

2. Ревва В.Н. Оценка устойчивости кровли в окрестности горных выработок / В.Н. Ревва, // Физика и техника высоких давлений. Донецк ДонФТИ НАН Украины.- 1997. том 7 № 4. – С.114 - 116.
3. Алексеев А. Д. Разрушение горных пород в объемном поле сжимающих напряжений / А. Д. Алексеев, В. Н. Ревва, Н. А. Рязанцев - К: Наукова думка, 1989. - 168 с.
4. Черепанов Г.П. Механика хрупкого разрушения / Г.П. Черепанов - Москва: Наука. 1974. - 640 с.
5. Методические указания по определению эффективной поверхностной энергии горных пород [Текст] Донецк: ИФГП НАНУ, 2009. - 23 с.
6. Черепанов Г.П. О развитии трещин в сжатых телах. Практическая математика и механика / Г.П. Черепанов - Москва: Металлургия. 1966. Том 30. - С. 82 - 93.
7. Хеккель К. Техническое применение механики разрушения/ К. Хеккель Москва. Металлургия, 1974. - 64 с.
8. Лихтман В. И. Физико-химическая механика металлов / В. И. Лихтман, Е.Д. Щукин, П.А. Ребиндер - М: Издание АН СССР. – 1962. – 303 с.
9. Ревва В. Н. Влияние глубины залегания угольных пластов на механические свойства угля / В.Н. Ревва, А.В. Молодецкий // Физико-технические проблемы горного производства. Донецк. – 2009.- № 12. - С. 55 - 58.
10. Ревва В.Н. Разрушение водонасыщенного угля при различных видах деформационного состояния / В.Н. Ревва, А.Н. Молодецкий, Д.С. Кодберг // Геотехническая механика: межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины – Днепропетровск, 2010. - № 89. – С.152 - 156.
11. Разрушение водонасыщенного угля при различных видах напряженного состояния / В.Н. Ревва, А. В. Молодецкий, В.В. Завражин, Н.И. Василенко // Физико-технические проблемы горного производства. – Донецк. – 2010. - № 13. – С. 117 – 121.
12. Деформирование и разрушение газонасыщенного угля при разных видах напряженного состояния / В.Н. Ревва, В.В. Завражин, А. В. Молодецкий, Д.С. Кодберг // Вести Донецкого горного института. – Донецк. – 2011. - № 1. – С. 66 - 70.

**УДК 622.817.47.002.5:621.643.2:533.1**

Мл. научн. сотр. Л.А. Новиков  
(ИГТМ НАН Украины)

### **ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СРЕДЫ В ВАКУУМНОМ ДЕГАЗАЦИОННОМ ТРУБОПРОВОДЕ**

Розглянуті особливості зміни динамічної та кінематичної в'язкості аеродисперсної системи на ділянках дегазаційного трубопроводу у залежності від от масової концентрації твердої фази

### **PHYSICAL PROPERTIES OF MEDIUM IN THE VACUUM DEGASSING PIPELINE**

Specific change of dynamic and kinematic viscosity of air-dispersed system in areas of degassing pipeline depending on mass concentration of the solid phase is described.

При разработке угольных месторождений на больших глубинах в сложных горно-геологических условиях актуальным вопросом является совершенствование технологий и технических средств дегазации, а также проведение необходимых дегазационных мероприятий для обеспечения безопасных условий труда.

Эффективность функционирования шахтной дегазационной системы зависит от сложности газопроводной сети, мощности вакуум-насосов, числа подсоединенных к трубопроводу дегазационных скважин, величины расхода газа и влаги из дегазационных скважин, а также технического состояния трубопровода. В процессе развития горных работ увеличивается число последовательных соединений участков трубопроводов и возрастает их суммарное гидравлическое сопротивление. По этой причине прокладывают дополнительные параллельные

участки трубопровода, длина и диаметр которых определяются с учетом необходимых расходных характеристик.

При определении газодинамических параметров и расходных характеристик участковых дегазационных трубопроводов на стадии проектирования и реконструкции газопроводной сети необходимо располагать достоверной информацией о физических свойствах транспортируемой среды. Несмотря на работу пыле- и влагоотделителей, при интенсивном поступлении пыли, шлама и воды из дегазационных скважин в газопроводную сеть происходит увеличение влажности и запыленности каптируемой метано-воздушной смеси (МВС) [1]. Это приводит к изменению физических свойств среды по сравнению с «чистой» МВС и отклонению расходных характеристик участковых дегазационных трубопроводов от их нормативных значений [2]. В случае притечек воздуха в газопроводную сеть и загрязненности внутренней поверхности труб, колебания расходных характеристик участковых трубопроводов увеличиваются, что может стать причиной снижения эффективности дегазации и возникновения аварийных ситуаций.

С учетом наличия взвешенных в газовом потоке компонентов транспортируемую по трубопроводам среду следует рассматривать как аэродисперсную систему с определенными физическими свойствами.

Относительная влажность и влагосодержание МВС определяются по формулам [3]:

$$\varphi = \frac{p_r}{p_r'}; \quad (1)$$

$$d' = \frac{R}{R_r} \frac{p_r}{p' - p_r} = \frac{R}{R_r} \frac{\varphi p_r'}{p' - \varphi p_r'}, \quad (2)$$

где  $p'$ ,  $p_r$  – давления влажной МВС и пара, Па;  $p_r'$  – парциальное давление насыщенного водяного пара, Па;  $R_r$  – газовая постоянная водяного пара, Дж/(кг·К).

Плотность влажной МВС [3]

$$\rho' = \frac{p'}{RT} - \frac{p_r}{T} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R_r} \right), \quad (3)$$

где  $T$  – температура влажной МВС, К;  $R$  – газовая постоянная «чистой» МВС, Дж/(кг·К).

Влажная МВС может быть насыщенной ( $\varphi < 1$ ,  $0 < p_r < p_r'$ ) и ненасыщенной ( $\varphi = 1$ ,  $p_r = p_r'$ ). При этом ее газовая постоянная и молекулярная масса будут определяться из следующих соотношений:

$$R' = R + d'R_r; \quad (4)$$

$$m' = m + d'm_r, \quad (5)$$

где  $m$ ,  $m_r$  – молекулярные массы «чистой» МВС и пара, кг/моль.

В соответствии с [4] динамическая вязкость влаги (пара) в газовом потоке

$$\mu_r = 8,17 \cdot 10^{-6} \frac{4,52T}{T+961} \sqrt{\frac{T}{273}} \left[ 1 - 2,1 \cdot 10^{-6} (T-393,15)^{-2} \rho_r \right], \quad (6)$$

где  $\rho_r$  – плотность водяного пара, кг/м<sup>3</sup>.

Динамические вязкости воздуха [5], метана [6] и их смеси [7] в дегазационном трубопроводе будут определяться как:

$$\mu_v = \mu_0 \left( \frac{273 + C_v}{T + C_v} \right) \left( \frac{T}{273} \right)^{1,5}; \quad (7)$$

$$\mu_m \approx 10^{-6} K_m \exp \left[ x_m \left( 3,48384 \cdot 10^{-6} T_m^{-1} p_m \Delta \right)^{2,4-0,2x_m} \right]; \quad (8)$$

$$\mu_s = \frac{y_v \mu_v}{y_v + y_m \psi_{m-v}} + \frac{y_m \mu_m}{y_m + y_v \psi_{v-m}}, \quad (9)$$

где  $\mu_s$  – динамическая вязкость воздуха при температуре  $T_0 = 273$  К, Па·с;  $C_v$  – постоянная Сезерленда для воздуха;  $\Delta$  – относительная плотность по воздуху, д.е.; где  $p_m$  – давление метана, Па;  $T_m$  – температура метана, К;  $K_m$ ,  $x_m$  – числовые параметры, определяемые согласно [6];  $y_v$ ,  $y_m$  – мольные доли воздуха и метана, д.е.;  $\psi_{m-v}$ ,  $\psi_{v-m}$  – числовые параметры, определяемые согласно [7].

Если МВС и водяной пар рассматривать как два различных газа, то для определения динамической вязкости влажной МВС как некоторого бинарного газа можно воспользоваться соотношением (9).

Рассмотрим случай, когда в потоке влажной МВС содержатся частицы пыли с эквивалентным диаметром  $d_t$ , размеры которых превосходят размеры газовых молекул. В связи с этим указанные частицы не оказывают заметного влияния на динамическую вязкость среды (исключая случай высокой концентрации этих частиц в потоке). В связи с этим в качестве физического параметра влажной МВС с частицами пыли указанного диаметра следует рассматривать среднюю величину результирующей плотности среды

$$\rho_1 = \rho_i c_i + \rho'(1 - c_i) = \rho_i c_i + \left[ \frac{p'}{RT} - \frac{p_r}{T} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R_r} \right) \right] (1 - c_i), \quad (10)$$

где  $\rho_t$  – плотность твердых частиц, кг/м<sup>3</sup>;  $c_t$  – объемная концентрация твердых частиц диаметром, д.е.

Рассмотрим случай, когда во влажной МВС присутствуют высокодисперсные частицы пыли с эквивалентным диаметром  $d_p \leq 0,1 \cdot 10^{-6}$  м. Так как эти частицы участвуют в броуновском движении молекул газа и формировании вязкости среды, то введем допущение, согласно которому частицы пыли диаметром  $d_p \leq 0,1 \cdot 10^{-6}$  м и массовой концентрацией  $c_p$  образуют «пылевой» газ [7], подчиняющейся кинетической теории газов. Тогда согласно работе [7] для средней скорости  $u_p$  и длины свободного пробега  $\lambda_p$  этих частиц можно записать:

$$u_p = [8kT_v(\pi 6^{-1} \pi d_p^3 \rho_t)^{-1}]^{0,5}; \quad (11)$$

$$\lambda_p = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d_p^2 n_p}, \quad (12)$$

где  $k = 1,380622 \cdot 10^{-23}$  – постоянная Больцмана;  $n_p = c_p m_p^{-1}$  – число частиц пыли в единице объема;  $m_p = 6^{-1} \pi d_p^3 \rho_t$  – масса частицы пыли, кг;  $c_p = C_p \rho_t$  – массовая концентрация частиц пыли, кг/м<sup>3</sup>;  $C_p$  – объемная концентрация частиц пыли, д.е, определяемая из соотношения

$$C_p = c_p \rho_t^{-1} = n_p 6^{-1} \pi d_p. \quad (13)$$

Молярная масса  $M_p$  и динамическая вязкость  $\mu_p$  рассматриваемой газообразной фазы [8]:

$$M_p = 6^{-1} \pi d_p^3 \rho_t N_a; \quad (14)$$

$$\mu_p = 3^{-1} c_p u_p \lambda_p = 3^{-1} C_p \rho_t u_p \lambda_p, \quad (15)$$

где  $N_a = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> – число Авогадро.

Динамическая вязкость аэродисперсной системы будет зависеть от влажности МВС и объемной концентрацией частиц пыли диаметром  $d_p$ . Объединяя две фазы: водяной пар и МВС будем рассматривать влажную МВС как некоторый газ. Если не учитывать частицы пыли диаметром  $d_t$ , то аэродисперсную систему можно рассматривать как бинарную газовую смесь, состоящую из влажной МВС (некоторого газа) и «пылевого» газа. Для определения динамической вязкости рассматриваемой аэродисперсной системы  $\mu_2$  можно воспользоваться соотношением (9), а для величины ее плотности и кинематической вязкости можно записать:

$$\rho_2 = \rho_t c_p + \rho'(1 - c_p) = \rho_t c_p + \left[ \frac{p'}{RT} - \frac{p_r}{T} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R_r} \right) \right] (1 - c_p); \quad (16)$$

$$v_2 = \frac{\mu_2}{\rho_2}, \quad (17)$$

где  $\mu_2$  – динамическая вязкость аэродисперсной системы, Па·с.

Если учитывать содержание взвешенных частиц пыли диаметром  $d_t$ , то соотношения (16), (17) примут вид:

$$\rho_3 = \rho_t(c_p + c_t) + \left[ \frac{p'}{RT} - \frac{p_r}{T} \left( \frac{1}{R} - \frac{1}{R_r} \right) \right] (1 - c_p - c_t). \quad (18)$$

$$v_3 = \frac{\mu_2}{\rho_3}, \quad (19)$$

В выражении (19) величина динамической вязкости будет такой же, как и в (17).

На рис. 1 представлены результаты расчета изменения динамической и кинематической вязкости аэродисперсной системы на участке дегазационного трубопровода в зависимости от массовой концентрации высокодисперсных частиц пыли, полученные по формулам (9) и (17) соответственно.

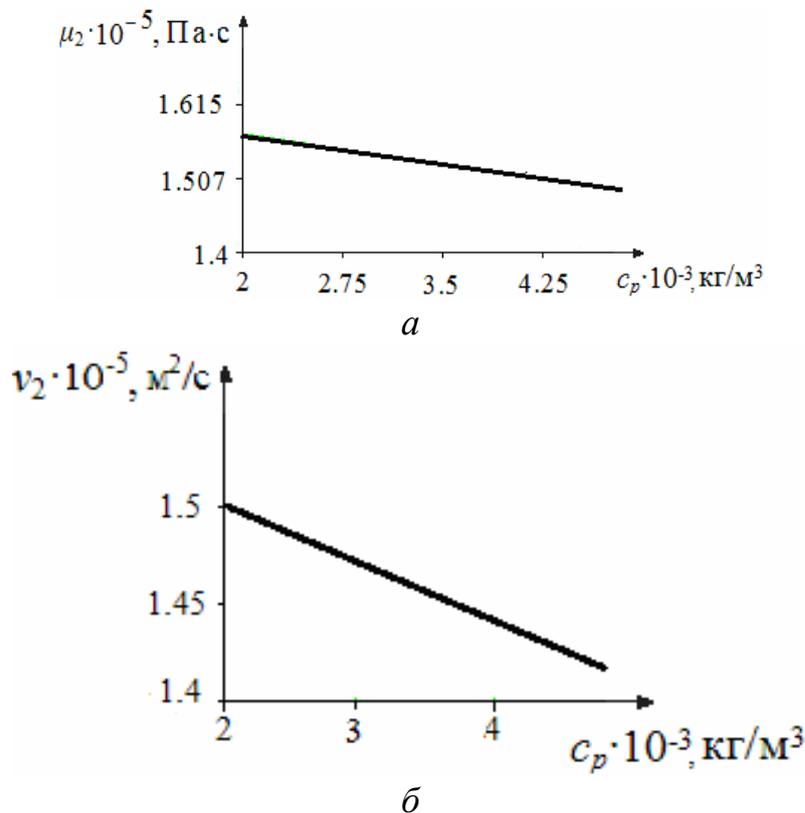


Рис. 1 - Изменение динамической (а) и кинематической (б) вязкости аэродисперсной системы на горизонтальном участке вакуумного дегазационного трубопровода при относительной влажности МВС  $\varphi = 1$  в зависимости от массовой концентрации высокодисперсных частиц пыли диаметром  $d_p = 0,1 \cdot 10^{-6}$  м

Анализ рис. 1,*а* показывает, что динамическая вязкость аэродисперсной системы обратно пропорциональна величине массовой концентрации  $c_p$  высокодисперсных частиц пыли. Это связано с малой средней скоростью броуновского движения этих частиц, а также с уменьшением длины их свободного пробега при возрастании параметра  $c_p$ .

Из рис. 1,*б* следует, что характер изменения кинематической вязкости аэродисперсной системы будет идентичен рис. 1,*а*. Отличие будет заключаться лишь в более быстром убывании параметра  $\nu_2$  при соответствующем возрастании массовой концентрации  $c_p$ .

Таким образом, при расчете расходных характеристик участков вакуумной газопроводной сети в качестве транспортируемой по дегазационному трубопроводу среду целесообразно рассматривать аэродисперсную систему с определенными физическими свойствами.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков Л.А. Определение потерь давления на загрязненных участках вакуумного дегазационного трубопровода / Л.А. Новиков // Геотехническая механика: межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2011. – Вып. 92. – С. 258-263.
2. Дегазация угольных шахт. Требования к способам и схемам дегазации. – Киев, 2004. – 126 с.
3. Бурцев С.И. Влажный воздух. Состав и свойства: Учеб. пособ. / С.И. Бурцев, Ю.Н. Цветков. – СПб.: СПбГАХПТ, 1998. – 146 с.
4. Нубарян С.М. Средства коммерческого учета энергоносителей: Курс лекций для студентов 5-6 курсов всех форм обучения по специальности 7.092108, 8.092108 «Теплогасоснабжение и вентиляция» / С.М. Нубарян // ХНАГХ. – Харьков: ХНАГХ, 2009 – 152 с.
5. Васильев И. А. Теплофизические свойства веществ: Учеб. пособ. / И. А. Васильев, Д. П. Волков, Ю. П. Зоричняк. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – С. 42.
6. Сухарев А. М. Технологический расчет и обеспечение надежности газо- и нефтепроводов / А. М. Сухарев, А. М. Красевич // РГУ нефти и газа. – М.: ГУП «Нефть и газ», 2000. – 270 с.
7. Асламова В. С. прямооточные циклоны. Теория, расчет, практика / В. С. Асламова // АГТА. – Ангарск: АГТА, 2008. – 233 с.
8. Рид Р. Свойства газов и жидкостей / Р. Рид, Дж. Праусниц, Т. Шервуд. – Л.: Химия, 1982. – 592 с.

## ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ФАКТОРЫ ДЕГАЗАЦИИ ПОРОД НА ШАХТЕ «АЛМАЗНАЯ»

Описані основні чинники дегазації порід на вугільних шахтах. Серед цих чинників – центральні частини стародавніх русел і потоків; локальні структури; зони порушених порід. Поєднання вказаних чинників показує зони скупчення вільного газу у відкладах шахт. Одержані експериментальні дані про розподіл газу в покрівлі основного вугільного пласта на шахті «Алмазна».

## MINING AND GEOLOGICAL FACTORS OF THE ROCK DEGASSING IN THE ALMAZNAYA MINE

Basic factors of the rock degassing in the coal mines are described. Among these factors are central parts of ancient canals and streams; local structures; areas of broken rocks. Combination of these factors indicates areas with free gas accumulation in the mine deposits. Experimental findings on gas distributing in the roof of basic coal layer in the Almaznaya mine are presented.

Проблема дегазации углей и вмещающих пород при ведении работ на шахтах актуальна с того времени, как начала развиваться угольная промышленность [1-3]. Когда в конце XVIII века в Бельгии, Франции и других странах были зафиксированы первые взрывы метана при ведении горных работ, в результате чего гибли люди, дегазация обрабатываемых угольных пластов стала неотъемлемой частью технологического процесса при угледобыче. Природная газоносность на разных шахтах и в разных странах не сильно отличается, поскольку формирование угленосных бассейнов подчиняется общим закономерностям, описанным в [4].

Значительные ресурсы метана в угольных пластах и вмещающих породах на угольных месторождениях Украины, могут служить дополнительным источником энергии для страны. Использование метана угольных месторождений способствует также уменьшению глобального «парникового эффекта» и выполнению Украиной обязательств, предусмотренных Рамочной конвенцией ООН по изменению климата. Установлено, что по своим свойствам метан в 21-н раз активнее влияет на процессы, связанные с образованием «парникового эффекта», чем углекислый газ [5].

Детальное исследование условий и закономерностей формирования и размещения скоплений углеводородов в осадочной толще позволили оценить высокую газоносность недр Донецкого бассейна. Его особенностью является наличие, кроме угля, значительных ресурсов метана, который находится в угольных пластах и вмещающих породах. Произведенная оценка ресурсов метана по угольным пластам составляет около 12 трлн. м<sup>3</sup> [6]. Следует указать, что эта цифра дана без учета газоносности пород, только по угольным пластам и пропласткам. С учетом газоносности пород, по данным [7], в отложениях Донецкого бассейна находится 25 трлн. м<sup>3</sup> метана. В.И. Узиюк и др. [8], выполнив ком-