

УДК 622.457.2:620.165.29

Губенко Д.И., магистр, начальник СНДЛ-110
(ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля»)

**ЗАКОНОМЕРНОСТИ ТРАНСПОРТИРОВАНИЯ
СЖАТОГО ВОЗДУХА ШАХТНЫМ ПОТРЕБИТЕЛЯМ
ПО НЕГЕРМЕТИЧНОМУ ТРУБОПРОВОДУ**

Губенко Д.І., магістр, начальник СНДЛ-110
(ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля»)

**ЗАКОНОМІРНОСТІ ТРАНСПОРТУВАННЯ
СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ШАХТНИМ СПОЖИВАЧАМ
ПО НЕГЕРМЕТИЧНОМУ ТРУБОПРОВОДУ**

Gubenko D.I., M.S. (Tech), head SRL-110
(SE "Design Office "Yuzhnoye" by M.K. Yangel")

**MECHANISM OF COMPRESSED AIR TRANSPORTION THROUGH
THE LEAKY PIPELINE TO THE MINE CONSUMERS**

Аннотация. Решена актуальная проблема разработки методов расчета оценки влияния степени герметичности элементов шахтных пневматических сетей на энергетическую эффективность их работы. Установлены закономерности движения воздушного потока на участке трубопровода шахтной пневматической сети с местной негерметичностью. Впервые получено уравнение сохранения энергии для движения газового потока по участку трубопровода с местной негерметичностью, которое характеризует связь между параметрами газа, его начальными и конечными значениями, характеристиками трубопровода и массовой величиной утечки газа. Определена зависимость энергоэффективности шахтной пневматической сети от ее суммарной негерметичности, давления сжатого воздуха на входе в сеть и на выходе из нее, характеристиками отдельных участков этой сети и времени оценки энергоэффективности. Полученные результаты могут быть применены для минимизации потерь сжатого воздуха при его транспортировании шахтным потребителям и повышения эффективности их работы.

Ключевые слова: шахтная пневматическая сеть, негерметичность, утечка, сжатый воздух, энергия, энергоэффективность.

На предприятиях горнодобывающей отрасли транспортирование сжатого воздуха от компрессорной станции до пневмоприемников осуществляется по длинным и разветвленным трубопроводам, что вызывает значительные энергетические потери. Эти потери связаны с гидравлическими сопротивлениями, температурными изменениями, колебаниями давления в сетях и, прежде всего, за счет утечек сжатого воздуха. Кроме этого, состояние шахтных пневмосистем на действующих горнодобывающих предприятиях вызывает необходимость осуществления конкретных мер, направленных на сокращение прямых энергозатрат и снижение материально-технических ресурсов при использовании сжатого воздуха [1 – 3].

Вопросы определения утечек воздуха наиболее полно изучены для механизма проветривания горных выработок. Среди многообразия работ в этом направлении следует отметить работы [4, 5]. В отечественной и зарубежной практике накоплен большой опыт по исследованию низконапорного (вентиляторного) способа транспортирования воздуха по шахтным пневматическим сетям. Однако, проблемы высоконапорного (компрессорного) способа подачи воздуха потребителям исследованы недостаточно [1, 2]. Кроме этого, утечки при движении по шахтным пневматическим сетям сжатого воздуха имеют многофакторную зависимость от различных технологических и конструктивных параметров его транспортирования. В связи с этим, расчет утечек сжатого воздуха при его транспортировании шахтным потребителям в большинстве случаев выполняется на базе экспериментальных исследований с использованием различных эмпирических формул.

Целью данной работы является получение зависимостей для оценки влияния степени герметичности элементов шахтных пневматических сетей на энергетическую эффективность их работы при транспортировании сжатого воздуха потребителям.

При построении математических моделей движения газа по трубопроводу однозначного подхода к рассмотрению термодинамических характеристик этого процесса не существует. В работе Филиппова И.В. [Филиппов И.В. Математическое моделирование пневматических сетей / Филиппов И.В. // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 1998. №1. – С. 106 – 111] отмечено, что данный процесс может рассматриваться как изотермический, политропный или адиабатный.

Движение реального газа, являющегося сжимаемой средой, по трубопроводу в общем случае характеризуется тем, что [6-10]:

- происходит значительное падение давления по длине за счет необходимости преодоления гидравлических сопротивлений и, при наличии негерметичности, за счет утечки;
- величина плотности, которая является функцией давления, монотонно убывает от начального участка к конечному;
- линейная скорость течения газа от начального участка к конечному монотонно возрастает.

Для герметичного трубопровода изотермическое движение газа, подчиняющееся закону Бойля-Мариотта, описывается в общем случае системой трех уравнений [6-10]:

- закона сохранения энергии (уравнением Бернулли);
- уравнением состояния;
- закона сохранения массы.

Негерметичный трубопровод можно рассматривать как открытую термодинамическую систему с протоком идеального газа при политропном процессе с переменными параметрами на входе и выходе в эту систему. В этом случае одномерное нестационарное движение газа в горизонтальном трубопроводе с теплообменом с окружающей средой описывается, как показано в вышеназванной

работе Филиппова И.В., системой дифференциальных уравнений: неразрывности; сохранения энергии; сохранения импульса; состояния; внутренней энергии.

Однако, практическое решение подобного рода системы уравнений без целого комплекса допущений, которые существенно снижают объективность и достоверность этих моделей, весьма затруднено.

Кроме этого, в негерметичном трубопроводе с равномерно распределенной утечкой величина давления движущегося сжатого воздуха может определяться системой дифференциальных уравнений, состоящей из уравнения Дарси-Вайсбаха для элементарного участка трубопровода и уравнения неразрывности потока [Мурзин В.А. Расчёт пневматических сетей шахт / В.А. Мурзин, Ю.А. Цейтлин. – М.: Недра, 1971. – 104 с.]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dP_n}{dx} + \frac{Q^2}{P_n + P_a} + \frac{2\rho_a \lambda R T_c}{S_{mp}} &= 0; \\ \frac{dQ}{dx} - aP_n^b &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где P_n – начальное статическое давление сжатого воздуха, Па; x – осевая координата, м; Q – объемный расход воздуха, приведенный к условиям окружающей среды, м³/с; P_a – барометрическое давление окружающей среды, Па; ρ_a – плотность атмосферного воздуха, кг/м³; λ – коэффициент гидравлических сопротивлений (коэффициент Дарси); R – универсальная газовая постоянная воздуха, Дж/(кг·К); T_c – средняя температура воздуха на рассматриваемом участке, К; S_{mp} – площадь проходного сечения трубопровода, м²; a – коэффициент утечек; b – показатель степени, изменяющейся от 1 до 1,3.

Во втором уравнении системы (1) выражение aP_n^b представляет собой удельную утечку воздуха, приходящуюся на единицу длины трубопровода. Входящий в это выражение коэффициент утечек " a " зависит от состояния трубопровода. Такой подход к описанию физики процесса движения сжатого воздуха по шахтному трубопроводу вызывает целый ряд вопросов, а именно:

1) равномерное распределение утечки в шахтном трубопроводе на практике труднодостижимо;

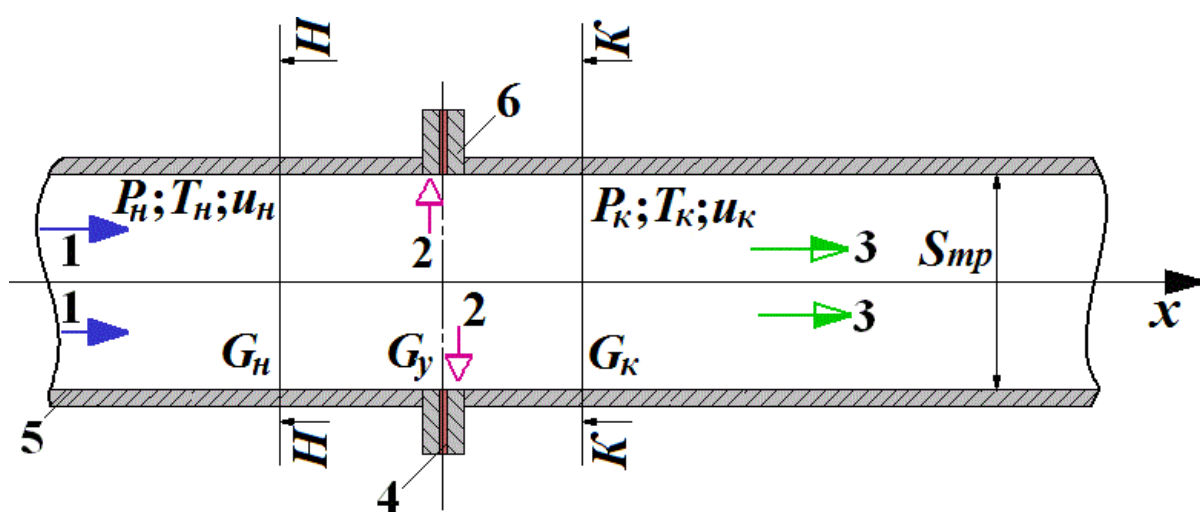
2) коэффициент утечки не имеет однозначного физического смысла [ГОСТ 26790-85. Техника течеискания. Термины и определения [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://vseghost.com/Catalog/20/20042.shtml>. – Загл. с экрана], а оценить его зависимость от состояния шахтного трубопровода на практике труднодостижимо;

3) рекомендации по выбору величины показателя степени b затруднительны в практическом применении.

Следовательно, вопрос разработки достаточно точной и апробированной математической модели процесса перемещения сжатого воздуха по шахтному

трубопроводу, имеющему местную (локальную) негерметичность по-прежнему остается актуальным. Местной или локальной негерметичностью могут быть неплотности фланцевых соединений, особенно, участков трубопроводов подачи сжатого воздуха шахтным потребителям.

Для исследования физики процесса транспортирования сжатого воздуха шахтным потребителям по негерметичному трубопроводу рассмотрим в неподвижной системе координат плоскую задачу об энергетическом балансе движения воздушного потока по цилиндрическому трубопроводу с утечкой воздуха через неплотности во фланцевом соединении секций трубопровода. Выберем некоторый участок движения сжатого воздуха между двумя нормальными (см. рисунок 1) к цилиндрической поверхности воздушного потока сечениями $H-H$ и $K-K$, в котором находится фланцевое соединение с нарушенной герметичностью прокладки.



- 1 – воздушный поток в исходном состоянии; 2 – утечка сжатого воздуха;
3 – воздушный поток после прохождения негерметичного участка;
4 – прокладка; 5 – транспортный трубопровод; 6 – фланцевое соединение

Рисунок 1 – Схема движения воздуха через негерметичный участок секций шахтного трубопровода

Образующая боковой поверхности выделенного участка воздушного потока (см. рис. 1) параллельна оси x , а скорость потока направлена в сторону положительного направления этой оси. Проекции на ось x сил давления, приложенных к боковой поверхности потока, равны нулю.

В общем случае уравнение сохранения энергии (энергетического баланса) для потока газа согласно первому началу термодинамики (закону сохранения энергии) в дифференциальной форме имеет вид [11 – 13]:

$$dE_m + dE_\delta = dE_{\text{м}} + dE_{\text{мп}} + dE_\kappa + dE_n + dE_\epsilon, \quad (2)$$

где dE_m – изменение подводимой тепловой энергии, Дж; dE_δ – изменение энер-

гии сил давления, под действием которых происходит перемещение потока газа между сечениями $H-H$ и $K-K$, а также выталкивание воздуха в месте нарушения герметичности, Дж; dE_m и dE_{mp} – соответственно изменения энергии, затраченной на выполнение механической работы и преодоление сил трения, Дж; dE_k , dE_n и dE_e – соответственно изменения кинетической, потенциальной и внутренней энергии потока газа, Дж.

Уравнение (2), составленное на основании первого закона термодинамики, показывает, что подводимая к потоку газа тепловая энергия и работа сил давления расходуется на совершение механической работы, работы сил трения и изменение запасов кинетической, потенциальной и внутренней энергии.

Приток тепла в общем случае осуществляется двумя способами: извне – за счет теплообмена при наличии разности температур и изнутри – за счет преобразования в тепло работы сил трения. Пренебрегая различиями температур транспортируемого сжатого воздуха с температурой окружающей среды (теплообмен отсутствует), можно считать, что при небольших скоростях движения воздушного потока $dE_m = dE_{mp}$. Кроме этого, так как на рассматриваемом участке поток воздуха не совершает никакой механической работы, то $dE_m = 0$. С учетом этого, подставляя выражения для сил давления, кинетической, потенциальной и внутренней энергии [12, 13], уравнение (2) для промежутка времени $d\tau$, в течении которого поток воздуха проходит рассматриваемый участок, примет вид:

$$\begin{aligned} [P_n u_n - P_k u_k + (P_n - P_k) u_n] S_{mp} d\tau = \frac{\rho_k u_k^3 - \rho_n u_n^3}{2} S_{mp} d\tau + (\rho_k u_k z_k - \rho_n u_n z_n) g S_{mp} d\tau + \\ + \frac{1}{A} (\rho_k u_k c_{vk} T_k - \rho_n u_n c_{vn} T_n) g S_{mp} d\tau \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} [P_n u_n - P_k u_k + (P_n - P_k) u_n] S_{mp} = \frac{\rho_k u_k^3 - \rho_n u_n^3}{2} S_{mp} + (\rho_k u_k z_k - \rho_n u_n z_n) g S_{mp} + \\ + \frac{1}{A} (\rho_k u_k c_{vk} T_k - \rho_n u_n c_{vn} T_n) g S_{mp}, \end{aligned} \quad (3)$$

где P_n и P_k – статические давление соответственно в начале (сечение $H-H$) и в конце (сечение $K-K$) рассматриваемого участка (см. рис. 1), Па; u_n и u_k – осредненные по площади скорости потока воздуха соответственно в начале (сечение $H-H$) и в конце (сечение $K-K$) рассматриваемого участка, м/с; ρ_n и ρ_k – осредненные по площади плотности воздуха соответственно в начале (сечение $H-H$) и в конце (сечение $K-K$) рассматриваемого участка, кг/м³; z_k и z_n – нивелирные уровни рассматриваемых сечений, м; g – ускорение силы тяжести, м/с²; A – тепловой эквивалент механической работы; c_{vk} и c_{vn} – средние массовые теплоемкости воздуха при постоянном объеме в соответствующих сечениях, Дж/(кг·К); T_k и T_n – осредненные по площади температуры воздуха в соответ-

ствующих сечениях, К.

Для рассматриваемых сечений, воспользовавшись уравнением неразрывности [12, 13], выражения для массовых расходов будут иметь вид

$$G_H = \rho_H u_H S_{mp}; \quad (4)$$

$$G_K = \rho_K u_K S_{mp}; \quad (5)$$

где G_H и G_K – массовые расходы воздуха в соответствующих сечениях, кг/с.

Принимаем в рассматриваемых сечениях $H-H$ и $K-K$ равенство теплоемкостей $c_{vK} = c_{vH} = c_v$ и температур $T_K = T_H = T$, а также учитываем, что при наличии негерметичности

$$G_H = G_K + G_y, \quad (6)$$

где G_y – утечка воздуха через фланцевое соединение.

Учитывая вышесказанное, правую часть уравнения (3) при помощи равенств (4) – (5) перепишем в виде:

$$\begin{aligned} \frac{\rho_K u_K^3 - \rho_H u_H^3}{2} S_{mp} + (\rho_K u_K z_K - \rho_H u_H z_H) g S_{mp} + \frac{1}{A} (\rho_K u_K c_{vK} T_K - \rho_H u_H c_{vH} T_H) g S_{mp} = \\ = \frac{1}{2} [G_H (u_K^2 - u_H^2) + G_y u_K^2] + G_y z g + \frac{1}{A} G_y c_v T g. \end{aligned} \quad (7)$$

Кроме этого для рассматриваемых сечений уравнение состояния идеального газа будет иметь вид [12, 13]:

$$P_H = \rho_H R T_H = \rho_H R T; \quad (8)$$

$$P_K = \rho_K R T_K = \rho_K R T. \quad (9)$$

Воспользовавшись равенствами (8) и (9) левую часть уравнения (3) при помощи равенств (4) и (5) перепишем в виде

$$[P_H u_H - P_K u_K + (P_H - P_K) u_H] S_{mp} = G_y R T + \frac{P_H - P_K}{\rho_H} G_H. \quad (10)$$

Учитывая равенства (7) – (10) формула (3) будет иметь вид:

$$G_y R T + (P_H - P_K) u_H S_{mp} = \frac{1}{2} [G_H (u_K^2 - u_H^2) + G_y u_K^2] + G_y z g + \frac{1}{A} G_y c_v T g. \quad (11)$$

Уравнение (11) представляет собой уравнение сохранения энергии для движения газового (воздушного) потока по трубопроводу с местной (локальной) негерметичностью. При отсутствии утечек газа ($G_y = 0$) данное уравнение принимает вид общеизвестного в газовой динамике уравнения Бернулли для идеальной несжимаемой жидкости [13]:

$$\frac{P_n - P_k}{\rho_n} = \frac{u_k^2 - u_n^2}{2}.$$

Воспользовавшись соотношением для массового расхода (4) и уравнением состояния (8), уравнение (11) преобразуем к виду:

$$G_n \left(u_k^2 - u_n^2 + \frac{P_n - P_k}{P_n} RT \right) = G_y \left\{ 2 \left[RT - g \left(z + \frac{c_v T}{A} \right) \right] - u_k^2 \right\}. \quad (12)$$

Обозначим удельный расход массовой утечки сжатого воздуха, равный отношению массового расхода утечки к начальному массовому расходу воздуха в начальном сечении рассматриваемого участка трубопровода

$$q = \frac{G_y}{G_n}, \quad (13)$$

а отношение давлений в рассматриваемых сечениях через

$$\theta = \frac{P_k}{P_n}. \quad (14)$$

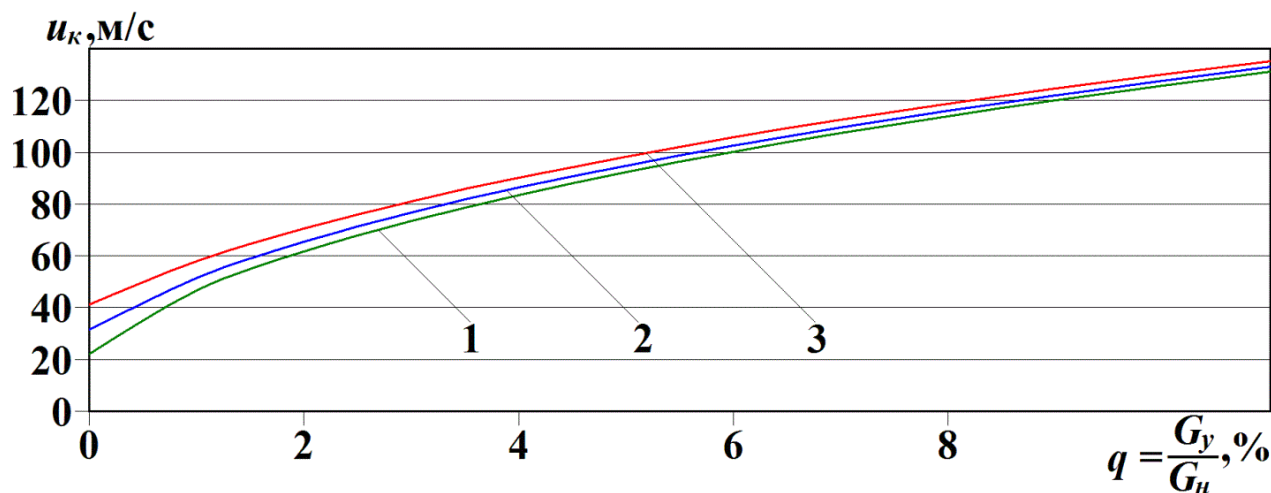
С учетом принятых обозначений (13) и (14) равенство (12) примет вид:

$$u_k^2 - u_n^2 - (1 - \theta) RT = q \left\{ 2 \left[RT - g \left(z + \frac{c_v T}{A} \right) \right] - u_k^2 \right\}. \quad (15)$$

Полученное равенство (15) применим для анализа влияния массовой утечки сжатого воздуха при его транспортировании по шахтному трубопроводу с локальной негерметичностью на величины изменения скорости и давления воздушного потока. В качестве исходных данных выберем следующие значения: $R = 287$ Дж/(кг·К); $T = 313$ К; $c_v = 720$ Дж/(кг·К); $g = 9,81$ м/с²; $z = 1$ м; $A = 427$.

На рисунке 2 представлены зависимости скоростей транспортирования по негерметичному шахтному трубопроводу сжатого воздуха, построенные для выбранных начальных параметров и значений $u_n = (20; 30; 40)$ м/с, а также по-

терь давления на преодоление гидравлического сопротивления $\theta = 0,999$, что соответствует падению давления 0,1 %.



1, 2, 3 – конечные значения скорости воздуха u_k для соответствующих значений начальных скоростей $u_n = (20; 30; 40)$ м/с

Рисунок 2 – Зависимость скорости движения воздуха по шахтному трубопроводу от величины удельной массовой утечки при отношении давлений $\theta=0,999$ или 0,1 %

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2, показывает, что зависимость скорости движения воздуха по негерметичному шахтному трубопроводу от величины удельной массовой утечки носит вид полинома четвертой степени с коэффициентами, зависящими от:

- начальных параметров его движения;
- режима транспортирования, характеризующегося величиной потерь давления.

При этом:

- наиболее существенное влияние на численное значение скорости движения воздуха после прохождения негерметичного участка оказывает величина падения давления;

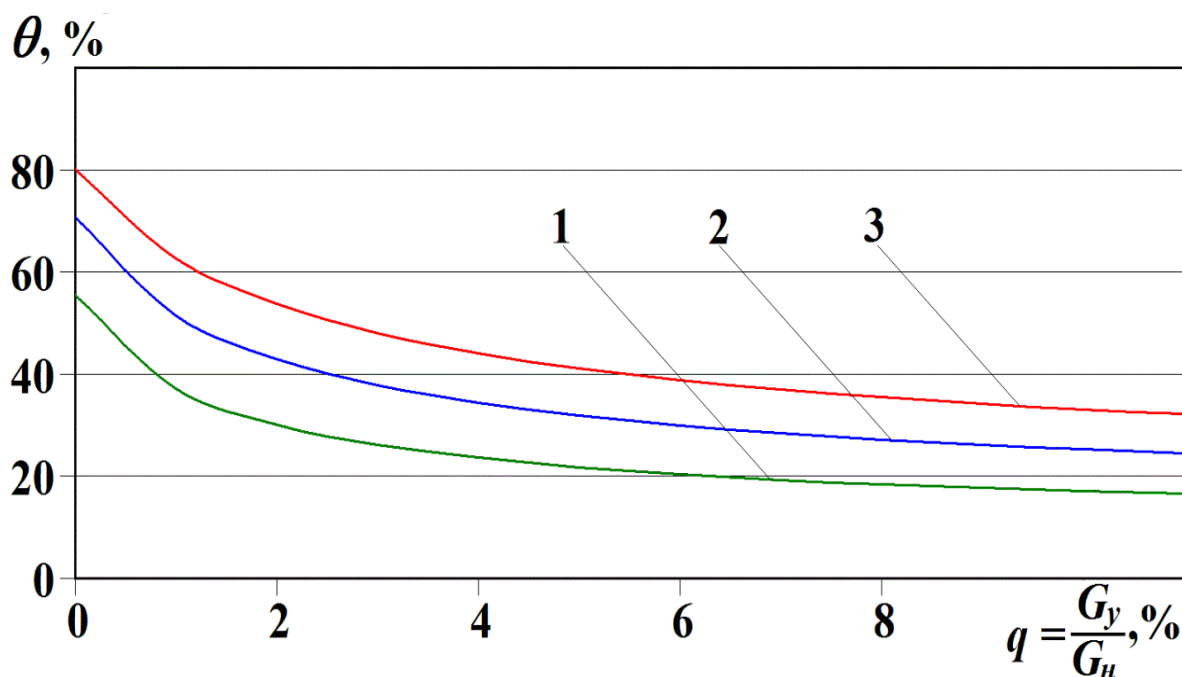
– чем больше величина утечки, тем меньше различия в скоростях движения воздуха после негерметичного участка для различных начальных условий его движения, а их численные значения значительно увеличиваются по сравнению с герметичными участками.

Рассмотрим элементарный объем сжатого воздуха, расположенный между исследуемыми сечениями (см. рис. 2), в виде некоторого поршня. Этот поршень под действиями сил давления совершает перемещение dx между сечениями $H-H$ и $K-K$. В этом случае эффективность перемещения массы воздушного потока между рассматриваемыми сечениями будет определяться как отношение работ в соответствующих сечениях:

$$\frac{P_K S_{mp} dx}{P_H S_{mp} dx} = \frac{P_K}{P_H} = \theta.$$

Для тех же выбранных начальных параметров на рисунке 3 приведены зависимости эффективности перемещения массы воздуха, определяемой по отношению давлений, от величины удельной массовой утечки. Зависимости построены при помощи уравнения (15) для транспортирования по негерметичному участку шахтного трубопровода сжатого воздуха со значениями начальной скорости $u_n = (20; 30; 40)$ м/с. Как видно из построенных зависимостей, эффективность (отношение давлений) транспортирования воздушного потока по негерметичному участку шахтной пневмосети при росте удельной величины массовой утечки воздуха уменьшается по полиномиальной зависимости четвертого порядка. При этом:

- чем выше скоростной режим движения воздуха, тем больше эффективность движущегося потока воздуха;
- численное значение отношения конечного и начального давлений воздуха пропорционально меняется в зависимости от начальной скорости движения воздушного потока.



1, 2, 3 – значения начальной скорости $u_n = (20; 30; 40)$ м/с

Рисунок 3 – Зависимость отношения давлений воздушного потока на негерметичном участке шахтной пневмосети от величины удельной массовой утечки при соответствующих значениях начальной скорости

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 2 и рис. 3, показывает, что в диапазоне роста удельной массовой утечки от 0 до 4 % происходит более резкое изменение параметров воздушного потока, характеризующего его эффективность его перемещения. Начиная с величины удельной массовой утечки 4 %, наблюдается выполаживание построенных зависимостей. Такой характер изменения эффективности перемещения воздушного потока объясняется тем, что по

мере увеличения потерь воздуха, за счет его утечки, происходят потери как кинетической, так и потенциальной энергии потока в месте локальной негерметичности трубопровода.

Энергоэффективность шахтной пневматической сети, которая характеризуется степенью передачи энергии сжатого воздуха, в общем случае можно оценивать по падению в ней давления сжатого воздуха. Учитывая, что падение давления воздуха в негерметичной пневмосети происходит за счет ее негерметичности $\Delta P_{утечки}$ и на преодоление гидравлических сопротивлений $\Delta P_{сопр}$, энергоэффективность шахтной пневмосети можно оценивать как

$$\eta_{сети} = \frac{P_{вых} - \Delta P_{сопр} - \Delta P_{утечки}}{P_{вх}}. \quad (16)$$

где $\eta_{сети}$ – коэффициент эффективности перемещения массы воздушного потока в пневмосети; $P_{вых}$ и $P_{вх}$ – давление воздуха соответственно на выходе и на входе пневмосети, МПа.

Воспользовавшись приведенными в работах [13 и СНиП 3.05.02-88. Строительные нормы и правила. Газоснабжение [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/2/2014/. – Загл. с экрана] формулами для нахождения утечки газа, осредненных значений перепада давления и диаметра трубопровода, выражение для определения степени негерметичности шахтного трубопровода, состоящего из n секций различного диаметра, можно записать в виде:

$$\Delta P_{утечки} = \frac{\pi \sum_{i=1}^n l_i \left(\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 l_i}{\sum_{i=1}^n d_i l_i} \right)^2}{4\tau} \Delta P_{утечки},$$

где $\Delta P_{утечки}$ – суммарная негерметичность шахтной пневмосети, Вт; l_i ($i=1, \dots, n$) – длина i -ого участка трубопровода, м; d_i ($i=1, \dots, n$) – диаметр i -ого участка трубопровода, м.

С учетом полученного равенства, уравнение (16) будет иметь вид:

$$\eta_{сети} = \frac{P_{вых} - \Delta P_{сопр}}{P_{вх}} - \frac{\Delta P_{утечки}}{P_{вх}} \frac{4\tau}{\pi \sum_{i=1}^n l_i \left(\frac{\sum_{i=1}^n d_i l_i}{\sum_{i=1}^n d_i^2 l_i} \right)^2} = \eta_{теор} - \Delta \eta_{сопр} - \Delta \eta_{утечки}, \quad (17)$$

где $\eta_{теор}$ – теоретическая эффективность пневмосети; $\Delta \eta_{сопр}$ и $\Delta \eta_{утечки}$ – потери эффективности пневмосети соответственно на преодоление гидравлического

сопротивления и за счет утечки, которые равны

$$\eta_{теор} = \frac{P_{вых}}{P_{вх}};$$

$$\Delta\eta_{сопр} = \frac{\Delta P_{сопр}}{P_n};$$

$$\Delta\eta_{утечки} = \frac{\Delta_{утечки}}{P_n} \frac{4\tau}{\pi \sum_{i=1}^n l_i} \left(\frac{\sum_{i=1}^n d_i l_i}{\sum_{i=1}^n d_i^2 l_i} \right)^2.$$

Полученное равенство (17) показывает связь энергоэффективности шахтной пневматической сети с гидравлическими сопротивлениями ($\Delta P_{сопр}$), степенью ее негерметичности ($\Delta_{утечки}$), давлением сжатого воздуха на входе в сеть ($P_{вх}$) и на выходе из нее ($P_{вых}$), характеристиками отдельных участков этой сети (l_i , d_i) и времени оценки энергоэффективности. В этом равенстве " $\Delta_{утечки}$ " представляет собой суммарную негерметичность трубопровода шахтной пневматической сети, суммарный полезный объем которой равен

$$\frac{\pi \sum_{i=1}^n l_i}{4} \left(\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2 l_i}{\sum_{i=1}^n d_i l_i} \right)^2.$$

В качестве примера рассмотрим шахтную пневматическую сеть, характеристика которой приведена в таблице 1.

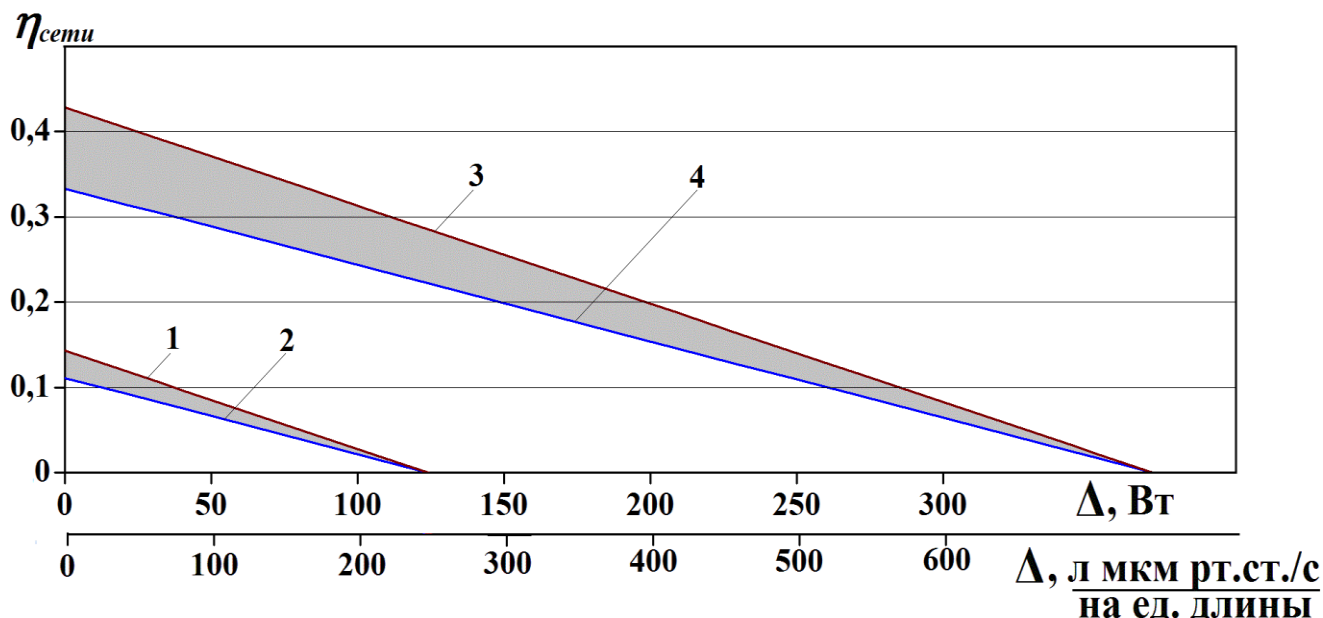
Таблица 1 – Примерная характеристика шахтной пневматической сети

Общая длина, км	Длина участка l_i , м	Внутренний диаметр d_i , м
3,9	400	0,05
	1000	0,1
	1000	0,15
	500	0,2
	500	0,25
	500	0,3

Для выбранной шахтной пневматической сети выполним оценку ее энергоэффективности за время одной рабочей смены (8 часов). В работах [1, 2] пока-

зано, что P_{ex} может варьироваться от 0,7 МПа до 0,9 МПа, а для обеспечения стабильной и бесперебойной работы шахтных потребителей необходимо обеспечить $P_{вплх} = 0,5$ МПа.

На рисунке 4 приведены зависимости коэффициента энергоэффективности шахтной пневматической сети от величины суммарной негерметичности этой системы для рассматриваемых параметров и падения давления на преодоление гидравлических сопротивлений соответственно 0,2 МПа и 0,4 МПа.



1, 2 – соответственно при $\Delta P_{comp} = 0,4$ МПа для значений P_{ex} , равного 0,7 МПа и 0,9 МПа;
3, 4 – соответственно при $\Delta P_{comp} = 0,2$ МПа для значений P_{ex} , равного 0,7 МПа и 0,9 МПа

Рисунок 4 – Зависимость энергоэффективности шахтной пневматической сети от величины ее суммарной негерметичности

Как видно из приведенных на рис. 4 графиков, энергоэффективность шахтной пневматической системы, оцениваемая по давлению транспортируемого сжатого воздуха, ограничена степенью суммарной негерметичности. Минимально допустимая степень суммарной негерметичности шахтной пневмосети, при которой эффективность передачи энергии сжатого воздуха по сети равна нулю, определяется полезным объемом сети и ее общим гидравлическим сопротивлением. Подаваемое в пневмосеть давление оказывает более существенное влияние на энергоэффективность этой сети только при достаточно высокой степени герметичности пневмосети.

Таким образом, результаты изложенных выше исследований сводятся к следующему:

– скорость движения воздуха по негерметичному шахтному трубопроводу полиномиально увеличивается с ростом величины удельной массовой утечки и имеет вид полинома четвертой степени с коэффициентами, зависящими от начальных параметров его движения и от режима транспортирования характе-

ризуючого величиною потерь давления;

– отношение конечного давления воздушного потока к его начальному значению полиномиально убывает с ростом величины удельной массовой утечки и имеет вид полинома четвертой степени с коэффициентами, при этом эффективность перемещения потока воздуха определяется скоростным режимом движения воздуха.

Выводы.

Увеличение удельной массовой утечки в негерметичном трубопроводе шахтной пневматической сети приводит к увеличению скорости и падению давления, а, следовательно, эффективности транспортирования воздушного потока, которые происходят по полиномиальному закону четвертой степени, при этом энергоэффективность шахтной пневматической сети, оцениваемая по потерям давления, ограничена степенью суммарной негерметичности сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Справочник горного инженера угольной шахты с крутым (крутонаклонным) залеганием пластов / [С.С. Гребёнкин, С.В. Янко, В.Н. Павлыш и др.]; под. общ. ред. С.В. Янко и С.С. Гребёнкина. – Донецк: ВИК, 2011. – 420 с.
2. О проблемах пневмоэнергетического комплекса шахт / Грядущий Б.А., Кирик Г.В., Коваль А.Н. [и др.] // Компрессорное и энергетическое машиностроение, №1(11). – 2008. – С. 2 – 5.
3. Миняев Ю.Н. Энергетические потери в пневмосетях рудничных компрессорных установок // Ю.Н. Миняев // Известия УГГГА, серия "Горная электромеханика". – Свердловск, 2003. – Вып. 16, С. 44 – 47.
4. Торопчин О.С. Аналитический метод определения линий утечек воздуха через выработанное пространство / О.С. Торопчин, С.А. Головкин, Н.В. Безкровный // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 69. – С. 277 – 288.
5. Бунько Т.В. Обобщенный алгоритм расчета утечек воздуха через выработанное пространство для различных схем проветривания выемочных участков / Т.В. Бунько, И.Е. Кокоулин, С.А. Головкин // Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2013. – Вип. 108. – С.143 – 151.
6. Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа / Л.Г. Лойцянский. – М.: Дрофа, 2003. – 841 с.
7. Rathakrishnan, E. (2013), Gas dynamics, PHI Learning Pvt. Ltd, Delhi, India.
8. Кузнецов Ю.В. Сжатый воздух / Ю.В. Кузнецов, М.Ю. Кузнецов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2007. – 267 с.
9. Молчанова Р.А. Расчет систем воздухообеспечения. Учебное пособие / Р.А. Молчанова. – Уфа: УГНТУ, 2003. – 60 с.
10. Чухарева Н.В. Расчет простых и сложных газопроводов / Н.В. Чухарева. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 13 с.
11. Koretsky, M.D. (2004), Engineering and chemical thermodynamics, JOHN WILEY & SONS, INC., Hoboken, NJ.
12. Borgnakke, C. and Sonntag, R.E. (2009), Fundamentals of thermodynamics, 7th ed., International student version, Wiley, Hoboken, NJ.
13. Дмитриева В.Ф. Основы физики: Учеб. пособие для студентов вузов. – 2-е изд., испр. и дополн. / В.Ф. Дмитриева, Прокофьев В.Л. – М.: Высшая школа, 2001. – 527 с.
14. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: Учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 243 с.

REFERENCES

1. Grebyenkin, S.S., Yanko, S.V., Pavlysh, V.N., Shirin, L.N., Kerkez, S.D., Ryabichev, V.D., Buzilo, V.I., Topchiy, S.E., Popov, S.O., Smorodin, G.M., Solovyev, G.I., Savchenko, I.V., Dyachkov, P.A., Popovskiy, V.N., Maevskiy, O.V. and Zenzerov, V.I. (2011), *Spravochnik gornogo inzhenera ugolnoy Shakhty s krutym (krutonaklonnym) zaleganiem plastov* [Directory of mining engineer of coal mine with a

steep (high-angle) formation of layers], VIK, Donetsk, Ukraine.

2. Gryaduschiy, B.A., Kirik, G.V., Koval, A.N., Loboda, V.V., Zharkov, P.E. and Lavrenko, A.M. (2008), "On the problems pneumoenergetic complex of mines", *Compressor and power engineering*, № 1 (11), pp. 2 – 5.

3. Minyaev, Yu.N. (2003), "Energy losses in the pipeline miner compressor installations", *News USMU series "Mining electro mechanics"*, no. 16, pp. 44 – 47.

4. Toropchin, O.S, Golovko, N.V. and Bezкровnyu, N.V. (2007), "Analytical method for determining the lines of air leakage through the goaf", *Geo-technical mechanics*, no. 69, pp. 277 – 288.

5. Bunko, T.V., Kokoulin, I.Ye. and Golovko, S.A. (2013), "The generalized algorithm of calculation losses of air through the worked out space for different ventilation plans of mining areas" *Geo-technical mechanics*, no. 108, pp. 143 – 151.

6. Loitsiansky, L.G. (2003), *Mekhanika zhidkosti i gaza* [Fluid Mechanics], Drofa, Moscow, Russia

7. Rathakrishnan, E. (2013), *Gas dynamics*, PHI Learning Pvt. Ltd, Delhi, India.

8. Kuznetsov, Yu.V. (2007), *Szhatyu vosdukh* [Compressed air], Ural Branch of RAI, Yekaterinburg, Russia.

9. Molchanova, P.A. (2003), *Raschet sistem vosdukhosnabzheniya. Uchebnoye posobiye* [The calculation of air supply systems. Textbook], UGNTU, Ufa, Russia

10. Chuhareva, N.V. (2010), *Raschet prostykh i slozhnykh gasoprovodov* [The calculation of simple and difficult of gas pipelines], Publishing house of Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia.

11. Koretsky, M.D. (2004), *Engineering and chemical thermodynamics*, JOHN WILEY & SONS, INC., Hoboken, NJ.

12. Borgnakke, C. Sonntag, R.E. (2009), *Fundamentals of thermodynamics*, 7th ed., International student version, Wiley, Hoboken, NJ.

13. Dmitriyeva, V.F. and Prokofyev V.L. (2001), *Osnovy fiziki: Uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov* [Fundamentals of Physics: Textbook for students], 2nd ed., rev. and supplemented, Graduate School, Moscow, Russia.

14. Kanevskiy, I.N. and Salnikova, E.N. (2007), *Nerazrushayushchiye metody kontrolya. Uchebnoye posobiye* [Non-destructive methods of control. Textbook], Publishing house DVGUTU, Vladivostok, Russia.

Об авторах

Губенко Дмитрий Иванович, магистр, начальник СНИЛ-110, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля» (ГКБ «Южное» им. М.К. Янгеля), Днепропетровск, Украина, di_gubenko@i.ua.

About the authors

Gubenko Dmitry Ivanovich, Master of Science, Head of SRL-110, State Enterprise "Design Office " Yuzhnoye" by M.K. Yangel (SE "Design Office " Yuzhnoye " by M.K. Yangel), Dnepropetrovsk, Ukraine, di_gubenko@i.ua.

Анотація. Вирішено актуальна проблема розробки методів розрахунку оцінки впливу ступеня герметичності елементів шахтних пневматичних мереж на енергетичну ефективність їх роботи. Встановлено закономірності руху повітряного потоку на ділянці трубопроводу шахтної пневматичної мережі з місцевою негерметичністю. Вперше отримано рівняння збереження енергії для руху газового потоку по ділянці трубопроводу з місцевою негерметичністю, яке характеризує зв'язок між параметрами газу, його початковими і кінцевими значеннями, характеристиками трубопроводу та масової величиною витоку газу. Визначено залежність енергоефективності шахтної пневматичної мережі від її сумарної негерметичності, тиску стисненого повітря на вході в мережу та на виході з неї, характеристиками окремих ділянок цієї мережі та часу оцінки енергоефективності. Отримані результати можуть бути застосовані для мінімізації втрат стисненого повітря при його транспортуванні шахтним споживачем і підвищення ефективності їх роботи.

Ключові слова: шахтна пневматична мережа, негерметичність, витік, стиснене повітря, енергія, енергоефективність.

Abstract. The article presents a new method for estimating affect of leaktightness rate in elements of mine pneumatic systems on these systems power efficiency. Physical laws of air flowing via an area with local leakage in the pipeline of a mine pneumatic system were established. It is first time when an energy equation has been established for gas flowing through the area with local leakage in the pipeline. This equation describes dependence between gas parameters, their initial and final values, characteristics of the pipeline and mass value of the gas leakage. It is stated that power efficiency of a mine pneumatic system depends on the system total leaktightness, compressed air pressure at entrance to and exit from the pneumatic system, characteristics of certain sectors of the system and time when the power efficiency is estimated.

The findings can minimize losses of the compressed air during its transportation to the mine consumers and increase the consumers' productivity.

Keywords: mine pneumatic system, leaktightness, leakage, compressed air, energy, power efficiency.

Стаття поступила в редакцію 12.01. 2015

Рекомендовано к публікації д-ром техн. наук В.Г. Шевченко

УДК 624.15.001

Шашенко А.Н., д-р техн. наук, профессор**Шаповал В.Г.**, д-р техн. наук, профессор
(Государственное ВУЗ «НГУ»)**Моркляник Б.В.**, канд. техн. наук, доцент
(НУ «ЛП»)**Шаповал А.В.**, канд. техн. наук, доцент
(ГВУЗ «ПГАСА»)

НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ПОЛУПРОСТРАНСТВА, ВНУТРИ КОТОРОГО НАХОДИТСЯ ТОЧЕЧНЫЙ ИСТОЧНИК ДАВЛЕНИЯ

Шашенко О.М., д-р техн. наук, професор**Шаповал В.Г.**, д-р техн. наук, професор
(Державний ВНЗ «НГУ»)**Моркляник Б.В.**, канд. техн. наук, доцент
(НУ «ЛП»)**Шаповал А.В.**, канд. техн. наук, доцент
(ДВНЗ «ПДАБА»)

НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИЙ СТАН ПІВПРОСТОРУ, ВСЕРЕДИНІ ЯКОГО ЗНАХОДИТЬСЯ ТОЧКОВЕ ДЖЕРЕЛО ТИСКУ

Shashenko A.N., D.Sc. (Tech.), Professor**Shapoval V.G.**, D.Sc. (Tech.), Professor
(State HEI "NMU")**Morklyanik B.V.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(NU «LP»)**Shapoval A.V.**, Ph.D. (Tech.), Associate Professor
(PSACEA)

STRESS-DEFORMED STATE HALF- SPACE WHICH INCLUDES A PRESSURE POINT SOURCE INSIDE

Аннотация. Целью исследования было рассмотрение возможности адекватного определения напряженно-деформированного состояния (НДС) грунтовых оснований при появлении в нем источника давления. Существующий в настоящее время подход основан на использовании фундаментальных решений и принципа суперпозиции. Однако отсутствует решение задачи по определению НДС грунтовых оснований, учитывающее происходящие в них фазовые переходы, например, замерзание поровой жидкости.

В работе представлено точное аналитическое решение фундаментальной задачи о НДС упругого полупространства, внутри которого расположен точечный источник давления.

Полученное фундаментальное решение позволит расширить класс задач по определению НДС грунтовых оснований и массивов горных пород задачами, в которых причиной возникновения напряжений и деформаций являются протекающие в них физические процессы, обусловленные фазовыми переходами. К таким относятся задачи об определении НДС грунтовых оснований и приконтурного массива вокруг горных выработок при морозном пучении грунта, высоконапорном инъецировании, искусственном замораживании грунта, пучении