

Член-корреспондент АН СССР З. Ф. ЧУХАНОВ

### ПОДЗЕМНАЯ ГАЗИФИКАЦИЯ МЕТОДОМ ФИЛЬТРАЦИИ

#### 1. Рациональное распределение скважин

Автором в 1938 г. был теоретически разработан и предложен (1) метод подземной газификации углей и сланцев, названный им „метод фильтрации“. В дальнейшем этот термин получил широкое распространение. Теперь он очень часто применяется ко всем способам

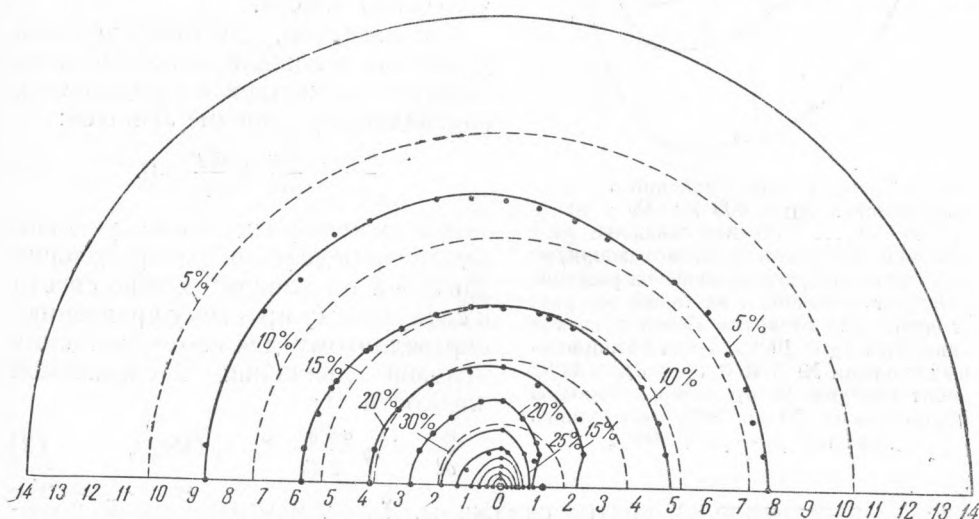


Рис. 1. Распределение давлений в угольном пласте:  $R_{\text{п}} = 800 r_1$ ;  $R_{\text{г}} = 40 r_1$ ;  $r_1 = r_2$ . Дугевая скважина расположена в центре пласта. Дебит дугевой скважины  $d_{\text{д}} = 100\%$ ; дебит газоприемной скважины № 1  $d_{\text{г}_1} = 36\%$ ; дебит контура П  $d_{\text{п}} = 64\%$ ; — — — изобары получены аналитически по уравнению (7) при отсутствии газоприемных скважин; — — — изобары, построенные от 5 до 50% избыточного давления  $p_1 - p_{\text{п}} = 100\%$ .\*

подземной газификации, основанным в той или иной степени на продувании угольного целлика, включая метод проницаемости или, как мы его назвали (1), „метод чистой фильтрации“.

Появившиеся в дальнейшем варианты (2) нашего метода, включая действующий и осуществляемый в настоящее время в подмосковном бассейне варианты, в своей основе имеют правильный принцип, данный в нашей работе и базирующийся на термической подготовке пласта, а не на чистой фильтрации. Однако, как мы покажем, эти варианты метода фильтрации построены на совершенно нерациональной схеме распределения скважин по панели и организации как процесса термической подготовки, так и непосредственно процесса эксплуатационной работы „панели“.

Рассмотрим для примера пласт подмосковного угля, залегающий в виде горизонтально простирающейся „линзы“. Мощность пласта

\* Здесь, так же как на рис. 2, 3, 4, изображены результаты, полученные на электроинтеграторе. ○ — скважина для подачи дутья; ● — газоприемная скважина.

считаем в среднем постоянной. Кровлю и почву считаем значительно более плотными, чем угольный пласт\*. Примерно в середине линзы, форму которой для простоты примем в виде окружности с радиусом  $R_{\Pi}$ , пробурена скважина до подошвы пласта. Радиус этой дутьевой скважины в области угольного пласта обозначим через  $r_1$ .

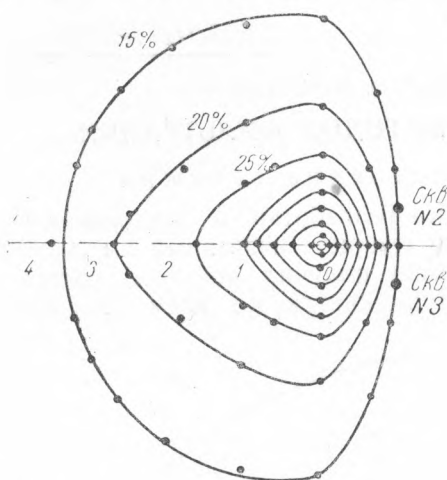


Рис. 2. Распределение давлений в угольном пласте:  $R_{\Pi} = 800 r_1$ ;  $R_{\Gamma} = 40 r_1$ ;  $r_1 = r_2 = r_3 \dots$ . Дутьевая скважина расположена в центре пласта, две газоприемных скважины расположены на расстоянии  $R_2$  от дутьевой и на таком же расстоянии друг от друга. Дебит дутьевой скважины  $d_{\text{д}} = 100\%$ ; дебит газоприемных скважин № 2 и 3  $d_{\Gamma_2} + d_{\Gamma_3} = 44\%$ ; дебит контура П  $d_{\Pi} = 56\%$ . Изобары построены от 10 до 50% избыточного давления  $p_1 - p_{\Pi} = 100\%$ .

Подведем к скважине воздух под некоторым избыточным давлением  $p_1$ . Обычно принято считать, что пласт (пористый резервуар), насытившись воздухом, перестанет принимать его, лишь небольшое количество воздуха (газа) будет уходить из пласта за счет проницаемости кровли и совсем ничтожное количество воздуха вследствие большой протяженности пласта (несколько километров) будет уходить вдоль угольного пласта.

Как известно, для таких условий движения в каждой точке области, занятой движущейся жидкостью, справедливо уравнение Лапласа:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0. \quad (1)$$

Для отмеченных выше условий задачу определения распределения давлений по „линзе“ можно свести к следующему простому уравнению, справедливому для изотермических условий движения несжимаемой жидкости\*\*:

$$\frac{\partial p}{\partial l} = \zeta_{\Phi} \frac{\rho W_{\Phi}^2}{2 d_{\Phi}} \quad \zeta_{\Phi} \rightarrow \varphi(\text{Re}_{\Phi}), \quad (2)$$

где  $l$  — расстояние от центра скважины,  $\zeta_{\Phi}$  — коэффициент сопротивления,  $W_{\Phi}$  — скорость фильтрации,  $d_{\Phi}$  — характерный размер частиц угольного пласта, образующих „фильтр“,  $\text{Re}_{\Phi} = W_{\Phi} d_{\Phi} / \nu$ .

Для ламинарной области по экспериментальным исследованиям:

$$\zeta_{\Phi \text{ л}} = \frac{A}{\text{Re}_{\Phi}}, \quad (3)$$

для турбулентного режима

$$\zeta_{\Phi \text{ т}} \sim A_1, \quad (4)$$

т. е. практически  $\zeta_{\Phi \text{ т}}$  не зависит от  $\text{Re}_{\Phi}$ .

Таким образом, для обоих режимов соответственно получим:

$$\left(\frac{dp}{dl}\right)_{\text{л}} = \frac{A_2 W_{\Phi}}{d_{\Phi}^2}; \quad \left(\frac{dp}{dl}\right)_{\text{т}} = \frac{A_3 W_{\Phi}^2}{d_{\Phi}}, \quad (5)$$

а при определенном среднем  $d_{\Phi}$

$$\left(\frac{dp}{dl}\right)_{\text{л}} = B W_{\Phi}; \quad \left(\frac{dp}{dl}\right)_{\text{т}} = B_1 W_{\Phi}^2, \quad (6)$$

и, учитывая изменение  $W_{\Phi}$  с  $l$ , обозначая расход воздуха через  $V$ , получим

$$(p_1 - p_2)_{\text{л}} = B_2 V \int \frac{1}{l} dl + C = B_2 V \ln \frac{l}{r_1}, \quad (7)$$

\* В дальнейшем мы рассмотрим влияние этих факторов на процесс.

\*\* Учет сжимаемости газа не меняет наших выводов.

$$(p_1 - p_2)_T = B_3 V^2 \int \frac{1}{l} dl + C_1 = B_3 V^2 \ln \frac{l}{r_1} \quad (8)$$

$$(V)_{\text{л}} = \frac{(p_1 - p_2)_{\text{л}}}{B_2 \ln \frac{l}{r_1}}; (V)_T = \sqrt{\frac{(p_1 - p_2)_T}{B_3 \ln \frac{l}{r_1}}} \quad (9)$$

Полученные уравнения (8) и (9) весьма характерны — они однозначно показывают, что при заданном напоре дутья в центральной скважине расход дутья

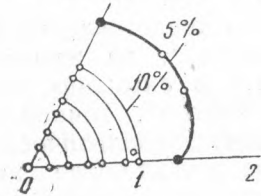


Рис. 3. Распределение давлений в угольном пласте:  $R_{\text{л}}=800 r_1$ ;  $R_T = 40 r_1$ ;  $r_1=r_2=r_3 \dots$ . Дутьевая скважина расположена в центре пласта, 6 газоприемных скважин расположены на  $R_T$  от дутьевой и равномерно распределены по окружности. Дебит дутьевой скважины № 1  $d_{\text{л}}=100\%$ ; дебит газоприемных скважин  $d_{\Gamma_2} + d_{\Gamma_3} + d_{\Gamma_4} + d_{\Gamma_5} + d_{\Gamma_6} + d_{\Gamma_7} = 86\%$ ; дебит контура П  $d_{\text{л}} = 14\%$ ; — изобары построены от 5 до 50% избыточного давления  $p_1 - p_{\text{л}} = 100\%$ .

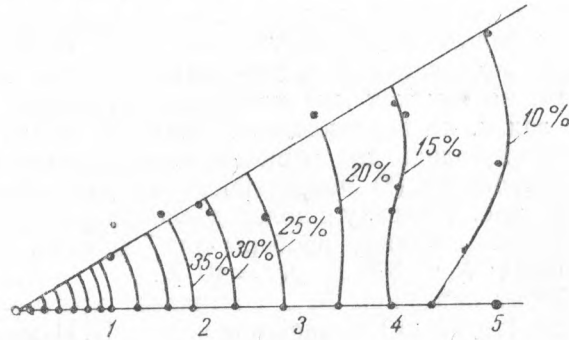


Рис. 4. Распределение давлений в угольном пласте:  $R_{\text{л}}=200 r_1$ ;  $R_T = 40 r_1$ ;  $r_1=r_2=r_3 \dots$ . Дутьевая скважина расположена в центре угольного пласта. 6 газоприемных скважин расположены на расстоянии  $R_T$  от дутьевой и равномерно распределены по окружности. Дебит дутьевой скважины № 1  $d_{\text{л}}=100\%$ ; дебит газоприемных скважин  $d_{\Gamma_2} + d_{\Gamma_3} + d_{\Gamma_4} + d_{\Gamma_5} + d_{\Gamma_6} + d_{\Gamma_7} = 75\%$ ; дебит контура П  $d_{\text{л}} = 25\%$ ; — изобары построены от 10 до 80% избыточного давления  $p_1 - p_{\text{л}} = 100\%$ .

меняется незначительно при изменении  $l$ . Подмосковский угольный пласт „линза“, как правило, выклинивается на краях и выходит на поверхность земли\*. В том случае, когда сам пласт угля не выходит на поверхность, так или иначе выходят на поверхность соединенные с „концами“ пласта газопроницаемые породы. Для этих условий очевидно, что задача, поставленная нами, совершенно не соответствует насыщению воздухом „пористого сосуда“, а является типичной задачей гидравлики с постоянным  $p_0$  на контуре пористого „сосуда“ с определенным для каждого месторождения значением радиуса этого „сосуда“. Абсолютная величина этого радиуса в больших пределах его изменения мало меняет расход воздуха  $V$ .

Для примера возьмем  $R_{\text{л}}=1$  м и соответственно  $R_{\text{л}_2}=10$  м,  $R_{\text{л}_3}=100$  м,  $R_{\text{л}_4}=1$  км и  $R_{\text{л}_5}=10$  км. Относительный расход воздуха при заданном напоре дутья изменится соответственно при  $r_1=0,1$  м:

$$V_{\text{л}_1}=1,00; V_{\text{л}_2}=0,50; V_{\text{л}_3}=0,33; V_{\text{л}_4}=0,25; V_{\text{л}_5}=0,20 \text{ и } V_{\text{т}_1}=1,00;$$

$$V_{\text{т}_2}=0,71; V_{\text{т}_3}=0,58; V_{\text{т}_4}=0,50 \text{ и } V_{\text{т}_5}=0,45.$$

Как видно из примера, при 10000-кратном увеличении расстояния от скважины до выходящего на поверхность земли „контура“ расход воздуха изменяется всего лишь при ламинарном режиме в 5 раз и при турбулентном режиме в 2 с небольшим раз.

\* Большею частью в оврагах.

Таким образом, рассматривая задачу подземной газификации подмосковного угля методом фильтрации, мы должны изображать ее так, как это сделано на рис. 1, т. е. представляя угольный пласт как „пористый сосуд“ с выходным контуром П, на котором имеет место атмосферное давление  $p_0$ .

На некотором расстоянии  $R_r$  от дутьевой скважины № 1 пробуем такую же воздухо- или газоприемную скважину № 2 с радиусом  $r_2 = r_1$ . Давление во второй скважине равно  $p_0$ . Каковы будут расходы воздуха в эту скважину и поле давлений в угольном пласте?

Если исходить из обычного, распространенного представления панели как практически замкнутого „пористого сосуда“, то весь или почти весь воздух должен идти из скважины № 1 в скважину № 2.

По нашей схеме получается резко отличная картина. Точное решение поставленной задачи может быть проведено аналитическим путем, но так как нам необходимо решение ряда других более сложных задач, не поддающихся точному аналитическому решению, мы воспользовались для решения наших задач методом электрического моделирования<sup>(3)</sup> Энергетического института АН СССР\*.

На рис. 1 наряду с полем давления, рассчитанным по уравнению (7), изображены кривые изобары для данного случая при следующих условиях:  $R_n = 800 r_1$ ;  $R_r = 40 r_1$ .

Дебит скважины № 2 составляет всего  $\sim 35\%$ , остальной воздух уходит (теряется) на внешний контур П. Изменение положения скважин на панели принципиально мало меняет картину. Так же мало влияет на дебит скважины № 2 (приемной) и форма „линзы“, вернее, форма контура.

Все случаи двухскважинной фильтрации, даже при изотермическом режиме фильтрации, весьма невыгодны по дебиту, так как потери дутья и газа неизбежно должны быть относительно велики. При наличии очага под землей, т. е. в реальных условиях подземной газификации, как мы покажем в следующей работе, они будут еще больше.

Решение задач при различном расположении скважин показывает, что для получения оптимальных результатов газоприемные скважины должны располагаться „охватывающим контуром“ вокруг дутьевых. На рис. 2, 3, 4 показаны результаты замыкания кольца скважины вокруг одной дутьевой скважины. Эффект „кольцевого“ расположения скважин весьма убедителен, и его преимущества ясны из рассмотрения приведенных рисунков. При выгазовывании первого контура панели газоприемные скважины становятся дутьевыми, и тогда следующее кольцо скважины будет газоприемным. Затем включается третье, четвертое и т. д. кольца. Естественно, что при включении новых площадей в газификацию „кольцевое“ расположение скважины вырождается в расположение параллельными рядами, и естественно поэтому—применение двухстороннего параллельного расположения скважин принципиально равнозначно „кольцевому“, точнее—расположению „замкнутым контуром“.

С точки зрения дебитов газоприемных скважин особенно благоприятен двух- или трехступенчатый отбор газа, т. е. отбор одновременно во 2-м, 3-м и т. д. „кольцах“. При этом в силу благоприятного поля давлений в пласте неизбежно должны снизиться и возможные в некоторых случаях потери газа вдоль покрывающих уголь пористых пластов породы. В дальнейшем мы рассмотрим наиболее благоприятные условия подготовки панели к газификации и условия ее эксплуатации.

Поступило  
8 I 1947

#### ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

<sup>1</sup> З. Ф. Чуханов, М. Я. Сагайдак, Изв. АН СССР, ОТН, № 8 (1939). <sup>2</sup> А. Б. Чернышев, Изв. АН СССР, ОТН, № 9 (1939). <sup>3</sup> Ю. Г. Толстов, ЖТФ, 12, № 10 (1942).

\* По нашему заданию были решены необходимые нам задачи. Решение проводилось при консультации Ю. Г. Толстова.