

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДВИЖЕНИЯ МЕТАНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ С ЧАСТИЦАМИ ВЛАГИ В ДЕГАЗАЦИОННОМ ТРУБОПРОВОДЕ**

У роботі розглянуті закономірності руху метано-повітряної суміші з частками вологи на ділянках газопровідної мережі та газодинамічні параметри газо-рідинного середовища у трубопроводі. Зроблено висновки про необхідність обліку інтенсивності припливу води в газопровідну мережу з дегазаційних свердловин.

## **RESEARCH OF PROCESS MOVEMENT METHANE-AIR MIX WITH PARTICLES OF A MOISTURE IN DEGASATION PIPELINE**

In work the laws of movement methane-air mix with particles moisture on sites degasation pipeline of a network and gas-dynamic parameters of gas-liquid environment in the pipeline are considered. The conclusions about necessity of the account intensity inflow of water in gas-pipeline a network from degasations of chinks are made.

При разработке угольных пластов на больших глубинах в условиях высокого газовыделения в выработанное пространство, возникают проблемы, связанные с обеспечением безопасных условий труда [1]. В связи с этим большое значение имеет повышение эффективности работы шахтных дегазационных систем (ДС). Эксплуатируемые в настоящее время ДС нуждаются в ремонте и реконструкции. Это объясняется тем, что магистральные и участковые дегазационные трубопроводы постоянно подвержены влиянию агрессивной среды, а также случайному воздействию технических средств и сдвигению горных пород. При этом, показатели эффективности функционирования ДС перестают соответствовать требованиям, изложенным в нормативном документе [2]. Кроме того, несоответствие показателей эффективности шахтных ДС возникает из-за ошибок при разработке газопроводных сетей. Ошибки связаны с недостаточно полным учетом особенностей газодинамических процессов, протекающих в системе трубопроводов при работе ДС, а также с неточностью показателей газообильности разрабатываемого угольного пласта.

При проведении реконструкции и ремонта элементов ДС (магистральных и участковых трубопроводов, вакуум-насосных станции, дегазационных скважин) по мере ведения горных работ происходит изменение топологии газопроводной сети, характера взаимодействия основных элементов ДС между собой, а также технических возможностей используемого в ДС оборудования. Данные обстоятельства не всегда в полной мере учитываются в существующих методах расчета параметров ДС, что приводит к несоответствию создаваемых математических моделей реальным газодинамическим процессам в дегазационных трубопроводах. По этой причине актуальным вопросом является создание удобных для инженерных расчетов математических моделей адекватно описывающих аэрогазодинамику метано-воздушной смеси (МВС)

на участках газопроводной сети.

В настоящей работе проведен анализ некоторых газодинамических параметров МВС с частицами влаги на основе математической модели, учитывающей особенности движения газо-жидкостной смеси по участкам дегазационного трубопровода.

В работе [3] были приведены результаты расчетов параметров различных вариантов газопроводных сетей для шахты «Глубокая» ОАО ш/у «Донбасс» на период с 2002 г. по 2006 г. При расчетах учитывалось помимо длины участков сети, количество параллельных ветвей. Результаты расчетов позволили уточнить диаметр труб, используемых на некоторых участках магистрального трубопровода, а также спрогнозировать величину затрат энергии на транспортировку МВС по газопроводной сети в течении выше указанного периода времени. Однако в данной работе не учитывалось влияние влаги в трубопроводах на рациональные параметры МВС, тем самым предполагалось, что водоприток из дегазационных скважин в дегазационный трубопровод отсутствует.

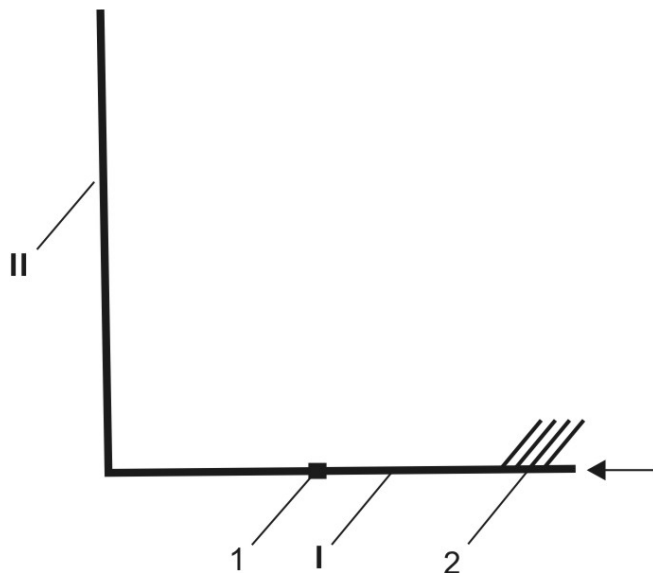
В работе [4] были определены рациональные режимы движения МВС по дегазационному трубопроводу низкого давления на шахте «Северная» (ОАО «Воркутауголь»). В качестве критериев для определения эффективности транспортирования МВС по трубопроводу использовались критерии Рейнольдса ( $Re$ ) и Эйлера ( $Eu$ ). Интервалы для критериев подобия определялись в зависимости от газодинамических параметров МВС и конструктивных параметров дегазационной установки. Были определены рациональные интервалы критериев подобия, в пределах которых обеспечивалась эффективная работа ДС. Рассматривались следующие зависимости:  $Re = f(d)$ ,  $Re = f(Q)$  и  $Eu = f(p_1 - p_2)$ , где  $d$  – диаметр участка дегазационного трубопровода, м;  $Q$  – объемный расход МВС, м<sup>3</sup>/с;  $p_1$  и  $p_2$  – соответственно давление МВС в начальном и конечном сечении участка трубопровода, Па. В данной работе не учитывалось влияние концентрации частиц влаги в МВС на газодинамические параметры движущейся среды. Считалось, что влажность МВС мала, чтобы ее рассматривать как газо-жидкостную среду.

Согласно [5, 6] при математическом моделировании ДС необходимо учитывать интенсивность поступления воды, шлама и пыли из дегазационных скважин в газопроводную сеть, так как при этом возникают неблагоприятные факторы, приводящие к снижению эффективности работы шахтных ДС. Происходит падение депрессии газопроводной сети в связи с засорением отдельных участков трубопровода перечисленными выше компонентами. Кроме того, имеет место коррозия внутренних поверхностей труб под действием агрессивной жидкой среды.

При высоком водопритоке из дегазационных скважин в газопроводную сеть, происходит рост объемной концентрации частиц влаги в потоке МВС и образование отдельных водяных скоплений различной толщины и протяженности. При этом будет идти рост теплообмена между стенками трубы и движущейся газо-жидкостной средой, а также рост конденсации на внутренней поверхности трубопроводов. В местах образования водяных пробок газодинамические парамет-

ры будут носить явно выраженный колебательный характер.

Рассмотрим математическую модель движения метано-воздушной среды с частицами влаги по участкам газопроводной сети (рис. 1). Будем рассматривать движущуюся среду, как газо-жидкостную смесь (суспензию). В качестве упрощения будем рассматривать частицы влаги шарообразной формы.



I, II – участки газопроводной сети; 1 – водоотделитель; 2 – дегазационные скважины;

→ – направление движения потока МВС

Рис. 1 – Фрагмент газопроводной сети

На участке I происходит накопление влаги, поступающей из дегазационных скважин 2. По этой причине через определенные промежутки времени водоотделитель 1 автоматически выпускает воду из трубопровода. За время  $t_1$  вода накапливается в месте установки водоотделителя, после чего в течении времени  $t_{сл}$  происходит ее слив. Разность между массой воды, поступающей на участок I и отводящейся из него определяется как  $\Delta M_I = Q_{скв} t_1 - Q_{от} t_{сл}$ , где  $Q_{скв}$  и  $Q_{от}$  – массовые расходы поступающей и отводящейся воды. Количество влаги во взвешенном состоянии на участке I можно приближенно определить как  $m_I = \Delta M_I - m'$ , где  $m'$  – количество влаги ушедшее на образование водяной пленки на внутренней поверхности трубопровода и скоплений воды.

Если  $\Delta M_I$  будет расти, то начнется накопление воды на участке I и в определенный момент времени возникнет водяная пробка. Рост величины  $\Delta M_I$  будет происходить при неправильно рассчитанных значениях  $t_1$  и  $t_{сл}$ .

Рассмотрим газодинамику процесса движения газо-жидкостной среды по приведенным выше участкам дегазационного трубопровода. Распределение объемной концентрации частиц жидкости  $C_I$  (%) по сечению горизонтального участка I по аналогии с [7] можно приближенно описать зависимостью

$$C_I = C_{pl} \exp^{\frac{-aV_s}{u_{*I}^{2,7}} y_I}, \quad (1)$$

где  $C_{pI}$  – объемная концентрация влаги возле нижней стенки трубы, %;  $V_s$  – скорость падения частицы влаги в покоящейся МВС, м/с;  $u_{*I}$  – динамическая скорость потока МВС возле стенки трубы, м/с;  $y_I$  – текущее расстояние, отсчитываемое от нижней стенки трубы, м;  $a$  – экспериментальная константа, зависящая от плотности и состава газовой среды.

Для вертикального участка II величина  $C_{II}$  будет практически постоянна по сечению трубы, что связано с направлением действия силы тяжести на частицы влаги. Значение  $C_{II}$  может приближенно считаться равным среднему значению  $C_I$  в конечном сечении участка I.

Рассматривая МВС с частицами влаги как суспензию, движущуюся в канале [7], можно определить такие характеристики течения, как:

1) плотность

$$\rho_d = \rho_v C + \rho_{mвс}(1 - C), \quad (2)$$

2) расходную скорость

$$u_d = \frac{4Q_d}{\pi d^2}, \quad (3)$$

3) число Рейнольдса

$$Re = u_d d \nu_{mвс}^{-1}, \quad (4)$$

4) динамическую вязкость

$$\mu_d = \mu_{mвс} (1 + 2,5 C), \quad (5)$$

5) потери напора на участке трубопровода

$$\Delta p = 0,5\lambda L d^{-1} \rho_d u_d^2, \quad (6)$$

где  $\rho_v$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{mвс}$  – плотность МВС, кг/м<sup>3</sup>;  $Q_d$  – объемный расход суспензии на участке, м<sup>3</sup>/с;  $\nu_{mвс}$  – кинематическая вязкость МВС, м<sup>2</sup>/с;  $\mu_{mвс}$  – динамическая вязкость МВС, Н/см;  $\lambda$  – коэффициент гидродинамического сопротивления суспензии на участке;  $L$  и  $d$  – соответственно длина и диаметр рассматриваемого участка газопроводной сети, м.

Для вертикальных участков газопровода (в особенности большой протяженности) при определении значений  $\Delta p$  необходимо учитывать возникновение местных аэродинамических сопротивлений крупных капель влаги, которые образуются на стенках трубопровода, и далее отрываясь от них, попадают в газовый поток.

Согласно [5] потери давления в месте сопряжения участков I и II будут

определяться как

$$\Delta p_{nI} = \frac{\rho_{dI} \cdot u_{dnl}^2}{2} \cdot \left[ 2000 \cdot \lambda_{nI}^{2,5} + 0,106 \cdot \frac{d_{nI}}{r_{nI}^2} \right] \cdot \frac{\alpha_{nI}}{90^\circ} \cdot \left[ 1 + K \cdot \frac{\omega_{MBC}}{\omega_6} \right], \quad (7)$$

где  $\lambda_{nI}$  – коэффициент гидродинамического сопротивления суспензии в месте поворота участка I;  $\alpha_{nI}$  – угол поворота I участка газопровода, град;  $d_{nI}$  и  $r_{nI}$  – соответственно диаметр и радиус I участка газопровода в месте его поворота, м;  $\rho_{dI}$  – плотность суспензии на участке I, кг/м<sup>3</sup>;  $u_{dnl}$  – скорость суспензии в месте поворота I участка газопровода, м/с;  $\omega_{MBC}$  и  $\omega_6$  – соответственно молекулярная масса МВС и воды, а.е.м;  $K$  – коэффициент выбираемый согласно [8].

Значение  $\lambda_{nI}$  при турбулентном движении суспензии можно определить по формуле

$$\frac{\lambda_{nI}}{\lambda_I} = 1 + 0,075 \cdot Re_I^{0,25} \cdot \left( \frac{d_I}{2 \cdot r_{nI}} \right)^{0,5}, \quad (8)$$

где  $\lambda_I$  – коэффициент гидродинамического сопротивления I участка газопровода.

Для определения коэффициента гидродинамического сопротивления  $\lambda$  на участках I и II можно использовать зависимость

$$\lambda = \frac{2d}{\rho_d u_d^2} \left| \frac{dp_{cm}}{d\xi} \right|, \quad (9)$$

где  $\left| \frac{dp_{cm}}{d\xi} \right|$  – градиент гидростатического давления по направлению, параллельному образующей трубы.

В работе [7] было приведено выражение для определения разности скоростей твердых частиц и жидкости при их совместном движении в горизонтальном и вертикальном каналах. Рассматривая аналогичный процесс движения частиц влаги с потоком МВС, для участков I и II можно приближенно записать

$$u_{sI} = \sqrt{\frac{8}{3} \frac{r_k}{C_x} \left( \frac{\rho_6 - \rho_{MBC}}{\rho_{MBC}} \right) g}, \quad (10)$$

$$u_{sII} = \pm \sqrt{\frac{4}{3C_x} \left( \frac{\rho_6 - \rho_{MBC}}{\rho_{MBC}} \right) g d_k}, \quad (11)$$

где  $C_x$  – коэффициент сопротивления капли воды;  $r_k$  и  $d_k$  – соответственно ра-

диус и диаметр капли воды, м.

Величина  $u_{sII}$  берется со знаком «+» для нисходящего течения и со знаком «-» для восходящего течения.

Скорость суспензии будет определяться как

$$\bar{u}_d = \bar{u}_{мвс} + \frac{\rho_g C}{\rho_d} u_s, \quad (12)$$

где  $\bar{u}_{мвс}$  – скорость потока МВС, м/с;  $u_s = v_k - \bar{u}_{мвс}$  – разность скоростей частицы воды и потока МВС, м/с

Выражения (10)-(11) можно использовать для корректировки диаметров участков магистральных трубопроводов.

С учетом (10)-(12) можно определить плотность суспензии  $\rho_d$  на участках I и II

$$\rho_d = \frac{Q_g \cdot u_d \cdot \rho_g}{Q_d \cdot v_{ck}} + \frac{Q_{мвс} \cdot u_d \cdot \rho_{мвс}}{Q_d \cdot u_{мвс}}, \quad (13)$$

где  $Q_g$ ,  $Q_{мвс}$  и  $Q_d$  – соответственно объемный расход воды, МВС и газо-жидкостной смеси на участке газопровода, м<sup>3</sup>/с;  $v_{ck}$  – средняя скорость капель воды в данном сечении участка газопровода, м/с.

Коэффициент турбулентной диффузии для мелкой частицы влаги определяется как  $D_t = l \sqrt{v_k'^2}$ , где  $l$  – микромасштаб турбулентности, м;  $\sqrt{v_k'^2}$  – среднеквадратическое отклонение пульсации скорости  $v_k'$  частицы влаги, м.

Коэффициенты турбулентной диффузии характеризуют структуру течения потока МВС с частицами влаги на рассматриваемом участке дегазационного трубопровода.

Суммарные потери напора суспензии на участках I и II с учетом выражения (6) будут определяться по формуле

$$\Delta p_{1-2} = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_{вод} + \Delta p_{нов},$$

где  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$  – соответственно потери напора суспензии на участках I и II;  $\Delta p_{вод}$  и  $\Delta p_{нов}$  – соответственно потери напора суспензии в месте установки водоотделителя 1 и в месте сопряжения участков I и II, Па.

В случае накопления влаги на участке I все потери напора на нем начнут расти в связи с уменьшением проходного сечения трубопровода.

Суммарная потеря напора газо-жидкостной смеси на участках газопроводной сети будет определяться по формуле

$$\Delta P_\sigma = \sum_{i=1}^m \Delta P_i + \sum_{j=1}^n \Delta P_j + \sum_{k=0}^p \Delta P_k + \sum_{\gamma=1}^{\xi} \Delta P_\gamma, \quad (14)$$

где  $\sum_{i=1}^m \Delta P_i$  – суммарное падение напора на  $i$ -тых участках газопроводной сети, Па;  $\sum_{j=1}^n \Delta P_j$  – суммарное падение напора на  $j$ -тых сопряжениях участков газопроводной сети, Па;  $\sum_{k=0}^p \Delta P_k$  – суммарное падение напора в местах установки водоотделителей, Па;  $\sum_{\gamma=1}^{\xi} \Delta P_{\gamma}$  – суммарное падение напора в узлах газопроводной сети, Па.

На основании выше сказанного можно сделать следующие выводы:

– рассмотренная модель позволяет учитывать влияние концентрации частиц влаги в МВС и водяных скоплений на аэрогазодинамические характеристики газо-жидкостного потока;

– при высоких величинах водопритока в газопроводную сеть, будет наблюдаться рост потерь напора, падение депрессии в сети, а также колебания аэрогазодинамических параметров МВС, что приведет к заметному снижению эффективности работы шахтной ДС;

– в дальнейшей работе планируется определить величину экспериментальной константы  $a$ , входящей в выражение (1), а также рассмотреть варианты газопроводных сетей, топология которых и аэродинамические параметры потока МВС на участках сети позволят избежать образования водяных скоплений.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила безпеки у вугільних шахтах. – К., 2005. – 360 с.
2. Руководство по дегазации угольных шахт. / АН СССР, Ин-т горного дела им. А.А. Скочинского. - Люберцы, 1990. – 190 с.
3. Стукало В.А., Кавера А.Л. Анализ состояния и меры по повышению эффективности проветривания и дегазации пластов-спутников шахты «Глубокая» Ш/У «Донбасс» // Известия Донецкого горного института, 2002. - №3. – С. 54-60.
4. Малашкина В.А., Вострикова Н.А. Определение рациональных режим работы дегазационных установок угольных шахт. – М.: МГГУ, ГИАБ.- 2005. – С. 61-69.
5. Новиков Л.А., Бунько Т.В., Кокоулин И.Е., Бокий Б.В. Влияние наличия влаги в дегазационном трубопроводе на его аэродинамические характеристики. - Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / ин-т геотехн. механ. им. Н.С. Полякова НАН Украины. - Днепропетровск, 2003. – Вып. 44.- С. 27-29.
6. Новиков Л.А., Бокий Б.В. Математическая модель движения метано-воздушной смеси на участках дегазационного трубопровода. - Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. трудов / ин-т геотехн. механ. им. Н.С. Полякова НАН Украины. - Днепропетровск, 2003. – Вып. 47.- С. 307-309.
7. А. Фортъе. Механика суспензий., перев. с французского. М., «Мир», 1971. – С. 233-234.
8. Вентиляция и кондиционирование воздуха. Справочник проектировщика/ Под ред И.Г. Старовойта. М.: Стройиздат, 1978. 509 с.