

А.С. Кобылкин, С.С. Кобылкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУХА ЧЕРЕЗ НЕОДНОРОДНУЮ ПОРИСТУЮ СРЕДУ*

Проведено изучение аэрогазодинамических процессов в системе «горные выработки – выработанное пространство» шахт и рудников. Исследования в этой области позволят повысить безопасность ведения горных работ. Решение задачи управления газовойделением и установление оптимального режима проветривания позволит уменьшить утечки воздуха в шахтах и рудниках, равномерно распределить выделение метана из выработанного пространства во времени и пространстве, предотвратить возникновение эндогенного пожара.

Ключевые слова: шахта, рудник, вентиляция, пористые среды, фильтрация, утечки воздуха, проницаемость, пористость.

Утечки воздуха в шахтах. Утечки можно классифицировать:

1. Классификация по месту:

а) утечки или подсос через устье вентиляционного ствола;

б) утечки в околоствольном дворе, в том числе через бункеры при скиповом подъеме;

в) утечки через двери и другие вентиляционные сооружения в шахте;

г) утечки через выработанное пространство.

2. Классификация по характеру утечек:

а) местные утечки (к ним относятся первые три типа);

б) равномерно-распределенные утечки.

Утечки через выработанное пространство в среднем составляют 40% от общих утечек. В связи с наличием утечек воздуха до очистных и проходческих забоев, мест, где газовыделение велико, дойдет воздух в недостаточном количестве. Во избежание такой ситуации увеличим количество воздуха, создав больший перепад давления, но и в местах утечек увеличится давление, что вызовет еще большие утечки. Учитывая то, что в соответ-

ствии с Положением об аэрогазовом контроле в угольных шахтах [1] скорость воздуха ограничена максимальными значениями (для очистных выработок 4 м/с) может наступить момент, когда мы не сможем уложиться в диапазон по скорости и необходимому количеству воздуха одновременно.

Так как для турбулентного режима движения воздуха в уравнении $h = R \cdot Q^2$ (J.J. Atkinson) степень, в которую необходимо возвести значение расхода воздуха (Q) равна 2, то необходимо понимать, для того чтобы удвоить количество подаваемого в шахту воздуха необходимо в четыре раза увеличить перепад давления (h), а чтобы увеличить в пять раз $Q - h$ необходимо увеличить в 25 раз, что практически в условиях шахт и рудников недостижимо. В связи с этим утечки не желательны, и их уменьшение является одной из важнейших задач рудничной аэрологии.

Выработанное пространство является «резервуаром» метана, из которого он выносится в горные выработки непосредственно в лаву и на вентиляционный штрек. Это приводит к загазированию, отключению электро-

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-05-07542-а.

снабжения системой АГЗ, к остановке горных работ.

Также при значительной величине утечек в выработанном пространстве растет вероятность возникновения эндогенных пожаров.

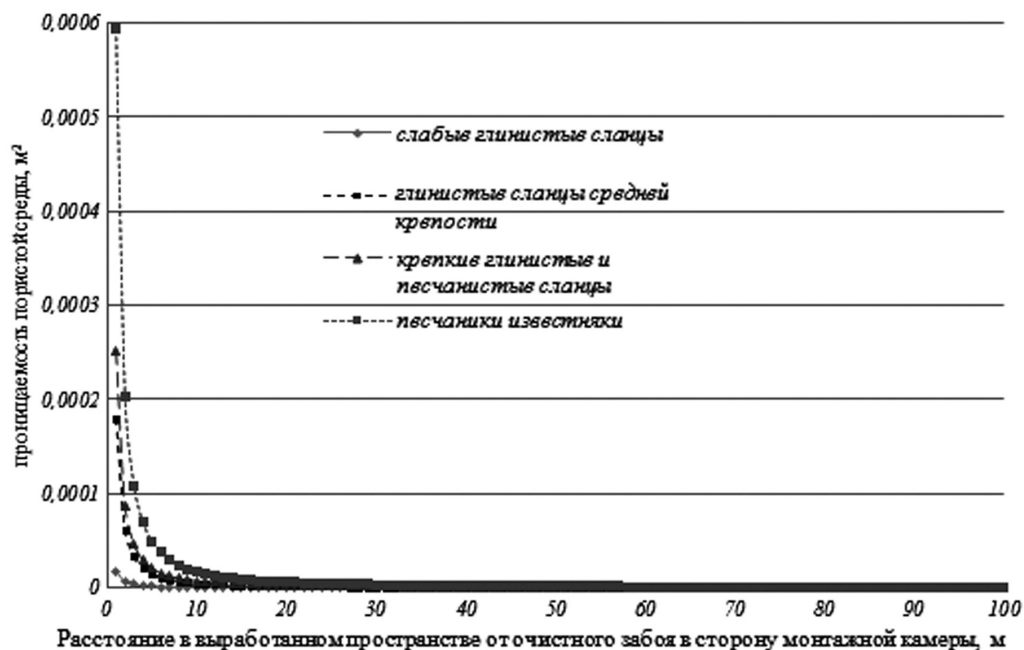
Выработанному пространству посвятили свои работы многие ученые: А.А. Скочинский, В.Б. Комаров, Воронин, А.Ф. Милетич, К.З. Ушаков, Л.С. Лейбензон, Л.А. Пучков, Н.О. Каледина, В.С. Забурдяев, Н.Г. Матвиенко и др. [3, 7–16].

Все без исключения авторы относят задачи аэрогазодинамики системы «горные выработки – выработанное пространство» к весьма сложным. Это связано в первую очередь с тем, что движение газов в сложных пористых средах изучено недостаточно. Существующие методы расчетов утечек через выработанное пространство требуют большого объема эмпирических данных для каждого конкретного слу-

чая, получаемых только в результате натуральных исследований уже на действующих выемочных участках.

Поэтому в настоящих условиях с использованием технологии компьютерного моделирования можно уточнить зависимости и закономерности между режимами вентиляции и газодинамики выработанного пространства, позволяющие повысить эффективность управления газораспределением [5]. Для компьютерного моделирования необходимым условием являются начальные и граничные условия [6]. На их определении и нужно остановиться.

Для того чтобы можно было описать явление движения газов через выработанное пространство необходимо понять, каким законам оно подчиняется. Далее необходимо установить зависимости утечек, выноса метана и возможности образования эндогенного пожара в зависимости от режимов



Графики изменения проницаемости пористой среды по длине выработанного пространства

проветривания. На основе полученных данных можно будет разработать способы управления утечками через выработанное пространство.

Выработанное пространство представляет собой трещиноватую пористую среду, а движение в ней газов – фильтрацию.

Пористая среда – совокупность твердых частиц разнообразной формы и различных размеров, плотно прилегающих друг к другу, пустое пространство между которыми заполнено газом или жидкостью [2].

Пористая среда характеризуется такими основными параметрами как:

- коэффициент пористости;
- коэффициент проницаемости;

Под пористостью понимают отношение объема пустот ко всему объему. Проницаемость в свою очередь определяется как геометрическая структура пористой среды (размер и форма частиц, система их упаковки) при этом она существенно зависит от характеристик вмещающих пород (рисунок) [16]. Между собой эти параметры тесно связаны.

В реальной пористой среде бывают тупиковые поры, в которых движение жидкости задерживается из-за образования застойных зон [2]. Поэтому под пористостью будем понимать отношение объема, занятого подвижным газом ко всему объему (динамическая пористость).

На движение газов в пористой среде (фильтрацию) также влияют характеристики газа, одной из основных характеристик является вязкость.

Исследования просачивания воздуха через слой пористого и мелкокускового материала, выполненные как в лабораториях, так и непосредственно на шахтах, показали, что течение воздуха в указанных условиях в ряде случаев уклоняется от квадратичного закона $h = R \cdot Q^2$ [3]. Показатели степени расхода воздуха лежат в пределах от 1

до 2, что значит, что течение воздуха при просачивании описывается не квадратичным, а ламинарным или промежуточным законом. В работах МакНИИ А.С. Цирюльниковым и А.Т. Топалкароевым были определены количества просачивающегося воздуха, при различной депрессии, через стенки бутовой кладки, толщиной 2,4 и 6 м при сечении штольни в свету 1,95 м²; закон движения оказался близким к квадратичному ($h = R \cdot Q^{1.7}$). Было доказано, что величина показателя степени расхода воздуха зависит от крупности кусков: чем мельче куски, тем степень ближе к единице [3].

Под трещиноватой пористой средой исследователи называют породу со смешанной пористостью. Что означает различие между образованием и основными характеристиками двух разных видов пустот в выработанном пространстве. Первый вид – это сеть трещин между блоками породы, второй – поры внутри блоков.

В работах по добыче нефти и газа есть описание явления движения жидкости (газа) в трещиноватых пористых средах, которое можно применить к нашей задаче, где роль трещиноватой пористой среды будет выполнять выработанное пространство. Движение в системе горных выработок и выработанного пространства будем рассматривать как фильтрацию двухфазной жидкости, где метан из выработанного пространства вытесняется воздухом, движущимся по шахте [4].

Выработанное пространство – порода со смешанной пористостью, где основное движение воздуха происходит по трещинам. Трещиноватость зависит от крепости горных пород, скорости подвигания очистного забоя, управления кровлей и других параметров.

При моделировании системы горные выработки – выработанное про-

странство необходимо учитывать их геометрические особенности и шахтное оборудование расположенное непосредственно у выработанного пространства (крепь) [6].

Только учет всех выше перечисленных условий позволит получить достоверные результаты расчетов еще на стадии проектирования угольных

шахт. При этом получаемые данные можно использовать для повышения эффективности мероприятий, предупреждающих развитие эндогенных пожаров и мероприятия, повышающие эффективность дегазации. Что в итоге существенно повысит энергоэффективность и безопасность горных работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 1 декабря 2011 г. № 678 (взамен РД 15-06-2006).
2. Чарный И.А. Подземная гидрогазодинамика. – М.: Гостоптехиздат, 1963.
3. Скочинский А.А., Комаров В.Б. Рудничная вентиляция. – М.-Л.: Углетехиздат, 1951.
4. Бан А., Богомолова А.Ф., Максимов В.А., Николаевский В.Н., Огаджанянц В.Г., Рыжик В.М. Влияние свойств горных пород на движение в них жидкости. – М.: Гостоптехиздат, 1962.
5. Кобылкин А.С. Исследование распределения вредных газов в горных выработках с использованием компьютерного моделирования // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2014. – № 10. – С. 202–207.
6. Кобылкин А.С. Обоснование параметров систем вентиляции горных выработок при их проходке с использованием пульсирующего режима проветривания: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГТУ, 2012. – 100 с.
7. Пучков Л.А. Аэродинамика подземных выработанных пространств. – М.: МГТУ, 1993. – С. 11–206.
8. Каледина Н.О. Управление газовыделением из выработанных пространств: Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. – М.: 1995. – 322 с.
9. Алехичев С.П., Пучков Л.А. Аэродинамика зон обрушения и расчет блоковых утечек воздуха. – Л.: Наука, 1968. – С. 122–133.
10. Пучков Л.А., Каледина Н.О. Динамика метана в выработанных пространствах шахт. – М.: МГТУ, 1995. – 312 с.
11. Матвиенко Н.Г. Борьба с метаном в очистных забоях. – М.: Углетехиздат, 1958. – С. 2–14.
12. Каледина Н.О. Исследование и расчет рациональных режимов аэродинамики и дегазации выработанных пространств в условиях автоматического управления вентиляцией выемочных участков. – М.: МГИ, 1977. – С. 14.
13. Клебанов Ф.С. О выделении метана из выработанных пространств / Проблемы рудничной аэрологии. – М.: Госгортехиздат 1959. – С. 113–122.
14. Милетич А.Ф. Утечки воздуха в шахтах. – М.: Госгортехиздат, 1962. – С. 73–99.
15. Милетич А.Ф. Утечки воздуха и их расчет при проветривании шахт. – М.: Недра, 1968. – 148 с.
16. Кобылкин С.С. Обоснование метода расчета параметров вентиляции шахт на основе объемного моделирования аэрогазодинамических процессов: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. – М.: МГТУ, 2011. – 161 с. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Кобылкин Александр Сергеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник ИПКОН РАН, старший преподаватель, МГИ НИТУ «МИСиС»,

Кобылкин Сергей Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, МГИ НИТУ «МИСиС».

ANALYSIS OF AIR FLOW IN HETEROGENEOUS POROUS MEDIUM

Kobylkin A.S.¹, Candidate of Technical Sciences, Researcher, Institute of Problems of Comprehensive Exploitation of Mineral Resources of Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia,
 Kobylkin S.S.¹, Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor,
¹ Mining Institute, National University of Science and Technology «MISiS», 119049, Moscow, Russia.

This work is aimed at studying the aero-gas dynamic processes in the system «mine workings – goaf» of the mines. The research in this area will increase the safety of mining operations. The solution of the gassing management and the establishment of the optimal mode of ventilation will reduce air leakage in mines, allow to evenly distribute the methane emission from the goaf in time and space, and to prevent the occurrence of endogenous fire.

Key words: mine, ventilation, permeability, porous medium, filtration, air leak, porosity.

ACKNOWLEDGEMENTS

The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research, Grant No. 15-05-07542-a.

REFERENCES

1. *Prikaz Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 1 dekabrja 2011 g. no 678 (vzamen RD 15-06-2006)* (Federal Environmental, Industrial and Nuclear Supervision Service of Russian Federation, Order no. 678, dated December 1, 2011 (instead of RD 15-06-2006)).
2. Charnyy I.A. *Podzemnaya gidrogazodinamika* (Underground hydro-gas-dynamics), Moscow, Gostoptekhizdat, 1963.
3. Skochinskiy A.A., Komarov V.B. *Rudnichnaya ventilyatsiya* (Mine ventilation), Moscow-Leningrad, Ugletekhizdat, 1951.
4. Ban A., Bogomolova A.F., Maksimov V.A., Nikolaevskiy V.N., Ogadzhanyants V.G., Ryzhik V.M. *Vliyaniye svoystv gornykh porod na dvizhenie v nikh zhidkosti* (Influence of properties of rocks on fluid flow in them), Moscow, Gostoptekhizdat, 1962.
5. Kobylkin A.S. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 10, pp. 202–207.
6. Kobylkin A.S. *Obosnovanie parametrov sistem ventilyatsii gornykh vyrabotok pri ikh prokhodke s ispol'zovaniem pul'siruyushchego rezhima provetrivaniya* (Validation of ventilation parameters for underground excavation driven using fluctuating airing mode), Candidate's thesis, Moscow, MGGU, 2012, 100 p.
7. Puchkov L.A. *Aerodinamika podzemnykh vyrabotannykh prostranstv* (Aerodynamics of underground mined-out voids), Moscow, MGGU, 1993, pp. 11–206.
8. Kaledina N.O. *Upravlenie gazovydeleniem iz vyrabotannykh postranstv* (Gas release control in mined-out voids), Doctor's thesis, Moscow, 1995, 322 p.
9. Alekhichev S.P., Puchkov L.A. *Aerodinamika zon obrusheniya i raschet blokovykh utechek vozdukha* (Aerodynamics of rock fall zones and calculation of air leakages in blocks), Leningrad, Nauka, 1968, pp. 122–133.
10. Puchkov L.A., Kaledina N.O. *Dinamika metana v vyrabotannykh postranstvakh shakht* (Methane dynamics in mined-out voids in underground mines), Moscow, MGGU, 1995, 312 p.
11. Matvienko N.G. *Bor'ba s metanom v ochestnykh zaboyakh* (Methane management in stoping faces), Moscow, Ugletekhizdat, 1958, pp. 2–14.
12. Kaledina N.O. *Issledovanie i raschet ratsional'nykh rezhimov aerodinamiki i degazatsii vyrabotannykh postranstv v usloviyakh avtomaticheskogo upravleniya ventilyatsiei vyemochnykh uchastkov* (Analysis and calculation of rational modes of aerodynamics and degassing for mined-out voids under conditions of automated ventilation control in mine districts), Moscow, MGI, 1977, pp. 14.
13. Klebanov F.S. *Problemy rudnichnoy aerologii* (Mine aerology problems), Moscow, Gosgortekhizdat, 1959, pp. 113–122.
14. Miletich A.F. *Utechki vozdukha v shakhtakh* (Air leakages in mines), Moscow, Gosgortekhizdat, 1962, pp. 73–99.
15. Miletich A.F. *Utechki vozdukha i ikh raschet pri provetrivaniy shakht* (Air leakages and their calculation in mine ventilation), Moscow, Nedra, 1968, 148 p.
16. Kobylkin S.S. *Obosnovanie metoda rascheta parametrov ventilyatsii shakht na osnove ob"emnogo modelirovaniya aerogazodinamicheskikh protsessov* (Validation of method for calculation of mine ventilation parameters based in 3D modeling of aerodynamic processes) Candidate's thesis, Moscow, MGGU, 2011, 161 p.