$$

где  $x_{y,i}$  и  $x_{o,i}$  – пластовая природная и остаточная газоносность угля,  $\text{м}^3/\text{т}$ ;

$x_{ni}$  – газоносность породы,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;

$M_{yi}$  и  $M_{ni}$  – расстояние по нормали от кровли рабочего пласта до середины пласта-спутника или газоносной породы, м;

$\varepsilon_{кр}$  – граничные деформации растяжения угля и пород. Для условий Донбасса:

$$\varepsilon_{кр.у}=(2-3)10^{-3}; \varepsilon_{кр.п}=(3-4)10^{-3}$$

$K_{ук}$  – коэффициент учитывающий способ управления кровлей;

$K_{л}$  – коэффициент учитывающий влияние степени метаморфизма на величину свода разгрузки

$m_b$  – вынимаемая мощность пласта с прослойками, м.

#### Дебит скважин опережающей дегазации

Дебит скважины и количество добытого метана является одним из основных показателей опережающей дегазации. Скважины опережающей дегазации, пробуренные в зону наибольшего прогиба пород (ЗНП) геологического объекта опережающей дегазации имеют дебиты 0,5-2,5 м<sup>3</sup>/мин.

Дебит метана в скважину  $I_c$  в м<sup>3</sup>/мин определяют по формуле:

$$I_c = \frac{20586 \cdot H^2 \cdot m_n \cdot R_c \cdot K_{np}}{\mu \cdot \ell} \cdot \exp(-0,0025t_c), \text{ м}^3/\text{мин} \quad (7)$$

где  $H$  – глубина залегания песчаника, который дегазируется, м;

$m_n$  – мощность песчаника, м;

$R_c$  – расстояние между скважинами, м;

$K_{np}$  – коэффициент газопроницаемости песчаника, м<sup>2</sup>;

$\mu$  – динамический коэффициент вязкости метана, Па·с;

$l$  – расстояние в сторону ненарушенного массива на котором давление газа в песчанике будет равно пластовому, м;

$t_c$  – продолжительность работы скважины, сут.

Для песчаников Донбасса среднее значение  $l=275$ м.

Расстояние между скважинами не должно превышать 80м.

Величина коэффициента проницаемости  $k_{np}$  берется из геологического отчета по шахте, а если данные о проницаемости песчаников отсутствуют, тогда величина коэффициента проницаемости выбирается из таблицы 1, где установлена зависимость  $k_{np}$  от коэффициента эффективной пористости  $k_{en}$ .

**Таблица 1.** Значение коэффициента  $k_{np}$

$k_{en}, \%$	$k_{np} \cdot 10^{-15}, \text{ м}^2$
1,0	0,02
2,0	0,05
3,0	0,14
4,0	0,37
5,0	1,0
6,0	2,72

Расчеты  $\mu$  для разных глубин приведены в таблице 2.

Если в породах кровли залегают два или больше пластов газоносных пород, которые отвечают критериям геологических объектов опережающей дегазации, тогда расчеты проводятся для каждого пласта отдельно, а результат суммируются для всей скважины,  $Q_c$ , м<sup>3</sup>/мин.:

$$Q_c = Q_1 + Q_2 + \dots + Q_i. \quad (8)$$

Эффективность способа опережающей дегазации, как одного из видов дегазации, может быть оценена только после отработки выемочного участка как отношение объема метана, из-

влеченного всеми скважинами опережающей дегазации, к объему метана, выделившегося на участке за полный период его отработки.

**Таблица 2.** Значение показателя вязкости метана  $\mu$

Глубина залегания песчаника Н, м	Температура пород, °С	Пластовое давление, $P_{пл}$ Мпа	Динамическая вязкость метана $\mu$ , $Па \cdot с \cdot 10^{-5}$
400	29	3,4	1,08
600	35	5,1	1,10
800	41	6,8	1,13
1000	47	8,5	1,16
1200	53	10,2	1,18
1400	59	11,9	1,23
1600	65	13,6	1,30

Коэффициент эффективности работы скважин опережающей дегазации ( $k_{эф.с}$ ) определяется как отношение объема извлеченного метана ( $W_c$ ) к объему извлекаемых запасов геологического объекта дегазации ( $W_{u.з}$ ) в пределах дегазируемого участка:

$$k_{эф.с} = \frac{W_c}{W_{u.з}}, \quad (9)$$

Извлекаемые запасы – это та часть ресурсов метана, содержащихся в геологическом объекте дегазации, которая может быть извлечена системами дегазации или выделена из него естественным путем в данных условиях подработки. Они определяются по формуле:

$$W_{u.з} = P_n \cdot \ell_{оч} \cdot R_c \cdot n, \text{ м}^3, \quad (10)$$

где  $\ell_{оч}$  – длина очистного забоя, м;

$R_c$  – расстояние между скважинами, м;

$n$  – количество скважин;

$P_n$  – плотность извлекаемых запасов метана, содержащихся в геологическом объекте дегазации,  $\text{м}^3/\text{м}^2$ .

Как уже отмечено, определяющим показателем эффективности опережающей дегазации является объем извлеченного метана и, как следствие, снижение природной газоносности объекта дегазации. Объемы метана, извлекаемого опережающей дегазацией, зависят от количества дегазационных скважин, дебита скважины и продолжительности ее работы. На стадии проектирования способа объем извлекаемого метана скважинами на дегазируемом участке ( $W_c$  тыс.  $\text{м}^3$ ) определяется по формуле:

$$W_c = \sum_{n=1}^{n=\max} 1,44 Q_c \cdot t_{дез}, \quad (11)$$

где  $Q_c$  – средний дебит дегазационной скважины,  $\text{м}^3/\text{мин}$ ;

$n$  – количество скважин на дегазируемом участке, шт.;

$t_{дез}$  – продолжительность работы скважины, суток.

Выполнение мероприятий по опережающей дегазации можно начинать уже при проведении вентиляционных штреков.

Внедрение способа на шахтах обеспечивает выполнение опережающей дегазации пород кровли до начала ведения очистных работ и в процессе выемки угля, вне зоны влияния лавы, а также, за счет улучшения качества извлекаемой газовой смеси – повышение объемов утилизируемого в энергогенерирующих устройствах метана. В итоге – повышается эффективность дегазационных мероприятий, как в аспекте безопасности, так и в аспекте извлечения метана, как ценного энергоносителя.

#### **Библиографический список**

1. Патент К75821 Україна, E21F7/00. Спосіб випередженої дегазації порід покрівлі високонавантажених лав/ А.Ф. Булат, Ю.Л. Звягільський, І.О. Єфремов [та інші]; - №20041108929, надрук. 15.05.05, Бюл. №5;

2. Клец А.П., Ефремов И.А. Потоки метана при опережающей дегазации //Деформирование и разрушение материалов с дефектами и динамические явления в горных породах и выработках: Матер. XVIII Международная научная школа – Симферополь: ТНУ.- 2008.-С.135-138.

3. Клец А.П., Ефремов И.А., Бокий Б.В. Экспериментальные исследования способа опережающей дегазации высоконагруженных лав// Геотехническая механика: Межведомственный сб.научн.труд/ИГТМ НАН Украины: - Днепропетровск, 2008 – Вып. - С.72-77.

*Надійшла до редакції 19.12.2016*

**І.О. Єфремов, С.М. Александров, А.В. Петренко**

Донецький національний технічний університет, м. Покровськ, Україна

#### **ВИПЕРЕДЖАЮЧА ДЕГАЗАЦІЯ ПОРІД ПОКРІВЛІ ВИСОКОНАВАНТАЖЕНИХ ЛАВ**

Аналіз газовиділення у виробки виїмкових дільниць показує, що до 80% загальної кількості метану надходить з вуглепородного масиву покрівлі. При чому до 80% обсягу для вугілля марки Г, Ж, К зосереджено в пісковиках.

Шляхи вирішення завдань з вилучення метану з пісковикиві привели до розробки нових технологій розробки дегазації порід покрівлі.

У способі випереджаючої дегазації реалізується ідея, яка полягає в обліку і використанні геомеханічних процесів, що відбуваються в підроблюваних газоносних породах покрівлі.

Дегазації порід покрівлі може здійснюватися в двох варіантах: безпосередньо в процесі проведення вентиляційного штреку і вже в спорудженому вентиляційному штреку без прив'язки до технології його проведення. З точки зору ефективності дегазації переважним є перший варіант технології, так як тривалість випереджаючої дегазації порід покрівлі буде максимальною - від моменту буріння дегазацийних свердловин в період проведення вентиляційного штреку до моменту підходу очисного забою у ворота зі свердловинами.

Результати виконаних досліджень показують, що спосіб випереджаючої дегазації високонавантажених лав є ефективним дегазацийним заходом, що дозволяє дегазувати газоносні пісковики до початку очисних робіт, знижувати надходження метану з порід покрівлі в вироблення виїмкових дільниць і витягувати газ високої якості для подальшого його використання, забезпечуючи безпеку ведення гірничих робіт.

**Ключові слова:** випереджальна дегазація, вуглепородний масив, газовиділення, ефективність дегазації, дегазацийна свердловина, безпека ведення гірничих робіт.

**I. Efremov, S. Alexandrov, A. Petrenko**

Donetsk National Technical University, Pokrovsk, Ukraine

#### ADVANCE DEGASSING OF ROCK OF LOADED ROOF

Analysis of degassing in excavation sites shows that 80% of the total amount of methane comes from coal and rock array. Other 80% of the volume of coal of brands G, F, K is concentrated in the sandstones. Given that the methane in sandstones is generally in the free state, it is quite a significant resource.

Ways to solve the problems on the extraction of methane from the sandstone led to the development of a new technology of roof rocks degassing.

In the process of advanced degassing an idea of integrating and using geomechanical processes occurring in the gas-bearing rocks of undermined roof is implemented.

The technology implements a method of advanced degassing roof rocks, it can be carried out in two ways: directly in the course of the ventilation drift and in the airway without reference to its technology. From the point of degassing efficiency it is preferable to use the first version of the technology as well as the duration of advanced degassing roof rocks is the maximum - from the moment of drilling degasification wells during the airway until the stope approaches the target with holes.

The results of the research show that the method of advanced degassing is an effective degassing activity, allowing degassing gas-bearing sandstones.

**Keywords: advance degassing, coal and rock array gassing, degassing efficiency, degasification wells, mining safety.**