

УДК 622.817.47:622.411.332

**В.А. Малашкина**

## **ОСОБЕННОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ В ПОДЗЕМНОЙ ДЕГАЗАЦИОННОЙ ТРУБОПРОВОДНОЙ СЕТИ**

*Статья посвящена особенностям изменения давления по длине в подземной трубопроводной системе дегазационных установок угольных шахт. Рассмотрены факторы, оказывающие влияние на количественную оценку изменения разрежения в дегазационной системе.*

*Ключевые слова:* метан, дегазация, подземный вакуумный газопровод, дегазационная установка, метановоздушная смесь.

---

**Н**еудовлетворительная работа дегазационных установок угольных шахт обусловлена в значительной мере неправильно выбранными режимами работы дегазационной системы, возникающими из-за снижения герметичности устьев дегазационных скважин и соединений труб подземного вакуумного газопровода, приводящих к увеличенным подсосам воздуха из атмосферы горных выработок внутрь системы, а также скоплениями в пониженных местах дегазационного трубопровода конденсата, угольной и породной пыли, а также продуктов коррозии. Все это приводит к существенному росту сопротивления трубопроводной сети и необходимости включения в работу дополнительного числа вакуумных насосов.

Следовательно, определяющим фактором эффективности использования дегазационных установок является эффективность работы подземного вакуумного дегазационного трубопровода: его пропускной способности и герметичности, так как наибольшее снижение концентрации каптируемого метана в смеси, вследствие подсосов воздуха в дегазационную систему, и потери создаваемого раз-

режения происходят именно на этапе транспортирования метановоздушной смеси от скважин на поверхность. Несмотря на это, вопросу влияния гидродинамических особенностей движения метановоздушной смеси по подземному дегазационному трубопроводу на эффективность работы дегазационной установки в целом в действующих нормативных документах по дегазации угольных шахт удленено очень мало внимания [1, 2].

Назначение дегазационной установки и условия эксплуатации выдвигают ряд требований, главное из которых – обеспечение полной безопасности при ведении угледобывающих работ на шахтах. Надежность системы дегазации складывается из: обеспечения взрывобезопасности, непрерывности функционирования, позволяющей вести добычные работы в установленном цикле и снижающей газовыделение в горные выработки. Взрывобезопасность, в свою очередь, определяется использованием оборудования, входящего в состав дегазационной установки, во взрывобезопасном исполнении, а также недопущением снижения концентрации каптируемой метановоздушной смеси ниже установленного «Правилами

безопасности...» уровня [1, 2]. Это зависит от разрежения, создаваемого вакуум-насосами в дегазационной системе, и наличия неплотностей соединений элементов дегазационной установки, приводящих к появлению подсосов воздуха.

Вакуумно-газовая съемка, применяемая для контроля работы дегазационной установки, не учитывает реальный состав каптируемой смеси и не дает возможности оценить работу разветвленного трубопровода, а также не позволяет определить: когда и на каком участке трубопровода следует прокладывать параллельный участок для увеличения пропускной способности дегазационной системы.

В настоящее время применение комплексных способов дегазации источников газовыделения позволяет получать метановоздушную смесь на выходе из дегазационных скважин с высокой концентрацией метана. Но сохранить достигнутый уровень качества каптируемой метановоздушной смеси при ее транспортировании от скважин до вакуум-насосной станции для последующей утилизации пока не представляется возможным.

Основными компонентами газовой смеси, каптируемой шахтной дегазационной установкой, являются метан и воздух. Подсосы воздуха из атмосферы горных выработок в дегазационную систему происходят при недостаточной герметизации устьев скважин, через трещины угольных пластов и вмещающих пород в дегазационные скважины, и, в основном, - через неплотности соединений звеньев труб подземного вакуумного газопровода. В результате подсосов воздуха внутрь дегазационной системы концентрация метана в каптируемой смеси снижается. Вместе с метановоздушной смесью, откачиваемой из дегазационных скважин, в систему

поступает вода в виде пара и капельной жидкости с примесями угольной и породной пыли, что оказывает отрицательное влияние на работу дегазационной системы.

Определено, что изменение параметров каптируемой смеси происходит в следующих пределах [3, 4, 9]:

- разрежение у устья дегазационной скважины – 0–27 (33) кПа,
- в вакуумном подземном дегазационном трубопроводе – 0–53 кПа;
- концентрация метана в смеси: до 100 %;
- концентрация углекислого газа – 0–2 %;
- относительная влажность метановоздушной смеси до 100 %;
- скорость движения трехфазной смеси: от 0,5 до 20–25 м/с;
- среднее значение температуры смеси на выходе из скважин: 30–35 °С, на конечном участке подземного трубопровода: 16–18 °С.

Герметизация устьев дегазационных скважин является одним из наиболее важных элементов, влияющих на эффективность работы дегазационной установки, так как от ее качества зависит степень разрежения в конце ненаруженной части скважины. При недостаточной герметизации скважин происходит подсос воздуха в дегазационную систему из окружающей атмосферы горных выработок через устья скважин и прилегающий к ним горный массив, что приводит к снижению концентрации метана в извлекаемой газовоздушной смеси.

Неодинаковое качество герметизации скважин, а также различные величины параметров дегазируемого источника – газоносности, трещиноватости и др. – являются причиной того, что характеристики дегазационных скважин различны. В результате концентрация метана в отсасываемой из скважин газовоздушной смеси бу-

дет неодинакова и изменяется во времени в связи с уменьшением газовыделения метана из дегазируемого источника: за все время функционирования одной скважины величина расхода отсасываемого из нее метана может измениться более чем в 10 раз [3].

Принятая схема дегазации, величина дебита метана, необходимая для достижения требуемой эффективности дегазации источников метановыделения, и требования, предъявляемые к дегазационным установкам, являются основополагающими при проектировании и расчете элементов и узлов дегазационной установки, но при этом также учитываются и требуемые величины параметров газовой смеси, позволяющие ее полезное использование потребителем. Главным при этом является: обеспечение стабильности давления метановоздушной смеси на выходе из вакуум-насосной станции, поддержание концентрации метана в смеси не ниже требуемой для утилизации, постоянная величина дебита метановоздушной смеси.

Основными особенностями транспортирования влажной метановоздушной смеси по вакуумному трубопроводу являются: значительная протяженность подземной трубопроводной сети; движение смеси в условиях вакуума; присутствие в составе каптируемой смеси паров воды, капельной жидкости, угольной и породной пыли; наличие подсосов воздуха через неплотности фланцевых соединений труб вакуумного трубопровода внутрь системы по всей его длине. При превышении установленных норм величины удельного объема подсасываемого воздуха наблюдается увеличение удельных потерь давления в трубопроводной сети по сравнению с расчетными величинами, увеличение дебита метановоздушной смеси с одновременным уменьшением в ней

концентрации метана, а в связи с образованием скоплений капельной жидкости в пониженных местах трубопровода – уменьшение гидравлического сечения труб. Эти факторы являются причиной увеличения затрат электроэнергии на транспортировку метановоздушной смеси по сети дегазационных трубопроводов, уменьшения дебита метана, отсасываемого из скважин, и увеличения абсолютного метановыделения в очистные выработки и выемочные участки.

Увеличение протяженности функционирующей трубопроводной сети, согласно технологическому процессу дегазации, влечет за собой рост потерь разрежения, создаваемого вакуум-насосами. Так как на один километр длины дегазационного трубопровода приходится 200-250 соединений труб, то с ростом протяженности трубопровода увеличивается объем подсасываемого воздуха в дегазационную систему через неплотности соединений, повышая гидравлическое сопротивление системы и значительно снижая концентрацию метана в каптируемой смеси. Кроме того, с развитием горных работ возрастает величина дебита метана, который необходимо каптировать дегазационной установкой из источников метановыделения для достижения требуемой эффективности дегазации. Поэтому, для увеличения пропускной способности дегазационной системы при ее реконструкции производится прокладка параллельных участков газопровода. Это приводит к росту фактической длины подземного газопровода и увеличению числа соединений труб. Таким образом, вопрос о правильном расчете длины и диаметра дополнительного параллельного участка трубопровода также является актуальным.

Гидродинамический режим движения влажной метановоздушной смеси формируется силами, поверхностными и массовыми, действующими на ее молекулы при движении по вакуумному подземному дегазационному трубопроводу, и носит турбулентный характер, соответствующий квадратичной области [5, 6]. К поверхностным силам относятся силы гидродинамического давления и силы внутреннего трения. К массовым силам, действующим на все молекулы смеси, относятся силы тяжести и инерции [7, 8].

При движении смеси по вакуумному газопроводу силы инерции входящих в ее состав компонентов различны, так как последние имеют разные молекулярные массы. Также различна и вязкость компонентов смеси, определяющая силы внутреннего трения. Подсосы воздуха в дегазационную систему является причиной повышения концентрации молекул воздуха и снижения концентрации метана во влажной метановоздушной смеси при ее движении от скважин к вакуум-насосной станции. Очевидно, что при изменении состава каптируемой смеси вследствие подсосов воздуха, изменится и соотношение сил, действующих на молекулы смеси. Молекулярный вес воздуха больше молекулярного веса метана, поэтому увеличение сил инерции смеси, происходящее за счет повышения концентрации воздуха в смеси, приводит к возрастанию поперечных составляющих скоростей и перемещений молекул смеси, что влечет за собой их интенсивное перемешивание. Кроме того, происходит увеличение плотности движущейся смеси.

Средняя скорость перемещения влажной газовоздушной смеси по вакуумному подземному дегазационному трубопроводу является парамет-

ром, характеризующим эффективность функционирования дегазационных установок, и не превышает 20-25 м/с [9]. Средняя скорость газового потока определяется зависимостью [7]

$$v = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi d^2}, \quad (1)$$

где  $v$  - средняя скорость движения смеси, м/мин;  $Q$  - объемный расход влажной метановоздушной смеси, м<sup>3</sup>/мин;  $S$  - площадь поперечного сечения потока смеси, м<sup>2</sup>;  $d$  - гидравлический диаметр участкового или магистрального вакуумного подземного дегазационного трубопровода, м.

Или

$$v = f(Q, d). \quad (2)$$

Таким образом, согласно (2), величина средней скорости движения влажной метановоздушной смеси зависит от объемного расхода смеси и гидравлического диаметра трубопровода, что определяет силы инерции, действующие в движущемся потоке.

Давление в начале и конце участков трубопровода является важным показателем, характеризующим состояние трубопровода, его гидравлическое сопротивление и наличие в нем водяных пробок, ненормируемых подсосов воздуха из атмосферы горных выработок в дегазационную систему, или мест с другими отклонениями от рационального режима работы, а также пропускную способность трубопроводной сети. В большинстве случаев разность давлений на вакуум-насосной станции и у устья удаленной скважины превышает допустимую расчетную величину, и для создания у скважины необходимого разрежения, вводят в эксплуатацию большее количество вакуум-насосов. Это влечет за собой увеличение количества потребляемой электроэнергии

и снижение эффективности работы вакуум-насосной станции. При этом ожидаемого увеличения объема каптируемого метана не происходит, в то время как возрастают подсосы воздуха в трубопроводную сеть, приводя к увеличению ее сопротивления. Очевидно, что с уменьшением сопротивления трубопровода потери давления по длине снижаются, и для формирования величины разрежения в устье удаленной скважины, необходимой для отсоса расчетного количества метана, возможно использование меньшего числа вакуум-насосов.

В соответствии с законом Дальтона, общее давление влажной газовоздушной смеси в любой точке дегазационной системы равно сумме давлений компонентов, входящих в ее состав [10]

$$p_c = p_m + p_l + p_d, \quad (3)$$

где  $p_c$  - давление влажной метановоздушной смеси, Па;  $p_m$ ,  $p_l$  и  $p_d$  - парциальное давление, соответственно, метана, сухого воздуха и водяного пара, Па.

Давление трехфазной смеси создается, в основном, молекулами метана и воздуха. Это связано с тем, что при температуре смеси 10...28 °C парциальное давление водяного пара не превышает 3,78 кПа [10].

Часть энергии, переносимой метановоздушной смесью вдоль газопровода, расходуется на преодоление гидравлических сопротивлений трубопроводной сети, преобразуясь в тепловую [7]. В основном – это сопротивления по длине, так как вакуумный подземный газопровод относится, с гидравлической точки зрения, к длинным трубопроводам. Тепловая энергия рассеивается во внешнюю среду, но часть ее остается в газовоздушном потоке, изменяя внутреннюю

энергию молекул движущейся смеси. Увеличение турбулентности движущейся смеси является одной из причин увеличения сопротивления и, как следствие, - потеря давления в вакуумном подземном дегазационном трубопроводе.

Абсолютное давление влажной метановоздушной смеси в конце участка  $p_2$ , определяется зависимостью [7]

$$p_2 = \sqrt{p_1^2 - \frac{4,5 \cdot 10^{-4} Q_m^2 R \lambda l T}{d^5}}, \quad (4)$$

где  $p_1$  и  $p_2$  - абсолютное давление влажной метановоздушной смеси соответственно в начале и конце участка трубопровода, Па;  $Q_m$  - массовый расход метановоздушной смеси на участке, кг/мин;  $R$  - газовая постоянная метановоздушной смеси в начале участка;  $\lambda$  - коэффициент гидравлического трения, или коэффициент Дарси;  $l$  - длина участка, м;  $T$  - температура метановоздушной смеси, К;  $d$  - внутренний диаметр трубопровода на участке, м. Или

$$p_2 = f(p_1, Q_m, R, \lambda, T, l, d), \quad (5)$$

то есть к параметрам, оказывающим основное влияние на изменение величины абсолютного давления смеси, относятся параметры смеси: массовый расход каптируемой метановоздушной смеси, коэффициент Дарси, газовая постоянная и температура смеси; а также конструктивные параметры дегазационной установки: длина участка трубопровода и его внутренний диаметр.

Учитывая то, что при движении смеси по участку трубопровода с происходящими подсосами воздуха изменяются такие параметры метановоздушной смеси как объемный расход, плотность, а коэффициент гид-

равлического трения учитывает влияние изменения температуры и гидравлического диаметра, то зависимость для определения величины разности давления на концах участка следующая

$$p_2 - p_1 = f(Q, \rho, R, \lambda, T, l, d). \quad (6)$$

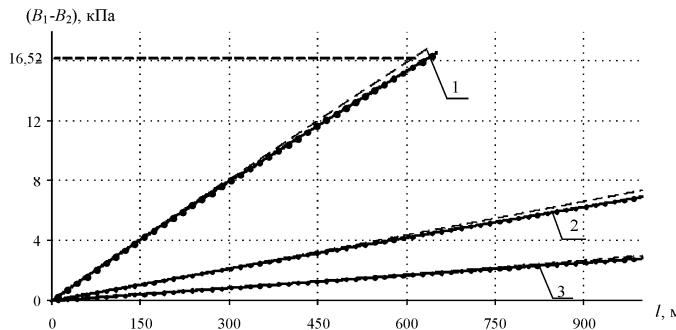
Между молекулами газовой смеси нет взаимодействия, и в промежутках между столкновениями друг с другом или со стенками труб движение их прямолинейно [10]. Столкнувшись, молекулы смеси теряют часть энергии и, меняя направление движения, способствуют перемешиванию. В области влажного газовоздушного потока, непосредственно прилегающего к стенке трубы, турбулентные пульсации минимальны или полностью исчезают. В этом районе вязкость смеси определяется динамической вязкостью входящих в состав смеси веществ, что и вызывает появление касательных напряжений, причем их величина тем больше, чем больше концентрация молекул воздуха. Немного дальше от стенок трубы - в переходной зоне потока - движение отдельных молекул газовоздушной смеси становится беспорядочным, интенсивно возрастают пульсационные скорости. В ядре потока полное касательное напряжение определяется в основном турбулентным трением, создаваемым интенсивным перемешиванием молекул газа вследствие возрастания поперечных составляющих скоростей.

Причина возрастания сопротивления вакуумного трубопровода при увеличении касательных напряжений в следующем. Движущаяся молекула метановоздушной смеси переносится пульсационной составляющей скорости из слоя с меньшей средней скоростью (вблизи стенок труб) в слой, средняя скорость которого больше. Переход молекулы сопровождается

увеличением скорости оставленного слоя, т. к. происходит передача последнему импульса, имеющего составляющую, совпадающую с вектором скорости этого слоя. В результате столкновений с окружающими молекулами слоя смеси, в который совершен переход, и движущихся быстрее, - рассматриваемая молекула приобретает ускорение, и ее количество движения увеличивается. Это увеличение происходит за счет того, что у принявшего слоя отнимается соответствующее количество движения, то есть это приводит к его торможению.

Так как молекулярная масса подсываемого в дегазационную систему воздуха больше молекулярной массы каптируемого метана и паров воды, поступающих в трубопроводную сеть из скважин вместе с газом, - то и силы инерции, возникающие при движении молекул воздуха, больше. Следовательно, соударения, происходящие между отдельными молекулами смеси, а также молекулами и стенками трубопровода, влекут за собой более интенсивное перемешивание. Такой процесс вызывает появление касательных составляющих напряжения, за счет чего разности скоростей слоев в ядре потока движущейся смеси будут сглаживаться, приводя к уменьшению неравномерности распределения скоростей движения. В результате возникают внутренние силы трения, препятствующие перемещению молекул смеси.

Следовательно, при движении метановоздушной смеси по вакуумному газопроводу от дегазационных скважин до вакуум-насосной станции увеличение концентрации воздуха в смеси приводит к: возрастанию сил инерции, действующих в смеси; увеличению динамической вязкости, влияние которой на гидравлическое трение значимо непосредственно у



**Графическая зависимость величины падения разрежения от длины вакуумного трубопровода при различных диаметрах:** 1 – при  $d = 0,200 \text{ м}$ ; 2 – при  $d = 0,259 \text{ м}$ ; 3 – при  $d = 0,309 \text{ м}$ : — — — при отсутствии подсосов воздуха в дегазационную систему; — — — при удельных подсосах воздуха в дегазационную систему, равных  $\Delta Q_b = 0,001 \text{ м}^3/\text{мин}\cdot\text{м}$

стенок труб и снижается к середине сечения. Основную роль в образовании потерь энергии играют перемешивание и соударения молекул смеси друг о друга, приводящие к рассеиванию кинетической энергии завихренных частиц. Увеличение турбулентности является одной из основных причин увеличения гидравлического сопротивления вакуумного трубопровода, и, как следствие, возрастания потерь давления в дегазационной системе. Касательные напряжения при этом в основном определяются турбулентной вязкостью, обусловленной турбулентными пульсациями.

Для определения характерного геометрического размера вакуумного газопровода необходимо проанализировать влияние изменения конструктивных параметров трубопроводной сети на величину потерь разрежения в дегазационной системе. Длина трубопроводной сети оказывает существенное влияние на падение разрежения создаваемого в дегазационной системе. Увеличение общей длины подземного трубопровода происходит за счет прокладки дополнительных участков магистральных и участковых трубопроводов при развитии горных работ, а также при применении параллельных трубопроводов для возможности каптирования большего объема добываемой метановоздушной смеси.

На рисунке представлен график зависимости величины падения разрежения, создаваемого в промежуточной ветви вакуумного подземного дегазационного трубопровода, от длины ветви при различных диаметрах

труб и постоянных значениях: разрежение на выходе промежуточной ветви  $B_2 = 16,53 \text{ кПа}$  (124 мм. рт. ст.), температура смеси  $T = 288 \text{ К}$ , концентрация метана в начале трубопровода  $a_m = 0,47$  доли ед., объемный расход метана  $Q_m = 15,8 \text{ м}^3/\text{мин}$ .

При одной и той же величине расхода метановоздушная смесь движется по трубопроводу, имеющему диаметр 200 мм, со скоростью 17,82 м/с, и при длине, равной 650 м (а при имеющихся подсосах – 624 м) разрежение равно нулю (кривая 1, рисунок). При больших диаметрах трубопровода (кривые 2 и 3) падение разрежения не так значительно. Сравнивая влияние конструктивных параметров вакуумного трубопровода на потери создаваемого в дегазационной системе разрежения, приходим к выводу, что при пропорциональном изменении величины внутреннего диаметра любого участка трубопровода и его длины влияние изменения диаметра труб на потери разрежения более значительно – более чем в 3,5 раза.

Таким образом, к основным причинам увеличения потерь давления на

участках вакуумного подземного дегазационного трубопровода относятся: снижение концентрации метана во влажной метановоздушной смеси относительно расчетных значений из-за увеличения удельных подсосов воздуха в дегазационную систему, при этом влияние изменения состава смеси на потери давления тем больше, чем меньше внутренний диаметр вакуумного газопровода; увеличение турбулентности по мере продвижения смеси от дегазационных скважин до ВНС; образование скоплений капельной жидкости в пониженных местах, приводящих к уменьшению гидравлического сечения труб; скоплений пыли и продуктов коррозии на участках трубопровода с малой величиной

скорости транспортирования смеси, а также - уменьшение пропускной способности дегазационной системы в связи с увеличением дебита метановоздушной смеси; из-за образования неровностей стенок труб после их длительной эксплуатации коэффициент сопротивления увеличивается в 1,5–2,0 раза по сравнению с его величиной при использовании новых труб. Пропускная способность подземной системы дегазационных трубопроводов напрямую зависит не только от конструктивных параметров газопровода – диаметра и длины применяемых труб, – но и от наличия или отсутствия скоплений воды, а также от концентрации метана в кипящей смеси.

---

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безопасности в угольных шахтах. ПБ 05-618-03. Утверждены Постановлением Госгортехнадзора РФ от 05.06.2003 №50 в редакции Приказа Роспотребнадзора от 20.12.2010 №1158 – М.: 2004.
2. Инструкция по дегазации угольных шахт. Утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 1 декабря 2011 г. № 679.
3. Карпов Е.Ф., Рязанов А.В. Автоматизация и контроль дегазационных систем. – М.: Недра, 1983. – 196 с.
4. Карпов Е.Ф., Басовский Б.И. Контроль проветривания и дегазации в угольных шахтах: Справ. пособие. – М.: Недра, 1994. – 336 с.
5. Расчет негерметичного газопровода шахтной дегазационной установки с помощью ЭВМ / В. Г. Лаврик, В.В. Кирик, В.А. Малашкина, В.С. Заславчик. – Разработка месторождений полезных ископаемых. – Киев: Техника, 1987. – вып.58. – С. 75–77.
6. Бай Ши-и. Турбулентное течение жидкостей и газов. – М: Изд.-во иностранной литературы, 1962. – 344 с.
7. Гейер В.Г., Дулин В.С., Заря А.Н. Гидравлика и гидропривод: Учеб. для вузов. – М.: Недра, 1991. – 331 с.
8. Рид Р., Праусниш Дж., Шервуд Т. Свойства газов и жидкостей: Справочное пособие / Пер. с англ. – 3-е изд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.
9. Малашкина В.А. Дегазационные установки: Учеб. пособие. – М.: Изд-во МГТУ, 2007. – 190 с.
10. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1985. – 520 с. **ГИАБ**

---

#### КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Малашкина Валентина Александровна – доктор технических наук, профессор каф. АОТ, Московский государственный горный университет, Moscow State Mining University, Russia, [ud@msmu.ru](mailto:ud@msmu.ru)

