

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

УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА ЭНЕРГИИ ПРИ КОНТРОЛЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ ПО МЕТОДУ ФИКСИРОВАННЫХ ОБЪЕМОВ

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

РІВНЯННЯ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСУ ЕНЕРГІЇ ПРИ КОНТРОЛІ ГЕРМЕТИЧНОСТІ ПО МЕТОДУ ФІКСОВАНИХ ОБ'ЄМІВ

Voloshin A.I., Cor. Member NASU,
Ponomarenko S.N., Ph.D. (Tech.), Senior Researcher
(IGTM NAS of Ukraine)
Gubenko D.I., M.S. (Tech)
(Yuzhnoye State Design Office)

THE EQUATION OF THERMAL ENERGY BALANCE FOR THE LEAK CONTROL BY METHOD OF FIXED VOLUMES

Аннотация. Работа направлена на термодинамический анализ параметров, характеризующих процесс утечки газа из контролируемого объекта с учетом его теплообмена с окружающей средой.

Получено уравнение теплового баланса, которое характеризует распределение энергии при контроле герметичности полых объектов по методу фиксированных объемов. Методология предусматривает использование двух емкостей, в одной из которых (эталонной) фиксируются начальные параметры измерений, а в другой (компенсационной) – текущие. Термостабилизация этих емкостей минимизирует возмущения от теплового влияния градиентов параметров окружающей среды. Выполнен анализ распределения энергии при контроле герметичности полого объекта по методу фиксированных объемов. Исследованы термодинамические параметры физических процессов, происходящих в закрытой термодинамической системе с учетом ее негерметичности и теплообмена с окружающей средой. Установлена закономерность распределения энергии в эталонной и компенсационной емкостях, находящихся внутри термостата. Показана взаимосвязь внутренней работы применяемого для контроля герметичности газа и совершаемой им работы по перемещению массы этого газа.

Ключевые слова: контроль герметичности, метод фиксированных объемов, эталонная и компенсационная емкость, утечка, теплообмен, окружающая среда, энергия, работа.

Обеспечение требуемой степени негерметичности трубопроводных систем, применяемых для транспортирования жидких и газообразных сред, является ключевым критерием оценки эффективности их применения [1]. Интегрирование в мировое экономическое сообщество требует, в частности, сертификации предприятий магистрального транспорта нефти и нефтепродуктов на соответствие международным экологическим стандартам ISO 14001 в области оперативного обнаружения утечек транспортируемого продукта [2]. Наиболее масштабное применение трубопроводные системы находят на предприятиях горнодобывающей отрасли, где они являются одними из основных элементов систем дегазации, а также транспортирования сжатого воздуха и воды [3-4]. Степень негерметичности оборудования и технологических систем, обеспечивающих производственный процесс добычи полезных ископаемых, во многом определяет безопасность ведения горных работ и их влияние на окружающую среду [5].

В настоящее время существуют различные методы и способы контроля герметичности полых объектов, к которым относятся трубопроводные системы [6]. Наиболее распространенным методом безбарокамерного контроля герметичности полых объектов является манометрический метод, основанный на определении величины спада давления контрольного газа за единицу времени, именуемый методом «спада давления». Основным недостатком данного метода является наличие существенных погрешностей, вызванных влиянием градиентов параметров окружающей среды на результаты определения утечек контрольного газа. Устранить этот недостаток возможно за счет применения метода фиксированных объемов, который был разработан и апробирован в ИГТМ НАН Украины [7].

Целью данной работы является получение уравнения теплового баланса контроля герметичности по методу фиксированных объемов для установления закономерностей физических процессов, происходящих в закрытой термодинамической системе с учетом ее негерметичности и теплообмена с окружающей средой.

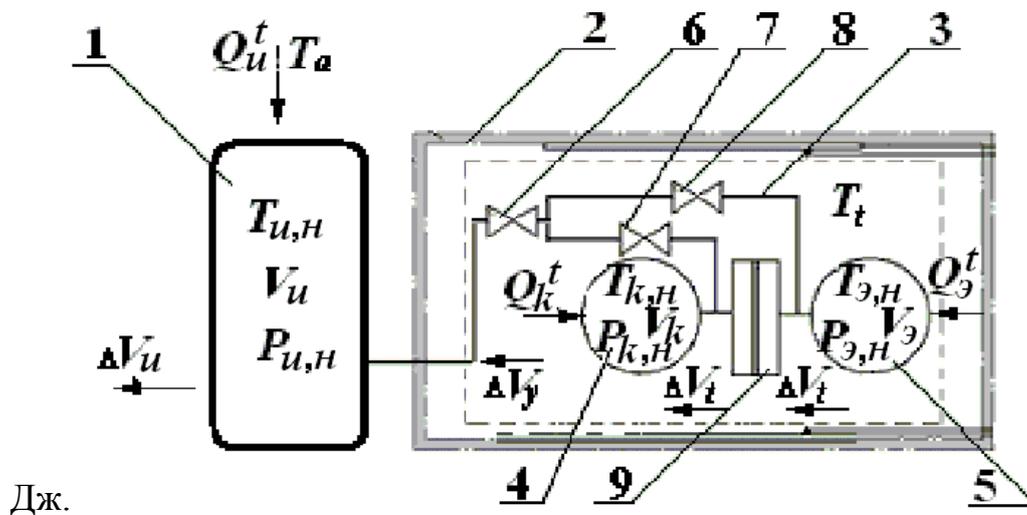
Для проведения анализа равновесных, обратимых квазистатических термодинамических процессов, происходящих при определении утечки с использованием метода фиксированных объемов, применим уравнение первого закона термодинамики, которое выражает изменения в термодинамической системе при подводе к ней некоторого количества тепла [8 – 12]. Принципиальная схема такой термодинамической системы представлена на рис. 1.

В общем случае дифференциальное уравнение баланса энергии для любой термодинамической системы имеет вид [8 – 11]:

$$dQ^t = dK + d\Pi + dL, \quad (1)$$

где dQ^t – изменение подводимого (отводимого) к термодинамической системе некоторого количества тепла, Дж; dK – изменение кинетической энергии молекул воздуха за счет подведенной (отведенной) теплоты, Дж; $d\Pi$ – изменение

потенциальной энергии молекул воздуха, Дж; dL – изменение совершаемой молекулами воздуха внешней работы,



1 – объект контроля; 2 – термостат; 3 – пневмоблок; 4 – компенсационная емкость; 5 – эталонная емкость; 6, 7 и 8 – запорная арматура; 9 – дифференциальный датчик перепада давления

Рисунок 1 – Принципиальная схема термодинамической системы контроля герметичности по методу фиксированных объемов

Для расчета количества подведенного (отведенного) тепла Q^t в единицу времени τ обычно применяется формула Ньютона-Рихмана [9 – 11], в которой тепловой поток считается пропорциональным разности температур между теплоносителем и стенкой:

$$\frac{Q^t}{\tau} = \alpha(T_t - T_f)F, \quad (2)$$

где τ – время, с; α – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м²·К); T_t – температура теплоносителя, К; T_f – температура стенки, К; F – площадь поверхности соприкосновения теплоносителя со стенкой, м².

Следует отметить, что формула Ньютона является формальным выражением теплового потока и в явном виде не учитывает все факторы, влияющие на интенсивность теплоотдачи [10 – 12]. Поэтому это влияние должен учитывать коэффициент теплоотдачи.

На практике интенсивность теплообмена обычно неодинакова по всей площади соприкосновения теплоносителя со стенкой и коэффициент теплоотдачи имеет различные значения для разных участков поверхности соприкосновения. Однако, для термостата, в котором за счет конструктивного исполнения можно создать температурной поле, близкое к равномерному и стационарному, в расчетах допустимо пользоваться осредненными величинами для всей поверхности соприкосновения.

Так как изменение внутренней энергии воздуха dU равно $dU = dK + d\Pi$, а элементарная деформационная работа (внешняя работа) воздуха, находящегося в объеме V под давлением P , равна $dL = PdV$ [9, 11], то уравнение (1) для одного кг воздуха можно переписать в виде:

$$dQ^t = dU + PdV, \quad (3)$$

где dU – изменение внутренней энергии, Дж; P – давление, Па; V – объем, м³.

Интегрирование уравнения (3) дает следующую зависимость:

$$Q^t = \Delta U + \int_{V_1}^{V_2} PdV,$$

где V_1 и V_2 – начальное и конечное значение объема, м³.

Зная функциональную зависимость $P = f(V)$, последнее равенство можно представить в виде:

$$Q^t = \Delta U + \int_{V_1}^{V_2} f(V)dV. \quad (4)$$

Для идеального воздуха с постоянной теплоемкостью c_v изменение внутренней энергии определяется по формуле [11, 12]:

$$\Delta U = m_1 c_v (T_2 - T_1), \quad (5)$$

где m_1 – начальное значение массы воздуха, кг; c_v – изохорная теплоемкость воздуха, Дж/(кг·К); T_1 и T_2 – начальное и конечное значение температуры воздуха, К.

С учетом равенств (2) и (5) уравнение (2.31) примет вид:

$$\alpha(T_t - T_f)F\tau = m_1 c_v (T_2 - T_1) + m_1 \int_{V_1}^{V_2} f(V)dV. \quad (6)$$

Для политропного процесса справедливо равенство [11, 12]:

$$P \left(\frac{V}{m} \right)^n = P_1 \left(\frac{V_1}{m_1} \right)^n, \quad (7)$$

где m – масса воздуха, кг; n – показатель политропы; P_1 – начальное давление

воздуха, Па.

Проинтегрировав равенство (6) с учетом равенства (7), будем иметь:

$$\alpha(T_i - T_f)F\tau = m_1 c_v (T_2 - T_1) + \frac{P_1 V_1 m_2 - P_2 V_2 m_1}{m_2 (n-1)}, \quad (8)$$

где m_2 – конечное значение массы воздуха, кг; P_2 – конечное давление воздуха, Па.

При открытых вентилях 6, 7 и закрытом вентиле 8 (см. рис. 1) мы получим термодинамическую систему, состоящую из эталонной 5, компенсационной 4 емкостей и расположенным между ними дифференциальным датчиком перепада давления 9. Так как эталонная емкость расположена в термостате, поддерживающем постоянный положительный баланс температуры с окружающей средой, то считаем, что изменения параметров воздуха в ней будут происходить по адиабатному закону, т. е. $n = k$, где k – коэффициент адиабаты. Кроме этого, считая рассматриваемую систему достаточно герметичной, при закрытом вентиле 8 (см. рис. 1) будем иметь:

$$m_1 = m_2 = m_{э,н};$$

$$P_1 = P_{э,н};$$

$$V_1 = V_э,$$

где $m_{э,н}$ – начальное значение массы воздуха в эталонной емкости, кг; $P_{э,н}$ – начальное давление воздуха в эталонной емкости, Па; $V_э$ – объем эталонной емкости, м³.

В этом случае уравнение баланса энергии (8) для эталонной емкости будет иметь вид:

$$\alpha_э (T_i - T_{f,э}) F_э \tau = m_{э,н} c_v \Delta T_э + \frac{P_{э,н} V_э - (P_{э,н} + \Delta P_э)(V_э + \Delta V_t)}{(k-1)}, \quad (9)$$

где $\alpha_э$ – коэффициент теплоотдачи стенки эталонной емкости, Вт/(м²·К); $T_{f,э}$ – температура стенки эталонной емкости, К; $F_э$ – площадь поверхности эталонной емкости, м²; $\Delta T_э$ – изменение температуры воздуха в эталонной емкости, К; $\Delta P_э$ – изменение давления воздуха в эталонной емкости, Па; ΔV_t – некоторое изменение объема воздуха в эталонной емкости за счет прогиба диафрагмы дифференциального датчика перепада давления, вызванное наличием градиента давления, м³.

В уравнении (9) изменение объема ΔV_t условно берем со знаком «+».

Аналогичное уравнение можно записать и для компенсационной емкости, учитывая, при этом, что для нее ΔV_t необходимо брать с противоположным

знаком, а наличие объекта контроля при открытом вентиле 6 (см. рис. 1) дополнительно даст изменение массы Δm_k :

$$\alpha_k (T_t - T_{f,k}) F_k \tau = m_{k,n} c_v \Delta T_k + \frac{P_{k,n} V_k (m_{k,n} + \Delta m_k) - (P_{k,n} + \Delta P_k) (V_k - \Delta V_t) m_{k,n}}{(m_{k,n} + \Delta m_k) (k - 1)}, \quad (10)$$

где α_k – коэффициент теплоотдачи стенки компенсационной емкости, Вт/(м²·K); $T_{f,k}$ – температура стенки эталонной емкости, K; F_k – площадь поверхности компенсационной емкости, м²; ΔT_k – изменение температуры воздуха в компенсационной емкости, K; ΔP_k – изменение давления воздуха в компенсационной емкости, Па; ΔV_t – некоторое изменение объема воздуха в компенсационной емкости за счет прогиба диафрагмы дифференциального датчика перепада давления, вызванное наличием градиента давления, м³.

Знак и величина Δm_k зависит от соотношения величин негерметичности объекта контроля и количества тепла, получаемого или отдаваемого объектом контроля за счет его теплообмена с окружающей средой. Для проведения анализа в уравнении (10) Δm_k условно возьмем со знаком «+».

На основании закона Паскаля о равенстве давлений $P_{э,н} = P_{k,н} = P$, а $\Delta P_k = \Delta P_э = \Delta P$, где ΔP – изменение давление воздуха в рассматриваемой термодинамической системе за промежуток времени τ , Па.

В том случае, если эталонная и компенсационная емкости выполнены одинакового объема ($V_э = V_k = V$), с одного и того же материала, имеют одинаковую форму и геометрические параметры ($F_э = F_k = F$), то $\alpha_э = \alpha_k = \alpha$, а $T_{f,k} = T_{f,э} = T_f$ и при $T_{k,н} = T_{э,н} = T$ будем иметь $m_{э,н} = m_{k,н} = m$.

Учитывая вышеизложенное и приравнивая левые части уравнений (9) и (10), получим:

$$m c_v \Delta T_k + \frac{P V (m + \Delta m_k) - (P + \Delta P) (V - \Delta V_t) m}{(m + \Delta m_k) (k - 1)} = m c_v \Delta T_э + \frac{P V - (P + \Delta P) (V + \Delta V_t)}{(k - 1)}. \quad (11)$$

Выполнив преобразование уравнения (11), будем иметь:

$$m c_v (\Delta T_k - \Delta T_э) = \frac{[P V - (P + \Delta P) (V + \Delta V_t)] (m + \Delta m_k) - P V (m + \Delta m_k) - (P + \Delta P) (V - \Delta V_t) m}{(m + \Delta m_k) (k - 1)}$$

ИЛИ

$$mc_v(\Delta T_k - \Delta T_3) = \frac{(P + \Delta P)[(V + \Delta V_t)(m + \Delta m_k) - (V - \Delta V_t)m]}{(m + \Delta m_k)(k - 1)}. \quad (12)$$

С учетом того, что $\Delta V_t \ll V$, уравнение (12), пренебрегая прогибом диафрагмы дифференциального датчика давления, можно переписать в виде:

$$mc_v(\Delta T_k - \Delta T_3) = \frac{(P + \Delta P)V}{(k - 1)} \frac{\Delta m_k}{m + \Delta m_k}. \quad (13)$$

Уравнение (13) характеризует распределение энергии в эталонной и компенсационной емкостях, находящихся внутри термостата. В этом процессе вся совершаемая воздухом работа (правый член уравнения) получается за счет изменения его внутренней энергии (левый член уравнения) и, наоборот, любое изменение внутренней энергии воздуха сопровождается работой воздуха по перемещению некоторой массы воздуха Δm_k . Знак и величина Δm_k , зависящие от знака и величины ΔP , в свою очередь определяют знак и величину ΔT_k .

Входящие в уравнения (12) значения массы воздуха в эталонной и компенсационной емкостях определяется по уравнению состояния в форме Менделеева-Клапейрона [11]:

$$m = PV/RT, \quad (14)$$

где R – газовая постоянная, Дж/(кг·К); T – температура, К.

Входящее в уравнение (13) значение теплоемкости c_v можно определить, воспользовавшись известными зависимостями для теплоемкостей при постоянном объеме и давлении, а именно формулой Майера и зависимостью для показателя адиабаты [12]:

$$c_p - c_v = R; \quad c_p/c_v = k,$$

из которых следует:

$$c_v = R/(k - 1). \quad (15)$$

Для сжатого воздуха ($R = 287,14$ Дж/(кг·К); $k = 1,4$) в соответствии с уравнением (15), имеем $c_v = 717,85$ Дж/(кг·К).

С учетом равенств (14) и (15) уравнение (13) примет вид:

$$\frac{\Delta T_k - \Delta T_9}{T} = \frac{P + \Delta P}{P} \frac{\Delta m_k}{m + \Delta m_k}. \quad (16)$$

Поскольку по своему физическому смыслу давление P , температура T и масса m положительны, а $\Delta P < P$; $\Delta m_k < m$, то, как следует из уравнения (16), $\Delta T_k - \Delta T_9 \leq 0$ при $\Delta m_k \leq 0$ и $\Delta T_k - \Delta T_9 \geq 0$ при $\Delta m_k \geq 0$.

Значения коэффициентов теплоотдачи $\alpha_9 = \alpha_k = \alpha$, входящих в уравнения (9) и (10), являются справочными данными, однако намного точнее их можно определить экспериментальным путем, воспользовавшись уравнением (9). С этой целью закрывают вентиль 6 и открывают вентили 7 и 8 (см. рис. 1). В этом случае, если система достаточно герметична, то $\Delta V_t = 0$ и $\Delta P = 0$. Тогда, зная температуру термостата T_t и начальную температуру T_f , а также измеряя изменение температуры ΔT_9 значение коэффициента α будет равно:

$$\alpha = \frac{mc_v \Delta T_9}{(T_t - T_f) F \tau}$$

или с учетом равенств (14) и (15):

$$\alpha = \frac{PV}{(k-1)F\tau} \frac{\Delta T_9}{(T_t - T_f)T}. \quad (17)$$

При контроле герметичности без подключения объекта испытаний, т. е. при закрытых вентилях 6, 7 и 8 (см. рис. 1) величина Δm_k , полученная из уравнения (16), даст степень негерметичности самого пневмоблока устройства контроля герметичности [7]. В состав пневмоблока входят следующие элементы:

- компенсационная и эталонная емкости;
- дифференциальный датчик перепада давления;
- запорная арматура и пневмомагистрали.

Величина собственной негерметичности пневмоблока устройства контроля герметичности, которую необходимо учитывать при определении суммарной негерметичности объекта контроля, в соответствии с уравнением (16) будет равна:

$$\Delta m_{k,y} = \left[m \frac{\Delta T_k - \Delta T_9}{T} \right] / \left[\frac{P + \Delta P}{P} - \frac{\Delta T_k - \Delta T_9}{T} \right],$$

где $\Delta m_{k,y}$ – изменение массы воздуха в компенсационной емкости за счет утечки, кг.

С учетом равенства (14) последнее соотношение примет вид:

$$\Delta m_{k,y} = \frac{P^2 V (\Delta T_k - \Delta T_9)}{RT [T(P + \Delta P) - P(\Delta T_k - \Delta T_9)]}. \quad (18)$$

Рассмотрим теперь термодинамическую систему, которая при открытых вентилях 6, 7 и закрытом вентиле 8 (см. рис. 1), будет состоять из объекта контроля 1 и компенсационной емкости 4. Так как объект контроля не изолирован от воздействия окружающей среды, то изменения параметров воздуха в нем будут происходить по политропному закону с показателем политропы n . Тогда уравнение баланса энергии для объекта контроля, с учетом того, что $\Delta V_t = 0$, будет иметь вид, аналогичный уравнению (10):

$$\alpha_u (T_a - T_{f,u}) F_u \tau = m_{u,n} c_v \Delta T_u + \frac{P_{u,n} V_u (m_{u,n} + \Delta m_u) - (P_{u,n} + \Delta P_u) V_u m_{u,n}}{(m_{u,n} + \Delta m_u)(n-1)}, \quad (19)$$

где α_u – коэффициент теплоотдачи стенки объекта контроля, Вт/(м²·К); T_a – температура окружающей среды, К; $T_{f,u}$ – температура стенки объекта контроля, К; F_u – площадь поверхности объекта контроля, м²; $m_{u,n}$ – начальное значение массы воздуха в объекте контроля, кг; ΔT_u – изменение температуры воздуха в объекте контроля, К; $P_{u,n}$ – начальной давление воздуха в объекте контроля, Па; V_u – объем объекте контроля, м³; $\Delta m_{u,n}$ – изменение массы воздуха в объекте контроля, кг; ΔP_u – изменение давления воздуха в объекте контроля, Па.

При этом, суммарная величина изменения массы воздуха в объекте контроля для политропного процесса определяется по уравнению [7]:

$$\Delta m_u = m_{u,n} \left[\left(\frac{\Delta P}{P} + 1 \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right], \quad (20)$$

где ΔP определяется как суммарное изменение давления воздуха в объекте контроля.

С учетом равенств (14), (15), (20) и того, что на основании закона Паскаля о равенстве давлений, $P_{u,n} = P$, а $\Delta P_u = \Delta P$:

$$\alpha_u (T_a - T_{f,u}) F_u \tau = \frac{P V_u}{T_{u,n} (k-1)} \Delta T_u + \frac{P V_u}{(n-1)} - \frac{(P_{u,n} + \Delta P) V_u}{(n-1) \left(\frac{\Delta P}{P} + 1 \right)^{\frac{1}{n}}}. \quad (21)$$

Уравнение (21), полученное на основании первого закона термодинамики, характеризует распределение подведенной (или отведенной) к объекту контроля теплоты между его внутренней энергией и совершаемой теплотой работы. В общем случае характер этого распределения произволен и не поддается описанию, т.к. доли теплоты, затрачиваемые на работу и внутреннюю энергию,

могут меняться в любых отношениях. При контроле герметичности по методу фиксированных объемов (см. рис. 1), как следует из равенств (18) и (20), справедливы следующие закономерности [7]:

- массовая величина степени негерметичности объекта контроля не зависит от его теплообмена с окружающей средой и определяется по перераспределению массы контрольного газа между объектом и компенсационной емкостью;
- влияние градиентов параметров окружающей среды учитывается показателем политропы и поправочными коэффициентами на результаты измерений.

Таким образом, выполненные исследования позволили получить уравнение теплового баланса энергии для термодинамического анализа параметров, характеризующих процесс утечки газа из контролируемого объекта с учетом теплообмена этого объекта с окружающей средой. Установлены закономерности распределения энергии в эталонной и компенсационной емкостях, находящихся внутри термостата, и взаимосвязи подводимой или отводимой к объекту контроля теплоты между его внутренней энергией и совершаемой этой теплотой механической работой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Масловский, В.В. Формирование свойств надежности элементов транспортных трубопроводных энергетических систем и региональной экологической безопасности при их производстве и ремонте / В.В. Масловский. – Харьков: ХНАГХ, 2009. – 254 с.
2. 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.
3. Технология подземной разработки пластовых месторождений полезных ископаемых / В.И. Бондаренко, А.М. Кузьменко, Ю.Б. Грядущий [и др.]. – Днепропетровск: Полиграфист, 2002. – 730 с.
4. Дроздова, Л.Г. Стационарные машины и установки / Л.Г. Дроздова. – Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2007. – 157 с.
5. НПАОП 10.0-1.01-10 Правила безпеки у вугільних шахтах: затв. наказом Державного комітету України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду 22.03.2010 № 62. – Київ: 2010. – 215 с. – (Нормативний документ Мінвуглепрому України).
6. ОСТ 26.260.14-2001. Сосуды и аппараты, работающие под давлением. Способы контроля герметичности [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www. atis-ars.ru>txt/docs/OST/OST_26.260.14-2001.doc](http://www.atis-ars.ru>txt/docs/OST/OST_26.260.14-2001.doc). – Загл. с экрана.
7. Bulat, A., Voloshyn, O., Ponomarenko, S., and Gubenko, D. (2013) “New-generation technique and technology for leakage tests”, Annual Scientific-Technical Collection “Mining of Mineral Deposits”, School of Underground Mining, Proc of VII International scientific-practical conference, Netherlands, CRC Press/Balkema, p. 1-4.
8. Koretsky, M.D. (2004), *Engineering and chemical thermodynamics*, JOHN WILEY & SONS, INC., Hoboken, NY.
9. Borgnakke, C. Sonntag, R.E. (2009), *Fundamentals of thermodynamics*, 7th ed., International student version, Wiley, Hoboken, NY.
10. Buchdahl, H.A. (2009), *The Concepts of Classical Thermodynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
11. 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.
12. Кудинов, В.А. Техническая термодинамика / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов. – М.: Высшая школа, 2007. – 264 с.

REFERENCES

1. Maslovskiy, V.V. (2009), *Formirovaniye svoystv nadezhnosti elementov transportnykh truboprovodnykh energeticheskikh sistem i regionalnoy ekologicheskoy bezopasnosti pri ikh proizvodstve i remonte*

[Formation properties of reliability of the elements of pipeline transportation and energy systems of the regional ecological security in their manufacture and repair], Kharkiv National Academy of Municipal Sector, Kharkiv, Ukraine.

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

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

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

5. State committee of Ukraine on industrial safety, labour protection and mountain supervision (2010), *NPAOP 10.0-1.01-10. Pravila bezpeki u vugilnich shakhtakh* [NPAOP 10.0-1.01-10 Rules of safety in coal mines], Kiev, Ukraine.

6. 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. Otrasevoy 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).

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

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

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

10. Buchdahl, H.A. (2009), *The Concepts of Classical Thermodynamics*, Cambridge University Press, Cambridge, UK.

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

12. Kudinov, V.A. and Kartashov, E.M. (2007), *Tekhnicheskaya termodinamika* [Engineering Thermodynamics], 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, инженер, Государственное предприятие «Конструкторское бюро «Южное» им. М.К. Янгеля» (ГП «КБ «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 Vibratory Transporting 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, Master of Science, State Enterprise "Design Office" Yuzhnoye" by

Анотація. Робота спрямована на термодинамічний аналіз параметрів, що характеризують процес витоку газу з контрольованого об'єкта з урахуванням його теплообміну з навколишнім середовищем.

Отримано рівняння теплового балансу, яке характеризує розподіл енергії при контролі герметичності порожнистих об'єктів по методу фіксованих об'ємів. Методологія передбачає використання двох місткостей, в одній з яких (еталонній) фіксуються початкові параметри вимірів, а в іншій (компенсаційній) - поточні. Термостабілізація цих місткостей мінімізує збурення від теплового впливу градієнтів параметрів навколишнього середовища. Виконаний аналіз розподілу енергії при контролі герметичності полого об'єкта по методу фіксованих об'ємів. Досліджено термодинамічні параметри фізичних процесів, що відбуваються в закритій термодинамічній системі з урахуванням її негерметичності та теплообміну з навколишнім середовищем. Встановлено закономірність розподілу енергії в еталонній та компенсаційній місткостях, що знаходяться всередині термостата. Показано взаємозв'язок внутрішньої роботи газу, який застосовується для контролю герметичності, та роботи, що здійснюється ним з переміщення маси цього газу.

Ключові слова: контроль герметичності, метод фіксованих об'ємів, еталонна та компенсаційна місткість, витік, теплообмін, навколишнє середовище, енергія, робота.

Abstract. The work is focused on thermodynamic analysis of parameters which characterize a process of gas escaping from the controlled object with taking into account its heat exchange with the environment.

A heat balance equation was formulated, which describes energy distribution when leakage from the hollow objects is monitored by the fixed volume method. The methodology assumes using of two vessels, in one of which (reference vessel) initial measurement parameters are fixed, and in the other (compensation vessel) current measurement parameters are recorded. Thermal stabilization of these vessels minimizes thermal perturbations caused by gradients of environmental parameters. Energy distribution was analyzed at monitoring leakage from the hollow object by the fixed volume method. Thermodynamic parameters of physical processes, which occurred in a closed thermodynamic system were investigated with taking into account rate of the system leak proofness and heat exchange with the environment. Pattern of the energy distribution in the reference and compensation vessels inside the thermostat was set. Interdependence was showed between internal work of the gas, which was used for monitoring the leakages, and the job which was performed for this gas mass motion.

Keywords: leakage monitoring, fixed volume method, reference and compensation vessel, leakage, heat exchange, environment, energy, job.

Статья поступила в редакцию 3.02. 2015

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