

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ГАЗА ВПЕРЕДИ ДВИЖУЩЕГОСЯ УГОЛЬНОГО ЗАБОЯ

C. B. Кузнецов

(Новосибирск)

Как известно [1], пласты угля, залегающие на глубине более 200—250 м, в большинстве случаев содержат метан или углекислый газ, количество которого доходит до 50—60 м³ на 1 т угля. Если горная выработка проводится в свите таких пластов, то в выработанном пространстве, и особенно вблизи забоя, всегда обнаруживается наличие газа. Наблюдения и опыт разработки газированных угольных пластов показали, что газ поступает в выработку как из отбитого угля, так и из разрабатываемого газированного угольного пласта, а в некоторых случаях газ проникает в выработки и из надрабатываемых (подрабатываемых) газированных угольных пластов. Кроме того, на многих шахтных пластах происходят так называемые необычные газовыделения: внезапные выбросы угля и газа и сухлярные выделения газа. При таких необычных газовыделениях в выработки почти мгновенно выделяются сотни и тысячи кубических метров метана [2].

Газовыделения в выработанное пространство, и особенно необычные газовыделения, не только затрудняют нормальное ведение горных работ, но и приводят к образованию взрывчатой концентрации метано-воздушной смеси.

Для борьбы с газовыделением, и особенно с явлениями необычных газовыделений в выработанное пространство, возникла необходимость изучения распределения давления газа в угольном пласте.

Имеются основания полагать [3], что давление газа в нетронутом угольном пласте близко к давлению горных пород, сжимающих пласт, при отсутствии влияния выработок. Именно этим давлением и физико-химическими свойствами пласти определяется количество газа, заключенного в угольном пласте. Кроме того, можно утверждать, что на достаточно больших глубинах залегания нетронутые газированные угольные пласти являются газонепроницаемой средой, и газ, заключенный в пласте, содержится в основном в сорбированном состоянии. Пористость, если последняя существует в нетронутом пласте, ничтожно мала; каждая пора должна быть замкнута и изолирована от другой. При подземной разработке месторождений угля в призабойной зоне угольного пласти имеет место разгрузка напряженного состояния, вследствие чего в некоторой части зоны разгрузки пласти происходит изменение пористости угля. С увеличением разгрузки пористость угольного пласти в области разгрузки увеличивается, а вместе с тем увеличивается и газопроницаемость его. При этом заключенный в угле газ в призабойной зоне разгрузки пласти получает возможность переходить из сорбированного в свободное состояние и выделяться в горные выработки. Таким образом, при решении вопроса о распределении давления газа впереди движущегося забоя необходимо рассматривать газопроницаемость и пористость угольного пласти, зависящими от разгрузки пласти.

В дальнейшем будем рассматривать случай одномерного движения, соответствующий движению забоя лавы. В связи с этим заметим, что напряжение разгрузки в призабойной зоне рассматриваемого пласти на определенной глубине залегания является функцией расстояния от забоя. Следовательно, пористость и коэффициент фильтрации угольного пласти можно рассматривать при решении задачи о распределении давления газа впереди движущегося угольного забоя как функции расстояния от забоя.

В первые задача об истечении газа в горные выработки с учетом сорбционных свойств пласти рассматривалась в работе [4]. В ней дано автомодельное решение задачи об истечении газа из однородного полубесконечного угольного пласти при постоянной газопроницаемости и постоянной пористости пласти.

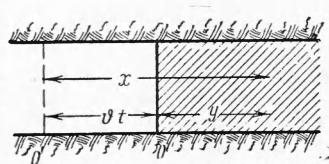
Позднее, в работе [5], даны уравнения кривых депрессии газа в угольном пласти при движущемся забое с учетом переменной газопроницаемости, зависящей от расстояния от забоя и сорбционных свойств пласти.

В работе [1] приводится полуэмпирическая формула распределения давления газа в угольном пласти, которая сопоставляется с результатами замера давления газа в камерах, образованных бурением скважин по пластам «Мазурка» и «Тонкий» шахты им. К. Маркса (Донбасс).

В основу настоящей работы положены идеи и методы, изложенные в работе [5]. Кроме того, результаты, полученные в работе [6], дают возможность найти закон распределения пористости m и коэффициента фильтрации k в угольном пласте в зависимости от расстояния от забоя. Это позволит в значительной мере уточнить характер распределения давления газа в угольном пласте и выяснить влияние основных геометрических и физико-механических параметров пласта на кривую депрессии газа.

§ 1. Уравнения движения. 1°. Напомним вывод уравнений [5], определяющих течение газа с учетом выделения сорбированного газа и движения угольного забоя с постоянной скоростью ϑ .

Обозначим через ρ — плотность газа, содержащегося в порах в свободном состоянии, u — скорость фильтрации, m — пористость, p — давление газа, Q — общее количество сорбированного и свободного газа, содержащегося в единице объема угля. Тогда уравнение сохранения массы газа можно записать в виде



Фиг. 1. Схема задачи

$$-\frac{\partial \rho u}{\partial x} = \frac{\partial Q}{\partial t} \quad (1.1)$$

По закону Дарси

$$u = -\frac{k}{\mu} - \frac{\partial p}{\partial x} \quad (1.2)$$

где μ — коэффициент вязкости газа, k — коэффициент фильтрации.

Наряду с неподвижной системой координат $O'x$ рассмотрим систему Oy , движущуюся с забоем (фиг. 1). Из фигуры видно, что

$$x = y + \vartheta t \quad (1.3)$$

Преобразуем уравнения движения (1.1) и (1.2) к системе координат, связанной с движущимся забоем. При этом будем считать, что движение газа изотермическое, и, следовательно,

$$\frac{\rho}{\rho^*} = \frac{p}{p^*} = \beta \quad (1.4)$$

Здесь ρ^* и p^* — некоторые постоянные плотность и соответствующее ей давление газа. Учитывая (1.3) и (1.4), уравнения (1.1) и (1.2) можно записать в виде

$$-\frac{\partial \beta u}{\partial y} = \frac{1}{\rho^*} \left(\frac{\partial Q}{\partial t} - \vartheta \frac{\partial Q}{\partial y} \right), \quad u = -p^* \frac{k}{\mu} \frac{\partial \beta}{\partial y} \quad (1.5)$$

Вместо переменной y введем безразмерный параметр y' , полагая $y = y^* y'$, где y^* — характерная величина, определяющая расстояние от забоя, на котором происходит основное изменение давления газа за счет фильтрации. Вместо времени t введем также безразмерный параметр t' , полагая $t = \tau t'$, где τ — характерный период времени, за который происходит заметное изменение фильтрационного расхода. Тогда уравнение (1.5) можно представить в виде

$$-\frac{\partial \beta u}{\partial y'} = \frac{\vartheta}{\rho^*} \left(\frac{y^*}{\tau \vartheta} \frac{\partial Q}{\partial t'} - \frac{\partial Q}{\partial y'} \right) \quad (1.6)$$

2°. Если, по мере продвижения угольного забоя с постоянной скоростью, газовыделение из него остается постоянным в течение длительного времени и $\partial Q / \partial t'$ по порядку величины не превосходит $\partial Q / \partial y'$, а параметр $y^* / \tau \vartheta$ мал по сравнению с единицей, то слагаемым $(y^* / \tau \vartheta)(\partial Q / \partial t')$ можно пренебречь по сравнению с $\partial Q / \partial y'$ и считать движение газа уставновившимся по отношению к движущемуся забою.

Это отвечает случаю малой фильтрационной способности, когда величина y^* относительно невелика и сравнительно небольшой скорости продвижения забоя.

Например, если y^* имеет величину порядка 4 м, скорость движения забоя порядка 2 м в сутки, а заметное изменение расхода газа через поверхность забоя наблюдается за год, т. е. $\tau = 365$ суток, то $y^* / \tau \vartheta = 0.002$ и

при определении кривой депрессии можно приближенно считать течение газа установившимся относительно движущейся поверхности забоя.

§ 2. Уравнения кривой депрессии. 1°. Уравнения установившегося течения газа относительно движущегося забоя будут иметь вид

$$\frac{d\beta u}{dy} - \frac{\vartheta}{\rho^*} \frac{dQ}{dy} = 0, \quad u = -p^* \frac{k}{\mu} \frac{d\beta}{dy} \quad (2.1)$$

Интегрируя первое уравнение (2.1), имеем

$$\beta u = \frac{\vartheta}{\rho^*} Q + C \quad (2.2)$$

где C — постоянная интегрирования.

Исходя из того, что на достаточно больших глубинах залегания пласт газопроницаем лишь в некоторой призабойной зоне разгрузки пласта, на границе $y = y^\circ$, отделяющей газопроницаемую призабойную зону от остальной газонепроницаемой части угольного пласта, имеем

$$u = 0, \quad Q = Q^\circ \quad (2.3)$$

где Q° — суммарное количество газа, включая сорбированный и свободный, аккумулированное единицей объема угля на границе y° .

Используя это условие, из уравнения (2.2) найдем

$$C = -\frac{\vartheta}{\rho^*} Q^\circ \quad (2.4)$$

Таким образом, уравнение (2.2) окончательно примет вид

$$\beta u = -\frac{\vartheta}{\rho^*} (Q^\circ - Q) \quad (2.5)$$

2°. Как показано в работе [7], к количеству метана, сорбированного ископаемыми углами в зависимости от давления газа, применимо уравнение Ленгмюра

$$Q_1' = \frac{ab'p}{1+ap} = \frac{a^*b'\beta}{1+a^*\beta} \quad (2.6)$$

где a, b' — постоянные Ленгмюра, $a^* = ap^*$.

Заметим, что в формуле (2.6) величина Q_1' отнесена к единице веса угля и выражает количество граммов газа, сорбированного одним граммом угля.

Если обозначим через ρ_2 истинную плотность угля, то $\rho_2 Q_1'$ выражает количество сорбированного газа единицей истинного объема (объем только зерен) угля. Обозначим кажущийся объем (суммарный объем зерен и пор) элемента через v , а его истинный объем через v_3 . Тогда количество газа, сорбированного истинным объемом v_3 угля, будет $\rho_2 Q_1' v_3$, а количество газа Q_1 , сорбированного единицей кажущегося объема угля, будет

$$Q_1 = \rho_2 Q_1' \frac{v_3}{v} \quad (2.7)$$

Используя определение пористости $m = 1 - v_3/v$, формулу (2.7) можно записать в виде

$$Q_1 = \rho_2 Q_1' (1 - m) \quad (2.8)$$

Кроме того, $m\rho$ выражает количество свободного газа, содержащегося в единице кажущегося объема угля. Будем считать, что основную роль в распределении давления газа впереди движущегося угольного забоя играет свободный газ, содержащийся в порах пласта, и сорбированный газ, определенный законом Ленгмюра (2.6) для единицы массы угля. Тогда выражение для суммарного количества газа в единице кажущегося объема угля будет иметь вид

$$Q = m\rho + (1 - m) \frac{abp}{1+ap} \quad (b = \rho_2 b') \quad (2.9)$$

Учитывая, что $p = p^\circ$, $\rho = \rho^\circ$, $m = m^\circ$ при $y = y^\circ$, из (2.9) найдем

$$Q^\circ = m^\circ \rho^\circ + (1 - m^\circ) \frac{abp^\circ}{1+ap^\circ} \quad (2.10)$$

Используя (2.2), (2.9) и (2.10), уравнение (2.5) можно записать в виде

$$\beta \frac{d\beta}{dy} = \frac{\vartheta \mu}{k p^*} \left\{ m^\circ \beta^\circ - m\beta + \frac{a^* b}{\rho^*} \left(\frac{1-m^\circ}{1+a^*\beta^\circ} \beta^\circ - \frac{1-m}{1+a^*\beta} \beta \right) \right\} \quad \left(\beta^\circ = \frac{p^\circ}{p^*} \right) \quad (2.11)$$

Уравнение (2.11) дает распределение давления газа в призабойной фильтрующейся зоне угольного пласта для любых законов изменения пористости m и коэффициента фильтрации k в зависимости от расстояния от забоя. Введем обозначения

$$k = DK \left(\frac{y}{y^\circ} \right), \quad \frac{1}{y_0} = \frac{\vartheta \mu}{D p^*} \quad (2.12)$$

Здесь $K(y/y^\circ)$ — безразмерная функция, D — коэффициент, не зависящий от y/y° и имеющий размерность Дарси. В этих обозначениях уравнение (2.12) примет вид

$$\beta \frac{d\beta}{dy/y^\circ} = \frac{y^\circ}{y_0 K(y/y^\circ)} \left\{ m^\circ \beta^\circ - m\beta + \left(\frac{1-m^\circ}{1+a^*\beta^\circ} \beta^\circ - \frac{1-m}{1+a^*\beta} \beta \right) \frac{a^* b}{\rho^*} \right\} \quad (2.13)$$

3°. Для сред с постоянной пористостью $m = m_*$ в уравнении (2.13) переменные разделяются при любом законе фильтрации $K = K(y/y^\circ)$ и уравнение (2.13) легко интегрируется. Действительно, при $m = m^\circ = m_*$ уравнение (2.11) можно записать в следующем виде:

$$m \frac{y^\circ}{y_0} \frac{d(y/y^\circ)}{K(y/y^\circ)} = \frac{\beta d\beta}{\beta^\circ - \beta + b^* (\beta^\circ - \beta) / (1 + a^*\beta)} \quad (2.14)$$

Здесь

$$b^* = \frac{1-m}{m\rho^*} \frac{a^* b}{1+a^*\beta^\circ} \quad (2.15)$$

Интегрируя (2.14), будем иметь

$$m \frac{y^\circ}{y_0} \int_0^{y/y^\circ} \frac{d\eta}{K(\eta)} = \int_{\beta_0}^{\beta} \frac{\beta d\beta}{\beta^\circ - \beta + b^* (\beta^\circ - \beta) / (1 + a^*\beta)} \quad (2.16)$$

Здесь β_0 определяет давление газа на свободной поверхности пласта. Выполнив интегрирование в правой части уравнения (2.16), находим

$$m \frac{y^\circ}{y_0} \int_0^{y/y^\circ} \frac{d\eta}{K(\eta)} = z(\beta) - z(\beta_0) \quad (2.17)$$

где

$$z(\beta) = -\beta - \beta^\circ \frac{1 + a^*\beta^\circ}{1 + b^* + a^*\beta^\circ} \ln(\beta^\circ - \beta) + \frac{b^*}{a^*} \frac{1 + b^*}{1 + b^* + a^*\beta^\circ} \ln(1 + b^* + a^*\beta)$$

При $p^* = p^\circ$, $\rho^* = \rho^\circ$ имеем $\beta^\circ = 1$. Тогда (2.18) примет вид

$$z(\beta) = -\beta - \frac{1 + a^*}{1 + a^* + b^*} \ln(1 - \beta) + \frac{b^*}{a^*} \frac{1 + b^*}{1 + a^* + b^*} \ln(1 + b^* + a^*\beta) \quad (2.19)$$

Рассмотрим изменение давления газа в порах угольного пласта на участке, где в результате изменения нагрузки на пласт пористость m изменяется, но в то же время остается в таких пределах, что на данном участке фильтрация отсутствует. Действительно, если до разгрузки газонепроницаемый пласт имел пористость m_* , то при разгрузке в результате прохождения выработки он будет оставаться газонепроницаемым до тех пор, пока пористость m не достигнет некоторого значения $m > m^\circ$, при которой открывается просвет n между зернами [6].

Таким образом, в области, в которой пористость в результате разгрузки пласта изменяется в пределах

$$m_* \leq m \leq m^\circ \quad (2.20)$$

будет отсутствовать течение газа, а изменение давления газа в порах будет происходить только за счет перехода сорбированного газа в свободное состояние. Зная закон перехода сорбированного газа в свободное состояние, легко установить зависимость изменения давления газа в порах при изменении пористости данной среды в пределах, определенных неравенством (2.20). Для этого составим уравнение баланса газа, заключенного в некотором кажущемся объеме v с пористостью m .

Если Q — общее количество газа в единице кажущегося объема с пористостью m , то Qv выражает общее количество газа, содержащегося в элементарном объеме.

Так как фильтрация газа отсутствует, то при изменении объема v и пористости m произведение $Qv = \text{const}$.

Пусть до разгрузки пласта объем рассматриваемого элемента был равен v_* , пористость равна m_* , а общее количество газа, содержащегося в единице объема неразгруженного элемента, равно Q_* . Тогда будем иметь $Qv = Q_*v_*$.

Если считать, что переход сорбированного газа в свободное состояние определяется законом Ленгмюра, то, пользуясь выражением (2.9) для Q , уравнение баланса газа можно записать в виде

$$\left[m_*\rho_* + (1 - m_*) \frac{abP_*}{1 + abP_*} \right] \frac{v_*}{v} = m\rho + (1 - m) \frac{abP}{1 + abP} \quad (2.21)$$

Но так как

$$m = 1 - \frac{v_3}{v}, \quad m_* = 1 - \frac{v_3}{v_*}$$

то

$$\frac{v_*}{v} = \frac{1 - m}{1 - m_*}$$

Подставляя выражение для v_*/v в (2.21) и разрешив его относительно m , будем иметь

$$m = \frac{\frac{m_*}{1 - m_*} \beta_* + \frac{a^*}{1 + a^*\beta_*} \frac{b}{\rho^*} \frac{\beta_* - \beta}{1 + a^*\beta}}{\beta + \frac{m_*}{1 - m_*} \hat{\beta}_* + \frac{a^*}{1 + a^*\beta_*} \frac{b}{\rho^*} \frac{\beta_* - \beta}{1 + a^*\beta}} \quad (\beta_* = \frac{p_*}{p^*}) \quad (2.22)$$

Здесь $\hat{\beta}_*$ определяет давление газа в нетронутом пласте.

Если принять, что в неразгруженном угольном пласте пористость отсутствует, т. е. $m_* = 0$, то уравнение (2.22) примет вид

$$m = \frac{\frac{a^*}{1 + a^*\beta_*} \frac{b}{\rho^*} \frac{\beta_* - \beta}{1 + a^*\beta}}{\beta + \frac{a^*}{1 + a^*\beta_*} \frac{b}{\rho^*} \frac{\beta_* - \beta}{1 + a^*\beta}} \quad (2.23)$$

Уравнения (2.22) и, в частности (2.23), дают изменение давления газа в порах той части угольного пласта, которая подвергается разгрузке в такой степени, что пористость ее m остается в пределах, ограниченных неравенством (2.20).

Зная закон распределения коэффициента фильтрации k и пористости m впереди угольного забоя как функции расстояния от поверхности забоя, по уравнениям (2.13) и (2.22) легко вычислить кривую депрессии газа впереди движущегося угольного забоя.

§ 3. Распределение пористости и коэффициента фильтрации в призабойной зоне пласта. Будем считать, что относительное объемное изменение $\Delta v/v$ некоторого элемента пласта, которое происходит только за счет изменения объема пор, является линейной функцией разгрузки пласта $\sigma_n - \sigma$, где σ_n — среднее напряжение в нетронутом угольном пласте на глубине H , σ — среднее напряжение в призабойной зоне разгрузки.

Как показано в работе [8], при изучении напряженного состояния угольного пласта можно считать, что вблизи забоя пласт ведет себя как пластическая полоса со свободной границей, зажатая между жесткими плитами. Исходя из этого и считая интенсивность касательных напряжений в угле постоянной и равной s , распределение нормальных компонент напряжений в призабойной зоне можно записать в виде решения Прандтля

$$-\frac{\sigma_x}{s} = \frac{\pi}{2} + \frac{y}{h}, \quad -\frac{\sigma_y}{s} = \frac{\pi}{2} + \frac{y}{h} - 2\sqrt{1 - \frac{x^2}{h^2}}$$

Здесь $2h$ — мощность пласта.

Принимая во внимание осредненное по мощности пласта значение σ , замечаем, что разгрузка пласта $\sigma_n - \sigma$ в призабойной зоне будет линейной функцией расстояния от забоя. Следовательно, и $\Delta v / v$ можно считать линейной функцией расстояния от забоя.

В работе [6] рассмотрена зависимость пористости и коэффициента фильтрации от относительного объемного изменения $\Delta V / V$ деформированного фиктивного грунта. Чтобы установить зависимость пористости и коэффициента фильтрации от относительного объемного изменения $\delta v = \Delta v / v$ естественного грунта, а следовательно, и зависимость их от расстояния от поверхности забоя, определим границы изменения $\delta V = \Delta V / V$ деформированного фиктивного грунта, соответствующие границам изменения δv естественного грунта и установим связь между δV и δv .

Пусть V — некоторый начальный объем недеформированного фиктивного грунта. Можно подобрать такую плотность упаковки шаров-зерен, образующих фиктивный грунт, чтобы при некотором объемном сжатии этого грунта пористость деформированного фиктивного грунта была равна некоторой начальной пористости m_0 естественного грунта. При этом объем выбранного элемента фиктивного грунта стал равным V_0 . Дальнейшее объемное сжатие деформированного фиктивного грунта, рассматриваемый элемент которого принимает объем v , будет соответствовать объемному сжатию естественного грунта, а относительные объемные изменения деформированного фиктивного грунта и естественного грунта будут характеризоваться отношениями

$$\delta V = \frac{\Delta V}{V} = \frac{v - V}{V}, \quad \delta v = \frac{\Delta v}{v} = \frac{v - V_0}{V_0}$$

соответственно. Отсюда находим

$$\delta V = (\delta V)_0 + [1 + (\delta V)_0] \delta v, \quad (\delta V)_0 = \frac{V_0 - V}{V_0} \quad (3.1)$$

Пусть на поверхности забоя угольного пласта пористость равна m_0 и ей соответствует некоторое значение $\Delta V / V$, равное $(\delta V)_0$. На границе $y = y^\circ$, где газопроницаемость становится равной нулю, пористость принимает значение, равное m° , а соответствующее ей значение δV равно $(\delta V)^\circ$. Исходя из этого и учитывая линейную зависимость $\Delta v / v$ от расстояния от забоя, будем иметь

$$\delta V = [(\delta V)^\circ - (\delta V)_0] \frac{y}{y^\circ} + (\delta V)_0 \quad (3.2)$$

Так как в нетронутом угольном пласте пористость равна m_* , а на поверхности она равна m_0 , то на некотором расстоянии y_* от забоя в области влияния разгрузки пласта пористость примет значение, равное m_* , и ей будет соответствовать некоторое значение δV , равное $(\delta V)_*$. При этом заметим, что когда y / y° в уравнении (3.2) изменяется в пределах

$$0 \leq y / y^\circ \leq 1 \quad (3.3)$$

распределение давления газа описывается уравнением (2.13), а когда

y / y° в уравнении (3.2) изменяется в пределах

$$1 \leq \frac{y}{y^\circ} \leq \frac{y_*}{y^\circ} \quad \left(\frac{y_*}{y^\circ} = \frac{(\delta V)_* - (\delta V)_0}{(\delta V)^\circ - (\delta V)_0} \right) \quad (3.4)$$

распределение давления газа описывается уравнением (2.22).

Как известно [6], выражения для пористости и коэффициента фильтрации имеют вид

$$m = 1 - \frac{\pi}{6(1-\cos\theta)\sqrt{1+2\cos\theta}} \frac{1}{1+\delta V} \\ k = DK, \quad D = 1.022 \cdot 10^4 d^2 \quad (3.5)$$

Здесь d — диаметр зерен, образующих соответствующий фиктивный грунт, и выражен в миллиметрах, при этом k принимает размерность дарси

$$K = \frac{n^2}{(1-m)^{1/3}} \left[\frac{6}{\pi} (1-\cos\theta) \sqrt{1+2\cos\theta} \right]^{1/3} \quad (3.6)$$

$$n = 1 - \lambda \left[\sqrt{\xi^2 - 1} + \xi^2 \left(\frac{\pi}{v} - \operatorname{arctg} \sqrt{\xi^2 - 1} \right) \right] \quad (3.7)$$

Параметр ξ определяется через δV из соотношения

$$\xi^2 (9 - \gamma \xi) - 3 = \frac{\varepsilon}{1 + \delta V} \quad (3.8)$$

где θ — параметр, характеризующий плотность упаковки зерен, причем в случае слабой упаковки ($\theta = 90^\circ$) имеем

$$\lambda = i, \quad v = 4, \quad \gamma = 4, \quad \varepsilon = 2$$

а в случае плотной упаковки ($\theta = 60^\circ$)

$$\lambda = \sqrt{3}, \quad v = 6, \quad \gamma = 5, \quad \varepsilon = 1$$

Таким образом, если известна пористость нетронутого угольного пласта и пористость его на поверхности забоя, то по формулам (3.2), (3.5) — (3.8) найдем распределение пористости и коэффициента фильтрации в призабойной зоне влияния разгрузки, т. е. от поверхности забоя до границы y_* , которая определяется из соотношения (3.4).

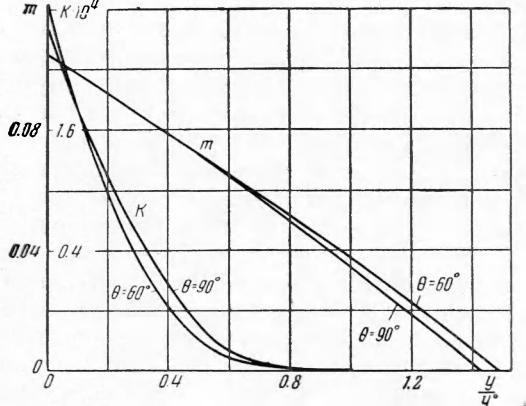
На графиках (фиг. 2) показано изменение пористости и параметра K , характеризующего коэффициент фильтрации. Графики построены для слабой ($\theta = 90^\circ$) и плотной ($\theta = 60^\circ$) упаковок при $m_0 = 0.104$ и m_* , равной нулю¹.

Соответствующие им кривые депрессии газа, построенные в результате численного интегрирования уравнения (2.13) и решения уравнения (2.22), показаны на фиг. 3—5.

§ 4. Влияние параметров угольного пласта на кривые депрессии газа.
1°. Анализ полученных результатов показывает, что по характеру распределения давления газа угольный пласт имеет три зоны:

1) газопроницаемая зона, простирающаяся в глубь массива от поверхности забоя на расстояние $y = y^\circ$;

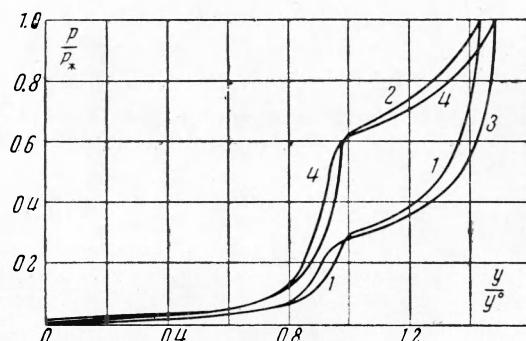
¹ Известно [1], что пористость разгруженных образцов углей в большинстве случаев колеблется в пределах от 0.06 до 0.16.



Фиг. 2. Распределение пористости m и параметра $K = k/D$ в призабойной зоне пласта

2) газонепроницаемая зона влияния разгрузки, которая следует непосредственно за газопроницаемой зоной и уходит в глубь массива на расстояние $y = y_*$ от забоя. Величина y_* зависит от механических свойств угольных пластов и колеблется в пределах от $1.41y^\circ$ до $1.48y^\circ$;

3) зона отсутствия разгрузки. Она следует за газонепроницаемой зоной влияния разгрузки и простирается в глубь угольного пласта.



Фиг. 3. Распределение давления газа в призабойной зоне пласта ($y^\circ/y_0 = 4 \cdot 10^{-7}$) в случае «слабой упаковки», $\theta = 90^\circ$; кривая 1 при $ap_* = 31.88$, $b/p_* = 0.16$; кривая 2 при $ap_* = 6.25$, $b/p_* = 0.34$ и в случае «плотной упаковки», $\theta = 60^\circ$; кривая 3 при $ap_* = 31.88$, $b/p_* = 0.16$; кривая 4 при $ap_* = 6.25$, $b/p_* = 0.34$

При расчете кривых депрессии газа (фиг. 3) установлено, что изменение сорбционных характеристик пласта оказывает незначительное влияние на характер кривых депрессии газа в газопроницаемой зоне и весьма значительное — на кривые депрессии газа в газонепроницаемой зоне влияния разгрузки¹. Если сорбционную способность угля характеризовать постоянными a , b' , входящими в закон Ленгмюра (2.6), то особая роль в распределении давления газа принадлежит постоянной ap_* .

Здесь p_* — давление газа в нетронутом угольном массиве. Действительно, при увеличении пористости в газонепроницаемой зоне влияния разгрузки сорбированный газ переходит в свободное состояние, поддерживая равновесное состояние между сорбционной способностью пласта и давлением газа в порах. При этом имеет место падение давления газа, которое будет тем значительнее, чем больше произведение ap_* .

Следует особо отметить, что к моменту открытия пор до фильтрационного состояния давление газа в них в зависимости от величины коэффициента ap_* может упасть на значительную величину. В частности, при $ap_* = 6.25$ давление газа только за счет расширения пор при разгрузке к моменту перехода в фильтрационное состояние падает почти на 40% по отношению p_* , а при $ap_* = 31.88$ давление газа падает почти на 70%.

Величина параметра b / p_* оказывает обратное параметру ap_* влияние на падение давления газа при расширении пор, но это влияние значительно меньше, чем влияние параметра ap_* .

2°. В газопроницаемой зоне основное влияние на характер кривой депрессии оказывает параметр

$$\frac{y^\circ}{y_0} = \frac{y^\circ \vartheta \mu}{D p_*}$$

и значение функции $K(y / y^\circ)$ на поверхности забоя.

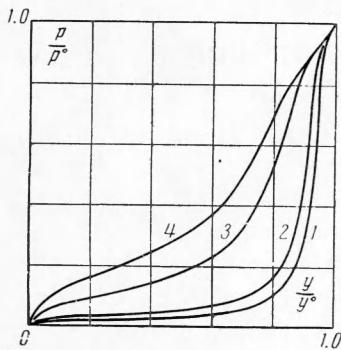
Из графика (фиг. 4) видно, что основное падение давления газа в газопроницаемой зоне происходит вблизи границы $y = y^\circ$. С уменьшением значения параметра y° / y_0 или с увеличением значения функции $K(y / y^\circ)$ на границе $y = 0$ крутизна падения давления газа вблизи границы $y = y^\circ$ значительно увеличивается. Например², давление газа на расстоянии

¹ Численные значения сорбционных постоянных a , b' заимствованы из работы [1].

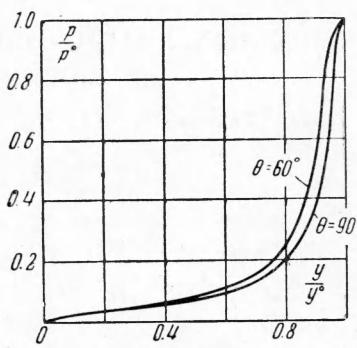
² Если положить $y^\circ = 4 \text{ м}$, $\vartheta = 1 \text{ м/сутки}$, $\mu = 0.011 \text{ сантимуаз}$, $p_* = p^* = 125 \text{ ат}$, и учитывая, что 1 сантимуаз $= (10^{-5}/981) \text{ кг} \cdot \text{сек} \cdot \text{см}^{-2}$, 1 дарси $= (10^{-5}/981) \text{ см}^2$, то значению $y^\circ/y_0 = 4 \cdot 10^{-7}$ соответствует диаметр зерен $d = 0.1 \text{ мм}$, а значению $y^\circ/y_0 = 4 \cdot 10^{-5}$ соответствует диаметр зерен $d = 0.01 \text{ мм}$.

$y = 0.6y^{\circ}$ отличается от давления газа на границе $y = y^{\circ}$ на 77% при $y^{\circ}/y_0 = 4 \cdot 10^{-5}$ и на 97% при $y^{\circ}/y_0 = 4 \cdot 10^{-7}$.

З°. Таким образом, в призабойной зоне угольного пласта до расстояния порядка $0.6y^{\circ}$ — $0.8y^{\circ}$ от поверхности забоя имеем незначительное давление газа по сравнению с давлением газа в нетронутом массиве (фиг. 3).



Фиг. 4



Фиг. 5

Фиг. 4. Распределение давления газа в призабойной газопроницаемой зоне пласта, $\theta = 60^\circ$: $ap_* = ap^{\circ} = 31.88$, $b/p^{\circ} = 0.16$; кривая 1 при $y^{\circ}/y_0 = 4 \cdot 10^{-7}$; кривая 2 при $y^{\circ}/y_0 = 16 \cdot 10^{-7}$; кривая 3 при $y^{\circ}/y_0 = 4 \cdot 10^{-5}$; кривая 4 при $y^{\circ}/y_0 = 16 \cdot 10^{-5}$.

Фиг. 5. Распределение давления газа в призабойной газопроницаемой зоне пласта в случае «слабой и плотной» упаковки при $ap^{\circ} = 9.1$, $b/y^{\circ} = 0.54$, $y^{\circ}/y_0 = 4 \cdot 10^{-7}$.

На остальном участке газопроницаемой зоны до границы $y = y^{\circ}$ давление газа резко возрастает и лишь при подходе к самой границе $y = y^{\circ}$ градиент давления газа падает. На границе $y = y^{\circ}$ кривая депрессии газа в газопроницаемой зоне непрерывно переходит в кривую депрессии газа в газонепроницаемой зоне влияния разгрузки, где давление газа и градиент давления газа вновь возрастают с увеличением расстояния от поверхности забоя. На границе $y = y_*$ давление газа достигает своего максимального значения, близкого к давлению горных пород в нетронутом угольном массиве.

Как видно из графиков (фиг. 5), плотность упаковки зерен незначительно сказывается на характере распределения и величине давления газа в призабойной зоне пласта.

В заключение автор благодарит С. А. Христиановича за ценные советы и указания, сделанные им при выполнении работы.

Поступила
24 III 1961

ЛИТЕРАТУРА

- Скочинский А. А., Ходот В. В. и др. Метан в угольных пластах. Углехиздат, 1958.
- Борбов И. В., Кричевский Р. М., Михайлов В. И. Внезапные выбросы угля и газа на шахтах Донбасса. Углехиздат, 1954.
- Карагодин Л. Н., Волошин Н. Е. Влияние очистного забоя на давление газа в массиве угля. Бюллетень МакНИИ, 1960, № 11.
- Кричевский Р. М. О природе внезапных выделений газа с выбросом угля. Бюллетень МакНИИ, 1948, № 18.
- Христианович С. А. Распределение давления газа вблизи движущейся поверхности угля. Изв. АН СССР, ОТН, 1953, № 12.
- Кузнецова С. В. Об одной модели пористого грунта. (Геометрические параметры и коэффициент фильтрации грунта.) ПМТФ, 1961, № 1.
- Пальвелев В. Т. Сорбция метана ископаемыми углами Донбасса при высоких давлениях. Изв. АН СССР, ОТН, 1945, № 6.
- Баренблatt Г. И., Христианович С. А. Об обрушении кровли при горных выработках. Изв. АН СССР, ОТН, 1955, № 11.