

УДК [622.817.47:533.6].001.24

**Новиков Л.А.**, магистр  
(ИГТМ НАН Украины)**ГАЗОДИНАМИКА ОБВОДНЕННЫХ УЧАСТКОВ ДЕГАЗАЦИОННОГО ТРУБОПРОВОДА И МЕТОДЫ РАСЧЕТА ИХ ПАРАМЕТРОВ****Новіков Л.А.**, магістр  
(ІГТМ НАН України)**ГАЗОДИНАМІКА ОБВОДНЕНИХ ДІЛЯНОК ДЕГАЗАЦІЙНОГО ТРУБОПРОВОДУ І МЕТОДИ РОЗРАХУНКУ ЇХ ПАРАМЕТРІВ****Novikov L.A.**, M.S. (Tech.)  
(IGTM NAS of Ukraine)**GAS DYNAMICS IN THE FLOODED AREAS OF DEGASSING PIPELINE AND METHODS FOR CALCULATING THEIR PARAMETERS**

**Аннотация.** Рассмотрены закономерности изменения потерь давления газозвушной смеси на сопряжениях участков вакуумной газопроводной сети при образовании скоплений влаги с различной степенью перекрытия проходного сечения дегазационного трубопровода. Представлены закономерности, связывающие толщину и протяженность скоплений капельной жидкости с их объемом на сопряжении участков, позволяющие определять величину потерь давления с учетом распределения фаз в сечении трубопровода. Рассмотрены основные методы расчета шахтных вентиляционных и дегазационных сетей.

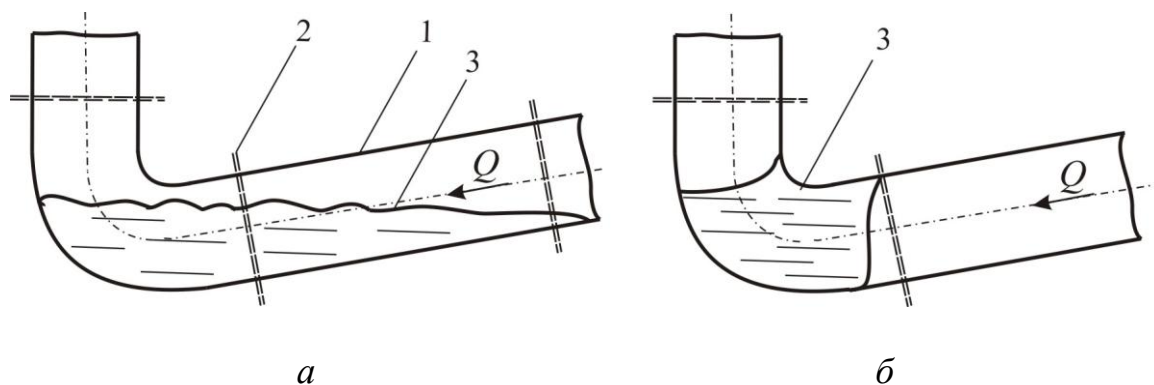
**Ключевые слова:** коэффициенты гидравлического трения, коэффициенты местных гидравлических сопротивлений, потери давления, скопление влаги, дегазационный трубопровод, метано-воздушная смесь.

Одной из причин снижения эффективности транспортировки метано-воздушной смеси (МВС) на поверхность по дегазационному трубопроводу является неудовлетворительное техническое состояние участков сети (нарушение герметичности фланцевых соединений труб, образование жидких и твердых отложений) [1], а также несоответствие расчетных параметров участков дегазационных трубопроводов реальным условиям эксплуатации.

В частности образование локальных скоплений влаги на участках сети может приводить к колебаниям объемного расхода метано-воздушной смеси, потерям разряжения, создаваемого вакуум-насосами [2], а также к значительному увеличению аэродинамического сопротивления. При высокой интенсивности притока влаги из дегазационных скважин и недостаточной эффективности устройств для ее отвода указанные скопления могут полностью перекрывать проходное сечение участков трубопроводов (водяные пробки), тем самым снижая эффективность дегазации и повышая вероятность возникновения взрывоопасных ситуаций. Места локализации скоплений влаги и интенсивность их образования зависят от интенсивности водопритока из дегазационных скважин и топологических особенностей сети трубопроводов.

Так как указанные факторы изменяются во времени, то при проведении аэрогазодинамических расчетов участков дегазационного трубопровода на стадии реконструкции, необходимы дополнительные экспериментальные исследования, а также прогноз развития процесса обводненности. В связи с этим исследование газодинамики обводненных участков дегазационного трубопровода и разработка новых методов их расчета является актуальной задачей.

К основным структурам течения двухфазной среды в трубопроводах можно отнести [3]: пузырьковую, снарядную, пробковую, расслоенную, кольцевую, эмульсионную и дисперсную. Переход от одной структуры течения к другой зависит от объемного содержания фаз и характера их распределения в сечении трубопровода. Применительно к вакуумной газопроводной сети следует рассматривать кольцевую, расслоенную и пробковую структуры течения. Первая наблюдается на вертикальных участках сети и представляет собой нисходящее течение жидкости по поверхности трубопровода, а вторая и третья – на горизонтальных и наклонных участках (рис. 1)



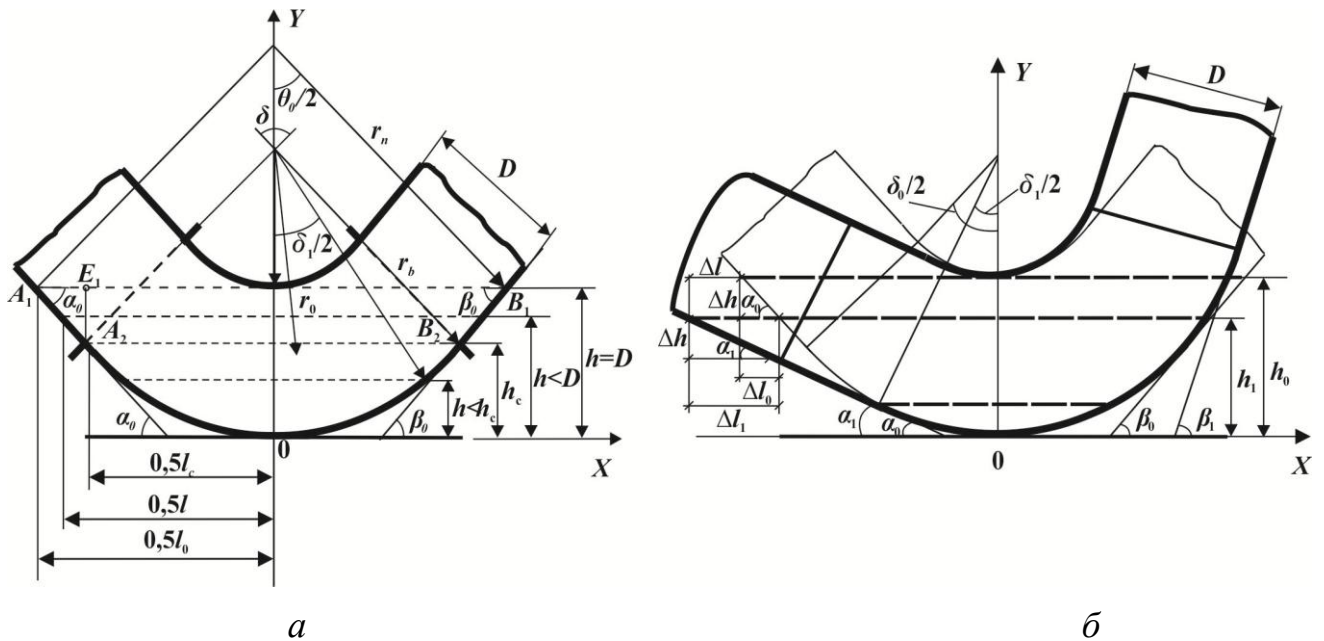
1 – дегазационный трубопровод; 2 – фланцевые соединения; 3 – скопление влаги

Рисунок 1 – Структура течения двухфазной среды на сопряжении участков дегазационного трубопровода: *а* – расслоенная; *б* – пробковая

Процесс образования водяной пробки в вакуумной газопроводной сети следует рассматривать в следующей последовательности. По мере увеличения толщины скопления возрастает динамическое воздействие газового потока с поверхностью жидкости. В результате происходит искривление границы раздела фаз и образование волновых структур (рис.1,*а*). Дальнейшее увеличение толщины скопления приводит к тому, что амплитуда их колебаний становится соизмерима с проходным сечением трубопровода. В результате происходит переход расслоенной структуры течения в пробковую (рис. 1,*б*).

Проходное сечение дегазационного трубопровода при одном и том же объеме жидкости, но различных углах наклона участков (наклон к горизонтальной плоскости) будет различным.

Определим геометрические параметры скопления влаги в продольном сечении дегазационного трубопровода (рис. 2)



1, 2 – уровни скопления влаги;  $h, h_0, h_1, h_c$  – толщины скопления влаги, м;  $\Delta h$  – изменение толщины скопления, м;  $l_0, l, l_c$  – длины скопления, м;  $\Delta l_0, \Delta l_1$  – длины участков поверхности скопления, м;  $\Delta l$  – приращение длины скопления, м;  $\alpha_0, \beta_0, \alpha_1, \beta_1$  – углы наклона звеньев, м;  $\theta_0, \delta_0, \delta_1$  – центральные углы, град;  $r_n, r_o, r_b$  – радиусы кривизны, град

Рисунок 2 – Геометрические параметры скопления влаги при его симметричном (а) и несимметричном (б) расположении относительно оси  $OY$  на сопряжении участков дегазационного трубопровода

Запишем соотношения для основных геометрических параметров скопления (рис. 2,а):

$$\alpha_0 + \beta_0 = 2\alpha_0 = \delta_0. \quad (1)$$

$$h_c = r_b [1 - \cos(0,5\delta_0)]; \quad (2)$$

$$A_2B_2 = l_c = 2\sqrt{2r_b h_c - h_c^2}; \quad (3)$$

$$A_1B_1 = l_0 = l_c + 2(D - h_c) \operatorname{tg}^{-1} \alpha_0. \quad (4)$$

Как видно из (2,б) при  $\alpha_1 \neq \beta_1$  скопление будет несимметричным относительно оси ординат. При этом его толщина уменьшится, а протяженность, наоборот, увеличится. Для геометрических параметров несимметричного скопления получим:

$$\alpha_1 + \beta_1 = \delta_0; \quad (5)$$

$$\theta_0 \approx 4 \operatorname{arctg} \left( 2Dl_0^{-1} \right); \quad (6)$$

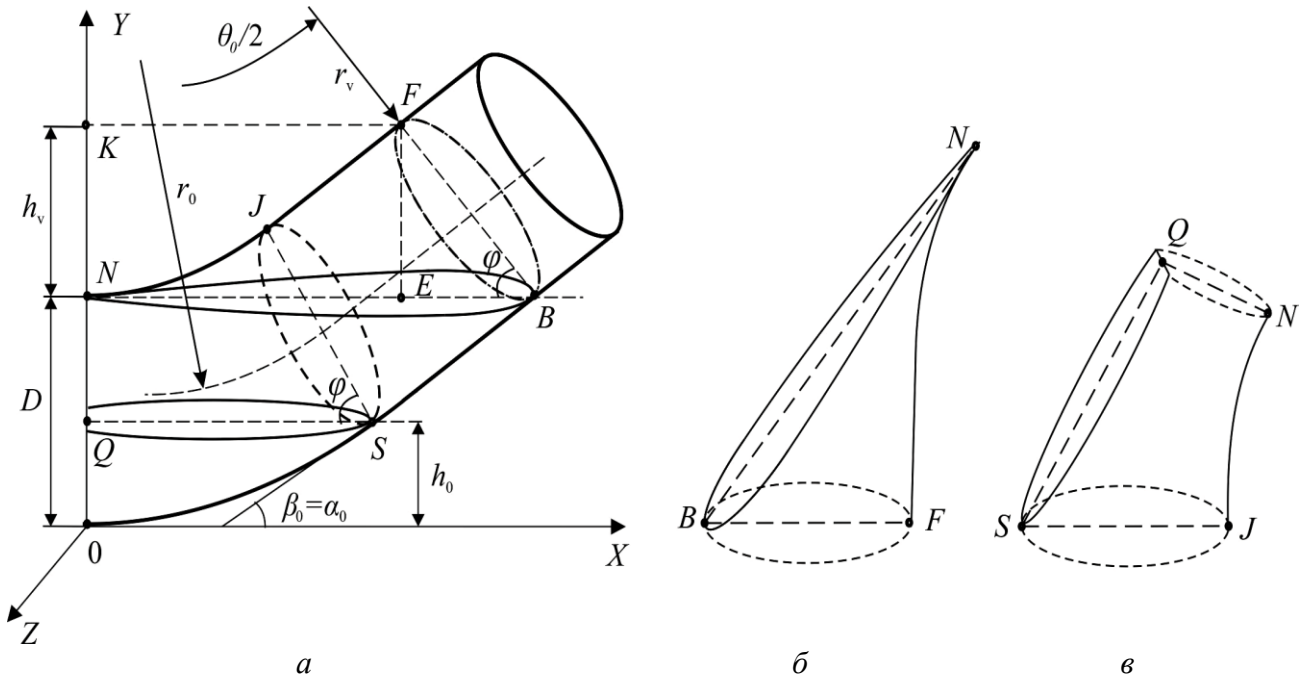
$$r_n = D [1 - \cos(\theta_0/2)]^{-1}. \quad (7)$$

Таким образом, в общем случае для текущей толщины и длины скопления влаги можно записать:

$$h_1 = r_n [1 - \cos(0,5\theta_0 - (\alpha_1 - \alpha_0))]; \quad (8)$$

$$l = l_0 + \Delta l = l_0 + (\Delta l_0 - \Delta l_1) = l_0 + \Delta h [tg^{-1}\alpha_1 - tg^{-1}\alpha_0]. \quad (9)$$

Определим объем симметрично расположенного скопления (рис. 3)



$h_0, h_v$  – текущая толщина скопления и длина отрезка  $NK$ , м;  $\beta_0 = \alpha_0$  – углы наклона звеньев трубопровода, град;  $\varphi$  – угол между отрезками  $FB, NB$  и  $QS, JS$  град;  $\theta_0$  – центральный угол, град;  $r_v$  – радиус кривизны, м

Рисунок 3 – Характер изменения проходного сечения трубопровода в месте скопления влаги (а) при  $h = D$  (б) и  $h < D$  (в)

В соответствии с рис. 3,а получим соотношения для следующих геометрических параметров:

$$\varphi = 90^\circ - \beta_0 = 90^\circ - \alpha_0; \quad (10)$$

$$FE = D \sin(90^\circ - \alpha_0); \quad (11)$$

$$KF = NB + FB \cos(\varphi) = 0,5l_0 + D \cos(\varphi); \quad (12)$$

$$\theta_0 \approx \arctg \left[ \frac{D \sin(90^\circ - \alpha_0)}{0,5l_0 + D \cos(\varphi)} \right]; \quad (13)$$

$$r_v = \frac{D \sin(\varphi)}{1 - \cos(0,5\theta_0)} = [0,5l_0 + D \sin(\varphi)] \operatorname{tg} \left( \frac{\theta_0}{4} \right); \quad (14)$$

$$h_v = r_v [1 - \cos(0,5\theta_0)] \quad (15)$$

Определим объем участка трубопровода  $NFB$  незанятого жидкостью (рис. 3,б) и объем участка  $NF0B$  (рис. 3,а). Получим:

$$V_a \approx 0,5\pi(0,25D^2) \frac{\pi r_v \theta_0}{360}; \quad (16)$$

$$V_\theta = \pi(0,25D^2) \frac{\pi r_0 \theta_0}{360}. \quad (17)$$

Тогда полный объем скопления влаги при  $h_0 = D$  будет определяться как

$$V_D = 2(V_\theta - V_a) = \pi^2(0,5D)^2 \frac{\theta_0}{360} [2r_0 - r_v]. \quad (18)$$

В случае, когда  $h_0 < D$  (рис. 3,в) соотношение (16) можно представить в виде

$$V_a \approx \pi(0,5D)^2 \frac{\pi r_v \theta}{360} (1 - h_0 / (2D)). \quad (19)$$

Тогда

$$V_D = (0,5D)^2 \frac{\pi^2}{180} [r_0 \theta_0 - r_v \theta (1 - h_0 / (2D))], \quad (20)$$

где  $\theta$  – текущий центральный угол, град.

Выражая в (20) толщину скопления через его объем получим

$$h \approx 1440V_D \pi^{-2} D^{-1} \theta^{-1} r_v^{-1} + 2D(r_v \theta - r_0 \theta_0) \theta^{-1} r_v^{-1}. \quad (21)$$

Площадь проходного сечения трубопровода в месте скопления влаги

$$S_a = S - S_0 = 0,25\pi D^2 - 0,125D^2 \left[ \frac{\pi \cdot \arccos(1 - 2h/D)}{90} + (4h/D - 2) \sqrt{1 - (2h/D - 1)^2} \right], \quad (22)$$

где  $S$ ,  $S_0$  – площади поперечного сечения трубопровода и скопления влаги, соответственно, м<sup>2</sup>.

Соотношение (22) можно представить в виде

$$\frac{S(100-a)}{100} = 0,25\pi D^2 - 0,125D^2 \left[ \frac{\pi \cdot \arccos(1-2h/D)}{90} + (4h/D-2)\sqrt{1-(2h/D-1)^2} \right], \quad (23)$$

где  $a$  – часть площади проходного сечения, приходящаяся на скопление влаги, %.

Величину абсолютного давления МВС за скоплением (рис. 1) можно определить по формуле [4]

$$p_k^2 = p_n^2 - 1,62\rho Q^2 D^{-4} [\xi + \zeta] \rho RT, \quad (24)$$

где  $p_k, p_n$  – абсолютные давления МВС начальное и конечное, Па;  $\rho$  – плотность МВС, кг/м<sup>3</sup>;  $Q$  – объемный расход МВС, м<sup>3</sup>/с;  $T$  – средняя температура МВС, К;  $R$  – газовая постоянная МВС, Дж/(кг·К);  $\xi, \zeta$  – коэффициенты сопротивления трения и местного гидравлического сопротивления.

Для определения коэффициентов сопротивления  $\xi, \zeta$  (исключая случай пробкового течения) воспользуемся соотношениями [5, 6]:

$$\xi = 0,11 \left( \frac{\Delta}{D} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \frac{L}{d} \left( 1 - \frac{\alpha_0}{360} \right); \quad (25)$$

$$\xi_o = A_s \left[ K_\Delta K_{Re_c} \zeta_p + 0,0175 \cdot \delta \cdot \bar{r} (\bar{\Delta} + 68/Re)^{0,25} \left( 1 - \frac{\alpha_0}{360} \right) \xi_{mf} \right], \quad (26)$$

где  $\xi_o$  – Общий коэффициент гидравлического сопротивления на сопряжении участков трубопровода;  $\bar{r} = r/D$  – относительный радиус кривизны оси трубопровода в месте сопряжения;  $D$  – гидравлический диаметр трубопровода, м;  $K_\Delta, K_{Re}$  – коэффициенты, зависящие от относительной шероховатости внутренней поверхности трубопровода и числа Рейнольдса, соответственно;  $\zeta_p, \xi_p$  – коэффициенты сопротивления трения и местного гидравлического сопротивления на сопряжении соответственно;  $\xi_{mf}$  – коэффициент межфазного трения;  $Re$  – число Рейнольдса;  $\alpha_0$  – центральный угол, характеризующий объемное содержание газообразной фазы, рад.

При двухфазном течении необходимо знать объемные расходы каждой из фаз. Связь между этими расходами имеет вид

$$Q_1 = Q_2 \beta (1 - \beta)^{-1} = Q_2 Q_0^{-1}, \quad (27)$$

где  $Q_0, Q_1, Q_2$  – объемные расходы двухфазной среды, газообразной и жидкой фазы, м<sup>3</sup>/с;  $\beta$  – объемное расходное газосодержание, д.е.

Переход от расслоенной к пробковой структуре течения характеризуется критическим числом Фруда [7]

$$Fr_* = 0,2 \frac{\exp(-2,5\beta)}{(1-\beta)^2} \left[ \frac{1 - \rho_1 \rho_2^{-1}}{1 - \rho_1 \rho_2^{-1} (v_1 v_2^{-1})^{1/4}} \right], \quad (28)$$

где  $\rho_1, \rho_2$  – плотности газа и жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $v_1, v_2$  – кинематические вязкости газа и жидкости, м<sup>2</sup>/с.

По результатам экспериментальных исследований двухфазных течений в рельефных трубопроводах было получено соотношение для определения потерь напора [6]

$$\Delta P = 0,5[9,81 \lambda_1 \rho_1 Fr \beta + 9,81 \lambda_2 \rho_2 Fr (1 - \beta)], \quad (29)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2$  – коэффициенты потерь на трение по длине для газа и жидкости;  $Fr$  – число Фруда.

Гидравлические диаметры трубопровода для газового и жидкостного потоков определяются с учетом величины  $\varphi$  [7].

Результаты расчета потерь давления на сопряжении участков дегазационного трубопровода (рис. 1) представлены на рис. 4

Как видно из рис. 2, если площадь проходного сечения трубопровода  $S_a \leq 0,5S_0$ , то в течение промежутка времени  $\Delta t = t_3 - t_2$  наблюдается снижение потерь давления. Данная особенность наиболее выражена при  $S_a = 0,65S_0$  и объясняется тем, что по мере уменьшения проходного сечения возрастает интенсивность возмущений на границе раздела фаз (волновая поверхность). При этом происходит кратковременное изменение характера распределения фаз в сечении трубопровода с дальнейшей трансформацией расслоенной структуры течения в пробковую.

При расчете аэродинамических параметров шахтных вентиляционных сетей (ШВС) и дегазационных систем (ДС) используется обобщенный квадратичный закон сопротивления

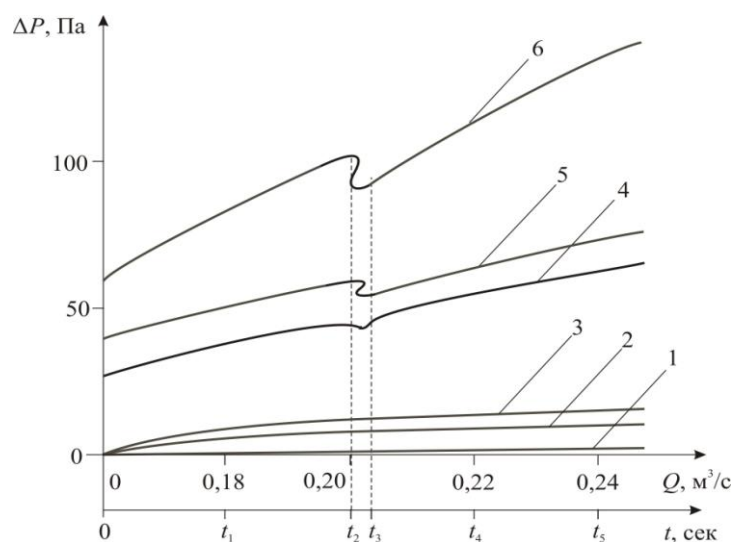
$$h = R_1 q + R_2 q^2, \quad (30)$$

где  $h$  – депрессия, действующая на некотором участке сети, Па;  $R_1, R_2$  – аэродинамические сопротивления ламинарное и турбулентное, Па·с/м<sup>2</sup>;  $q$  – объемный расход газовой смеси, м<sup>3</sup>/с.

Расчет аэродинамических параметров вакуум-насосов и дегазационных скважин, как правило, основывается на степенном законе

$$h = Rq^n, \quad (31)$$

где  $n$  – показатель степени.



1 – 0%; 2 – 10%; 3 – 15 %; 4 – 50%; 5 – 60%; 6 – 65 %

Рисунок 4 – Зависимость потерь давления на сопряжении участков дегазационного трубопровода диаметром 150 мм от объемного расхода МВС при различной степени перекрытия скоплением влаги проходного сечения

Законы сопротивления (30) и (31) дают практически одинаковые результаты. При этом степенной закон (31) также может быть использован для исследования аэрогазодинамических процессов, протекающих в ШВС и ДС. В связи с этим при расчете указанных систем целесообразно использовать метод межузловых депрессий, основные этапы которого заключаются в следующем:

1. Принимается, что движение газа в газопроводах подчиняется закону (24).
2. Расходная характеристика вакуум-насосной станции (ВНС) задается в виде линейной зависимости [8]

$$h = a - bQ,$$

где  $a$  – максимальный вакуум, который может создать ВНС, Па;  $b$  – параметр линейной характеристики ВНС, Па·с/м<sup>3</sup>.

3. С использованием уравнения неразрывности потока смеси в узлах дегазационной сети

$$\sum_{i=1}^n (Q_i + I_i) = 0,$$

где  $I_i$  – внешний источник (дебит метана из скважин), м<sup>3</sup>/с;  $n$  – количество ветвей, инцидентных данному узлу.

Дебит метана, поступающий по скважинам, зависит от вакуума и определяется эмпирически по формуле для каждого выемочного участка [8]

$$I_i = I_{0i} + c_i h_i,$$

где  $I_{0i}$  – дебит метана при отсутствии вакуума, м<sup>3</sup>/с;  $c_i$  – коэффициент пропорциональности между дебитом метана и вакуумом, с/(Па·м<sup>3</sup>).



#### 4. Невязка в каждом узле определяется по формуле

$$\Delta h_j = \frac{f(h_j)}{f'(h_j)},$$

где  $\Delta h_j$  - невязка по депрессии в  $j$  – м узле;  $j$  – номер узла.

Процесс повторяется. Расчет прекращается, когда значения невязок расходов в узлах становятся меньше заданной точности.

Метод позволяет проводить одновременный расчет вакуумных газопроводных и вентиляционных сетей с учетом их взаимовлияния.

#### **Выводы:**

- величина проходного сечения дегазационного трубопровода в месте локализации жидкой фазы обратно пропорциональна объему этого скопления, зависит от рельефа трубопровода и его диаметра;

- при образовании скоплений влаги на участках дегазационного трубопровода возникают колебания абсолютного давления, интенсивность которых обратно пропорциональна площади проходного сечения. При этом уменьшение указанной площади на 50% и более сопровождается скачкообразным снижением потерь давления и аэродинамического сопротивления;

- при расчете совместно работающих шахтных вентиляционных и дегазационных сетей целесообразно использовать метод межузловой депрессии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков, Л.А. Влияние дисперсной фазы на гидравлическое сопротивление участков дегазационных трубопроводов / Л.А. Новиков // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / Ин-т геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины. – Днепропетровск, 2014. – Вып. 114. – С. 154-161.
2. 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.
3. Лабунцов, Д.А. Механика двухфазных систем: Учебное пособие для вузов / Д.А. Лабунцов, В.В. Ягов. – М.: МЭИ, 2000. – 374 с.
4. Малашкина, В.А. Дегазационные установки: Учебное пособие / В.А. Малашкина. – М.: МГГУ, 2007. – 189 с.
5. Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И.Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
6. Мамаев, В.А. Гидродинамика газо-жидкостных смесей в трубах / В.А. Мамаев, Г.Э. Одишария, Н.И. Семенов, А.А. Точигин. – М.: Недра, 1969. – 203 с.
7. Марон, В.И. Гидравлика двухфазных потоков в трубопроводах: Учебное пособие / В.И. Марон. – СПб.: Лань, 2012. – 256 с.
8. Морев А.М. Дегазация сближенных пластов / А.М. Морев, И.И. Евсеев. – М.: Недра, 1975. – 168с.

#### REFERENCES

1. Novikov, L.A. (2014), "Impact of disperse phase on hydraulic resistance of district degassing pipelines", *Geo-Technical Mechanics*, no. 114, pp. 154-161.
2. Novikov, L.A. (2011), "Determination of the losses pressure on polluted area of vacuum degassing pipeline", *Geo-Technical Mechanics*, no. 92, pp. 258-263.
3. Labuntsov, D.A. and Yagov, V.V. (2000), *Mehanika dvuhfaznyih system* [Mechanics of two-phase systems], MEI, Moscow, Russia.

4. Malashkina, V.A. (2007), *Degazatsionnyie ustanovki: Uchebnoe posobie* [Decontamination equipment: Textbook], MMSU, Moscow, Russia.
5. Idelchik, I.E. (1992), *Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam* [Handbook of hydraulic resistance], Mashinostroenie, Moscow, Russia.
6. Mamaev, V.A., Odishariya, G.E., Semenov, N.I. and Tochigin, A.A. (1969), *Gidrodinamika gazo-zhidkostnyih smesey v trubah* [Hydrodynamics of gas-liquid mixtures in pipes], Nedra, Moscow, SU.
7. Maron, V.I. (2012), *Gidravlika dvuhfaznyih potokov v truboprovodah: Uchebnoe posobie* [Hydraulics of two-phase flows in pipes: Textbook], Lan, St.- Petersburg, Russia.
8. Morev, A.M. and Evseev I.I. (1975), *Degazatsiya sblizhennikh plastov* [Degassing of the drawn together layers], Nedra, Moscow, SU.

---

#### Об авторе

**Новиков Леонид Андреевич**, младший научный сотрудник в отделе проблем разработки месторождений на больших глубинах, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепрпетровск, Украина, Inov71@yandex.ru

#### About the author

**Novikov Leonid Andreevich**, Master of Science, Junior Researcher in Department of Mineral Mining at Great Depths, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, Inov71@yandex.ru

---

**Анотація.** Розглянуто закономірності зміни втрат тиску газоповітряної суміші на сполученнях ділянок вакуумної газопровідної мережі при утворенні скупчень вологи з різним ступенем перекриття прохідного перетину дегазаційного трубопроводу. Представлено закономірності, що зв'язують товщину та довжину скупчень краплинної рідини з їхнім обсягом на сполученні ділянок, що дозволяє визначати величину втрат тиску з урахуванням розподілу фаз у перетині трубопроводу. Розглянуто основні методи розрахунків шахтних вентиляційних і дегазаційних мереж.

**Ключеві слова:** коефіцієнти гідравлічного тертя, коефіцієнти місцевих гідравлічних опорів, втрати тиску, скупчення вологи, дегазаційний трубопровід, метано-повітряна суміш.

**Abstract.** Regular changing of pressure drop in gas-air mixture is considered in conjugate sections of the vacuum gas pipeline network at moisture collections and at different degrees of flow section overlapping in the gas drainage pipeline. Conformities to the law, linking a thickness and extent of accumulations of tiny liquid with their volume on the interface of areas, are represented, allowing to determine the size of losses of pressure taking into account distributing of phases in the section of pipeline. The basic methods of calculation of mine ventilation and decontamination networks are considered.

**Keywords:** coefficient of hydraulic friction, coefficient of local hydraulic resistance, pressure drop, moisture collection, degassing pipeline, methane-air mixture.

*Статья поступила в редакцию 16.01.2015*

*Рекомендовано к публикации д-ром техн. наук Т.В. Бунько*