

В.А. Малашкина**ОСОБЕННОСТИ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ
В ПОДЗЕМНЫХ ДЕГАЗАЦИОННЫХ ТРУБОПРОВОДАХ
ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ
В УГОЛЬНЫХ ШАХТАХ**

Рассмотрены особенности протекания тепловых процессов в системах подземных дегазационных газопроводов, в которых используются трубы из композитных материалов. В современных условиях горного производства в системах дегазации угольных шахт нашли применение трубы из стеклопластика, теплофизические характеристики которых существенно отличаются от стальных труб. Эти отличия оказывают влияние на тепло- и гидродинамические режимы движения метановоздушной смеси по подземному вакуумному газопроводу. Специфика процесса теплообмена, имеющего место при транспортировании по подземному вакуумному газопроводу метановоздушной смеси от скважин на поверхность показывает, что его интенсивность зависит от состава газовой смеси, расхода, температуры, давления и коэффициента теплопроводности материала трубопровода. Учет особенностей термодинамических процессов в подземных вакуумных трубопроводах из полимерных материалов позволит правильно выбирать места установки конденсатоотводчиков по длине газопровода. Это обеспечит своевременный и эффективный отвод конденсата и непрерывность работы системы дегазации угольной шахты.

Ключевые слова: дегазация, теплообмен, конденсация, гидравлическое сопротивление, подземный вакуумный газопровод, метановоздушная смесь.

Повышение эффективности работы систем дегазации имеет важное значение, как для безопасности труда, так и для снижения простоев выемочного комплекса из-за загазованности выработок. 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 тепло- и гидродинамического режима движения каптируемой метановоздушной смеси, поэтому в настоящее время эффективность работы дегазационных установок угольных шахт значительно меньше проектной.

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.

Известно, что производительность всей дегазационной системы в значительной мере зависит от пропускной способности газопровода, которая существенно снижается из-за скоплений воды с примесями угольной и породной пыли, а также продуктов коррозии в местах прогибов, так как здесь происходит уменьшение проходного сечения труб и, как следствие, увеличение сопротивления трубопроводной сети.

В настоящее время согласно «Инструкции по дегазации угольных шахт» подземные дегазационные газопроводы монтируются из стальных труб с толщиной стенок не менее 2,5 мм или из труб других материалов, допущенных к применению в подземных выработках для целей дегазации [1]. В инструкции конкретно не оговорено из каких других материалов могут быть изготовлены трубы для систем дегазации. Известно, что в современных условиях горного производства в системах дегазации угольных шахт нашли применение трубы из композитных материалов, то есть стеклопластиковые.

В угольной промышленности существуют ограничения на применяемые в закрытых горных выработках материалы. Так правила безопасности в угольных шахтах [4] устанавливают, что изделия из неметаллических материалов, находящиеся в закрытых горных выработках должны иметь кислородный индекс не менее 28%, быть трудногорючими, трудновоспламеняемыми [2], а продукты их горения не должны быть высокотоксичными. По указанным причинам применение полиэтиленовых и полипропиленовых труб в угольных шахтах невозможно. В то же время, стеклопластиковые трубы этим требованиям отвечают. Применение в шахтах стеклопластиковых труб целесообразно по ряду причин:

- малая масса, что весьма актуально, поскольку шахтные трубопроводы имеют большие диаметры (150–350 мм) и монтируются, как правило, вручную;
- коррозионная стойкость в шахтной атмосфере;
- внутренняя поверхность с низкой шероховатостью, снижающая возможность скопления угольной и породной пыли.
- отсутствуют продукты коррозии;
- безопасность при взрывах метана, так как разрушение стеклопластика происходит без образования травмоопасных осколков.

Установлено, что при подаче, каптируемой из угольных шахт, метановоздушной смеси от скважин на поверхность в подземном дегазационном трубопроводе имеет место процесс вынужденного конвективного теплообмена между влажной метановоздушной смесью и окружающей шахтной атмосферой по всей длине газопровода, 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). Объемное содержание метана при этом снижается [3].

При использовании стеклопластиковых трубопроводов в системах дегазации процесс вынужденного конвективного теплообмена имеет ряд особенностей, которые необходимо учитывать при выборе режимов эксплуатации дегазационных установок.

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.

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 является 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 подсосов 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/с в зависимости от расположения горной выработки; температура воздуха окружающей шахтной атмосферы также изменяется от 14–16 °С – у ствола шахты до 35–38 °С – у устья дегазационной скважины.

Общее давление газовой смеси в этом случае на основании закона Дальтона определяется

$$p_c = p_n + p_v + p_m$$

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

В процессе конденсации пара из паровоздушной смеси относительное содержание пара в слое, прилегающем к конденсатной пленке на внутренней поверхности трубопровода, и его парциальное давление снижаются. Снижается также и температура газовой смеси. Создается разность температур пара в ядре потока и поверхности конденсатной пленки. У стенки создается зона с повышенным содержанием воздуха. Слой смеси, обращенный к конденсатной пленке и насыщенный воздухом, тормозит частицы пара, направляющиеся к поверхности конденсации. Частицы пара проникают к поверхности конденсации лишь за счет молекулярной и турбулентной диффузии. Интенсивность протекания последней зависит от гидродинамических условий.

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 потока может ускорять или замедлять стекание пленки конденсата. Увеличение скорости смеси способствует усилению механического воздействия и возникновению возмущений пленки. Происходит процесс ее турбулизации. Растет интенсивность процесса теплообмена.

Наличие в движущемся конденсирующемся паре жидкости в виде капель или частиц пыли также положительно отражается на интенсификации процесса теплообмена. Установить характер влияния, содержащейся в метановоздушной смеси, угольной и породной пыли, а также капельной жидкости, выносимых потоком газа из дегазационных скважин, практически затруднительно, так как их количество постоянно изменяется в зависимости от количества одновременно эксплуатируемых скважин, разрежения в их устье и других локальных причин.

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.

Принято считать, что если скорость газа или газовой смеси меньше четвертой части скорости звука, то к газам можно применять законы движения и теплоотдачи, полученные для несжимаемой жидкости.

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.

Интенсивность вынужденного конвективного теплообмена характеризуется, как известно, коэффициентом теплоотдачи. В рассматриваемом случае коэффициент теплоотдачи метановоздушной смеси при известном поле температур может быть определен с помощью метода теплового баланса. Тепловой поток, передаваемый от метановоздушной смеси через поверхность нагрева в соответствии с законом Ньютона-Рихмана

$$Q = \int_F a_1 \Delta T dF \text{ или } Q = \int_F K' \Delta T dF$$

где Q – тепловой поток, Вт; a_1 – коэффициент теплоотдачи, Вт/м²·К; ΔT – разность между средними температурами поверхности теплообмена и окружающей среды, К; F – площадь поверхности теплообмена, м²; K' – коэффициент теплопередачи.

Считая коэффициент теплопередачи постоянным по всей поверхности нагрева тепловой поток можно определить по формуле

$$Q = KF\Delta t,$$

где K – средний коэффициент теплопередачи, Вт/м²·К; Δt – средний температурный напор, К.

Средний коэффициент теплопередачи определяется зависимостью [3]

$$K = \frac{1}{\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} + \frac{\delta_{ст}}{\lambda_{ст}} + R_{заг}},$$

где a_1, a_2 – коэффициенты теплоотдачи соответственно метановоздушной смеси и охлаждающей среды (рудничной атмосферы в данном случае), Вт/м² К; $\delta_{ст}$ – толщина стенки трубы, м; $\lambda_{ст}$ – коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/мК; $R_{заг}$ – термическое сопротивление учитывающее загрязнение поверхности теплообмена с обеих сторон (накипь, сажа и др.), м²·К/Вт.

Величина термического сопротивления, учитывающего загрязнения поверхности теплообмена, выбирается по экспериментальным данным [3]. В рассматриваемом случае этой величиной можно пренебречь, так как при подаче по подземному дегазационному газопроводу метановоздушной смеси в газопроводе не образуется накипь, сажа и пр.

Используемые в настоящее время в системах дегазации некоторых угольных шахт стеклопластиковые трубы имеют отличающиеся от стальных труб теплофизические характеристики (таблица), которые оказывают существенное влияние на тепло- и гидродинамические режимы движения метановоздушной смеси по подземному вакуумному газопроводу.

Преимущество стеклопластика по большинству параметров очевидно. Система подземных дегазационных газопроводов может полностью состоять из стальных труб или стеклопластиковых или самый сложный вариант – комбинированный состав газопровода. Как правило, на действующих дегазационных установках стеклопластиковые трубы применяют для участковых газопрово-

Сравнительные теплофизические характеристики различных материалов

Физико-механические характеристики	Стеклопластик	ПВХ	Сталь	Алюминий
Плотность, т/м	1,6–2,0	1,4	7,8	2,7
Разрушающее напряжение при сжатии (Растяжении), МН/м (МПа)	410–1180	41–48	410–480	80–430
Разрушающее напряжение при изгибе, МН/м (МПа)	690–1240	80–110	400	275
Модуль упругости при растяжении, ГПа	21–41	2,8	210	70
Модуль упругости при изгибе, ГПа	27	41	210	70
Коэффициент линейного расширения $\times 10^{-6}/10^\circ\text{C}$	5–14	57–75	11–14	22–23
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м $^\circ\text{C}$)	0,3–0,33	0,2	46	140–190
Коррозионная стойкость	отличная	отличная	плохая	средняя
Усадка	отличная	плохая	отличная	отличная

дов. Последний вариант с точки зрения протекания тепловых процессов является самым сложным. В этом случае выпадение конденсата по длине трубопровода происходит неравномерно.

С другой стороны тепловой поток, передаваемый через поверхность нагрева в соответствии с уравнением Фурье-Кирхгофа можно определить

$$Q = C_p \rho Q_1 (T_2 - T_1),$$

где C_p – удельная теплоемкость влажной метановоздушной смеси, Дж/кгК; ρ – плотность метановоздушной смеси, кг/м 3 ; Q_1 – объемный расход метановоздушной смеси, м 3 /с.

Из уравнения теплового баланса коэффициент теплоотдачи метановоздушной смеси будет равен

$$a_1 = \frac{C_p \rho Q_1 (T_2 - T_1) \lambda_{ct} a_2}{F \Delta t \lambda_{ct} a_2 - C_p \rho Q_1 (T_2 - T_1) (\lambda_{ct} + \delta_{ct} a_2)}$$

или с учетом влажности метановоздушной смеси

$$a_1 = \frac{Q_1 a_2 \lambda_{ct} \left[p C_{pl} + a_M p (0,55 C_{pM} - C_{pl}) + \phi p_s (0,62 C_{pd} - C_{pl}) \right] \times}{287 F \Delta t a_2 \lambda_{ct} T_2 - (\delta a_2 + \lambda_{ct}) (T_2 - T_1) Q_1 \times} \times (T_2 - T_1) \times \left[p C_{pl} + a_M p (0,55 C_{pM} - C_{pl}) + \phi p_s (0,62 C_{pd} - C_{pl}) \right],$$

где C_{pM} , C_{pl} , C_{pd} – удельная теплоемкость соответственно метана, сухого воздуха и водяного пара, Дж/кг·К.

Таким образом, учитывая специфику процесса теплообмена, имеющего место при транспортировании по подземному вакуумному газопроводу метановоздушной смеси от скважин на поверхность, можно определить основные факторы, влияющие на его интенсивность для трубопроводов из стали и композитных материалов, путем анализа графических зависимостей величины коэффициента теплоотдачи газовой смеси от ее состава, расхода, температуры, давления и коэффициента теплопроводности материала трубопровода (рисунок).

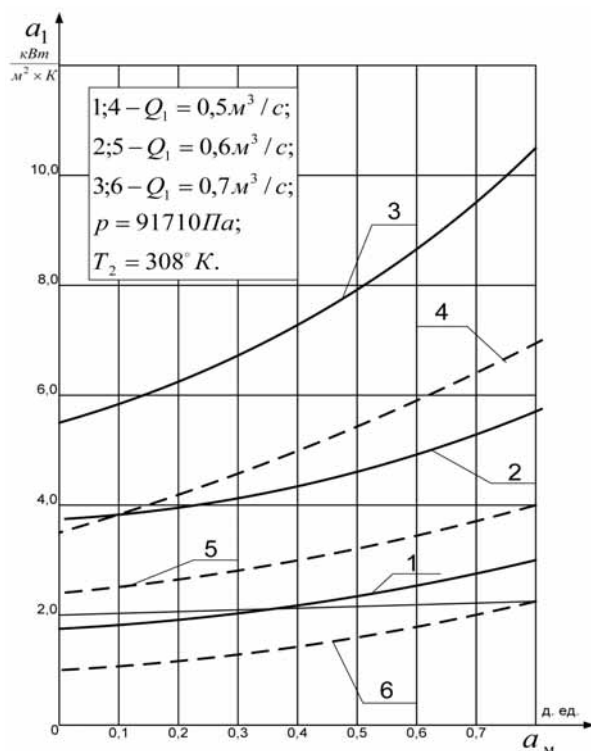


График зависимости $a_1 = f(a_m, Q_1)$

зывается меньше, например, на 36% при расходе $Q_1 = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$, температуре $T_2 = 308^\circ \text{ К}$, давлении $p = 91,71 \text{ кПа}$ и содержании метана в смеси $a_m = 0,7$. Снижение интенсивности теплообмена между метановоздушной смесью и окружающей шахтной атмосферой снизит температуру последней вдоль участка газопровода из композитных материалов.

Поэтому при определении коэффициента теплоотдачи в подземных вакуумных трубопроводных системах дегазационных установок угольных шахт необходимо обязательно учитывать не только состав неконденсирующейся части газовой смеси, но и теплопроводные качества материала трубопровода. Кроме того, необходимо учесть, что при использовании дегазационных труб из композитных материалов в горных выработках по длине трубопровода будет также изменен тепловой режим шахтной атмосферы. Это будет влиять на нормализацию теплового режима в шахи и рудников [5].

Таким образом, при проектировании новых и диагностике работы существующих дегазационных установок, в которых применяются участковые газопроводы из композитных материалов, а также при вводе в эксплуатацию новых дегазационных участков угольных шахт необходимо обязательно учитывать особенности термодинамических процессов имеющих место при движении влажной метановоздушной смеси. Это позволит правильно выбирать места установки конденсатоотводчиков по длине трассы с учетом влияния тепловых факторов подземной шахтной атмосферы и характеристик материала газопроводов, что обеспечит своевременный и эффективный отвод конденсата, а следовательно и непрерывность работы системы дегазации угольной шахты.

Необходимость учета всех вышеперечисленных факторов при определении коэффициента теплоотдачи метановоздушной смеси подтверждается графической зависимостью $a_1 = f(a_m, Q_1)$ (см. рисунок).

Наличие в неконденсирующейся части газовой смеси метана оказывает возрастающее влияние на величину коэффициента теплоотдачи метановоздушной смеси при увеличении ее расхода и содержания в ней метана (см. рисунок). Значение коэффициента теплоотдачи при конденсации паров воды из движущейся метановоздушной смеси в условиях эксплуатации дегазационных установок угольных шахт, определяемое с учетом состава неконденсирующейся части смеси для трубопроводов из композитных материалов по сравнению со стальными ока-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Вып. 22. – М.: ЗАО «НТЦ исследований проблем промышленной безопасности», 2012. – 250 с.
2. ГОСТ 12.1.044–91(1999). Пожарная безопасность. Общие требования. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 65 с.
3. Малашкина В.А. Дегазационные установки: Учебное пособие. 2-е изд. – М.: изд-во МГТУ, 2012 – 190 с.
4. Правила безопасности в угольных шахтах. Утверждены приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 19 ноября 2013 г. N 550. Серия 05 выпуск 40 – М.: изд-во ЗАО НТЦ ПБ, 2014.
5. Кобылкин С.С., Кобылкин А.С. Вопросы нормирования и измерения теплового режима шахт и рудников / Международная молодежная научная школа «Проблемы освоения недр в XXI веке глазами молодых». Т. 2. 19–23 ноября 2012 г. – М.: ИПКОН РАН, 2012. – С. 478–480. **ПИБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

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

UDC 622.411.33:533.17

FEATURES OF THERMODYNAMIC PROCESSES IN UNDERGROUND DEGASIFICATION PIPES MADE OF COMPOSITE MATERIALS IN COAL MINES

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

The article is devoted to peculiarities of thermal processes in systems of underground degasification pipelines using pipe made of composite materials. In today's environment of mining systems in underground coal mines have found the use of pipes made of fiberglass, thermal and physical characteristics which differ substantially from steel pipes. These differences have an impact on thermal and hydrodynamic regimes of motion of a methane-air mixture through an underground vacuum pipeline. The specificity of the process of heat transfer that occurs during transportation in underground vacuum pipeline methane-air mixture from the wells to the surface shows that its intensity depends on the composition of the gas mixture, flow, temperature, pressure and conductivity of the pipe material. The account features of the thermodynamic processes in underground vacuum pipelines made of composite materials will allow you to properly choose the installation location of the traps for water along the length of the pipeline. This will ensure timely and efficient removal of condensate and the continuity of working of system degasification in underground coal mines.

Key words: degassing, heat transfer, condensation, hydraulic co-resisting, underground vacuum gas pipeline, methane-air mixture.

REFERENCES

1. *Instruktsiya po degazatsii ugol'nykh shakht*. Seriya 05. Vyp. 22 (Instructions for the degassing of coal mines. Series 05. Issue 22), Moscow, ZAO «NTTs issledovaniy problem promyshlennoy bezopasnosti», 2012, 250 p.
2. *Pozharnaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya*. GOST 12.1.044–91(1999) (Fire safety. General requirements. GOST 12.1.044–91(1999)), Moscow, IPK Izdatel'stvo standartov, 1999, 65 p.
3. Malashkina V.A. *Degazatsionnye ustanovki*. Uchebnoe posobie. 2-e izd. (Degassing unit. Educational aid, 2nd edition), Moscow, izd-vo MGGU, 2012, 190 p.
4. *Pravila bezopasnosti v ugol'nykh shakhtakh*. Uverzhdeny prikazom Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru ot 19 noyabrya 2013 g. N 550. Seriya 05 vypusk 40 (Coal Mine Safety Regulations. Approved by order of the Federal service for ecological, technological and nuclear supervision on November 19, 2013 N 550. Series 05 issue 40), Moscow, izd-vo ZAO NTTs PB, 2014.
5. Kobylykin S.S., Kobylykin A.S. *Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya shkola «Problemy osvoeniya nedr v XXI veke glazami molodykh»*. T. 2. 19–23 noyabrya 2012 (Issues of valuation and measurement of thermal power modes of mines. – International youth scientific school «Problems of development of mineral resources in the XXI century through the eyes of the young». Vol. 2. from November 19–23, 2012), Moscow, IPKON RAN, 2012, pp. 478–480.