

ОСОБЕННОСТИ ВЫБОРА ТЕПЛОИЗОЛИРУЮЩЕГО МАТЕРИАЛА ДЛЯ НАЗЕМНЫХ ДЕГАЗАЦИОННЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

В. А. Малашкина

НИТУ «МИСиС», Москва, Россия

Аннотация: В настоящее время метановоздушная смесь, извлекаемая из газовых угольных шахт, находит все большее использование в различных направлениях: топливо в газовых котельных, автомобильное топливо, производство сажи, различных красителей и так далее. Однако во всех случаях для стабильного функционирования любого производства необходимо обеспечить непрерывную подачу и стабильный состав шахтной метановоздушной смеси. Часть подающего газопровода от устья шахтного ствола до вакуум-насосной станции и далее от нее к потребителю прокладывается по поверхности, что особенно в холодный период года является основным препятствием обеспечения устойчивой работы потребителей. В результате обмерзания внутренней поверхности трубопровода существенно снижается его гидравлическое сечение, а следовательно, растет сопротивление. По этой причине актуальной является задача правильного расчета и правильного выбора необходимой тепловой изоляции наземных дегазационных газопроводов из различных материалов. Особое значение приобретает учет в расчетах как теплоизоляционных свойств материалов-изоляторов, так и теплопроводности трубопроводов, особенно из композитных материалов. В настоящее время кроме традиционных теплоизолирующих материалов нашли широкое применение теплоизоляционные краски, которые выполняют не только функцию теплоизоляции, но и предохраняют от коррозии стальные трубопроводы. Использование теплоизоляционных красок в системах дегазации угольных шахт позволит стабилизировать не только по количеству, но и по качеству подачу шахтной метановоздушной смеси к потребителю не зависимо от климатических условий окружающей среды.

Ключевые слова: дегазация, гидравлическое сопротивление, подземный вакуумный газопровод, метановоздушная смесь, стеклопластиковый трубопровод, герметичность, парниковый эффект.

Для цитирования: Малашкина В. А. Особенности выбора теплоизолирующего материала для наземных дегазационных газопроводов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10-1. – С. 56–62. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_56.

Features of the choice of thermal insulation material for ground degassing gas pipelines

V. A. Malashkina

NUST "MISiS", Moscow, Russia

Abstract: Currently, the methane-air mixture extracted from gas coal mines is increasingly used in various areas: fuel in gas boilers, automobile fuel, the production of soot and various

dyes, and so on. However, in all cases, for the stable operation of any production, it is necessary to ensure a continuous supply and a stable composition of the mine methane-air mixture. Part of the gas supply pipeline from the mouth of the mine shaft to the vacuum pumping station and further from it to the consumer is laid on the surface, which, especially in the cold season, is the main obstacle to ensuring the stable operation of consumers. Due to the freezing of the inner surface of the pipeline, its hydraulic cross-section is significantly reduced, and therefore the resistance increases. Therefore, the problem of correct calculation and selection of the necessary thermal insulation of ground degassing gas pipelines made of various materials is relevant. Of particular importance is the need to take into account both the thermal insulation properties of insulator materials and the thermal conductivity of pipelines, especially those made of composite materials. Currently, in addition to traditional thermal insulation materials, thermal insulation paints have been widely used, which perform not only the function of thermal insulation, but also protect steel pipelines from corrosion. The use of thermal insulation paints in coal mine degassing systems will allow not only to stabilize the supply of mine methane-air mixture to the consumer in terms of quantity, but also in terms of quality, regardless of the climatic conditions of the environment.

Key words: degassing, hydraulic co-resisting, underground vacuum gas pipeline, methane-air mixture, fiberglass pipeline, tightness, greenhouse effect.

For citation: Malashkina V. A. Features of the choice of thermal insulation material for ground degassing gas pipelines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(10-1):56–62. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_101_0_56.

Введение

Как известно, дегазационная система угольной шахты представляет собой технологический комплекс, состоящий из: вакуум-насосной станции, всасывающего и нагнетательного газопроводов, скважин и потребителя метановоздушной смеси.

По опыту эксплуатации дегазационных систем установлено, что наиболее слабым звеном в этой технологической схеме являются подземные вакуумные и наземные вакуумные (до вакуум-насосной станции) и напорные (после вакуум-насосной станции или главной вентиляторной установки) газопроводы, по которым метановоздушная смесь транспортируется от скважин на поверхность и от вакуум-насосной станции к потребителю [1–3].

Температура газовой смеси или вентиляционного воздуха на выходе из шахты составляет в среднем 17–20 °С, а из вакуум-насосной станции – 25–30 °С. В теплый период времени года никаких осложнений в эксплуа-

тации наземных участков вакуумного и напорного газопровода не наблюдается. В холодный, особенно зимний период, через стенку трубопровода происходит теплообмен между холодным атмосферным воздухом и влажной метановоздушной смесью с выделением влаги в виде конденсата. При этом вода скапливается в нижней части газопровода и при температуре воздушной среды ниже 0 °С замерзает. Следовательно, уменьшается проходное сечение газопровода и увеличивается его гидравлическое сопротивление.

Основное содержание. В настоящее время в системах дегазации широко используются трубопроводы, собранные из звеньев труб не только из стальных, но и композитных материалов, в частности из стеклопластика.

Для предотвращения обмерзания внутренней поверхности наземного дегазационного трубопровода предусматривается его тепловая изоляция [1]. Однако в нормативной литературе не содержится конкретных рекомендаций по рас-

чету и выбору характеристик и типов теплоизоляционных материалов в зависимости от условий эксплуатации наземных дегазационных газопроводов [1, 4].

Толщину теплоизоляционного слоя необходимо определять для наиболее тяжелых условий эксплуатации газопровода (для условий Воркутинского и Кузнецкого бассейнов угольных месторождений средняя низкая температура окружающей среды составляет от -30 до -40 °С).

Для нормального протекания процесса теплообмена и исключения возможности образования льда в трубах необходимо, чтобы температура наружной стенки дегазационной трубы была выше 0 °С.

Мощность теплового потока передаваемого от метановоздушной смеси в соответствии с уравнением Фурье-Кирхгофа [5] определяется:

$$N = C_p Q_m \Delta T_{\text{доп}}, \quad (1)$$

где C_p — удельная теплоемкость каптированной метановоздушной смеси; Q_m — массовый расход метановоздушной смеси; $\Delta T_{\text{доп}}$ — допустимое снижение температуры смеси (в каждом конкретном случае).

Известно, что газ, откачиваемый из дегазационных скважин, представляет собой смесь, состоящую из трех основных компонентов: метан, сухой воздух и водяной пар. Все три компонента в составе метановоздушной смеси ведут себя как самостоятельные газы и не вступают между собой ни в какие соединения и реакции. Поэтому при расчете теплофизических характеристик шахтной метановоздушной смеси необходимо учитывать наличие влаги при вычислении ее плотности, удельной теплоемкости и коэффициента теплоотдачи [6].

Удельную теплоемкость в данном случае нужно определять для метановоздушной смеси с учетом ее влажности по массовому составу и теплоемкости ее компонентов [5, 6]:

$$C_p = \frac{1}{\rho} (\rho_m C_{pm} + \rho_l C_{pl} + \rho_d C_{pd}), \quad (2)$$

где ρ , ρ_m , ρ_l , ρ_d — плотность метановоздушной смеси, метана, сухого воздуха, водяного пара соответственно; C_{pm} , C_{pl} , C_{pd} — удельная теплоемкость метана, сухого воздуха и водяного пара соответственно.

Зависимость (2) можно представить в следующем виде:

$$C_p = \frac{C_{pl} \rho + a_m \rho (0,55 C_{pm} - C_{pl}) + \phi \rho_s (0,62 C_{pd} - C_{pl})}{\rho - 0,45 a_m \rho - 0,38 \phi \rho_s}, \quad (3)$$

где a_m — объемное содержание метана в смеси; ρ — абсолютное давление в газопроводе; ρ_s — парциальное давление сухого насыщенного пара при заданной температуре; ϕ — относительная влажность смеси.

Поскольку C_{pm} , C_{pd} , $C_{pl} = f(p, T)$ (при $\phi = 100\%$) для метановоздушных смесей, то $C_p = f(\rho, a_m, T)$, где T — температура метановоздушной смеси. Следовательно, для расчетов тепловой изоляции можно применить следующую зависимость, полученную экспериментально [6]:

$$C_p = 0,017 a_m^{0,44} T^{1,84} \rho^{0,10}. \quad (4)$$

Потери тепла на один метр длины газопровода составят:

$$q = N / l, \quad (5)$$

где l — длина газопровода.

По известной величине удельных потерь тепла находим сопротивление переходу тепла от влажной метановоздушной смеси к окружающей среде:

$$\sum R = \frac{T_0 - T_1}{q}, \quad (7)$$

где T_0 , T_1 — температура метановоздушной смеси на выходе из шахты или вакуум-насосной станции и окружающей среды соответственно.

Сопротивление переходу тепла от метановоздушной смеси к окружающей атмосфере определяется следующим образом:

$$\sum R = R_{\text{из}} + R_{\text{в}} + R_{\text{н}}, \quad (8)$$

где: $R_{\text{из}}$ — сопротивление переходу тепла изоляции; $R_{\text{в}}$ — сопротивление переходу тепла от поверхности газопровода к окружающему воздуху; $R_{\text{н}}$ — сопротивление переходу тепла от несущей среды (метановоздушной смеси) к поверхности стенки трубопровода.

$$R_{\text{н}} = R_{\text{в}} = \frac{1}{\pi D_{\text{н}} a}, \quad (9)$$

где a — коэффициент теплоотдачи влажной метановоздушной смеси.

Изменение состояния метановоздушной смеси при движении по наземному дегазационному трубопроводу можно считать изотермическим, так как процесс теплообмена происходит при незначительных перепадах давлений и относительно небольших изменениях температур. В этих условиях физические свойства газовой смеси при дозвуковом течении в прямой длинной круглой трубе можно считать постоянными, поэтому коэффициент теплоотдачи в данном случае предлагаем определять для метановоздушной смеси с учетом ее влажности по массовому составу и теплоотдаче ее компонентов [5, 6]:

$$a = \frac{C_{\text{р}} \rho Q_1 (T_2 - T_1) \lambda_{\text{ст}} a_2}{F \Delta t \lambda a_2 - C_{\text{р}} \rho Q_1 (T_2 - T_1) (\lambda_{\text{ст}} + \delta_{\text{ст}} a_2)}, \quad (10)$$

где ρ — плотность метановоздушной смеси, кг/м³; Q_1 — объемный расход метановоздушной смеси, м³/с; $\delta_{\text{ст}}$ — толщина стенки трубы, м; $\lambda_{\text{ст}}$ — коэффициент теплопроводности материала трубы, Вт/м К; λ — коэффициент теплопроводности влажной метановоздушной смеси, Вт/м К; a_2 — коэффициент теплоотдачи охлаждающей среды (окружающей атмосферы в данном случае), Вт/м²К; F — площадь поверхности теплообмена, м²; Δt — средний температурный напор, К.

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 (рис.). Значение коэффициента теплоотдачи при конденсации паров воды из движущейся метановоздушной смеси в условиях эксплуатации дегазационных установок угольных шахт, определяемое без учета состава неконденсирующейся части смеси, оказывается заниженным, например, на 36% при расходе $Q_1 = 0,5$ м³/с, температуре $T_2 = 308^\circ$ К, давлении $p = 91,71$ кПа и содержании метана в смеси $a_{\text{м}} = 0,7$.

Поэтому при определении коэффициента теплоотдачи в случае теплообмена в трубопроводных системах дегазационных установок угольных шахт необходимо обязательно учитывать состав неконденсирующейся части газовой смеси.

Коэффициент теплопроводности влажной метановоздушной смеси λ также определяется с учетом ее состава:

$$\lambda = \frac{3600 g \mu (C_{\text{р}} - R) C_{\text{р}}}{C_{\text{р}} - R}, \quad (11)$$

где μ — динамическая вязкость метановоздушной смеси, которая определяется с учетом ее состава и влажности, Па·с; R — газовая постоянная метановоздушной смеси, Дж/(моль·К).

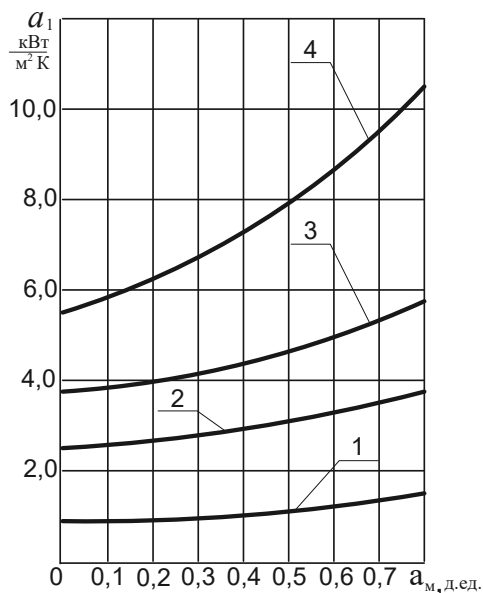


Рис. График зависимости $a_1 = f(a_m)$:

1 – $Q_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $Q_1 = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$;

3 – $Q_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{с}$; 4 – $Q_1 = 0,7 \text{ м}^3/\text{с}$;

$p = 91\,710 \text{ Па}$; $T = 308\text{К}$

Fig. Dependency graph $a_1 = f(a_m)$:

1 – $Q_1 = 0,3 \text{ м}^3/\text{с}$; 2 – $Q_1 = 0,5 \text{ м}^3/\text{с}$;

3 – $Q_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{с}$; 4 – $Q_1 = 0,7 \text{ м}^3/\text{с}$;

$p = 91\,710 \text{ Па}$; $T = 308\text{К}$

В рассматриваемом случае можно пренебречь изменениями коэффициента теплопроводности газовой смеси при снижении или росте температуры окружающей среды и в расчетах принимать его постоянным, так как его относительное изменение составляет $10^{-3}\%$. Изменение температуры окружающей среды зависит: в подземных горных выработках от работы вентиляционной сети шахты [7, 8], в наземных условиях – от колебаний погодных условий в различное время года.

Для определения коэффициента теплоотдачи влажной метановоздушной смеси при конденсации водяных паров из движущегося потока можно использовать экспериментальную зависимость [5, 6]:

$$a_1 = 0,215Q_1^{1,50} (T_2 - T_1)^{1,41} \cdot \Delta t^{-1,45} Q_2^{-0,35} a_M^{0,13} \rho^{0,75}. \quad (12)$$

В расчетах особое внимание нужно обратить на величину коэффициента теплопроводности материала стенки трубы [9]. Для стальных труб этот коэффициент составляет $37 - 64 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, а для стеклопластиковых – $0,75 - 0,9 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, что на практике позволяет значительно снизить толщину теплоизоляционного слоя.

Сопротивлением стенки трубопровода можно пренебречь вследствие его малой величины по сравнению с сопротивлением теплоизоляционного материала [10, 11].

Толщина требуемого теплоизоляционного слоя

$$\delta_{\text{из}} = \frac{e^{2\pi\lambda_{\text{из}} \sum R} - 1}{2} D_H, \quad (13)$$

где $\lambda_{\text{из}}$ – коэффициент теплопроводности теплоизоляционного материала; D_H – наружный диаметр трубопровода.

Выбор типа теплоизоляционного материала наземной части дегазационного трубопровода зависит от климатических условий эксплуатации газопровода [12]. В настоящее время нашли широкое применение теплоизоляционные краски, которые не только выполняют функцию теплоизоляции, но и предохраняют от коррозии стальные трубопроводы. По своим теплотехническим характеристикам теплоизолирующие краски во многих случаях использовать выгоднее, чем традиционные теплоизоляционные материалы (табл.).

Заключение

Правильно выбранная тепловая изоляция наземных дегазационных газопроводов из стальных или композиционных материалов позволит не только обеспе-

Таблица

Технические характеристики теплоизоляционных материалов
Technical characteristics of thermal insulation materials

Параметр	Изолятор		
	Теплоизолирующая краска	Пенополистирол	Минеральная вата
Термическое сопротивление, К	1,25	1,25	1,25
Теплопроводность, Вт/м К	0,0012	0,04	0,044
Сравнительная толщина изолирующего слоя, мм	1,5	50	55

чить стабильный цикл работы потребителей шахтного метана в любое время года, продлить срок службы наземных стальных газопроводов, но и уменьшит

количество выбросов шахтного метана в окружающую атмосферу, что положительно отразится на снижении парникового эффекта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Инструкция по дегазации угольных шахт. Серия 05. Выпуск 22. — М.: ЗАО «Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности», 2012. — 250 с.
2. Малашкина В. А. Мониторинг эффективности системы дегазации угольной шахты — основа безопасного труда горнорабочих. Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2020. — № 6-1. — С. 38—45. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-38-45.
3. 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. P. 151–166.
4. Карпов Е. Ф., Рязанов А. В. Автоматизация и контроль дегазационных систем. — М.: Недра, 1983. — 190 с.
5. Малашкина В. А. Исследование возможностей повышения эффективности подземной дегазации угольных шахт // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — №9. — С. 131—137. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-131-137
6. Малашкина В. А. Направления повышения эффективности использования систем дегазации угольных шахт. // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2019. — № 6. — С. 206—214. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-06-0-206-214.
7. 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. P. 1445–1451.
8. Кобылкин С. С., Харисов А. Р. Особенности проектирования вентиляции угольных шахт, применяющих камерно-столбовую систему разработки. Записки Горного Института. — 2020. — Том 245. — С. 531—538. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.4
9. 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. P. 1–8.
10. Строй Л. Ф., Скальский В. А. Расчет и проектирование тепловых сетей. — Киев: Будивельник, 1981. — 147 с.
11. СП 41—103—2000 Проектирование тепловой изоляции оборудования и трубопроводов. ГП ЦНС Госстроя России Теплопроект ГУП НИИМосстрой. — М.: ГУП ЦПП 2001. — 42 с.

12. Wang Dongyuan, Zhao Zifeng, Tan Qiuxia, Yang Jian. Research on Design Method for Thermal Insulation of Oil Pipeline in Permafrost Regions. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation.- China 2020 2nd International Conference on Civil Architecture and Energy Science (CAES 2020) E3S Web of Conferences 165, 01016 (2020) – 4p. Doi. org/10.1051/e3sconf/202016501016 

REFERENCES

1. *Instrukciya po degazacii ugol'nyh shaht* [Instructions for degassing coal mines]. Seriya 05. Vypusk 22. Moscow: ZAO «Nauchno-tehnicheskij centr issledovanij problem promyshlennoj bezopasnosti», 2012. 250 p. [In Russ]
2. Malashkina V. A. Monitoring the effectiveness of the coal mine degassing system-the basis for safe work of miners. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* no. 6 – 1, 2020, pp. 38 – 45. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-61-0-38-45 [In Russ]
3. 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.
4. Karpov E. F., Ryazanov A. V. *Avtomatizaciya i kontrol' degazacionnyh sistem* [Automation and control of degassing systems]. Moscow, Nedra, 1983. 190 p. [In Russ]
5. Malashkina V. A. Efficiency boosting feature of intensification of coal mine in degasification. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* no.9, 2019. pp. 131–137. DOI: 10.25018/0236-1493-2019-09-0-131-137 [In Russ]
6. Malashkina V. A. Recent trends in efficiency improvement in application of degasification systems in coal mines. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* no. 6 , 2019, pp. 206 – 214. DOI: 10.25018/0236 – 1493 – 2019 – 06 – 0-206 – 214 [In Russ]
7. 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.
8. Kobylkin S. S., Harisov A. R. Features of designing ventilation of coal mines using a chamber-column development system. *Zapiski Gornogo Instituta*. 2020. Tom 245. pp. 531 – 538. DOI: 10.31897/PMI.2020.5.4 [In Russ]
9. 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.
10. Stroj L. F., Skal'skij V. A. *Raschet i proektirovanie teplovyh setej* [Calculation and design of heat networks]. Kiev: Budivel'nik, 1981. 147 p. [In Russ]
11. *SP 41 – 103 – 2000* Proektirovanie teplovoj izolyacii oborudovaniya i truboprovodov. GP CNS Gosstroya Rossii Teploproekt GUP NIIMosstroj. Moscow, GUP CPP 2001. 42 p. [In Russ]
12. Wang Dongyuan, Zhao Zifeng, Tan Qiuxia, Yang Jian. Research on Design Method for Thermal Insulation of Oil Pipeline in Permafrost Regions. China Petroleum Pipeline Engineering Corporation.- China 2020 2nd International Conference on Civil Architecture and Energy Science (CAES 2020) E3S Web of Conferences 165, 01016 (2020) 4r. Doi. org/10.1051/e3sconf/202016501016.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Малашкина В. А. — докт. техн. наук, профессор кафедры БЭГП, ГИ, НИТУ «МИСиС», e-mail: promecolodgy@mail.ru, ORCID ID 0000-0001-9270-4790.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Malashkina V. A., Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of «Safety and ecology mining production» of the Moscow Mining Institute of the NUST “MISIS”, ORCID ID 0000-0001-9270-4790.

Получена редакцией 30.06.2021; получена после рецензии 18.08.2021; принята к печати 10.09.2021.
Received by the editors 30.06.2021; received after the review 18.08.2021; accepted for printing 10.09.2021.