

Волошин А.И., чл.-кор. НАН Украины,
Пономаренко С.Н., канд. техн. наук
(ИГТМ НАН Украины)
Губенко Д.И., инженер
(ГП «КБ «Южное» им. М.К. Янгеля»)

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ШАХТНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ СЖАТОГО ВОЗДУХА ПО МЕТОДУ ФИКСИРОВАННЫХ ОБЪЕМОВ

Волошин О.І., чл.-кор. НАН України,
Пономаренко С.М., канд. техн. наук
(ІГТМ НАН України)
Губенко Д.І., інженер
(ДП «КБ «Південне» ім. М.К. Янгеля»)

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ШАХТНИХ ТРУБОПРОВІДІВ СТИСНЕНОГО ПОВІТРЯ ПО МЕТОДУ ФІКСОВАНИХ ОБ'ЄМІВ

Voloshin A.I., Cor. Member NASU,
Ponomarenko S.N., Ph. D (Tech)
(IGTM NAS of Ukraine)
Gubenko D.I., M.S. (Tech)

(SE "Design Office "Yuzhnoye" by M.K. Yangel")

LEAKAGE MONITORING OF COMPRESSED AIR MINE PIPE-LINES ACCORDING TO THE FIXED VOLUMES METHOD

Аннотация. В статье предложен новый метод определения степени негерметичности шахтных трубопроводов сжатого воздуха с целью повышения энергосбережения при производстве, транспортировании и потреблении сжатого воздуха шахтным пневматическим оборудованием. Предлагаемая методология фиксированных объемов предусматривает использование двух эталонных емкостей, в одной из которых фиксируются начальные параметры измерений, а в другой – текущие. На основании феноменологического подхода к описанию исследуемых физических процессов построена математическая модель определения степени негерметичности с использованием данного метода. В математической модели использованы основные закономерности молекулярно-кинетической теории газов с учетом взаимосвязи давления, температуры, объема и вида используемого газа. Выполнено математическое описание процессов, происходящих при определении утечки из замкнутого объема с использованием разработанного метода. Показано, что эффективность нового метода обусловлена применением в расчетном алгоритме закона сохранения массы при поэтапном рассмотрении процессов утечки и теплообмена. Применение предложенного метода фиксированных объемов позволит повысить требования по контролю герметичности пневматического оборудования и систем воздухоподачи во время проведения ремонтных и регламентных работ.

Ключевые слова: сжатый воздух, шахтные трубопроводы, степень негерметичности, метод фиксированных объемов, замкнутый объем, избыточное давление.

В настоящее время непроизводственные затраты на обеспечение сжатым воздухом шахтных потребителей составляют достаточно большой объем и проблема их снижения является чрезвычайно актуальной, учитывая рост цен в тарифной цене энергоносителей. Одним из вариантов решения проблемы повышения надежности и безопасности ведения горных работ, а также энергосбережения при производстве, транспортировании и потреблении сжатого воздуха шахтным пневматическим оборудованием является минимизация потерь сжатого воздуха за счет повышения степени герметичности пневматических систем и оборудования. С этой целью на горнодобывающих предприятиях необходимо повышать требования по контролю герметичности пневматического оборудования и систем воздухоподачи во время проведения ремонтных и регламентных работ.

В настоящее время разработаны различного рода способы ремонта и устранения течи шахтных трубопроводов подачи потребителям сжатого воздуха. Однако проблема разработки и промышленного освоения высокоэффективного и высокоточного способа контроля герметичности шахтных трубопроводов сжатого воздуха до настоящего времени в полной мере не решена.

Таким образом, установление закономерностей процесса утечки сжатого воздуха из испытываемой системы, находящейся под избыточным давлением с учетом ее теплообмена с окружающей средой и обоснование параметров способа контроля герметичности шахтных трубопроводов сжатого воздуха по методу фиксированных объемов является актуальной научной задачей, имеющей важное практическое значение для горнодобывающей отрасли.

Выбор способа контроля герметичности должен производиться с учетом специфики контролируемого объекта, а именно: большой протяженности и объемов, перепадов давлений, температур и пр. В связи с этим возникает актуальная необходимость выбора метода контроля герметичности, обеспечивающего высокую точность и достоверность контроля с учетом перечисленных выше особенностей транспортирования сжатого воздуха по трубопроводам.

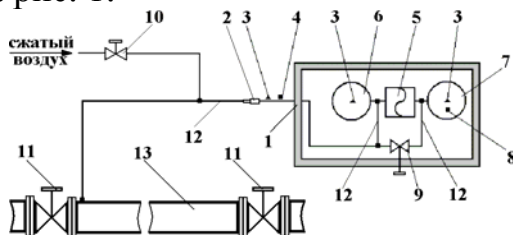
Существующие в настоящее время традиционные методы и способы выполнения контроля герметичности изделий регламентированы различными отраслевыми стандартами. Однако, отсутствие единой методологии определения степени негерметичности различных изделий, в том числе и шахтных трубопроводов, согласованной и утвержденной соответствующими государственными органами и выпущенной в виде нормативной документации существенно обостряет проблему, связанную с герметичностью изделий.

Наиболее распространенным и широко применяемым на практике способом определения степени негерметичности изделий, находящихся под избыточным давлением, является манометрический метод, основанный на определении величины спада давления газов в этих изделиях за единицу времени, зачастую именуемый методом «спада давления». Однако, чувствительность данного метода ограничена допустимой негерметичностью проверяемого изделия 1 л мкм рт.ст./с и существенно зависит от влияния изменений температуры окружающей среды и атмосферного давления.

Устранить основные недостатки, присущие изложенному манометрическому способу определения степени негерметичности изделий, и определить фактическую величину микро утечки в дегазационном трубопроводе позволяет разработанный в ИГТМ НАН Украины способ контроля герметичности полых изделий по методу фиксированных объемов [1]. В этом методе процесс измерений выполняется в закрытом объеме термостата с размещением в нем двух емкостей (компенсационной и эталонной) одинакового объема и устройства для измерения перепада давления. Величина фактической негерметичности изделия определяется по величине изменения массы газа в компенсационной емкости с учетом реального изменения давления и температуры газа в испытуемом изделии.

Данный метод базируется на использовании основных соотношений молекулярно-кинетической теории газов, математический аппарат которой учитывает взаимосвязь давления, температуры, объема, вида используемого газа и характеристик применяемого контрольно-измерительного оборудования.

Функциональная схема определения степени негерметичности замкнутых объемов, находящихся под избыточным давлением, по методу фиксированных объемов представлена на рис. 1.



1 – термостат; 2 – входной штуцер; 3 – датчики температуры; 4 – датчик барометрического давления; 5 – устройство для измерения перепада давления; 6, 7 – компенсационная и эталонная емкости; 8 – датчик абсолютного давления газа в эталонной емкости; 9, 10, 11 – запорная аппаратура; 12 – соединительная пневмомагистраль; 13 – испытуемый трубопровод

Рисунок 1 - Функциональная схема компоновки оборудования для определения герметичности по методу фиксированных объемов

В соответствии со схемой, приведенной на рис. 1, контролируемый участок трубопровода 13, представляющий собой замкнутый объем $V_{из}$, соединяют через входной штуцер 2 при помощи пневмомагистралей 12 и вентиля 9 с находящимися в термостате 1 компенсационной 6 и эталонной 7 емкостями и установленным между ними устройством для измерения перепада давления 5. В эталонной емкости фиксируются начальные значения основных параметров газа, а в компенсационной – текущие, обусловленные изменениями параметров газа в изделии за контролируемый период времени, при этом термостат поддерживает положительный баланс температуры с окружающей средой. Технология определения степени негерметичности состоит в следующем:

1) заполняется вся технологическая схема рабочим газом (сжатым воздухом) до заданного рабочего давления;

2) производится временная выдержка и выравнивается во всей системе рабочее давление;

3) система отсекается вентилем 10 от источника рабочего газа (на чертеже не показан);

4) производится временная выдержка и стабилизируется температура газа в компенсационной и эталонной емкости до заданных величин;

5) отсекается вентилем 5 эталонная емкость от испытуемого объекта, а компенсационная емкость остается соединенной с объектом, при этом обе емкости остаются соединенными между собой через устройство измерения перепада давления;

6) в реальном масштабе времени измеряют:

– датчиком 8 абсолютное давление газа в эталонной емкости, датчиками 3 температуру газа в геометрических центрах компенсационной и эталонной емкости, а также температуру окружающей среды на входе в термостат;

– датчиком 4 атмосферное давление и датчиком 5 перепад давления между компенсационной и эталонной емкостями;

7) по специально разработанному расчетному алгоритму определяется фактическая величина негерметичности.

Размещение компенсационной 6, эталонной 7 емкости и устройства для измерения перепада давления 1 в термостате 1 (см. рис. 1) позволяет выровнять в них температурные поля и снять температурные возмущения, получаемые от испытуемого объекта 13. За счет этого в компенсационную емкость от объекта испытаний будут поступать только возмущения, связанные с перепадом давления газа в этом объекте. При этом изменения параметров газа во всей системе обусловлены двумя факторами, а именно:

– негерметичностью объекта испытаний;

– изменениями параметров окружающей среды.

Все изменения газодинамических параметров происходят в соответствии с законами сохранения массы и энергии и описываются уравнениями газового состояния Клапейрона-Менделеева.

Концептуальный подход в применении метода фиксированных объемов состоит в том, что при отсутствии каких-либо утечек из системы изменение массы газа в компенсационной емкости не происходит. Этот вывод следует из рассмотрения уравнения газового состояния для компенсационной емкости в начале и конце испытаний, когда данный объем газа находится в состоянии равновесия:

$$P_{k,n} V_k = m_{k,n} R T_{k,n}; \quad (1)$$

$$(P_{k,n} + \Delta P_k) V_k = (m_{k,n} + \Delta m_k) R (T_{k,n} + \Delta T_k), \quad (2)$$

где $P_{k,n}$ – рабочее давление в начале испытаний (давление наддува), Па; V_k – объем компенсационной емкости, м³; $m_{k,n}$ и $T_{k,n}$ – соответственно масса, кг и температура газа, К в компенсационной емкости в начале испытаний; R – универсальная газовая постоянная, Дж/(кг·град); ΔP_k – измеряемое перепад давления газа между компенсационной и эталонной емкостями, Па; Δm_k , ΔT_k – изменение соответственно массы, кг и температуры, К газа в компенсационной

емкости в процессе испытаний.

Для анализа распределения параметров газа в общем случае изменения всех параметров берем со знаком « + » и принимаем следующие допущения:

- рассматриваем только квазистатические процессы;
- время релаксации намного меньше промежутков времени, для которых записывают соответствующие уравнения газового состояния;
- время, в течение которого происходит изменение давления газа в объекте контроля за счет его негерметичности и теплообмена с внешней средой, намного больше времени релаксации;
- давление газа, а, следовательно, и перепад давления во всех точках в соответствии с законом Паскаля одинаково;
- температура и плотность газа в различных точках контролируемого объема изделия могут иметь различные значения, но находятся в обратно пропорциональной зависимости;
- температуру газа, находящегося в пневмомагистрале 12 после входного штуцера 2 на входе в термостат 1 (см. рис. 1) считаем равной температуре окружающей среды, измеряемой датчиком 3;
- степень негерметичности пневмомагистралей, запорной арматуры, компенсационной, эталонной емкостей и применяемой измерительной аппаратуры намного меньше измеряемой утечки.

Из совместного рассмотрения уравнений (1) и (2) следует:

$$\frac{P_{k,n} + \Delta P_k}{P_{k,n}} = \frac{m_{k,n} + \Delta m_k}{m_{k,n}} \frac{T_{k,n} + \Delta T_k}{T_{k,n}} \quad (3)$$

или

$$1 + \frac{\Delta P_k}{P_{k,n}} = \left(1 + \frac{\Delta m_k}{m_{k,n}}\right) \left(1 + \frac{\Delta T_k}{T_{k,n}}\right);$$

$$1 + \frac{\Delta P_k}{P_{k,n}} = 1 + \frac{\Delta T_k}{T_{k,n}} + \frac{\Delta m_k}{m_{k,n}} \left(1 + \frac{\Delta T_k}{T_{k,n}}\right). \quad (4)$$

Преобразовав уравнение (4), получим:

$$\frac{\Delta m_k}{m_{k,n}} \left(1 + \frac{\Delta T_k}{T_{k,n}}\right) = \frac{\Delta P_k}{P_k} - \frac{\Delta T_k}{T_{k,n}}. \quad (5)$$

Из последнего равенства очевидно, что $\Delta m_k = 0$ при условии $\frac{\Delta P_k}{P_{k,n}} = \frac{\Delta T_k}{T_{k,n}}$ или

$\frac{\Delta P_k}{\Delta T_k} = \frac{P_{k,n}}{T_{k,n}}$. Таким образом, если в рассматриваемом замкнутом объеме нет

утечки ($\Delta m_k = 0$), а есть только изменение температуры за счет теплообмена с внешней средой, то обусловленное этим температурным фактором изменение ΔP_k линейно связано с изменением ΔT_k в компенсационной емкости.

Следовательно, если за все время испытаний, необходимое для определения степени негерметичности объекта испытаний с требуемой точностью, имеет место соотношение $\frac{\Delta P_k}{\Delta T_k} = \frac{P_{k,n}}{T_{k,n}} = const$, то с точностью до погрешности измерения можно говорить о допустимой степени герметичности испытуемого объема.

Поскольку компенсационная, эталонная емкости и устройство измерения перепада давления расположены в термостате, поддерживающем положительный баланс температуры с окружающей средой, то их теплообменом с окружающей средой можно пренебречь. Кроме того, в рассматриваемых процессах можно пренебрегать силами трения, следовательно, перераспределение параметров газа в компенсационной емкости происходит по адиабатному закону с коэффициентом адиабаты k :

$$\frac{P_{k,n} + \Delta P_k}{P_{k,n}} = \left(\frac{m_{k,n} + \Delta m_k}{m_{k,n}} \right)^k. \quad (6)$$

С другой стороны, перераспределение параметров газа в объекте испытаний, учитывая реальные условия их проведения, будет происходить по политропному закону с показателем политропы n :

$$\frac{P_{k,n} + \Delta P_k}{P_k} = \left(\frac{m_u + \Delta m_u}{m_u} \right)^n, \quad (7)$$

где m_u и Δm_u – масса газа в объекте контроля в начале испытаний и ее изменение в процессе испытаний, кг.

Показатель политропы n , входящий в уравнение (7), определяют по формуле:

$$n = \left[\lg \frac{P_{a,i}}{(P_{k,n} + \Delta P_i)} \right] / \left[\lg \frac{P_{a,i}}{(P_{k,n} + \Delta P_i)} + \lg \frac{T_{e,i}}{T_{a,i}} \right], \quad (8)$$

где $P_{a,i}$ – измеряемое текущее значение атмосферного давления, Па; ΔP_i – измеряемое текущее значение перепада давления между компенсационной и эталонной емкостями, Па; $T_{a,i}$ – текущее значение температуры атмосферного воздуха, измеряемое на входе в термостат, К; $T_{e,i}$ – осредненное значение текущей температуры газа, измеренной в компенсационной и эталонной емкостях, равное $T_{e,i} = T_{k,n} + \Delta T_{k,i} - \Delta T_{э,i}$; $\Delta T_{э,i}$ – текущее изменение температуры, измеряемое в эталонной емкости, К; $\Delta T_{k,i}$ – текущее изменение температуры, измеряемое в компенсационной емкости, К.

Масса газа в объекте контроля в начале испытаний, приведенная к нормальным условиям, определяют по формуле:

$$m_u = \rho_n V_u \frac{P_{k,n} T_n}{P_n T_{a,n}}, \quad (9)$$

где V_u – объем испытуемого объекта, м³; $T_{a,n}$ – начальное значение температуры атмосферного воздуха, измеряемое на входе в термостат, °К; ρ_n , P_n , T_n – соответственно плотность, кг/м³, давление, Па и температура, °К используемого газа при нормальных условиях, выбираемая по справочным данным.

Из совместного рассмотрения уравнений (1) и (2) следует:

$$\frac{\Delta m_k}{m_{k,n}} \left(1 + \frac{\Delta T_k}{T_{k,n}} \right) = \frac{\Delta P_k}{P_{k,n}} - \frac{\Delta T_k}{T_{k,n}}. \quad (10)$$

Если в испытуемом объекте нет утечки, а на каждом шаге выполнения измерений давление газа изменяется за счет реального теплообмена с окружающей средой, то согласно закону Шарля изменение давления $\Delta P_{t,i}$, вызванное изменениями температуры, будет равно:

$$\Delta P_{t,i} = P_{k,n} \left(\frac{T_{a,i}}{T_{a,n}} - 1 \right). \quad (11)$$

В то же время эти изменения давления, согласно закону Паскаля о равенстве давлений, будут передаваться и в компенсационной емкости $\Delta P_{t,i} = \Delta P_{k,n}$, вызывая при этом линейное изменение температуры ΔT_k в этой емкости: $\frac{\Delta P_k}{P_{k,n}} = \frac{\Delta T_k}{T_{k,n}}$.

А тогда, как следует из равенства (10), $\Delta m_k = 0$.

В соответствии с законами сохранения массы и энергии во всей пневмосистеме происходит перераспределение параметров газа. При этом, изменения параметров газа в испытуемом объекте, совершающиеся по политропному закону, переходят в изменения параметров газа в компенсационной емкости, совершающиеся по адиабатному закону. Изменения параметров газа за счет теплообмена с окружающей средой и изменения параметров газа за счет утечки рассматривают независимо друг от друга, учитывая необходимость контроля микроутечек при вышеназванных допущениях. Следовательно, на величину массовой утечки газа из всей системы изменения параметров газа за счет теплообмена с окружающей средой не влияют.

Изменение массы в испытуемом изделии Δm_u состоит из массы газа, вытекшего из изделия за счет процесса утечки Δm_y , и поступившего в него некоторого количества газа Δm_k из компенсационной емкости. Тогда массовая величина утечки газа из изделия, характеризующая его герметичность, будет равна:

$$\Delta m_y = \Delta m_u - \Delta m_k, \quad (12)$$

Массовая величина фактической негерметичности Δm_y испытуемого изделия в атмосферных условиях с учетом уравнений (6) – (12) будет равна:

$$\Delta m_y = \frac{V_u (P_{k,n} + \Delta P_i) \rho_n T_n}{T_{a,n} P_n} \left[\left(1 + \frac{T_{e,n} (\Delta P_i - \Delta P_{t,i}) - P_{k,n} (T_{e,i} - T_{e,n})}{P_{k,n} T_{e,i}} \right)^{k/n} - 1 \right] - \frac{T_{e,n} (\Delta P_i - \Delta P_{t,i}) - P_{k,n} (T_{e,i} - T_{e,n})}{T_{e,n} T_{e,i}} \frac{V_k}{R}. \quad (13)$$

Таким образом, независимо от влияния внешних факторов, а именно, теплообмена испытуемого объекта с окружающей средой и реальными колебаниями атмосферного давления, массовая величина фактической негерметичности испытуемого объекта Δm_y , рассчитанная по формуле (13), будет зависеть только от перераспределения массы газа между объектом контроля и компенсационной емкостью. При этом влияние изменение внешних факторов и стабильность работы термостата учитывают в формуле (13) показателем политропы n и значениями $\Delta P_{t,i}$, $T_{e,n}$ и $T_{e,i}$.

Анализируя все вышеизложенное, можно сделать вывод: наиболее перспективным направлением в определении степени негерметичности шахтных трубопроводов сжатого воздуха является применение манометрического способа контроля герметичности по методу фиксированных объемов.

Результаты изложенных исследований сводятся к следующему:

- нарушение герметичности шахтных трубопроводов сжатого воздуха приводит к повышению прямых энергозатрат и снижению материально-технических ресурсов при использовании сжатого воздуха;
- вопросы контроля и обеспечения герметичности шахтных трубопроводов для транспортирования сжатого воздуха исследованы недостаточно;
- в нормативно-технической базе отсутствуют руководящие документы по необходимой степени герметизации шахтных трубопроводов и способах контроля их герметичности;
- для минимизации потерь сжатого воздуха за счет повышения степени герметичности пневматических систем и оборудования необходима разработка новых методов контроля степени негерметичности шахтных трубопроводов и регламентирующих документов по применению этих методов;
- наиболее перспективным направлением решения рассматриваемой проблемы является применение манометрического способа контроля степени негерметичности изделий по методу фиксированных объемов.

Научная новизна полученных результатов заключается в построении расчетного алгоритма на основе закона о сохранении массы и учете специфики перераспределения газодинамических параметров при рассмотрении процессов

утечки и теплообмена с окружающей средой. Практическая ценность заключается в разработке техники и технологии определения степени негерметичности замкнутых объемов, находящихся под избыточным давлением, по методу фиксированных объемов. Полученные результаты могут быть применены при оценке степени негерметичности объектов различного технологического назначения, работающих под избыточным давлением.

– вопросы контроля и обеспечения герметичности шахтных трубопроводов для транспортирования сжатого воздуха исследованы недостаточно;

– в нормативно-технической базе отсутствуют руководящие документы по необходимой степени герметизации шахтных трубопроводов и способах контроля их герметичности;

– для минимизации потерь сжатого воздуха за счет повышения степени герметичности пневматических систем и оборудования необходима разработка новых методов контроля степени негерметичности шахтных трубопроводов и регламентирующих документов по применению этих методов;

– наиболее перспективным направлением решения рассматриваемой проблемы является применение манометрического способа контроля степени негерметичности изделий по методу фиксированных объемов.

Научная новизна полученных результатов заключается в построении расчетного алгоритма на основе закона о сохранении массы и учете специфики перераспределения газодинамических параметров при рассмотрении процессов утечки и теплообмена с окружающей средой. Практическая ценность заключается в разработке техники и технологии определения степени негерметичности замкнутых объемов, находящихся под избыточным давлением, по методу фиксированных объемов. Полученные результаты могут быть применены при оценке степени негерметичности объектов различного технологического назначения, работающих под избыточным давлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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.
2. Технология подземной разработки пластовых месторождений полезных ископаемых / В.И. Бондаренко, А.М. Кузьменко, Ю.Б. Грядущий [и др.]. – Днепропетровск: Полиграфист, 2002. – 730 с.
3. Дроздова Л.Г. Стационарные машины и установки / Л.Г. Дроздова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 157 с.
4. Кутуков, С.Е. Проблема повышения чувствительности, надежности и быстродействия систем обнаружения утечек в трубопроводах / С.Е. Кутуков // Нефтегазовое дело. – 2004. – Т.2. – С. 29 – 45.
5. ОСТ 26.260.14-2001. Сосуды и аппараты, работающие под давлением. Способы контроля герметичности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.atiss-ars.ru/txt/docs/OST/OST_26.260.14-2001.doc. – Загл. с экрана.
6. Каневский И.Н. Неразрушающие методы контроля: Учеб. пособие / И.Н. Каневский, Е.Н. Сальникова. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. 243 с.
7. Волошин А.И. Основные достижения в области геотехнологий, систем трубопроводного пневмотранспорта, теплоэнергетики и контроля герметичности полых изделий / А.И. Волошин // Геотехническая механика: Межвед. сб. науч. тр. / ИГТМ НАНУ. – Днепропетровск, 2012. — Вып. 100. – С. 79 – 91.
8. New-generation technique and technology for leakage tests / VII International scientific-practical conference “School Underground Mining” / Bulat A., Voloshyn O., Ponomarenko S., Gubenko D. // Annual Scientific-Technical Collection “Mining of Mineral Deposits”. – Netherlands: CRC Press/Balkema, 2013. – P. 1 –

4.

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

10. 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.

REFERENCES

1. Gryaduschiy B.A., Kirik G.V. Koval A.N., Loboda V.V., Zharkov P.E. and Lavrenko AM (2008), O problemakh pnevmoenergeticheskogo kompleksa shakht [On the problems pneumoenergetic complex of mines] // *Compressor and power engineering*, № 1 (11), pp. 2 – 5.

2. Bondarenko, V.I., Kuzmenko, A.M., Gryadushchiy, Y.B., Kolokolov, O.V., Kharchenko, V.V., Tabachenko, N.M. and Pochepov, V.N. (2002), *Tekhnologiya podzemnoy razrabotki plastovykh mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Technology of underground mining of mineral deposits], Polygraphist, Dnepropetrovsk, Ukraine.

3. Drosdova, L.G. (2007), *Stazionarnye mashiny i ustanovki* [Stationary machines and installations], DVG TU, Vladivostok, Russia.

4. Kutukov, S.Ye. (2004), "Improvement in pipeline leak detection system's responsiveness, robustness and rapidity", *Oil business*, vol. 2, pp. 29 – 45.

5. State Mining and Technical Supervision Russia in the composition of its GD 26.260.010-2002 (2002), *26.260.14-2001:Sosudy i apparaty, rabotayushchie pod davleniem. Sposoby kontrolya germetichnosti. Otrazlevoy standart* [26.260.14-2001. Vessels and apparatus work under pressure. Control techniques the tightness. Industry Standard] available at: http://www.atis-ars.ru>txt/docs/OCT/OCT_26.260.14-2001.doc (Accessed 6 May 2014).

6. Kanevskiy, I.N. (2007), *Nerasrushayushchie metody kontrolya: Uchebnoye posobiye [Non-destructive testing: Textbook]*, DVG TU, Vladivostok, Russia.

7. Voloshyn, O. I. (2012), "Basic achievements in area of geotechnologies, systems of pipeline of pneumatic transport's, thermal energy and control of impermeability of hollow wares" *Geotekhnicheskaya Mekhanika* [Geo-Technical Mechanics], no.100, pp. 79 – 91.

8. Bulat, A., Voloshyn, O., Ponomarenko, S. and Gubenko, D. (2013) New-generation technique and technology for leakage tests / VII International scientific-practical conference "School Underground Mining" // Annual Scientific-Technical Collection "Mining of Mineral Deposits". – Netherlands: CRC Press / Balkema, 2013 . – P. 1 – 4.

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

10. 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.

Об авторах

Волошин Алексей Иванович, доктор технических наук, профессор, член-корреспондент НАН Украины, заместитель директора института по научной работе, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, worldlab.eg@gmail.com.

Пономаренко Сергей Николаевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела вибропневмотранспортных систем и комплексов, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАНУ), Днепропетровск, Украина, ponomarenko@ua.fm.

Губенко Дмитрий Иванович, 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

Voloshin Alexei Ivanovich, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Corresponding Member of the National Academy of Science of Ukraine, Deputy Director of the institute, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, worldlab.eg@gmail.com.

Ponomarenko Sergei Nikolaevich, Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Senior Researcher of department of vibropneumotransportation systems and complexes, M.S. Polyakov Institute of Geotechnical

Mechanics under the National Academy of Science of Ukraine (IGTM, NASU), Dnepropetrovsk, Ukraine, ponomarenko@ua.fm.

Gubenko Dmitry Ivanovich, head 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. У статті запропоновано новий метод визначення ступеня негерметичності шахтних трубопроводів стисненого повітря з метою підвищення енергозбереження при виробництві, транспортуванні та споживанні стисненого повітря шахтним пневматичним обладнанням.

Пропонована методологія фіксованих об'ємів передбачає використання двох еталонних ємкостей, в одній з яких фіксуються початкові параметри вимірів, а в іншій - поточні. На підставі феноменологічного підходу до опису досліджуваних фізичних процесів побудована математична модель визначення ступеня негерметичності з використанням даного методу. У математичній моделі використані основні закономірності молекулярно-кінетичної теорії газів з урахуванням взаємозв'язку тиску, температури, об'єму та виду використовуваного газу. Виконано математичний опис процесів, що відбуваються при визначенні витоку із замкненого об'єму, з використанням розробленого методу. Показано, що ефективність нового методу обумовлена застосуванням у розрахунковому алгоритмі закону збереження маси при поетапному розгляді процесів витоку та теплообміну. Застосування запропонованого методу фіксованих об'ємів дозволить підвищити вимоги щодо контролю герметичності пневматичного устаткування та систем подачі повітря під час проведення ремонтних і регламентних робіт.

Ключові слова: стиснене повітря, шахтні трубопроводи, ступінь негерметичності, метод фіксованих об'ємів, замкнутий об'єм, надлишковий тиск.

Abstract. This paper proposes a new method for determining the leakiness degree of compressed air pipe-lines to enhance of energy saving in the production, transportation and consumption of compressed air by the mine pneumatic equipment.

The proposed fixed volumes methodology provides the use of two standard receptacles, in the one of which the initial measurement parameters are fixed, and in the other – they are current. The mathematical model of determining the leakiness degree is constructed by this method on the basis of the phenomenological approach to the description of investigated physical processes. The basic regularities of the gas molecular-kinetic theory are used in the mathematical model with allowance for interrelation of pressure, temperature, volume and type of used gas. The mathematical description of the processes, happening when leakage from the closed volume is determined, is implemented using the developed method. It is shown that the effectiveness of a new method caused by application of the law of conservation of mass in a phased consideration of leakage and heat transfer processes in the calculated algorithm. Application of the proposed fixed volumes method will increase the requirements for leakage monitoring of pneumatic equipment and air supply systems during the repair and maintenance works.

Keywords: compressed air, mine pipe-lines, leakiness degree, fixed volumes method, confined space, excessive pressure.

Стаття поступила в редакцію 24.06. 2014

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