

В.А. Малашкина

НАПРАВЛЕНИЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПОДЗЕМНОЙ ДЕГАЗАЦИИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ УСЛОВИЙ ТРУДА ШАХТЕРОВ УГОЛЬНЫХ ШАХТ

Аннотация. Увеличение глубины разработки угольных месторождений приводит к повышению рисков аварий и травм горнорабочих вследствие значительного роста природной газоносности пластов. Рост количества метана в горных выработках приводит к повышению угрозы внезапных выбросов угля и метана. Возрастает актуальность обеспечения безопасности труда горнорабочих за счет поддержания содержания метана в атмосфере подземных горных выработок в пределах установленных норм. В этих условиях управление газовойделением необходимо осуществлять за счет согласованной работы систем вентиляции, дегазации и газоотсоса, то есть на стадии проектирования они должны рассматриваться как единая вентиляционно-дегазационная сеть. Сегодня системы вентиляции, дегазации и газоотсоса проектируются, сооружаются и эксплуатируются каждая сама по себе, так как отсутствуют совместные показатели эффективности работы общей системы, отражающие взаимное влияние составных частей. Это один из основных недостатков в действующей методологии проектирования шахт в области систем управления метановыделением. Повышение эффективности работы систем дегазации и газоотсоса имеет важное значение, как для безопасности труда, так и для снижения простоев выемочных комплексов из-за загазованности выработок.

Ключевые слова: дегазация, гидравлическое сопротивление, подземный вакуумный газопровод, метановоздушная смесь, условия труда шахтеров.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-69-75

Постоянное увеличение глубины разработки угольных месторождений приводит к повышению рисков аварий и травм горнорабочих вследствие значительного роста природной газоносности пластов. Это приводит к увеличению метановыделения в горные выработки, повышению угрозы внезапных выбросов угля и метана. Возрастает актуальность обеспечения безопасности труда горнорабочих за счет поддержания содержания метана в атмосфере подземных горных выработок в пределах установленных норм [1].

В этих условиях управление газовойделением должно осуществляться за счет

согласованной работы систем вентиляции, дегазации и газоотсоса, то есть уже на стадии проектирования они должны рассматриваться как единая вентиляционно-дегазационная система.

Сегодня системы вентиляции, дегазации и газоотсоса проектируются, сооружаются и эксплуатируются каждая сама по себе, так как отсутствуют совместные показатели эффективности работы общей системы, отражающие взаимное влияние составных частей в режиме текущего времени с учетом динамики газовойделения [2, 5]. Это один из основных недостатков в действующей методологии проектирования шахт в области

систем управления метановыделением [2, 5].

Повышение эффективности работы систем дегазации и газоотсоса имеет важное значение, как для безопасности труда, так и для снижения простоев выемочных комплексов из-за загазованности выработок.

Существенные резервы эффективности подземной дегазации угольных шахт остаются неиспользованными вследствие неудовлетворительной работы дегазационных и газоотсасывающих установок, обусловленной нерациональными режимами их эксплуатации и конструктивными недостатками последних. Очень часто нерациональные режимы работы дегазационной установки являются следствием недостаточно объективных расчетов выполненных на стадии проектирования, а это значит, что ряд факторов, оказывающих влияние на качество и количество подаваемой на поверхность метановоздушной смеси из горных выработок не учтены в расчетах, проектах и рабочих характеристиках системы дегазации.

Расчет конструктивных параметров и технических характеристик дегазационных установок без учета особенностей транспортирования влажной метановоздушной смеси по подземному вакуумному дегазационному трубопроводу влечет за собой несоответствие ожидаемого и формируемого при последующей эксплуатации термо- и гидродинамического режима движения каптируемой метановоздушной смеси, поэтому в настоящее время эффективность работы дегазационных установок угольных шахт значительно меньше проектной [6]. В этих условиях требуется определять рациональные режимы движения метано-воздушной смеси по подземному вакуумному дегазационному трубопроводу с учетом термо- гидродинамических особенностей.

Кроме того, использование на многих шахтах газоотсасывающих установок, в которых выбор режима работы газоотсасывающих вентиляторов производится без учета особенностей движения метановоздушной смеси через смесительную камеру, не дает требуемого эффекта снижения газообильности выемочных участков и устранения скопленных метана на сопряжениях очистных и вентиляционных выработок в угольных шахтах, опасных по газу и пыли путем отсасывания метановоздушных смесей из выработочного пространства и отвода их по жестким трубопроводам (вентиляторы ВЦГ-7А и ВЦГ-9М), также, а также для удаления метановоздушной смеси с концентрацией метана от 0 до 10% с выемочных полей шахт, установленных на устья вентиляционных скважин с поверхности шахт (вентиляторы УВЦГ-15). Конструктивные параметры смесительной камеры определяются не расчетом, а в соответствии с рекомендациями «Инструкции по применению схем проветривания выемочных участков угольных шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок» для всех шахт принимаются одинаковыми [3]. Такой подход не позволяет обеспечить работу газоотсасывающих вентиляторов в устойчивом режиме.

Требования к оборудованию, эксплуатации и контролю работы поверхностных и подземных газоотсасывающих установок определены в «Инструкции по применению схем проветривания выемочных участков угольных шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства» [3].

В настоящее время применение эффективных способов дегазации источников газовыделения позволяет получать метановоздушную смесь на выходе из дегазационных скважин с высокой концентрацией метана. Но сохранить до-

стигнутый уровень качества каптируемой метановоздушной смеси при ее транспортировании от скважин до вакуум-насосной станции и последующей утилизации не представляется возможным [3].

Для работы установки с наименьшими потерями по разрежению, создаваемому вакуум-насосами дегазационная система должна обладать минимальным гидравлическим сопротивлением трубопроводной сети и качественной герметизацией всех элементов и узлов системы, в целях исключения притечек воздуха из окружающей атмосферы горных выработок в систему вакуумных газопроводов. Производительность всей дегазационной системы в значительной мере зависит от пропускной способности газопровода, которая может существенно снизиться из-за скопления воды с примесями угольной и породной пыли в местах прогибов, так как здесь происходит снижение проходного сечения труб и, как следствие, увеличение сопротивления трубопроводной сети.

На качество работы дегазационной сети влияет ее гидродинамическое сопротивление. В связи с наличием вышечисленных недостатков в работе дегазационной системы потери создаваемого вакуум-насосами разрежения больше расчетных. На величину падения давления по длине подземного газопровода влияет ряд факторов: гидродинамическое сопротивление трубопровода, подсосы воздуха в систему, длина трубопроводной сети. Сопротивление трубопровода характеризуется коэффициентом Дарси λ , влияние которого на величину изменения давления в системе определяется зависимостью

$$p_1 - p_2 = \frac{2}{2 - \frac{p_1 - p_2}{p_1}} \frac{8\lambda l}{\rho_1 \pi^2 d^5} Q_m^2, \quad (1)$$

где p_1, p_2 — абсолютное давление в вакуумном трубопроводе соответственно

в начале и конце участка, Па; l — длина участка, м; ρ_1 — плотность метановоздушной смеси в начале участка, кг/м³; d — диаметр трубопровода на участке, м; Q_m — массовый расход метановоздушной смеси на участке, кг/с; λ — коэффициент Дарси.

Гидродинамический режим движения каптируемой метановоздушной смеси по вакуумному трубопроводу — турбулентный соответствующий квадратичной области [4]. Основную роль в образовании потерь энергии при турбулентном течении играют перемешивание и рассеивание кинетической энергии завихренных частиц. При транспортировании каптируемой метановоздушной смеси по вакуумному трубопроводу от скважин на поверхность в результате подсосов воздуха внутрь системы из окружающей шахтной атмосферы плотность и динамическая вязкость смеси увеличиваются (массовый расход метана при этом остается постоянным), а температура — уменьшается в результате теплообмена с окружающей средой, что влияет на сопротивление трубопроводной сети. Но такая зависимость не одинакова.

Для новых труб с низкой шероховатостью изменение динамической вязкости смеси в результате подсосов воздуха в трубопровод влияет на величину коэффициента Дарси меньше, чем для старых. Таким образом при увеличении содержания метана в метановоздушной смеси при любой шероховатости во внутренних стенках труб значение величины коэффициента Дарси уменьшается.

Влияние коэффициента Дарси на скорость движения метановоздушной смеси для разных диаметров трубопровода при одном и том же массовом расходе различно. В трубах с большими диаметрами коэффициент Дарси меньше, т.к. здесь силы инерции преобладают над турбулентной вязкостью, то есть с увеличением диаметра трубопровода умень-

шается значение величины коэффициента Дарси, отражающего сопротивление вакуумного трубопровода. При этом падение давления при одних и тех же длине газопровода и массовом расходе смеси — уменьшается.

Установлено что, при подаче, каптируемой из угольных шахт, метановоздушной смеси от скважин на поверхность в подземном дегазационном трубопроводе имеет место процесс вынужденного конвективного теплообмена [3], сопровождающийся конденсацией паров воды в условиях вакуума в присутствии смеси неконденсирующихся газов: воздуха и метана (в газовой смеси имеются также и другие неконденсирующиеся газы, но их содержание незначительно).

Метановоздушная смесь, откачиваемая из дегазационных скважин угольных шахт, представляет собой смесь отдельных газов, не вступающих между собой ни в какие химические реакции. Каждый газ в смеси независимо от других газов полностью сохраняет свои свойства и ведет себя так, как если бы он один занимал весь объем смеси [7, 8]. Общее давление газовой смеси в этом случае на основании закона Дальтона определяется

$$p_c = p_n + p_v + p_m, \quad (2)$$

где p_c , p_n , p_v , p_m — давление соответственно общее смеси, парциальное водяного пара, парциальное сухого воздуха, парциальное метана, Па.

Процесс конденсации водяного пара в подаваемой от скважин на поверхность или к потребителю метановоздушной смеси от дегазации имеет ряд особенностей: конденсация происходит в условиях вакуума; процесс конденсации имеет место в постоянно движущейся метановоздушной смеси; содержание метана в неконденсирующейся части газовой смеси может изменяться от 0 до 100% (при этом массовый расход метана явля-

ется постоянным); в метановоздушной содержится вода в виде капель, уголь и породная пыль; содержание воздуха в неконденсирующейся части метановоздушной смеси может изменяться от 0 до 100% и при наличии притечек воздуха из внешней среды увеличивается по ходу движения от дегазационных скважин к вакуум-насосной станции; с наружной стороны подземный дегазационный трубопровод обтекается постоянно движущимся воздухом шахтной атмосферы, скорость которого также изменяется от 0 до 4 м/св зависимости от расположения горной выработки; температура воздуха окружающей шахтной атмосферы также изменяется от 14–16 °С до 35–38 °С.

Если при конденсации метановоздушная смесь движется с определенной скоростью, то на границе раздела фаз возникает трение между паром и конденсатной пленкой. Сила трения в зависимости от величины и направления может ускорять или замедлять стекание пленки конденсата [8, 9]. Увеличение скорости смеси способствует усилению механического воздействия и возникновению возмущений пленки. Происходит процесс ее турбулизации. Растет интенсивность процесса теплообмена.

Величина разрежения в подземном дегазационном трубопроводе обычно изменяется от 0 до 67 кПа. Число Кнудсена, характеризующее соизмеримость средней длины свободного пробега молекул с характерным линейным масштабом течения, для этих условий меньше 10^{-3} , поэтому при рассмотрении процесса теплообмена в дегазационном трубопроводе можно пренебречь дискретным строением газа.

Анализируя особенности процесса конвективного теплообмена, имеющего место в подземных дегазационных газопроводах, приходим к выводу, что в рассматриваемом случае теплотой трения газа можно пренебречь.

В подземных дегазационных трубопроводах метановоздушная смесь движется со скоростью не более 20...25 м/с, поэтому, если при движении газа и возникают разности давления, небольшие по сравнению с его абсолютным давлением, то изменения объема получаются малыми, и такие потоки газа можно считать несжимаемыми.

Уравнение подобия для процесса вынужденного конвективного теплообмена, происходящего в подземном вакуумном дегазационном газопроводе, имеет вид

$$Nu = f(Re, Pr) \text{ или} \\ Nu = 0,008 \left(\frac{vl}{\nu} \right)^{1,16} \left(\frac{\mu C_p}{\lambda} \right)^{1,84}, \quad (3)$$

где Nu — число Нуссельта, характеризующее интенсивность процесса теплообмена; Re — число Рейнольдса, характеризующее гидродинамический режим потока; Pr — число Прандтля — теплофизическая характеристика теплоносителя; λ — коэффициент теплопроводности влажной метановоздушной смеси, Вт/м · К; v — характерная, обычно средняя скорость метановоздушной смеси в начальном сечении системы, м/с; ν — кинематическая вязкость метановоздушной смеси, м²/с; μ — динамическая вязкость смеси, Па · с; C_p — коэффициент удельной теплоемкости влажной метановоздушной смеси, Дж/кг · К.

Экспериментально установлено, что величина числа Нуссельта для характерных условий эксплуатации подземных вакуумных дегазационных газопроводов (содержание метана в газовой смеси $a_m = 0$ —100%; температура смеси $T = 277$ —313 К; скорость метановоздушной смеси в подземном вакуумном газопроводе $v = 2$ —25 м/с) изменяется в пределах от 0,1 до 75. Также можно сделать вывод о том, что чем больше содержание метана в метановоздушной сме-

си, тем интенсивнее происходит процесс теплообмена при одинаковом гидродинамическом режиме движения газа.

С увеличением количества метановоздушной смеси, подаваемой на поверхность по подземным трубопроводам с постоянными конструктивными параметрами, растет интенсивность процесса теплообмена при одинаковых теплофизических характеристиках газовой смеси (удельная теплоемкость, теплопроводность, динамическая вязкость).

Процесс конденсации паров воды при движении каптируемой метановоздушной смеси от скважин на поверхность отсутствует, если числа Нуссельта имеют значения меньше чем, определяемые по зависимости (3) на 10—15%. Это означает, что в пониженных местах подземного вакуумного дегазационного газопровода не будет скапливаться конденсат, образующий водяные пробки, что вызывает сбои в работе систем дегазации угольных шахт. Гидродинамический режим движения метановоздушной смеси в подземных вакуумных газопроводах для обеспечения непрерывной подачи каптируемой из дегазационных скважин метановоздушной смеси на поверхность или к потребителю должен определяться с учетом интенсивности происходящих в системе тепловых процессов.

Следовательно, основным направлением повышения эффективности подземной дегазации угольных шахт с целью улучшения условий труда шахтеров, а также обеспечения возможности утилизации метана каптируемого дегазационными [9, 11] и газоотсасывающими установками [10] является регулирование режимов эксплуатации дегазационных и газоотсасывающих установок в зависимости от текущих показателей работы системы дегазации, которые определялись бы изменяющимся во времени содержанием метана в горных выработках.

Для реализации предложенного подхода необходимо разработать и закрепить в нормативных документах методику совместного расчета конструктивных параметров и технических характери-

стик шахтной системы «вентиляция — дегазация — газоотсос», которая могла бы использоваться не только на этапе проектирования, но при эксплуатации и диагностике этой системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Храмцов В. И. и др. Состояние дегазации и перспективы ее развития на шахтах Кузбасса // Безопасность труда в промышленности. — 2003. — № 3. — С. 22–24.
2. Каледина Н. О., Малашкина В. А. Резервы повышения эффективности подземной дегазации угольных пластов с целью улучшения условий труда шахтеров // Горный журнал. — 2017. — № 6. — С. 86–89.
3. Инструкции по применению схем проветривания выемочных участков угольных шахт с изолированным отводом метана из выработанного пространства с помощью газоотсасывающих установок. Приказ Минприроды РФ № 325 от 08.10.2009 г.
4. Малашкина В. А. Дегазационные установки: Учебное пособие. 2-е изд. — М.: Изд-во МГГУ, 2012. — 190 с.
5. Каледина Н. О., Пучков Л. А., Кобылкин С. С. Системные решения обеспечения метано-безопасности угольных шахт // Горный журнал. — 2014. — № 5. — С. 12–16.
6. Малашкина В. А. Исследование влияния гидро- и термодинамических процессов в дегазационных газопроводах на качество метановоздушной смеси, извлекаемой из угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — № 5. — С. 221–229.
7. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. — М.: Мир, 1985. — 520 с.
8. Ушаков К. З., Малашкина В. А. Гидравлика. Учебник. — М.: изд-во МГГУ, изд-во «Горная книга», 2009. — 414 с.
9. Аверин С. И., Минаев А. К., Швыдкий В. С. Механика жидкости и газа: учебник для вузов. — М.: Металлургия, 1987. — 304 с.
10. Junjie Chen, Deguang Xu Ventilation air Methane of Coal Mines as the Sustainable Energy Source // American Journal of Mining and Metallurgy. 2015. Vol. 3. Iss. 1. Pp. 1–8.
11. Şuvar M. C., Lupu C., Arad V., Cioclea D., Păsculescu V. M., Mija N. Computerized simulation of mine ventilation networks for sustainable decision making process // Environmental Engineering and Management Journal. 2014. Vol. 13. No. 6. Pp. 1445–1451.
12. Krings T., Gerilowski K., Buchwitz M., Hartmann J., Sachs T., Erzinger J., Burrows J., Bovensmann H. Quantification of methane emission rates from coal mine ventilation shafts using airborne remote sensing data // Atmospheric Measurement Techniques. 2013. Vol. 6. Pp. 151–166. **ИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Малашкина Валентина Александровна — доктор технических наук, профессор, НИТУ «МИСиС», e-mail: ud@msmu.ru.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 7, pp. 69–75.

Coal mine degasification efficiency enhancement to improve working conditions of miners

Malashkina V.A., Doctor of Technical Sciences, Professor, National University of Science and Technology «MISIS», 119049, Moscow, Russia, e-mail: ud@msmu.ru.

Abstract. Deeper level coal mining results in the higher rate of accidents and injuries of miners as a consequence of the considerable increase in natural gas content of coal beds. Methane input in underground excavations aggravates coal and methane outburst hazard. It becomes increasingly urgent to

ensure safety of miners by the maintenance of mine air methane content within the enforced standard. In such conditions, gas emission control should include coordinated operation of ventilation, gas drainage and gas exhauster, i.e. they are to be assumed an integrated ventilation-and-degasification network as early as the mine planning and design stage. This day, the systems of ventilation, gas drainage and gas exhaust are designed, constructed and operated alone as the data on the efficiency of the integrated system reflective of mutual influence of the system components are absent. This is one of the major deficiencies of the current mine planning and design methodology in terms of methane emission control. Enhancement of gas drainage and exhaust efficiency is critical for labor safety and shortage of longwall mining equipment due to high gas content in mine air.

Key words: degasification, hydraulic resistance, underground vacuum gas pipe, methane-and-air mixture, working conditions of miners.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-7-0-69-75

REFERENCES

1. Khramtsov V.I. Sostoyanie degazatsii i perspektivy ee razvitiya na shakhtakh Kuzbassa [The state of degassing and prospects for its development in the mines of Kuzbass]. *Bezopasnost' truda v promyshlennosti*. 2003, no 3, pp. 22–24. [In Russ].
2. Kaledina N.O., Malashkina V.A. Rezervy povysheniya effektivnosti podzemnoy degazatsii ugol'nykh plastov s tsel'yu uluchsheniya usloviy truda shakhterov [Reserves to improve the efficiency of un-derground degassing of coal seams in order to improve working conditions of the joints]. *Gornyy zhurnal*. 2017, no 6, pp. 86–89. [In Russ].
3. *Instruktsii po primeneniyu skhem provetrivaniya vyemochnykh uchastkov ugol'nykh shakht s izolirovannym otvodom metana iz vyrabotannogo prostranstva s pomoshch'yu gazootsasyvayushchikh ustanovok*. Prikaz Minprirody RF № 325 ot 08.10.2009 g. [Instructions for use schemes of airing of excavation sites of coal mines with isolated removal of methane from out space with gazootsasyvajushchih plants. Order of the Ministry of natural resources № 325 from 08.10. 2009.]
4. Malashkina V.A. Degazatsionnye ustanovki: Uchebnoe posobie. 2-e izd. [Decontamination units: Educational aid, 2nd edition], Moscow, Izd-vo MGGU, 2012, 190 p.
5. Kaledina N.O., Puchkov L.A., Kobylkin S.S. Sistemnye resheniya obespecheniya metanobezopasnosti ugol'nykh shakht [System solutions ensure metrobasement coal mines]. *Gornyy zhurnal*. 2014, no 5, pp. 12–16. [In Russ].
6. Malashkina V.A. Issledovanie vliyaniya gidro- i termodinamicheskikh protsessov v degazatsionnykh gazoprovodakh na kachestvo metanovozdushnoy smesi, izvlekaemoy iz ugol'nykh shakht [Study of the effect of hydro and thermodynamic processes in the degassing pipelines on the quality of a methane-air mixed-si extracted from coal mines]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2014, no 5, pp. 221–229. [In Russ].
7. Kukhling Kh. Spravochnik po fizike. Per. s nem. [Handbook of physics: English–German translation], Moscow, Mir, 1985, 520 p.
8. Ushakov K.Z., Malashkina V.A. *Gidravlika*. Uchebnik [Hydraulics. Textbook], Moscow, izd-vo MGGU, izd-vo «Gornaya kniga», 2009, 414 p.
9. Averin S.I., Minaev A.K., Shvydkiy V.S. *Mekhanika zhidkosti i gaza: uchebnik dlya vuzov* [Fluid and gas mechanics: Textbook for high schools], Moscow, Metallurgiya, 1987, 304 p.
10. Junjie Chen, Deguang Xu Ventilation air Methane of Coal Mines as the Sustainable Energy Source. *American Journal of Mining and Metallurgy*. 2015. Vol. 3. Iss. 1. Pp. 1–8.
11. Şuvar M. C., Lupu C., Arad V., Cioclea D., Păsculescu V.M., Mija N. Computerized simulation of mine ventilation networks for sustainable decision making process. *Environmental Engineering and Management Journal*. 2014. Vol. 13. No. 6. Pp. 1445–1451.
12. Krings T., Gerilowski K., Buchwitz M., Hartmann J., Sachs T., Erzinger J., Burrows J., Bovensmann H. Quantification of methane emission rates from coal mine ventilation shafts using airborne remote sensing data. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2013. Vol. 6. Pp. 151–166.

