

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОНТРОЛЬ ДИСБАЛАНСА ПРИХОДА И РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ГАЗА МАГИСТРАЛЬНОГО ГАЗОПРОВОДА

Введение. Газотранспортные предприятия допускают неточности вследствие корректируемого измерения расхода газа, что не позволяет с достаточной точностью вычислить дисбаланс газа между приходом и распределением. Причиной неточностей служат систематические погрешности измерений, а также наличие утечек в отдельных нитках газопровода [1]. Выявление объема и мест корректируемых измерений и утечек в газопроводе является нетривиальной задачей, для решения которой в настоящее время не разработано функциональных методик. Практика применения статистических методов в разных областях науки и народного хозяйства позволяет предположить, что их применение позволит решить вышеуказанные проблемы и в газовой промышленности.

Постановка задачи исследования. В настоящее время сбор и обработка статистической информации прихода и распределения газа по газотранспортной системе Украины ведется с помощью централизованной базы данных «АРМ диспетчера Трансгазу», основанной на измерениях современными расходомерами и вычислении физических характеристик газа [1]. Идея применения статистических методов для решения указанных проблем высказывалась в научной литературе [2, 3]. Однако, каких-либо определенных результатов в данном направлении получено не было и для выявления дисбалансов расхода газа в газопроводе применяются известные своей простотой методы [1], что не позволяет распознать корректируемые измерения.

Цель исследований данной работы заключается в разработке универсального алгоритма обнаружения признаков корректируемого измерения расхода газа путем статистического анализа случайных временных рядов суточного измерения прихода и распределения.

Материалы исследований. Представим разность суточного расхода D_i между приходом X_i и распределением Y_i в i -тые сутки измерений в следующем виде:

$$D_i = X_i - Y_i; \quad (i = 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

где n — число суток измерений временного ряда прихода и распределения; t_i — время.

Поскольку в газотранспортной системе существует изменение запасов газа $\alpha(t_i) = Z(t_i) - Z(t_{i-1})$, где $Z(t_i)$, $Z(t_{i-1})$ — запас газа в газопроводе в i -тые и $(i-1)$ сутки измерений, связанное с колебаниями давления и температуры, то значение дисбаланса β_i между приходом и распределением имеет вид: $\beta_i = D_i - \alpha_i$; $(i = 1, 2, \dots, n)$. Несложно показать, что среднее изменение запаса газа $\bar{\alpha}$ равно: $\bar{\alpha} = (Z_n - Z_1)/n \approx 0$, т.е. для вычисления среднего значения дисбаланса при достаточно длинных временных рядах $n \rightarrow \infty$ необходимо посчитать среднюю разность $\bar{D} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n D(t_i)$. При этом дисперсия разности равна $\sigma_D^2 = \sigma_\beta^2 + \sigma_\alpha^2$, где σ_β^2 и σ_α^2 — дисперсии дисбаланса и изменения запаса газа.

Статистический анализ D_i путем обработки большого числа гистограмм с помощью различных критериев согласия показал, что закон распределения D_i без нарушения условий измерения является Гауссовым $D_i = D_{i,j}$:

$$p(D_{i,j}) = \exp\left[-(D_{i,j} - \bar{D}_i)^2 / (2\sigma_i^2)\right] / (\sigma_i \sqrt{2\pi}), \quad (2)$$

где \bar{D}_i , σ_i^2 — математическое ожидание и дисперсия Гауссова шума.

Коэффициент корреляции между X_i и Y_i $K(X_i, Y_i) = \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) / n\sigma_x\sigma_y$, где $\bar{X}, \bar{Y}, \sigma_x^2, \sigma_y^2$ — средние и дисперсии прихода и распределения, после несложных преобразований представим в следующем виде: $K(X_i, Y_i) = [\sigma_x/\sigma_y + \sigma_y/\sigma_x - \sigma_D^2 / (\sigma_x\sigma_y)] / 2$. При близких значениях дисперсий σ_x и σ_y получим приближенную формулу для коэффициента корреляции:

$$K(X_i, Y_i) = 1 - \eta_x\eta_y / 2; \quad \eta_x = \sigma_D / \sigma_x; \quad \eta_y = \sigma_D / \sigma_y. \quad (3)$$

Статистический анализ временных рядов прихода и распределения по УМГ «Киевтрансгаз» с дальнейшим вычислением коэффициента корреляции и дисперсий показал правомерность соотношения (3). Кроме того, при некорректируемом измерении выполняется условие:

$$\eta_x = \eta_y < 0,2; \quad K(X_i, Y_i) \geq 0,96, \quad (4)$$

что является критерием фиксации некорректируемого определения $\bar{D} = \bar{D}_i$.

В том случае, когда условие (4) нарушается, закон фактической плотности вероятности $p(D_i)$ значительно отличается от нормального. Гистограмма фактической плотности вероятности представлена на рис. 1. Здесь N_i — число значений, попадающих в $(i+1)$ -ый интервал наблюдений $\Delta_{i+1} = (i+1)\Delta - i\Delta$; ($i = 0, 1, K, r$), с фиксированным интервалом $\Delta = (D_{\max} - D_{\min})/r$, где r — число интервалов; $i = 0$ — соответствует D_{\min} ; $i = r$ — соответствует D_{\max} .

Полученный закон плотности по виду напоминает распределение Райса:

$$p(D_i) = \frac{1}{\sigma_i \pi \sqrt{2\pi}} \int_0^\pi \exp\left[-(D_i - S \cos \theta)^2 / (4\sigma_i^2)\right] d\theta, \quad (5)$$

где S и θ — соответственно амплитуда и начальная фаза гармонического процесса.

Распределение Райса является композицией Гауссового распределения (2) и распределения арккосинуса:

$$p(D_{i,i}) = \begin{cases} \left(\pi \sqrt{2\sigma_i^2 - D_{i,i}^2}\right)^{-1}, & |D_{i,i}| < S, \\ 0, & |D_{i,i}| \geq S, \end{cases} \quad \text{где } \sigma_i = S/\sqrt{2} \text{ — среднеквадратичное отклонение процесса. Отличие}$$

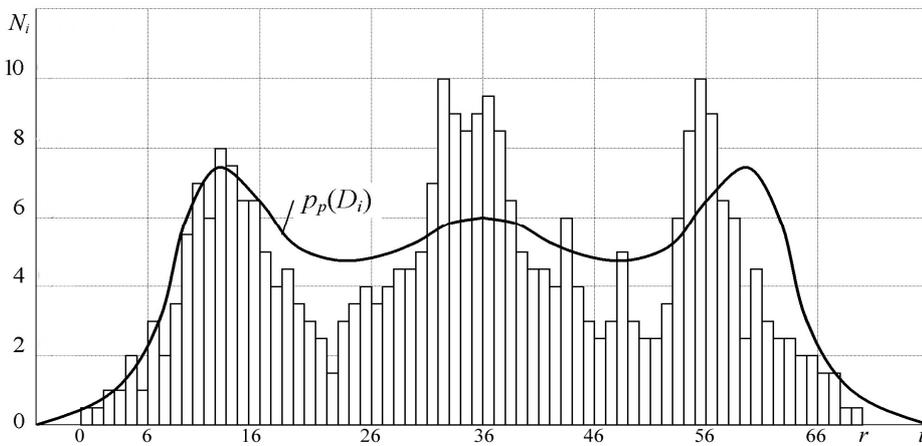


Рис. 1. Гистограмма разности прихода и распределения газа УМГ «Киев-трансгаз» (КС) в зимний период; $p_p(D_i)$ - плотность распределения Райса

от распределения Райса заключается в том, что правый и левый максимумы плотности вероятности $p(D_i)$ гистограммы (рис. 1) несимметричны.

С целью выделения из плотности вероятности $p(D_i)$ периодического $p(D_{n,i})$ и Гауссового $p(D_{n,i})$ распределений представим временной ряд D_i в виде спектра. В общем случае эта операция выполняется с помощью преобразования Фурье [4]. Так как в расчетах используются данные, представляющие собой дискретную конечную последовательность ежесуточных значений расхода газа, то применяется дискретная аппроксимация финитного быстрого преобразования Фурье [5]:

$$F[D(k/n)] = \sum_{i=1}^n D_i \cdot \exp(-j2\pi ki/n); \quad (k = 1, 2, K, N), \quad (6)$$

где $j^2 = -1$; n — объем временной выборки; N — число гармоник спектра.

После получения спектра исследуемой последовательности проведено отделение максимальных значений амплитуд таким образом, чтобы спектр разделился на две части (вертикальная обрезка). Для этого из всех составляющих спектра, значения которых выше определенного постоянного порога $F[D(k/n)] = \text{const}$, вычитается этот порог постоянных значений, а составляющие, значения которых меньше порога, остаются без изменения. На рис. 2 представлены относительные амплитуды всех гармоник спектра k -того порядка $F[D(k/n)]/\sigma_D$. Сплошной линией отмечен применяемый в данном случае уровень обрезки спектра, т.е. уровень разделения сигналов. Спектр с постоянными амплитудами $F[D_i(k/n)]$ (первая часть) представляет собой спектр белого шума, т.е. Гауссов процесс [4]. Вторая часть спектра $F[D_i(k/n)]$ характерна для амплитудно-частотной модуляции периодического сигнала [3] с основным периодом $i = 8$ суток и числом гармоник $N = 64$. Таким образом можно предположить, что полученное распределение (рис. 1) является композицией модулированного периодического и Гауссова процессов.

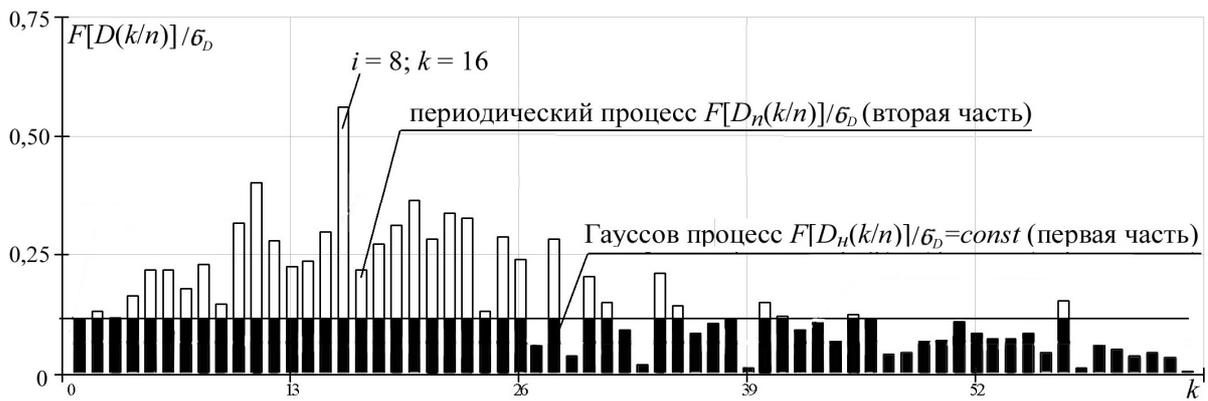


Рис. 2. Спектр разности D_i по УМГ «Киевтрансгаз» в зимний период (КС)

После этого к обеим частям разделенного спектра применяется обратное преобразование Фурье, выполняемое по формулам [4]:

$$\left. \begin{aligned} D_{i,j} &= \sum_{k=1}^n F[D_i(k/n)] \exp(j2\pi ki/n); \\ D_{i,j} &= \sum_{k=1}^n F[D_i(k/n)] \exp(j2\pi ki/n); \\ (i &= 1, 2, K, n). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

В данном случае также применяется дискретная аппроксимация быстрого обратного преобразования Фурье. Это позволило получить периодический и случайный временные ряды с объемом выборки $n = 128$, т.к. применяемые при анализе спектральные соотношения, связанные с быстрым преобразованием Фурье, требуют выбирать длину выборки $n = 2^m$, где $m = 7$ — целое число. Кроме того, $n = 128$ соответствует длине зимнего и летнего периодов. Таким образом, фактическое распределение (рис. 1) представлено в виде композиции периодического (рис. 3) и Гауссова распределений (соотношение (2)).

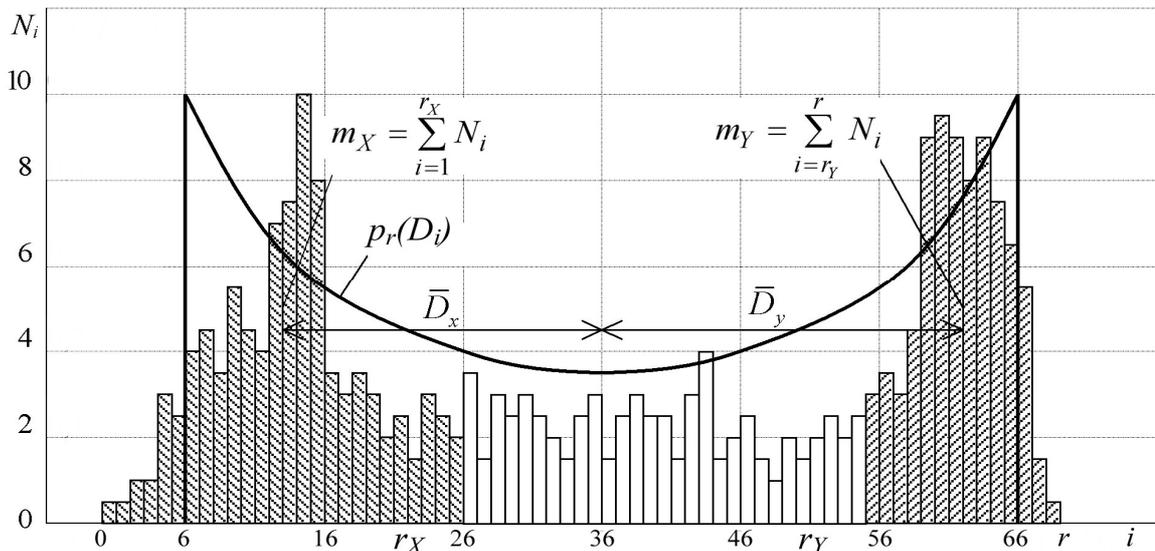


Рис. 3. Гистограмма обрезанного периодического распределения D_i УМГ «Киевтрансгаз» в зимний период; $p_r(D_i)$ - закон аркосинуса гармонического распределения

Предположим, что корректируемые измерения расхода газа происходят в m_x точках прихода и m_y точках распределения (рис. 4) таким образом, чтобы $m_x + m_y \leq n$. Обозначим среднее значение корректируемой систематической погрешности прихода ΔX_m , а распределения - ΔY_m . На рис. 4 представлены относительные значения прихода $X_i^0 = X_i / \bar{X}$ и распределения $Y_i^0 = Y_i / \bar{Y}$ газа. Тогда корректируемые X_i и Y_i можно получить одновременным увеличением прихода и распределения на величину средних значений ΔY_m и ΔX_m соответственно в m_y и m_x точках или одновременным занижением прихода и распределения на величину средних значений ΔX_m и ΔY_m соответственно в m_x и m_y точках.

Для реализации вышеописанной процедуры значения ежесуточных замеров ранжируем по значениям D_i (рис. 5). Затем значения временных реализаций поступления X_i и распределения Y_i газа разбиваем на три уча-

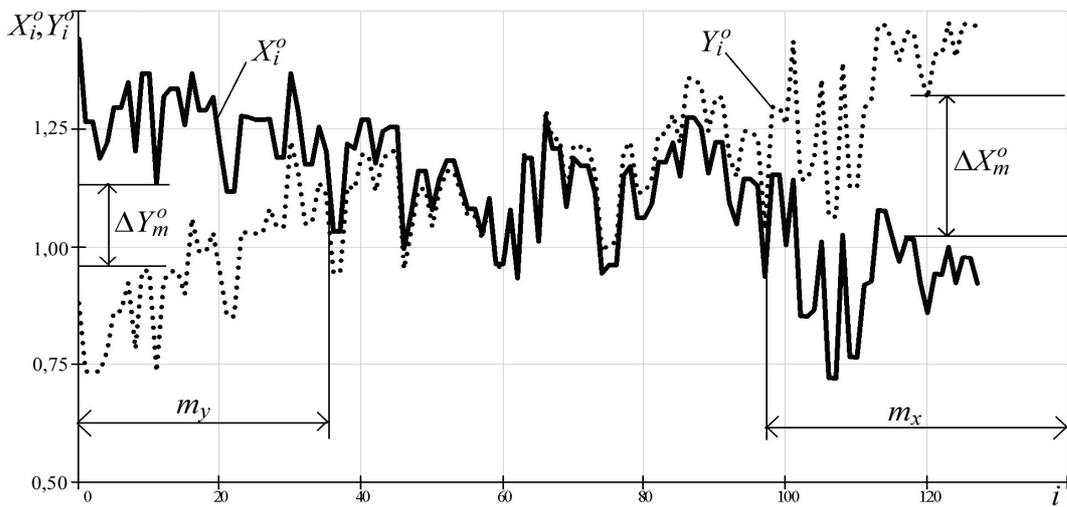
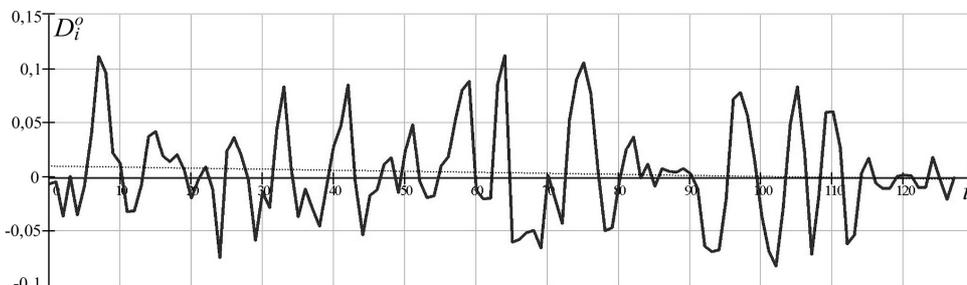
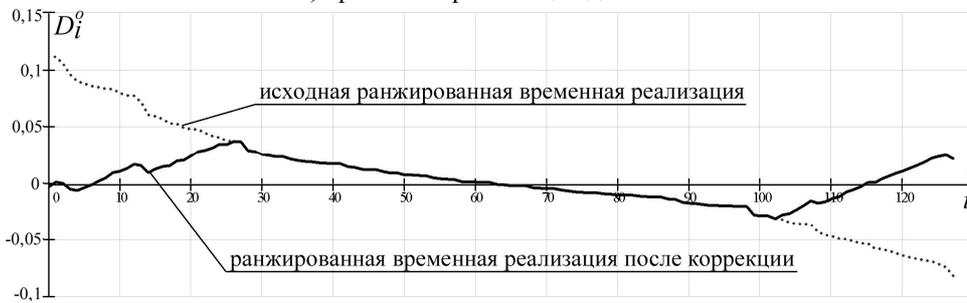


Рис. 4. Временные ряды прихода X_i и распределения Y_i , ранжированные по D_i , УМГ «Киевтрансгаз» в зимний период

ска: участок положительных разниц; участок разниц, близких к нулю и участок отрицательных разниц. Для положительного и отрицательного участков проводим процедуру сглаживания (восстановления первоначальных значений X_i и Y_i), которая заключается в выравнивании кривой графика реализации в соответствии со значением разницы прихода ΔX_m и распределения ΔY_m в соответствующие дни измерений $m_X = \sum_{i=1}^{r_X} N_i$;



а) временная реализация дисбаланса



б) выравнивание «хвостов» дисбаланса

Рис. 5. Исходная временная реализация и выравнивание «хвостов» дисбаланса

транспорта газа: экспортного газопровода (ЕГ) и Киевской системы (КС). Замеры расхода газа проводились отдельно по ЕГ и КС в течение пяти лет. Данные статистической отчетности обладают сезонной неравномерностью и представлены отдельно в зимний и летний периоды ($n = 128$). На рис. 5,а приведена временная реализация последовательности относительных замеров дисбаланса $D_i^o = D_i / \bar{D}$ КС в зимний период. На Рис. 5,б представлены ранжированные относительные значения D_i до и после восстановления. Значения коэффициентов корреляции соответствующих диапазонов исследуемого периода для «зимнего» периода КС приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Коэффициенты корреляции для восстановленных значений X_i , Y_i по УМГ «Киевтрансгаз» в зимний период

Число точек диапазона	Коэффициенты корреляции $K(X_i, Y_i)$			
	$n = 128$	$m_x = 20$	$n - (m_x + m_y) = 75$	$m_y = 33$
До коррекции	0.839	0.890	0.977	0.966
После коррекции	0.970	0.890	0.977	0.966

Восстановление первоначальных значений X_i и Y_i путем их суммарного увеличения на $\Delta X_m \cdot m_x$ и $\Delta Y_m \cdot m_y$ показало, что после восстановления коэффициент корреляции всей выборки увеличивается (табл. 1) и не нарушает условия (4). По отдельным участкам коэффициент остается без изменений, что свидетельствует о предварительном сдвиге всех участков на постоянную величину. Таким образом, в газотранспортной системе при корректируемых измерениях возникают дополнительные периодические (отрицательный и положительный) временные ряды коррекции дисбалансов со средней разностью соответственно $\bar{D}_X = \Delta X_m P_x$ и $\bar{D}_Y = \Delta Y_m P_y$, где $P_x = m_x/n$, $P_y = m_y/n$, $P_x \neq P_y \leq 1$. Ряды коррекции искажают плотность вероятности Гаусса (рис. 1) и близки к гармоническому распределению (рис. 3).

Для нахождения неизвестных параметров \bar{D}_i , σ_i , ΔX_m , ΔY_m , P_x , P_y начальные моменты суммы Гауссового $D_{i,i}$ и периодического $D_{i,i}$ рядов приравняем к фактическим начальным моментам всего распределения $M(D_i)^k$:

$$\dot{M}(D_{i,i} + D_{i,i})^k = \dot{M}(D_i)^k; \quad (k = 1, K, r). \quad (8)$$

Суммирование моментов в левой части уравнения (8) производим по известной зависимости [3]: $M(D_{i,i} + D_{i,i})^k = \sum_{m=0}^k C_k^m \cdot M(D_{i,k,i})^{k-m} \cdot M(D_{i,k,i})^m$; $C_k^m = k!/[m!(k-m)!]$; $C_k^0 = 1$. Известно и вычисление

статистических моментов фактического распределения: $\dot{M}(D_i)^k = \sum_{i=1}^n D_i^k/n$; $(k = 1, K, r)$. Начальные моменты

Гауссова распределения $M(D_{i,i})^k$, выраженные через центральные, вычисляем по формуле:

$$M(D_{i,i})^k = \sum_{m=0}^k C_k^m \cdot \mu(D_{i,i})^{k-m} \cdot \bar{D}_i^m, \quad \text{а центральные моменты — по формулам [3]:}$$

$\mu(D_{i,i})^{2k} = 1 \cdot 3 \cdot K \cdot (2k-1) \sigma_i^{2k}$; $\mu(D_{i,i})^{2k-1} = 0$; $k = 1, 2, K$. Моменты периодического распределения представляем приближенно в следующем виде:

$$\dot{M}(D_{i,i})^k = \Delta \tilde{O}_m^k D_{i,i} + \Delta Y_m^k D_{i,i}; \quad (k = 1, K, r). \quad (9)$$

В результате получим систему шести нелинейных алгебраических уравнений относительно шести неизвестных:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^n D_i / n &= (P_1 \Delta X_m + P_2 \Delta Y_m) + \sigma_i^2; \\ \sum_{i=1}^n D_i^2 / n &= (P_1 \Delta \tilde{O}_m^2 + P_2 \Delta Y_m^2) + 2(P_1 \Delta X_m + P_2 \Delta Y_m) \sigma_i^2 + (\sigma_i^4 + \bar{D}_i); \\ \sum_{i=1}^n D_i^3 / n &= (P_1 \Delta \tilde{O}_m^3 + P_2 \Delta Y_m^3) + 3(P_1 \Delta \tilde{O}_m^2 + P_2 \Delta Y_m^2) \sigma_i^2 + 3(P_1 \Delta X_m + P_2 \Delta Y_m) (\sigma_i^4 + \bar{D}_i) + (3\sigma_i^2 \bar{D}_i + \sigma_i^6); \\ \sum_{i=1}^n D_i^4 / n &= (P_1 \Delta \tilde{O}_m^4 + P_2 \Delta Y_m^4) + 4(P_1 \Delta \tilde{O}_m^3 + P_2 \Delta Y_m^3) \sigma_i^2 + 6(P_1 \Delta \tilde{O}_m^2 + P_2 \Delta Y_m^2) (\sigma_i^4 + \bar{D}_i) + \\ &+ 4(P_1 \Delta X_m + P_2 \Delta Y_m) (3\sigma_i^2 \bar{D}_i + \sigma_i^6) + (3\bar{D}_i^2 + 6\bar{D}_i \sigma_i^4 + \sigma_i^8); \\ \sum_{i=1}^n D_i^5 / n &= (P_1 \Delta \tilde{O}_m^5 + P_2 \Delta Y_m^5) + 5(P_1 \Delta \tilde{O}_m^4 + P_2 \Delta Y_m^4) \sigma_i^2 + 10(P_1 \Delta \tilde{O}_m^3 + P_2 \Delta Y_m^3) (\sigma_i^4 + \bar{D}_i) + \\ &+ 10(P_1 \Delta \tilde{O}_m^2 + P_2 \Delta Y_m^2) (3\sigma_i^2 \bar{D}_i + \sigma_i^6) + 5(P_1 \Delta X_m + P_2 \Delta Y_m) (3\bar{D}_i^2 + 6\bar{D}_i \sigma_i^4 + \sigma_i^8) + \\ &+ (15\bar{D}_i^2 \sigma_i^2 + 10\bar{D}_i \sigma_i^6 + \sigma_i^{10}); \\ \sum_{i=1}^n D_i^6 / n &= (P_1 \Delta \tilde{O}_m^6 + P_2 \Delta Y_m^6) + 6(P_1 \Delta \tilde{O}_m^5 + P_2 \Delta Y_m^5) \sigma_i^2 + 15(P_1 \Delta \tilde{O}_m^4 + P_2 \Delta Y_m^4) (\sigma_i^4 + \bar{D}_i) + \\ &+ 20(P_1 \Delta \tilde{O}_m^3 + P_2 \Delta Y_m^3) (3\sigma_i^2 \bar{D}_i + \sigma_i^6) + 15(P_1 \Delta \tilde{O}_m^2 + P_2 \Delta Y_m^2) (3\bar{D}_i^2 + 6\bar{D}_i \sigma_i^4 + \sigma_i^8) + \\ &+ 6(P_1 \Delta X_m + P_2 \Delta Y_m) (15\bar{D}_i^2 \sigma_i^2 + 10\bar{D}_i \sigma_i^6 + \sigma_i^{10}) + (15\bar{D}_i^3 + 45\bar{D}_i^2 \sigma_i^4 + 15\bar{D}_i \sigma_i^8 + \sigma_i^{12}). \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Систему нелинейных алгебраических уравнений (10) решаем с помощью метода Ньютона-Рафсона-Канторовича, в частности методом градиентной релаксации [5]. При $r = 6$ используем классический метод, а при $r > 6$ — метод наименьших квадратов [5].

Поскольку данные статистической отчетности не учитывают занижение средних значений прихода \bar{X} и распределения \bar{Y} , то общий средний дисбаланс расхода газа $\bar{\beta}_0$ будет равен:

$$\bar{\beta}_0 = \begin{cases} \bar{D} + |\bar{D}_x|, & \text{якщо } |\bar{D}_x| > \bar{D}_y; \\ \bar{D} + \bar{D}_y, & \text{якщо } \bar{D}_y > |\bar{D}_x|. \end{cases} \quad (11)$$

Поиск решение системы уравнений (10), составленной для КС, выполнялся с использованием функций пакета MathCad, позволяющих находить точное или приближенное решение системы уравнений при задании начальных условий. Результаты решения уравнений (10) представлены в табл. 2. Вычисление $\bar{\beta}$ приведено раздельно в летний и зимний периоды ($n = 128$). На основе полученных данных были рассчитаны математические ожидания и дисперсии периодического и Гауссова процессов (табл. 2). Установлено, что по экспортному газопроводу в зимний и летний периоды $K(X_i, Y_i) = 0.998$ и $\bar{\beta} = 0.21\%$, Гауссовский закон распределения D_i не нарушается, а дисбаланс характеризует естественные потери газа.

Таблица 2 - Результаты решения системы уравнений (10) для УМГ «Киевтрансгаз» в зимний период (КС) в процентном отношении к среднему \bar{X}

P_x	P_y	$\Delta X, \%$	$\Delta Y, \%$	m_x	m_y
0.156	0.258	-5.321	7.475	19.957	33.011
$\bar{D}, \%$	$\sigma, \%$	$\bar{D}_i, \%$	$\sigma_i, \%$	$\bar{D}_i, \%$	$\sigma_i^2, \%$
0.4085	4.365	0.615	1.712	-0.207	3.996

По киевской системе Гауссовский закон распределения D_i нарушается, и в зимний и летний периоды параметры соответственно равны: $K(X_i, Y_i) = 0.835$, $\bar{\beta} = 0.44\%$ и $K(X_i, Y_i) = 0.960$, $\bar{\beta} = -0.24\%$. Вычисление заниженных значений прихода и распределения показало, что $|\bar{D}_x| > \bar{D}_y$, и в зимний и летний периоды соответственно равно $|\bar{D}_x| = 1.42\%$ и $|\bar{D}_x| = 0.86\%$, а общие средние разбалансы $\bar{\beta}_0$ в зимний и летний периоды соответственно равны: $\bar{\beta}_0 = 1.85\%$ и $\bar{\beta}_0 = 0.62\%$.

Выводы. Приведенные значения дисбалансов газа КС УМГ «Киевтрансгаз» не превышают погрешности измерительных приборов [1], однако дают дополнительные средние значения дисбаланса и нарушают Гауссовский закон распределения временных рядов D_i . Корректируемые измерения расхода обусловлены занижением прихода и распределения в пределах систематической погрешности измерительных приборов, а статистические данные отчетности несколько искажены.

Перспективы дальнейших исследований. Разработанную модель дисбаланса для повышения точности необходимо скорректировать путем исключения трендов прихода и распределения, связанных с сезонной неравномерностью. Кроме того, дополнительно провести оценку влияния изменения запаса газа α_i на дисбаланс с применением коэффициентов корреляции и относительных дисперсий, над чем в настоящее время авторы статьи работают.

Литература.

1. Андрійшин М.П. і др. Вимірювання витрати та кількості газу: Довідник. — Івано-Франківськ: ПП. «Сімик», 2004. — 160с.: іл.
2. Ігуменцев Є.О., Марчук Я.С., Андрійшин М.П. Виявлення перетоків газу в запірної арматурі КС за реєстрацією вібраційного сигналу. — Нафтова і газова промисловість. — № 2. — 2003 р. — С. 13-18.
3. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. — М.: Наука, 1974. — 832с., ил.
4. Бендат Дж., Пирсон А. Применение корреляционного и спектрального анализа / Пер. с англ. — М.: Мир, 1983. — 312с.
5. Дьяконов В. Mathcad 8/2000. Специальный справочник. — СПб.: Изд-во «Питер», 2000. — 592с.