

Г.Г. Каркашадзе, В.А. Макаров

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ОТКАЧКИ МЕТАНОВОЗДУШНОЙ СМЕСИ ИЗ ВЫРАБОТАННОГО ПРОСТРАНСТВА ЧЕРЕЗ ДЛИННЫЕ НАПРАВЛЕННЫЕ СКВАЖИНЫ

Представлена методика расчета темпа откачки газа из выработанного пространства через дегазационные скважины. Описана аналитическая модель расчета, построенная на достижениях прикладной теории аэродинамических сопротивлений. Выполнен сравнительный анализ эффективности извлечения метановоздушной смеси через вертикальные (базовый вариант) и горизонтальные скважины (новый вариант), пробуренные с земной поверхности и из подземной выработки. Расчетами установлено, что важнейшим фактором эффективности дегазации является диаметр скважин. Сформулирован вывод, что для эффективной дегазации выработанного пространства через длинные направленные дегазационные скважины необходимо найти возможность бурения скважин диаметром – 200 мм и более. Скважины диаметром 96 мм существенно уступают по фактору дегазации базовому варианту с бурением скважин с земной поверхности.

Ключевые слова: дегазационные скважины, темп откачки, аналитическая модель, аэродинамические сопротивления, диаметр скважины, мощность вакуумного насоса.

По мере подземной отработки газоносного угольного пласта длинными столбами за пределами лавы формируется зона выработанного пространства, которое заполняется метаном и воздухом. Метановоздушная смесь из выработанного пространства частично поступает в лаву, что отражается на безопасности по газовому фактору [1, 2, 3]. Для извлечения опасной смеси из выработанного пространства на практике широко применяют базовую технологию бурения вертикальных скважин с дневной поверхности, через которые вакуумным насосом производят откачку газа. Однако базовая технология дегазации требует осуществления трудоемких технических мероприятий на

поверхности шахтного поля, что приводит к значительным материальным затратам.

Начиная с 2011 г. на шахте им. С.М. Кирова ОАО «СУЭК-Кузбасс» для подземного бурения стали использовать передовую технику VLD-1000A (компания «Valley Longwall Drilling Systems International Pty») [4, 5]. Станки размещают в подземной выработке и осуществляют направленное бурение скважин диаметром длиной 1000 м и более в угольных пластах и вмещающих породах. Рекордные скорости проходки скважин были достигнуты при бурении скважин 96 мм, однако станок также позволяет бурить скважины диаметром 120 мм. На базе технических возможностей нового бурового оборудования, на шахте реализуется другой вариант дегазации выработанного пространства, принципиальная схема которого представлена на рис. 1.

Газоносный угольный пласт 1 разрабатывается по столбовой системе разработки с лавой 2, ограниченной крепью от выработанного пространства 3 с обрушенными породами кровли 4. В породах кровли пробурены длинные дегазационные скважины 5, которые подключены к шахтному газопроводу, выходящему через подземные выработки на дневную поверхность. Откачку метановоздушной смеси осуществляют с помощью стационарного вакуумного насоса, расположенного на поверхности (на рисунке не показано). В отличие от базовой технологии описанный вариант дегазации не требует бурения скважин с дневной поверхности, что создает определенные организационные и технико-экономические преимущества.

Однако для достижения требуемой эффективности дегазации через горизонтальные скважины необходимо оптимизировать мощность вакуумного насоса и диаметр скважин, к кото-

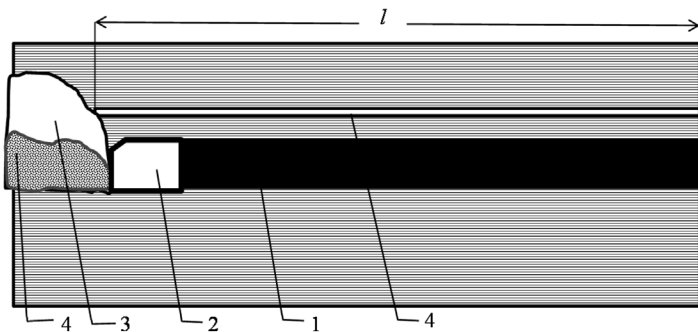


Рис. 1. Принципиальная схема дегазации выработанного пространства через горизонтальные скважины

рым предъявляются главное техническое требование – обеспечить темп откачки метановоздушной смеси, не меньше чем в базовой технологии. Отличительной особенностью новой технологической схемы является постепенное сокращение длины дегазационной скважины. Поэтому наибольшее аэродинамическое сопротивление магистрали имеет место в начале отработки выемочного столба и наименьшее в конце отработки.

Ранее в работе [6] была описана методика расчета производительности откачки метановоздушной смеси в зависимости от геометрических параметров вертикальной дегазационной скважины и мощности вакуумного насоса. В основе расчетной модели использована связь между потребляемой мощностью и аэродинамическим сопротивлением в магистралях

$$N = \frac{G}{\rho} (\Delta P_0 + \Delta P + \Delta P_c), \quad (1)$$

где N – потребляемая мощность вакуум-насоса, Вт; ΔP_0 – внутреннее аэродинамическое сопротивление вакуум-насоса, Па; G – массовый темп откачки метановоздушной смеси, кг/с; ρ – плотность метановоздушной смеси, кг/м³; ΔP – потери напора в скважине, Па; ΔP_c – потери напора на пути движения от скважины до вакуум-насоса, Па.

При холостом режиме работы вакуум насоса массовый темп откачки максимальный и с учетом внутреннего аэродинамического сопротивления насоса определяется из выражения

$$N = \frac{G_0}{\rho_0} \Delta P_0, \text{ Вт}, \quad (2)$$

где ρ_0 – плотность воздуха на холостом ходу работы вакуум-насоса, кг/м³; G_0 – массовый темп откачки на холостом ходу, кг/с.

При этом объемный темп откачки V_0 газа составляет

$$V_0 = \frac{G}{\rho_0}. \quad (3)$$

где V_0 – объемный темп откачки, м³/с.

Следовательно, внутреннее аэродинамическое сопротивление вакуумного насоса при известных паспортных характеристиках составляет

$$\Delta P_0 = \frac{N}{V_0}. \quad (4)$$

Потери напора в дегазационной скважине пропорциональны величине аэродинамического сопротивления по ее длине

$$\Delta P = \rho g h_l. \quad (5)$$

где h_l – аэродинамическое сопротивление, м.

Величина аэродинамического сопротивления при движении метановоздушной смеси по цилиндрическому каналу – скважине, при небольших перепадах давления, что имеет место в процессе работы вакуумного насоса, определяется по формуле Вейсбаха-Дарси [7, 8]

$$h_l = \lambda \frac{l}{D} \frac{V^2}{2g}, \text{ м} \quad (6)$$

где λ – коэффициент трения, рассчитываемый по эмпирической формуле [8]

$$\lambda \approx 0,11 \left(\Delta_r + \frac{68}{Re_D} \right)^{0,25},$$

Δ_r – относительная шероховатость канала диаметром D , $\Delta_r = 2\Delta/D$; Re_D – число Рейнольдса, $Re_D = VD/\nu$; ν – кинематическая вязкость газа, м²/с; l – длина скважины, м; D – диаметр скважины, м; V – скорость газа в скважине, м/с;

$$V = \frac{4G}{\pi D^2 \rho} \quad (7)$$

Аэродинамическое сопротивление наземных коммуникаций на пути от устья скважины до вакуум-насоса ΔP_c также вычисляется по формуле Вейсбаха-Дарси

$$\Delta P_c = \rho g \sum \xi_j \frac{V^2}{2g} = \rho \sum \xi_j \frac{V^2}{2}, \quad (8)$$

где $\sum \xi_j$ – сумма коэффициентов линейных и местных сопротивлений на участке от скважины до вакуумного насоса.

Величина аэродинамического сопротивления горизонтального участка подземного магистрального трубопровода длиной l_1 диаметром D_1 составляет

$$\Delta P_1 = 0,11 \left(\frac{\Delta_1}{D_1} + \frac{17\pi\rho D_1 \nu}{G} \right)^{0,25} \frac{l_1}{D_1^5} \frac{8G^2}{\pi^2 \rho}. \quad (9)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления при плавных поворотах магистрального трубопровода по направлению из шахты на дневную поверхность

$$\xi_2 = 0,13 \cdot n_2 \quad (10)$$

где n_2 – суммарное количество поворотов

Следовательно, аэродинамическое сопротивление на участках поворотов составляет

$$\Delta P_2 = \rho g \xi_2 \frac{V^2}{2g} = \rho g \xi_2 \frac{1}{2g} \left(\frac{4G}{\pi D_1^2 \rho} \right)^2 = \frac{8 \xi_2 G^2}{\pi^2 D_1^4 \rho} \quad (11)$$

Коэффициент аэродинамического сопротивления на задвижках [4]

$$\xi_3 = 0,15 \cdot n_3, \quad (12)$$

где n_3 – суммарное количество задвижек.

Соответствующее задвижкам аэродинамическое сопротивление:

$$\Delta P_3 = \rho g \frac{8 \xi_3}{g} \cdot \frac{G^2}{\pi^2 D_1^4 \rho^2}. \quad (13)$$

С учетом представленных зависимостей вместо формулы (1) имеем нелинейное уравнение, связывающее мощность вакуумного насоса и расход метано-воздушной смеси

$$N = \frac{G}{\rho} \left(\frac{N}{V_0} + \lambda(G) \frac{l}{D^5} \cdot \frac{8G^2}{\pi^2 \rho} + \lambda_1(G) \frac{l_1}{D_1^5} \cdot \frac{8G^2}{\pi^2 \rho} + \frac{8(\xi_2 + \xi_3)G^2}{\pi^2 D_1^4 \rho} \right) \quad (14)$$

В качестве примера демонстрации методики расчета рассмотрим для сравнения два технологических варианта дегазации выработанного пространства:

1. Базовая технология – дегазация через четыре вертикальные скважины, пробуренные в купол обрушения с дневной поверхности. Диаметр обсадной трубы скважине $D = 200$ мм, длина каждой $l = 400$ м. Скважины подключены к вакуумному насосу ВВН-150 с номинальной производительностью $V_0 = 150$ м³/мин, мощностью $N = 315$ кВт.

Дополнительные параметры: шероховатость стенок скважины $\Delta = 0,15$ мм; кинематическая вязкость газа $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5}$ м²/с; плотность метано-воздушной смеси $\rho = 0,97$ кг/м³; суммарная длина трубопровода от устья скважин до вакуум-насоса $l_1 = 50$ м; диаметр наземного трубопровода $D_1 = 200$ мм; шероховатость стенок наземного трубопровода $\Delta = 0,15$ мм; количество плавных поворотов в наземном трубопроводе $n_2 = 4$; коэффициент аэродинамического сопротивления поворотов $\xi_2 = 0,13$; количество задвижек $n_3 = 4$; коэффициент аэродинамического сопротивления задвижек $\xi_3 = 0,15$.

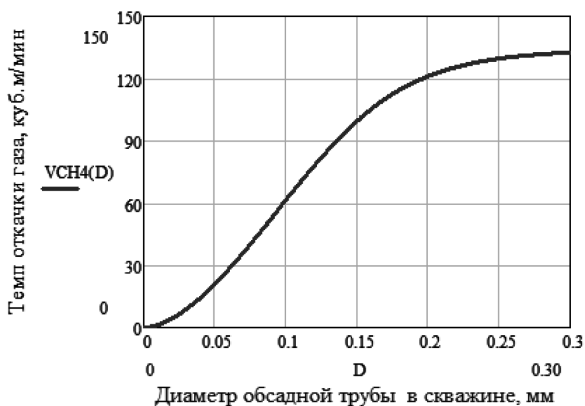


Рис. 2. Темп откачки метановоздушной смеси в зависимости от диаметра обсадной трубы

При данных условиях объемный темп откачки метановоздушной смеси, откачиваемый дегазационной системой из выработанного пространства через четыре параллельно подключенные скважины составляет $121,0 \text{ м}^3/\text{мин}$.

На рис. 2 представлена графическая зависимость темпа откачки в зависимости от весьма весомого параметра — внутреннего диаметра обсадной трубы.

2. Новый вариант — дегазация через горизонтальные скважины (рис. 1), пробуренные станком VLD-1000A из подземной выработки по породам кровли в выработанное пространство за очистным забоем. Диаметр скважин $D = 96 \text{ мм}$, максимальная длина каждой скважины в начале эксплуатации $l = 1000 \text{ м}$. Скважины присоединены к шахтному газопроводу длиной $l_2 = 580 \text{ м}$, диаметром $D_1 = 325 \text{ мм}$. Откачка газа осуществляется насосом ВВН-150, расположенным на поверхности шахтного поля.

Дополнительные параметры: шероховатость стенок скважины $\Delta = 0,3 \text{ мм}$; кинематическая вязкость газа $\nu = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; плотность метановоздушной смеси $\rho = 0,97 \text{ кг}/\text{м}^3$; суммарная длина трубопровода от устья скважин до земной поверхности $l_1 = 480 \text{ м}$; диаметр подземного трубопровода $D_1 = 325 \text{ мм}$; шероховатость стенок подземного и наземного трубопровода $\Delta = 0,15 \text{ мм}$; количество плавных поворотов в подземном и наземном трубопроводах — 20 и 4; коэффициент аэродинамического сопротивления поворотов $\xi_2 = 0,13$; количество подземных и наземных задвижек 2 и 4; коэффициент аэродинамического сопротивления задвижек $\xi_3 = 0,15$.

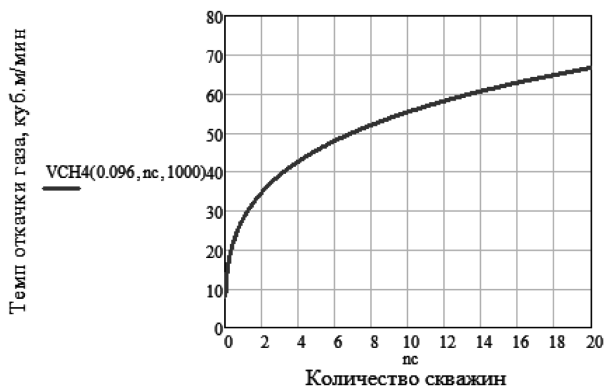


Рис. 3. Темп откачки газа через скважины диаметром 96 мм

В отличие от первого варианта, при заданных условиях объемный расход метановоздушной смеси, откачиваемый вакуумным насосом из выработанного пространства через четыре параллельно подключенные скважины, неудовлетворительный и составляет 42,6 м³/мин, что почти в три раза меньше в базовом варианте.

Для соответствия по производительности откачки базовому варианту рассмотрим вариант с бурением большого количества направленных горизонтальных скважин. На рис. 3 представлена зависимость темпа извлекаемого вакуумным насосом газа в зависимости от количества скважин. Как свидетельствуют расчеты даже кратное увеличение количества дегазационных скважин не приводит к достижению адекватного эффекта дегазации, полученным в базовом варианте. Это объясняется большим аэро-

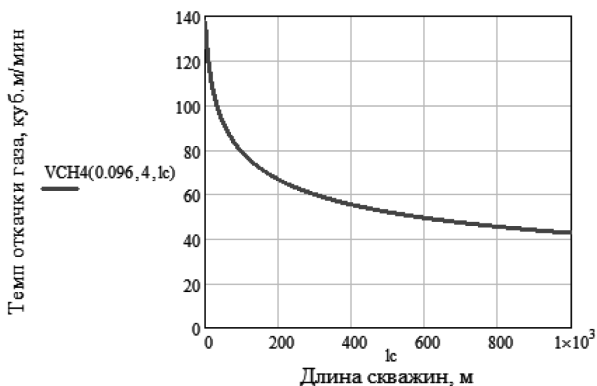


Рис. 4. Темп откачки газа через четыре дегазационные скважины

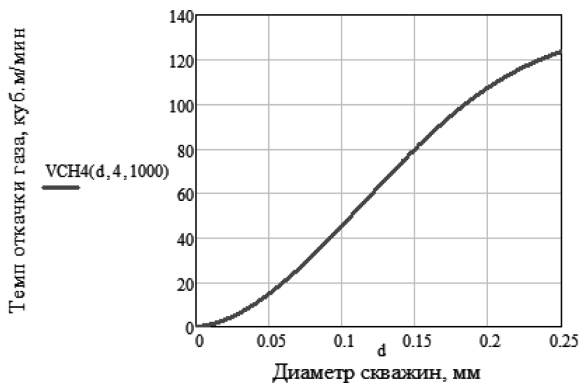


Рис. 5. Темп откачки газа в зависимости от диаметра

динамическим сопротивлением, создаваемым скважиной малого диаметра.

На рис. 4 представлена зависимость темпа откачки от длины каждой из четырех горизонтальных дегазационных скважин. Сокращение длины скважин по мере отработки выемочного столба естественно приводит к увеличению темпа откачки за счет снижения аэродинамического сопротивления. Однако даже при понижении длины скважины в пять раз до величины 200 м, темп откачки газа возрастает только до 67 м³/мин, что все равно много меньше, чем при использовании базового варианта со скважинами с земной поверхности.

На самом деле самым весомым фактором повышения темпа откачки газа является возможность увеличения диаметра дегазационной скважины. На рис. 5 представлен прогнозный вариант с дегазацией через четыре скважины в зависимости от диаметра. Для сравнения станок VLD-1000A имеет возможность бурить скважины диаметром 120 мм. В первом случае при диаметре 96 мм темп откачки составляет 42,6 м³/мин, а во втором при диаметре 120 мм темп откачки возрастает до величины 59,3 м³/мин, что все равно меньше базового. Что бы достичь темпа 100 м³/мин через скважины диаметром 120 мм их необходимое количество должно быть — 100 шт. Такой вариант дегазации явно неприемлем для практики.

Более технологичном является вариант бурения горизонтальных скважин диаметром 200 мм и более. В этом случае четыре дегазационные скважины действительно обеспечат нужный темп откачки 107 м³/мин и более. Эта ситуация отражена, в частности на рис. 5. Однако для этой цели требуются более

мощные буровые станки, вопрос применения которых в будущем представляется перспективным.

Таким образом, представлена методика расчета темпов откачки метановоздушной смеси из выработанного пространства, позволяющая прогнозировать эффективность работы системы дегазации на стадии проектирования. Предварительные расчеты свидетельствуют, что для эффективной дегазации выемочного столба через длинные направленные дегазационные скважины необходимо найти возможность бурения скважин большего диаметра – более 200 мм. Скважины диаметром 96 мм, буримые станком VLD-1000А, уступают по эффективности базовому варианту со скважинами с земной поверхности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пучков Л. А., Каледина Н. О., Кобылкин С. С. Системные решения обеспечения метанобезопасности угольных шахт // Горный журнал. – 2014. – № 5. – С. 12–16.
2. Сластунов С. В., Ермак Г. П., Ютяев Е. П. Дегазационная подготовка угольных пластов к интенсивной отработке как основа системного решения проблемы метанобезопасности угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – ОВ 1. – С. 107–119.
3. Сластунов С. В., Ермак Г. П. Обоснование выбора и эффективная реализация способов дегазации при интенсивной отработке газоносных угольных пластов – ключевой вопрос обеспечения метанобезопасности угольных шахт // Уголь. – 2013. – № 1. – С. 21–24
4. Шевченко Л. А. Процессы газоотдачи угленосного массива в длинные скважины // Вестник КузГТУ. – 2014. – № 3. – С. 52–55.
5. Гришин В. Ю., Мазаник Е. В., Шевченко Л. А. Новые технологии дегазации шахт Кузбасса // Безопасность жизнедеятельности. – 2014. – № 3. – С. 19–21.
6. Каркашадзе Г. Г., Мазаник Е. В., Лунин М. Г. Методика расчета производительности вакуум-насоса в процессе дегазации выработанного пространства через скважины с поверхности // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2009. – ОВ 11. – С. 146–153.
7. Винников В. А., Каркашадзе Г. Г. Гидромеханика: Учебник для вузов. – М.: Изд-во МГГУ, 2003. – 302 с.
8. Альтшуль А. Д., Животовский Л. С., Иванов Л. П. Гидравлика и аэродинамика. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с. **ПДАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Каркашадзе Георгий Григорович*¹ – доктор технических наук, профессор, e-mail: g-karkashadze@mail.ru,
*Макаров Василий Александрович*¹ – аспирант,
e-mail: technomon@yandex.ru,

¹ МГИ НИТУ «МИСиС».

UDC
622.454.22:
622.333.6:
622.81

G.G. Karkashadze, V.A. Makarov

**OPTIMIZATION OF THE MODE
OF PUMPING OF METHANE-AIR MIXTURE
FROM THE GOAF THROUGH
A LONG DIRECTIONAL WELLS**

The technique of calculation of the rate of pumping gas from the goaf through wells. The described analytical calculation model, built on the achievements of applied theory of aerodynamics. Comparative analysis of the efficiency of extraction of methane-air mixture through a vertical (base case) and horizontal wells (new variant), were drilled from the surface and from underground conditions. Calculations found that the most important factor in degassing efficiency is the diameter of the wells. The conclusion is that an effective degassing goaf through a long directional gas drainage hole, you need to find a way of drilling diameter is 200 mm or more. Borehole diameter of 96 mm have a low efficiency by a factor of degassing compared to the baseline option.

Key words: degassing wells, rate of pumping, analytical model, aerodynamic drag, borehole diameter, vacuum pump power.

AUTHORS

*Karkashadze G.G.*¹, Doctor of Technical Sciences, Professor,

e-mail: g-karkashadze@mail.ru,

*Makarov V.A.*¹, Graduate Student,

e-mail: g-karkashadze@mail.ru,

¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS»,
119049, Moscow, Russia.

REFERENCES

1. Puchkov L. A., Kaledina N. O., Kobylkin S. S. *Gornyy zhurnal*. 2014, no 5, pp. 12–16.
2. Slastunov S. V., Ermak G. P., Yutyaev E. P. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, Special edition 1, pp. 107–119.
3. Slastunov S. V., Ermak G. P. *Ugol'*. 2013, no 1, pp. 21–24
4. Shevchenko L. A. *Vestnik KuzGTU*. 2014, no 3, pp. 52–55.
5. Grishin V. Yu., Mazanik E. V., Shevchenko L. A. *Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti*. 2014, no 3, pp. 19–21.
6. Karkashadze G. G., Mazanik E. V., Lupiy M. G. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2009, Special edition 11, pp. 146–153.
7. Vinnikov V. A., Karkashadze G. G. *Gidromekhanika: Uchebnik dlya vuzov* (Fluid mechanics: Textbook for high schools), Moscow, Izd-vo MGGU, 2003, 302 p.
8. Al'tshul' A. D., Zhivotovskiy L. S., Ivanov L. P. *Gidravlika i aerodinamika* (Hydraulics and aerodynamics), Moscow, Stroyizdat, 1987, 414 p.

