

УДК [519.95 + 518.5]: 622.692.4

А. Д. Тевяшев, К. В. Кобылинский

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ КРИМИНАЛЬНЫХ ОТБОРОВ ИЗ ПРОДУКТОПРОВОДОВ

1. Введение

Криминальные отборы углеводородного сырья из продуктопроводов (ПП) являются одной из постоянных проблем, стоящих перед трубопроводными компаниями. Криминальные отборы, кроме прямых экономических потерь, на порядки увеличивают и риски экологических катастроф, связанных с разливом углеводородного сырья, взрывами и пожарами.

В настоящее время все трубопроводные компании имеют собственные службы безопасности, обеспечивающие сохранность как самих трубопроводных систем, так и целевых продуктов (ЦП), транспортируемых по этим системам. Каждая компания применяет свои собственные модели оценки риска криминальных отборов и определяет приемлемый для нее уровень риска, в зависимости от которого формируется структура, состав и степень технической оснащенности ее службы безопасности в условиях ограничения как технических, так и финансовых ресурсов. Наличие мобильных и хорошо оснащенных служб безопасности является необходимым, но не достаточным условием для успешной борьбы с криминальными отборами.

Для эффективной работы служб безопасности они должны обеспечиваться оперативной и достоверной информацией о факте обнаружения криминального отбора, его интенсивности, времени начала и местоположении на трассе ПП. Обеспечение этой информацией возможно за счет включения в состав информационно-аналитических систем управления режимами транспорта и распределения ЦП в трубопроводных системах модуля интеллектуальной системы обнаружения криминальных отборов (ИСОКО). Необходимость в ИСОКО, в отличие от систем обнаружения утечек ЦП из ПП, предопределена ее целевым назначением — интеллектуальным противодействием криминальным группам в сокрытии факта, интенсивности, времени и места отбора ЦП из ПП. Это противодействие обусловлено использованием криминальными группами множества различных стратегий отбора: от простейших — максимального отбора в течение всего времени, необходимого для заполнения имеющейся емкости путем полного открытия вентиля, через который осуществляется отбор на фоне квазистационарного режима, до комбинированных стратегий — последовательного увеличения/уменьшения отборов с малыми приращениями на фоне существенно нестационарных режимов, вызванных включением/выключением насосных агрегатов (НА), переключением резервуаров (Р) на входе/выходе ПП, значительными изменениями оборотов приводов НА на насосных станциях (НС).

В силу указанных обстоятельств разработка ИСОКО является чрезвычайно актуальной.

2. Структура и параметры продуктопровода

Разработанная ИСОКО обеспечивает эффективную работу на ПП, характеризующихся следующими параметрами:

- длина ПП не ограничена;
- структура ПП — древовидная, однониточная;
- количество НС на ПП не ограничено;
- количество НА, установленных на каждой из НС — до 5;
- количество замерных узлов (ЗУ) на ПП не ограничено;
- расстояния между соседними ЗУ — от 10 до 50 км;
- измеряемые параметры в каждом ЗУ — избыточное давление, массовый расход, плотность и температура ЦП;
- цикл измерения физических параметров ЦП в каждом ЗУ — 1 с;
- величина рассинхронизации данных, поступающих из ЗУ, — не более 1 с.

В основу ИСОКО положены интеллектуальные алгоритмы автоматической обработки, анализа и принятия решений по оперативным данным, поступающим из ЗУ ПП. В состав этих алгоритмов входят следующие процедуры:

- проверка результатов измерений физических параметров ЦП в ЗУ на достоверность;
- заполнение пропусков в результатах измерений физических параметров ЦП;
- фильтрация результатов измерений физических параметров ЦП;
- оценивание и компенсация систематических ошибок результатов измерений массового расхода и плотности ЦП;
- проверка гипотезы и принятие решения о квазистационарности режима ПП;
- методы обнаружения утечек:
 - а) статического баланса;
 - б) динамического баланса;
 - в) знаков приращений расходов;
 - г) знаков приращений давлений;
- проверка сложных гипотез и принятие решения о наличии утечек;
- методы определения времени возникновения утечки и локализации ее местоположения:
 - а) отношения правдоподобия;
 - б) разности между временем прихода фронтов волн возмущений в ЗУ по и против направления движения ЦП;
 - в) максимального правдоподобия.

3. Анализ режимов работы продуктопроводов

Анализ фактических режимов работы продуктопроводов позволяет разделить их на два класса: квазистационарные и существенно нестационарные режимы.

На практике стационарные режимы практически не встречаются из-за наличия ряда возмущающих факторов, которые оказывают постоянное влияние на режим работы ПП. Основными такими факторами являются: опорожнение резервуара в начале ПП, наполнение резервуара в конце ПП, переключение резервуаров, поступление в продуктопровод ЦП с различным химическим составом. При перечисленных возмущениях режим работы ПП можно считать квазистационарным, т. к. данные возмущения малы и не оказывают существенного влияния на его режим работы.

Причиной возникновения существенно нестационарных режимов работы продуктопроводов являются пуски и остановки НА на НС, значительные изменения положения регулирующих задвижек и оборотов приводов НА, аварийные утечки и криминальные отборы.

В момент возникновения криминального отбора из продуктопровода происходит резкое возмущение движения ЦП по ПП. При этом в месте отбора происходит изменение значений параметров ЦП: расхода, давления и температуры. Волны изменения расхода и давления распространяются в обе стороны от места отбора со скоростью, примерно равной скорости звука в рассматриваемом ЦП. Причем значение расхода ЦП в ЗУ до места отбора возрастает, а в ЗУ после отбора уменьшается, в то же время значение давления во всех ЗУ падает. Изменение температуры при криминальном отборе повторяет характер изменения расхода — в ЗУ до места отбора температура ЦП возрастает, а в ЗУ после отбора падает, но эти изменения пропорциональны величине изменения скорости потока ЦП, носят несущественный характер и проходят со значительной временной задержкой. Поэтому такие изменения температуры ЦП в ЗУ не могут служить основой для оперативного принятия решений о наличии криминального отбора.

Если величина отбора постоянная, то распространяющиеся по трубопроводу волны возмущения в течение некоторого времени постепенно затухают и устанавливается новый квазистационарный режим с криминальным отбором.

4. Моделирование режимов работы магистрального продуктопровода

Разработанная ИСОКО предназначена для магистральных ПП линейной одноиточной структуры. Предполагается, что в общем случае магистральный ПП включает в себя ряд НС: одну головную — в начале ПП, остальные промежуточные — вдоль трассы ПП. Расстояние между соседними НС может составлять от нескольких десятков до сотни километров. ИСОКО может контролировать режимы

транспорта ЦП по всему ПП в целом или отдельно по каждому участку ПП между соседними ЗУ.

При разработке математических моделей квазистационарных и существенно нестационарных неизоэнергетических режимов транспорта ЦП по магистральному ПП необходимо учитывать влияние следующих факторов:

- неоднородность плотности ЦП вдоль трассы ПП, обусловленную различным химическим составом ЦП, поступающего в ПП из различных резервуаров;
- сжимаемость и расширяемость ЦП, обусловленные влиянием на него давления и температуры;
- изменение геометрических размеров трубопровода (длины и диаметра), обусловленные влиянием давления и температуры ЦП вдоль трассы ПП.

4.1. Математическая модель установившегося потокораспределения в магистральном продуктопроводе

Математическая модель установившегося потокораспределения (УПР) в магистральном ПП включает в себя математические модели структуры ПП и его технологических элементов: насосных агрегатов (НА), участков трубопровода (УТ), регулирующих задвижек (РЗ), отсекающих задвижек (ОЗ) и обратных клапанов (ОК).

Математическая модель структуры ПП. Технологическая структура ПП рассматривается в виде связанного ориентированного графа с множеством V вершин, которым отвечают узлы сети, и множеством E дуг, которым отвечают технологические элементы. К технологическим элементам относятся: насосные агрегаты (множество L), участки трубопровода (множество P), регулирующие задвижки (множество R), отсекающие задвижки (множество Z), обратные клапаны (множество KL). Полученный граф дополняется «нулевой» вершиной и рядом фиктивных дуг, часть из которых соединяют «нулевую» вершину со входами ПП (множество I), а остальные фиктивные дуги соединяют выходы ПП с «нулевой» вершиной (множество O). Перенумеруем все дуги графа сети. Тогда множество номеров всех дуг графа можно представить в виде объединения следующих взаимно непересекающихся множеств:

$$E = I \cup L \cup P \cup R \cup Z \cup KL \cup O.$$

Произведем выбор дерева графа. Множества номеров дуг, соответствующих ветвям дерева, обозначим индексом 1, а соответствующих хордам — индексом 2. В этом случае имеем:

$$E = E_1 \cup E_2.$$

Математическая модель структуры УПР в магистральном ПП. Для выбранного дерева графа математическая модель структуры УПР в магистральном ПП может быть описана системой уравнений, соответствующей первому и второму законам Кирхгофа [1], и может быть представлена в следующем виде:

$$W_i = \sum_{r \in E_2} b_{ir} W_r, \quad i \in E_1, \quad (4.1)$$

$$\Delta P_r = \sum_{i \in E_1} b_{ir} \Delta P_i, \quad r \in E_2, \quad (4.2)$$

где $b_{ir} \in \{-1; 0; 1\}$ ($i \in E_1, r \in E_2$) — элемент матрицы B_1 , с помощью которой описывается граф с выбранным на нем деревом; W_j — массовый расход на элементе $j \in E$; ΔP_j — разность давлений на входе и на выходе элемента $j \in E$, причем

$$\Delta P_j = \Delta P_j(W_j), \quad j \in L \cup P \cup R \cup Z \cup KL. \quad (4.3)$$

Зависимость (4.3) определяется математической моделью УПР на соответствующем технологическом элементе.

Математическая модель насосного агрегата:

$$\Delta P_j(W_j) = a_{0j} + a_{1j} \cdot \left(\frac{W_j}{\rho} \right) + a_{2j} \cdot \left(\frac{W_j}{\rho} \right)^2, \quad j \in L, \quad (4.4)$$

где a_{0j}, a_{1j}, a_{2j} — коэффициенты квадратичной аппроксимации напорной характеристики j -го НА [2].

Математическая модель участка трубопровода:

$$\Delta P_j(W_j) = \frac{8L_j \lambda_j}{8\pi^2 d_j^5 \rho E_j^2} \cdot W_j \cdot |W_j| + \rho g \Delta z_j, \quad j \in P. \quad (4.5)$$

где L_j — длина j -го УТ, м; d_j — внутренний диаметр трубопровода, м; E_j — коэффициент эффективности; λ_j — коэффициент гидравлического трения; Δz_j — разность геодезических отметок начала и конца j -го УТ. Для расчета значения коэффициента λ_j А. Д. Альтшулем была предложена следующая полуэмпирическая формула:

$$\lambda_j = 0,11 \left(\frac{k_{sj}}{d_j} + \frac{68\nu}{v_j d_j} \right)^{0,25},$$

где k_{sj} — эквивалентная шероховатость стенок труб, м; v_j — скорость потока, м/с; ν — кинематическая вязкость ЦП, м²/с.

Математическая модель регулирующей задвижки:

$$\Delta P_j(W_j) = \frac{c_{P3j}}{E_{P3j}^2} \cdot W_j \cdot |W_j|, \quad j \in R, \quad (4.6)$$

где c_{P3j} — эквивалентное гидравлическое сопротивление j -й РЗ, находящейся в положении «открыто»; $E_{P3j} \in [0, 1]$ — степень открытия РЗ, определяемая положением штока РЗ или углом поворота перекрывающего клапана, причем $E_{P3j} = 1$ в положении «открыто», $E_{P3j} \rightarrow 0$ в положении «закрыто».

Математическая модель отсекающей задвижки:

$$\Delta P_j(W_j) = \frac{c_{O3j}}{E_{O3j}^2} \cdot W_j \cdot |W_j|, \quad j \in Z, \quad (4.7)$$

где c_{O3j} — эквивалентное гидравлическое сопротивление j -й ОЗ в открытом состоянии; E_{O3j} — степень открытия ОЗ, причем $E_{O3j} = 1$ в положении «открыто», $E_{O3j} \rightarrow 0$ в положении «закрыто».

Математическая модель УПР на обратном клапане:

$$\Delta P_j(W_j) = \frac{c_{OKj}}{E_{OKj}^2} \cdot W_j \cdot |W_j|, \quad j \in KL, \quad (4.8)$$

где c_{OKj} — эквивалентное гидравлическое сопротивление j -го ОК в открытом состоянии; $E_{OKj}(W_j)$ — степень открытия ОК, причем $E_{OKj}(W_j) = 1$ при $W_j \geq 0$, $E_{OKj}(W_j) \rightarrow 0$ при $W_j < 0$.

Таким образом, математическая модель УПР в магистральном ПП включает в себя две системы алгебраических уравнений для первого и второго законов Кирхгофа (4.1), (4.2) и уравнения математических моделей УПР на технологических элементах ПП (4.4)–(4.8). Моделирование УПР в магистральном ПП заключается в решении системы нелинейных алгебраических уравнений, входящих в математическую модель УПР в магистральном ПП, одним из численных методов.

Это классический подход к моделированию стационарного или установившегося потокораспределения в магистральных ПП. Однако, как уже отмечалось в предыдущем разделе, на практике стационарные режимы практически не встречаются. Поэтому модель УПР в магистральном ПП должна быть обобщена на случай существенно нестационарных неизотермических режимов (ННР). При построении такой модели предполагается, что основными инерционными элементами в магистральном ПП являются участки трубопровода протяженностью более одного километра, а это означает, что инерционностью процессов в НС, включающей в себя участки трубопровода до десятков метров, можно пренебречь. Это позволяет строить математическую модель существенно нестационарных неизотермических режимов (ММСННР) в виде двух взаимосвязанных классов моделей — модели УПР для НС и ММСННР для всех участков ПП между ЗУ.

4.2. Математическая модель существенно нестационарных неизотермических режимов транспорта ЦП по участку магистрального ПП

Пусть $\{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ — координаты ЗУ магистрального ПП. Рассмотрим участок ПП между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ. Основными предпосылками при построении ММСННР транспорта ЦП по участку ПП являются три закона:

- закон сохранения количества движения [3]:

$$\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\lambda}{2d_0} \rho v^2 + \rho g \frac{dz}{dx} = 0;$$

- закон сохранения массы [3]:

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v S)}{\partial x} = 0;$$

- закон сохранения энергии [4]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\pi d_0 K}{\rho S C_p} (T - T_{cp}) - \frac{v}{C_p} \frac{dz}{dx} = 0,$$

где $x \in [X_n, X_{n+1}]$ — пространственная переменная, м; $t \in [t_1, t_2]$ — переменная времени, с; $P = P(x, t)$ — среднее по сечению давление, Па; $\rho = \rho(x, t)$ — средняя по сечению плотность ЦП, кг/м³; $v = v(x, t)$ — средняя по сечению скорость потока, м/с; $T = T(x, t)$ — температура ЦП, °C; $S = S(x, t)$ — площадь поперечного сечения участка трубопровода, м²; $d_0 = d_0(x)$ — внутренний диаметр участка трубопровода, м; λ — коэффициент гидравлического сопротивления, который рассчитывается по формуле Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{k_s}{d_0} + \frac{68 \nu}{v d} \right)^{0,25}$$

k_s — эквивалентная шероховатость стенок труб, м; ν — кинематическая вязкость ЦП, м²/с; $g = 9,81$ м/с² — ускорение свободного падения; $z = z(x)$ — геодезическая отметка в точке x , м; K — коэффициент теплопередачи от ЦП к грунту, Вт/(м² · °C); C_p — удельная теплоемкость ЦП, Дж/(кг · °C); $T_{гр}$ — температура грунта, °C.

При определении параметров ПП в реальных условиях необходимо учитывать продольные и поперечные деформации участка трубопровода, обусловленные влиянием давления и температуры транспортируемого ЦП. В этом случае площадь внутреннего сечения участка трубопровода в точке x в момент времени t должна рассчитываться по формуле [4]:

$$S = k_S \cdot S_0,$$

где $k_S = 1 + \frac{d_0}{E_{10} \delta} \cdot (P - P_0) + 2\alpha_L \cdot (T - T_0)$;

$k_S = k_S(x, t)$ — коэффициент поперечного расширения участка трубопровода; $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, $T_0 = 20$ °C — давление и температура в стандартных условиях; $S_0 = S_0(x)$ — площадь внутреннего сечения участка трубопровода в точке x в стандартных условиях, причем $S_0 = \pi d_0^2 / 4$; $E_{10} = E_{10}(x)$ — модуль Юнга материала стенок участка трубопровода в точке x , Па; $\alpha_L = \alpha_L(x)$ — коэффициент линейного (температурного) расширения материала стенок участка трубопровода в точке x , 1/°C.

ЦП также обладает свойством сжимаемости и расширяемости, которое обусловлено влиянием давления и температуры, что выражается следующей формулой изменения его плотности [4]:

$$\rho = k_p \cdot \rho_0, \quad (4.9)$$

где $k_p = 1 + \frac{1}{K_{ЦП}} \cdot (P - P_0) - \xi_{ЦП} \cdot (T - T_0)$;

$k_p = k_p(x, t)$ — коэффициент сжатия ЦП; $\rho_0 = \rho_0(x, t)$ — приведенная (к стандартным условиям) плотность ЦП; $K_{ЦП}$ — модуль упругости ЦП, Па; $\xi_{ЦП}$ — коэффициент объемного (температурного) расширения ЦП, 1/°C.

При магистральном транспорте неоднородных ЦП необходимо учитывать процессы продольного размытия фронтов ЦП с различной плотностью. Уравнение продольного перемешивания ЦП на границе фронтов, записанное для приведенной плотности ЦП в точке x участка трубопровода в момент времени t , имеет следующий вид [4]:

$$\frac{\partial \rho_0}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial \rho_0}{\partial x} + K_{пр} \frac{\partial^2 \rho_0}{\partial x^2} = 0,$$

где $K_{пр}$ — эффективный коэффициент продольного перемешивания, значение которого оценивается экспериментально или приближенно рассчитывается по формуле [4]:

$$K_{пр} = 1,785 \cdot \sqrt{\lambda} \cdot v \cdot d_0.$$

С учетом уравнений сжимаемости и расширяемости ЦП, после соответствующих преобразований уравнений, получим ММСНПР транспорта ЦП на участке трубопровода в виде следующей системы дифференциальных уравнений в частных производных:

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\rho_0}{S_0 k_S} \cdot \frac{\partial Q_0}{\partial t} + \frac{0,5 \lambda \rho_0 Q_0^2}{d_0 k_p S_0^2 k_S^2 E^2} + \rho_0 k_p g \frac{\partial z}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{S_0} \cdot \left(\frac{d_0}{E_{10} \delta} + \frac{1}{K_{ЦП}} \right)^{-1} \cdot \frac{\partial Q_0}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial T}{\partial t} + \frac{Q_0}{S_0} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{(T - T_{гр}) 4K}{\rho_0 k_p d_0 C_p} - \frac{Q_0}{S_0 C_p} \cdot \frac{\partial z}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial \rho_0}{\partial t} + \frac{Q_0}{S_0} \cdot \frac{\partial \rho_0}{\partial x} + 1,785 \sqrt{\lambda} d_0 \cdot \frac{Q_0}{S_0} \cdot \frac{\partial^2 \rho_0}{\partial x^2} = 0, \end{cases} \quad (4.10)$$

$$x \in [X_n, X_{n+1}], t \in [t_1, t_2]$$

где E — коэффициент эффективности участка трубопровода (оценивается по экспериментальным данным); $Q_0 = Q_0(x, t)$ — приведенный к стандартным условиям объемный расход ЦП, причем

$$Q_0 = \frac{W}{\rho_0}, \quad (4.11)$$

Моделирование существенно нестационарных неизоэнтальпических режимов транспорта ЦП на участке ПП между n -м и $(n + 1)$ -м ЗУ заключается в численном решении краевой задачи, включающей в себя:

- систему дифференциальных уравнений (4.10) относительно неизвестных функций $P(x, t)$, $Q_0(x, t)$, $T(x, t)$ и $\rho_0(x, t)$;
- начальные условия, т. е. профили давления, расхода, температуры и приведенной плотности в начальный момент времени t_1 :

$$P(x, t_1) = P^{(нач)}(x), \quad Q_0(x, t_1) = Q_0^{(нач)}(x),$$

$$T(x, t_1) = T^{(нач)}(x), \quad \rho_0(x, t_1) = \rho_0^{(нач)}(x), \quad (4.12)$$

$$x \in [X_n, X_{n+1}]$$

где $P^{(нач)}(x)$, $Q_0^{(нач)}(x)$, $T^{(нач)}(x)$, $\rho_0^{(нач)}(x)$ — заданные функции;

- граничные условия, состоящие из условий в начальной точке участка:

$$\begin{aligned} P(X_n, t) &= P_n(t), \quad T(X_n, t) = T_n(t), \\ \rho_0(X_n, t) &= \rho_{0n}(t), \quad t \in [t_1, t_2], \end{aligned} \quad (4.13)$$

и в конечной точке участка:

$$Q_0(X_{n+1}, t) = Q_{0n+1}(t), \quad t \in [t_1, t_2], \quad (4.14)$$

где $P_n(t)$, $T_n(t)$, $\rho_{0n}(t)$, $Q_{0n+1}(t)$ — заданные функции.

Для решения краевой задачи (4.10), (4.12)–(4.14) используется конечно-разностная аппроксимация частных производных на основе неявной схемы [5]. Поиск решения полученной системы нелинейных уравнений осуществляется численным методом. Решением задачи являются функции оценки давления $\hat{P}(x, t)$, расхода $\hat{Q}_0(x, t)$, температуры $\hat{T}(x, t)$ и приведенной плотности $\hat{\rho}_0(x, t)$ при $x \in [X_n, X_{n+1}]$, $t \in [t_1, t_2]$.

4.3. Математическая модель квазистационарных пензотермических режимов (ММКСНР) транспорта ЦП по участку магистрального ПП

При квазистационарном режиме работы ПП уравнения математической модели можно упростить за счет того, что производные по времени обращаются в ноль. В этом случае из (4.10) для участка трубопровода постоянного диаметра между n -м ЗУ и $(n+1)$ -м ЗУ для произвольных точек и получим:

$$\begin{cases} P_{x_1} - P_{x_2} = \frac{(x_1 - x_2) \lambda \rho_{0x_1x_2}^{(ср)} Q_{0x_1}^2}{2E^2 k_{Sx_1x_2}^{(ср)^2} k_{px_1x_2}^{(ср)^2} d_0 S_0^2} + \\ + \rho_{0x_1x_2}^{(ср)} k_{px_1x_2}^{(ср)} g \cdot (z(x_2) - z(x_1)), \\ Q_{0x_1} = Q_{0x_2}, \\ \frac{T_{x_2} - T_{гр}}{T_{x_1} - T_{гр}} = \exp \left(\frac{(x_1 - x_2) \pi d_0 K}{\rho_{0x_1x_2}^{(ср)} k_{px_1x_2}^{(ср)} C_p Q_{0x_1}} \right), \\ \rho_{0x_1x_2}^{(ср)} = 0,5 \cdot (\rho_{0x_1} + \rho_{0x_2}), \end{cases} \quad (4.15)$$

$$\forall x_1, x_2 \in [X_n, X_{n+1}]: x_1 < x_2,$$

$$\text{где } k_{Sx_1x_2}^{(ср)} = \frac{1}{2} \cdot (k_S(P_{x_1}, T_{x_1}) + k_S(P_{x_2}, T_{x_2})),$$

$k_{px_1x_2}^{(ср)} = \frac{1}{2} \cdot (k_p(P_{x_1}, T_{x_1}) + k_p(P_{x_2}, T_{x_2}))$ — средние значения соответствующих коэффициентов; P_x , Q_{0x} , T_x , ρ_{0x} — соответственно давление, расход, температура и приведенная плотность в заданной точке x , т. е. x_1 или x_2 .

Запишем (4.15) для n -го и $(n+1)$ -го ЗУ:

$$\begin{cases} P_n - P_{n+1} = \frac{(X_{n+1} - X_n) \lambda \rho_{0n,n+1}^{(ср)} Q_{0n}^2}{2E^2 k_{Sn,n+1}^{(ср)^2} k_{pn,n+1}^{(ср)^2} d_0 S_0^2} + \\ + \rho_{0n,n+1}^{(ср)} k_{pn,n+1}^{(ср)} g \cdot (z(x_2) - z(x_1)), \\ Q_{0n} = Q_{0n+1}, \\ \frac{T_{n+1} - T_{гр}}{T_n - T_{гр}} = \exp \left(\frac{(X_{n+1} - X_n) \pi d_0 K}{\rho_{0n,n+1}^{(ср)} k_{pn,n+1}^{(ср)} C_p Q_{0n}} \right), \\ \rho_{0n,n+1}^{(ср)} = 0,5 \cdot (\rho_{0n} + \rho_{0n+1}), \end{cases} \quad (4.16)$$

где $k_{Sn,n+1}^{(ср)} = \frac{1}{2} \cdot (k_S(P_n, T_n) + k_S(P_{n+1}, T_{n+1}))$, $k_{pn,n+1}^{(ср)} = \frac{1}{2} \cdot (k_p(P_n, T_n) + k_p(P_{n+1}, T_{n+1}))$; P_n , Q_{0n} , T_n , ρ_{0n} — соответственно давление, расход, температура и приведенная плотность ЦП в n -м ЗУ; P_{n+1} , Q_{0n+1} , T_{n+1} , ρ_{0n+1} — соответственно давление, расход, температура и приведенная плотность ЦП в $(n+1)$ -м ЗУ.

4.4. Проверка квазистационарности режима магистрального продуктопровода

Для оценивания степени связи стационарности изменений физических параметров в некоторой точке магистрального ПП достаточно исследовать поведение массового расхода, так как любое существенное изменение давления, плотности или температуры на входах или выходах магистрального ПП приводит к существенному изменению массового расхода.

Для проверки квазистационарности режима работы магистрального ПП будем использовать метод отношения правдоподобия, предназначенный для выявления скачка в поведении процесса [6]:

$$\max_{1 \leq r \leq K} S_n^{(r,K)}(\hat{W}_n^0, \hat{\nu}_n(r)) < \beta_n, \quad (4.17)$$

где

$$S_n^{(r,K)}(\hat{W}_n^0, \hat{\nu}_n) = \nu_n \cdot \sum_{k=r}^K \left(\tilde{W}_n(t_k) - \hat{W}_n^0 - \frac{\nu_n}{2} \right);$$

$$\hat{\nu}_n(r) = \frac{1}{K-r+1} \cdot \sum_{k=r}^K \left(\tilde{W}_n(t_k) - \hat{W}_n^0 \right);$$

$\tilde{W}_n(t_k)$ — результат измерения массового расхода в n -м ЗУ в момент времени t_k ; $\hat{W}_n^0$ — оценка среднего значения процесса до начального момента времени t_1 ; β_n — некоторое пороговое значение критерия, численное значение которого получается в результате обучения (настройки) ИСОКО.

Численное значение параметра, при котором выражение (4.17) достигает максимума, соответствует моменту времени t_n прихода фронта волны возмущения на n -й ЗУ. Считаем, что режим является квазистационарным на участке магистрального ПП между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ, если условия квазистационарности (4.17) выполняются в n -м и $(n+1)$ -м ЗУ.

5. Оценивание параметров ММСНП и ММСНП

На практике в режиме on-line или off-line экспериментально оценивается коэффициент эффективности E и коэффициент теплопередачи K для участка ПП между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ. Если в момент времени t выполняется условие квазистационарности в n -м и $(n+1)$ -м ЗУ (п. 4.4), то при отсутствии отборов ЦП оценки коэффициента эффективности и коэффициента теплопередачи рассчитываются, соответственно, по формулам, вытекающим из (4.16):

$$\hat{E}^2 = \frac{((\hat{Q}_{0n}^t + \hat{Q}_{0n+1}^t) / 2)^2}{\hat{P}_n^t - \hat{P}_{n+1}^t - \hat{\rho}_0^{(cp)} \hat{k}_p^{(cp)} g \cdot (z(X_{n+1}) - z(X_n))} \times \frac{(X_{n+1} - X_n) \lambda \hat{\rho}_0^{(cp)}}{2 \hat{k}_s^{(cp)^2} \hat{k}_p^{(cp)} d_0 S_0^2},$$

$$\hat{K} = \frac{\hat{\rho}_0^{(cp)} \hat{k}_p^{(cp)} C_p \cdot ((\hat{Q}_{0n}^t + \hat{Q}_{0n+1}^t) / 2)^2}{(X_{n+1} - X_n) \pi d_0} \cdot \ln \frac{\tilde{T}_{n+1}^t - T_{гр}}{\tilde{T}_n^t - T_{гр}},$$

где $\hat{P}_n^t, \hat{P}_{n+1}^t$ — результаты измерений давления в момент времени t в n -м и $(n+1)$ -м ЗУ; $\tilde{T}_n^t, \tilde{T}_{n+1}^t$ — результаты измерений температуры в момент времени t в n -м и $(n+1)$ -м ЗУ; $\hat{Q}_{0n}^t, \hat{Q}_{0n+1}^t$ — оценки приведенного объемного расхода в момент времени t в n -м и $(n+1)$ -м ЗУ, рассчитанные на основе результатов прямых измерений; $\hat{\rho}_0^{(cp)}, \hat{k}_s^{(cp)}, \hat{k}_p^{(cp)}$ — оценки средних значений, соответственно, приведенной плотности, коэффициента сжатия ЦП и коэффициента поперечного расширения трубопровода для данного участка ПП, рассчитанные на основе результатов прямых измерений.

6. Предварительная обработка оперативных данных

6.1. Проверка оперативных данных на достоверность

Анализ на достоверность информации, переданной из ЗУ системой сбора данных в виде флага:

- 0 — измеренное значение достоверно;
- 1 — измеренное значение не достоверно.

Область допустимых значений для каждого измерения:

$$X_{\min} < \tilde{X}_n^t < X_{\max},$$

где $\tilde{X}_n^t$ — измеренное значение с n -го ЗУ в момент времени t ; $X_{\min}$ — минимальное значение, которое может принимать $\tilde{X}_n^t$; $X_{\max}$ — максимальное значение, которое может принимать $\tilde{X}_n^t$.

Скорость изменения измеренного значения:

$$v_{\min} < |\tilde{X}_n^t - \tilde{X}_{n-1}^{t-1}| < v_{\max},$$

где $v_{\min}$ — минимальное значение скорости изменения, $v_{\max}$ — максимальное значение скорости изменения.

6.2. Восстановление пропусков в оперативных данных

Пусть пропуск данных в n -м ЗУ составляет измерений. Предполагаем, что до и после пропуска име-

ется по n значений измеренных данных: до пропуска — $(\tilde{x}_{i-n+1}, \tilde{x}_{i-n}, \dots, \tilde{x}_i)$ и после пропуска — $(\tilde{x}_{i+k+1}, \tilde{x}_{i+k+2}, \dots, \tilde{x}_{i+k+n})$.

Введем обозначения:

$$\bar{x}^+ = \sum_{r=i+k+1}^{i+k+n} \tilde{x}_r, \quad \bar{x}^- = \sum_{r=i-k+1}^i \tilde{x}_r.$$

Тогда каждое из k пропущенных измерений рассчитаем по формуле:

$$\tilde{x}_j = \frac{\bar{x}^+ - \bar{x}^-}{k} \cdot j + \bar{x}^-, \quad j = \overline{1, k}.$$

Восстановление пропуска в оперативных данных в каждом ЗУ производится только в том случае, если величина пропуска не превышает заданной величины k , в противном случае рассматриваемые данные исключаются из анализа до поступления новых достоверных оперативных данных. Численное значение k определяется при обучении (настройке) ИСОКО.

6.3. Фильтрация оперативных данных

Для уменьшения случайной ошибки результатов измерений, все измеренные значения подвергаются процедуре фильтрации:

$$\hat{X}_n^t = \frac{1}{2K_n^t + 1} \cdot \sum_{i=t-K_n^t}^{t+K_n^t} \tilde{X}_n^t,$$

где $\hat{X}_n^t$ — отфильтрованное значение с n -го ЗУ в момент времени t ; $\tilde{X}_n^t$ — измеренное значение с n -го ЗУ в момент времени t ; K_n^t — глубина фильтра для n -го ЗУ в момент времени t . Численное значение K_n^t определяется при обучении (настройке) ИСОКО.

7. Оценивание систематических ошибок результатов измерений массового расхода и плотности ЦП и устранение их влияния

Результаты измерений физических параметров ЦП в ЗУ ПП содержат в себе два вида ошибок измерений: случайные и систематические. Фильтрация оперативных данных снижает уровень случайных ошибок измерений. Для устранения систематических ошибок измерений существует два подхода: калибровка измерительных датчиков и применение математических методов оценивания систематических ошибок.

В каждом ЗУ осуществляются измерения следующих величин: избыточное давление — $\tilde{P}_n^t$, массовый расход — $\tilde{W}_n^t$, плотность — $\tilde{\rho}_n^t$, температура — $\tilde{T}_n^t$, где t — дискретный момент времени, n — номер ЗУ, $n = 1, 2, \dots, N$.

Математическая модель результата измерения параметра Y имеет вид:

$$\tilde{Y} = Y^* + \Delta_Y + \xi_Y,$$

где $\tilde{Y}$ — результат измерения параметра Y ; Y^* — истинное значение параметра Y ; Δ_Y — систематическая ошибка результата измерения параметра Y ; ξ_Y — случайная ошибка результата измерения параметра Y .

Считаем, что случайные ошибки измерений имеют нормальное распределение вероятностей с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ_Y^2 , т. е. $\xi_Y \sim N(0, \sigma_Y^2)$. Дисперсия σ_Y^2 определяется классом точности датчика. Фактическое значение дисперсии σ_Y^2 оценивается экспериментальным путем.

Таким образом, математические модели результатов измерений, соответственно, избыточного давления, массового расхода, плотности и температуры в n -м ЗУ в момент времени t выражаются формулами вида:

$$\begin{aligned}\bar{P}_n^t &= P_n(t) + \Delta_{P_n} + \xi_{P_n}^t, \quad \xi_{P_n}^t \sim N(0, \sigma_{P_n}^2); \\ \bar{W}_n^t &= W_n(t) + \Delta_{W_n} + \xi_{W_n}^t, \quad \xi_{W_n}^t \sim N(0, \sigma_{W_n}^2); \\ \bar{\rho}_n^t &= \rho_n(t) + \Delta_{\rho_n} + \xi_{\rho_n}^t, \quad \xi_{\rho_n}^t \sim N(0, \sigma_{\rho_n}^2); \\ \bar{T}_n^t &= T_n(t) + \Delta_{T_n} + \xi_{T_n}^t, \quad \xi_{T_n}^t \sim N(0, \sigma_{T_n}^2).\end{aligned}$$

Считаем, что случайные ошибки измерений независимы друг от друга.

В ИСОГО систематические ошибки измерений давления и температуры оказывают малое влияние на результаты вычисления соответствующих оценок и принятия решений, так что ими можно пренебречь. В то же время влияние систематических ошибок измерений массового расхода и плотности ЦП значимо, оно оценивается и устраняется.

Пусть в момент времени t имеет место квазистационарный режим на участке ПП между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ. Согласно математической модели квазистационарного неизотермического режима, имеем

$$Q_{0n}(t) = Q_{0n+1}(t). \quad (7.1)$$

Уравнение (7.1) при подстановке в него выражения (4.11) с учетом (4.9) принимает вид:

$$k_{P_n}(t) \cdot \frac{W_n(t)}{\rho_n(t)} = k_{P_{n+1}}(t) \cdot \frac{W_{n+1}(t)}{\rho_{n+1}(t)}$$

или

$$k_{P_n}(t) \cdot W_n(t) \cdot \rho_{n+1}(t) - k_{P_{n+1}}(t) \cdot W_{n+1}(t) \cdot \rho_n(t) = 0. \quad (7.2)$$

Предположим, зафиксировано M различных квазистационарных режимов работы ПП, и по каждому интервалу времени, на котором была установлена квазистационарность m -го режима, для каждого n -го ЗУ рассчитаны оценки среднего значения и дисперсии всех видов измерений, которые обозначим соответственно через $\bar{W}_n^{(m)}$, $\hat{\sigma}_{W_n}^{(m)2}$, $\hat{\rho}_n^{(m)}$, $\hat{\sigma}_{\rho_n}^{(m)2}$, $\hat{P}_n^{(m)}$, $\hat{\sigma}_{P_n}^{(m)2}$, $\hat{T}_n^{(m)}$, $\hat{\sigma}_{T_n}^{(m)2}$, $n = 1, 2, \dots, N$, $m = 1, 2, \dots, M$.

Приведем обоснование формальной постановки задачи оценивания систематических смещений измерений массового расхода $\Delta_{W_{n,n+1}}$ и плотности $\Delta_{\rho_{n,n+1}}$, которые выражаются через систематические ошибки следующим образом:

$$\begin{aligned}\Delta_{W_{n,n+1}} &= \Delta_{W_{n+1}} - \Delta_{W_n}, \\ \Delta_{\rho_{n,n+1}} &= \Delta_{\rho_{n+1}} - \Delta_{\rho_n}.\end{aligned}$$

Запишем выражение для расчета величины невязки, соответствующей левой части выражения (7.2) при подстановке в него результатов измерений по m -му зафиксированному квазистационарному режиму, с учетом поправок на систематические смещения измерений массового расхода и плотности в $(n+1)$ -м ЗУ относительно n -го ЗУ:

$$\begin{aligned}\hat{f}^{(m)} &= \hat{k}_{P_n}^{(m)} \cdot \hat{W}_n^{(m)} \cdot (\hat{\rho}_{n+1}^{(m)} - \Delta_{\rho_{n,n+1}}) - \\ &- \hat{k}_{P_{n+1}}^{(m)} \cdot (\hat{W}_{n+1}^{(m)} - \Delta_{W_{n,n+1}}) \cdot \hat{\rho}_n^{(m)}.\end{aligned} \quad (7.3)$$

Невязка $\hat{f}^{(m)} = \hat{f}^{(m)}(\Delta_{W_{n,n+1}}, \Delta_{\rho_{n,n+1}})$ при фиксированных значениях $\Delta_{W_{n,n+1}}$, $\Delta_{\rho_{n,n+1}}$ является случайной величиной, так как подставляемые в (7.3) результаты измерений физических параметров ЦП есть случайные величины. Необходимо найти такие значения неизвестных систематических смещений $\Delta_{W_{n,n+1}}$, $\Delta_{\rho_{n,n+1}}$, при которых отклонения от нуля невязок $\hat{f}^{(m)}$, $m = 1, 2, \dots, M$, будут обусловлены только влиянием случайных ошибок измерений.

По предположению, случайные ошибки измерений имеют нормальное распределение вероятностей. В силу малости случайных ошибок измерений можно считать, что распределение случайной величины $\hat{f}^{(m)}$ близко к нормальному распределению вероятностей:

$$\hat{f}^{(m)} \sim N(0, \sigma_f^{(m)}).$$

Дисперсию невязки $\hat{f}^{(m)}$ с большой степенью точности можно оценить на основе линеаризации зависимости (6.3):

$$\begin{aligned}\hat{\sigma}_f^{(m)2} &= \left(\hat{k}_{P_n}^{(m)} \hat{\rho}_{n+1}^{(m)} \hat{\sigma}_{W_n}^{(m)} \right)^2 + \left(\hat{k}_{P_{n+1}}^{(m)} \hat{W}_{n+1}^{(m)} \hat{\sigma}_{\rho_n}^{(m)} \right)^2 + \\ &+ \left(\hat{k}_{P_{n+1}}^{(m)} \hat{\rho}_n^{(m)} \hat{\sigma}_{W_{n+1}}^{(m)} \right)^2 + \left(\hat{k}_{P_n}^{(m)} \hat{W}_n^{(m)} \hat{\sigma}_{\rho_{n+1}}^{(m)} \right)^2.\end{aligned}$$

Оценивание систематических смещений $\Delta_{W_{n,n+1}}$ и $\Delta_{\rho_{n,n+1}}$ выполним, воспользовавшись методом максимального правдоподобия. Для совокупности реализаций нормально распределенной случайной величины $\hat{f}^{(m)}$ по M зафиксированным квазистационарным режимам логарифмическая функция максимального правдоподобия имеет вид:

$$L = \sum_{m=1}^M \frac{1}{\hat{\sigma}_f^{(m)2}} \hat{f}^{(m)2}.$$

В этом случае задача оценивания систематических смещений $\Delta_{W_{n,n+1}}$ и $\Delta_{\rho_{n,n+1}}$ записывается в следующей постановке:

$$\begin{aligned}&L(\Delta_{W_{n,n+1}}, \Delta_{\rho_{n,n+1}}) = \\ &= \sum_{m=1}^M \frac{\hat{f}^{(m)2}(\Delta_{W_{n,n+1}}, \Delta_{\rho_{n,n+1}})}{\hat{\sigma}_f^{(m)2}} \rightarrow \min_{(\Delta_{W_{n,n+1}}, \Delta_{\rho_{n,n+1}}) \in R^2}.\end{aligned} \quad (7.4)$$

В результате решения задачи безусловной минимизации выпуклой функции $L(\Delta_{W_{n,n+1}}, \Delta_{P_{n,n+1}})$ (7.4) одним из численных методов получим оценки систематических смещений $\hat{\Delta}_{W_{n,n+1}}$ и $\hat{\Delta}_{P_{n,n+1}}$.

Оценки систематических ошибок измерений массового расхода и плотности рассчитываются по следующим формулам:

$$\hat{\Delta}_{W_n} = \hat{\Delta}_{W_{n,1}} - \hat{\Delta}_{W_n}^0, \quad \hat{\Delta}_{P_n} = \hat{\Delta}_{P_{n,1}} - \hat{\Delta}_{P_n}^0, \quad (7.5)$$

$$n = 1, 2, \dots, N,$$

$$\text{где } \hat{\Delta}_{W_n}^0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \hat{\Delta}_{W_{n,1}}, \quad \hat{\Delta}_{P_n}^0 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N \hat{\Delta}_{P_{n,1}}; \quad \hat{\Delta}_{W_{n,1}} = \sum_{i=2}^n \hat{\Delta}_{W_{i-1,i}}, \quad \hat{\Delta}_{P_{n,1}} = \sum_{i=2}^n \hat{\Delta}_{P_{i-1,i}}, \quad n = 1, 2, \dots, N.$$

Полученные оценки систематических ошибок измерений массового расхода и плотности используются для коррекции результатов измерений в каждом из N ЗУ.

Дисперсии оценок систематических ошибок $\hat{\Delta}_{W_n}$, $\hat{\Delta}_{P_n}$, $n = 1, 2, \dots, N$, могут быть оценены методом Монте-Карло.

8. Методы обнаружения утечек и криминальных отборов

8.1. Метод статического баланса

Метод статического баланса (МСБ) используется каждый раз перед обучением (настройкой) ИСОКО и позволяет оценить:

- систематические ошибки измерения геодезических отметок ЗУ;
- наличие, местоположение и объемы стационарных утечек на каждом из участков продуктопровода между ЗУ.

Суть метода заключается в следующем. После подтверждения квазистационарности режима ПП начинается постепенное (во избежание гидравлических ударов) перекрытие ОЗ на всех выходах ПП при всех работающих НС. После полного перекрытия ОЗ на выходах ПП расходы ЦП на НС становятся равными нулю и НС отключаются при помощи ОЗ.

В таком состоянии ПП находится в течение некоторого интервала времени ΔT_1 , пока не будут завершены все переходные процессы. Критерием окончания переходных процессов является условие:

$$\forall j \in N: \sigma_{P_j}^2 \leq \varepsilon, \quad (8.1)$$

где $N = \{1, 2, \dots, N\}$ — множество ЗУ ПП, $\sigma_{P_j}^2$ — оценка дисперсии давления в j -м ЗУ, $\varepsilon > 0$ — некоторая малая положительная величина, численное значение которой определяется при обучении (настройке) ИСОКО. Начальное значение $\varepsilon = 0,1$.

Далее перекрываются ОЗ на каждом из ЗУ. В этом случае весь ПП оказывается разбитым на участки между ЗУ, закрытыми с обеих сторон ОЗ и находящимися под рабочими давлениями. В таком состоянии продуктопровод выдерживается в течение

времени ΔT_2 , необходимого для получения всех необходимых оценок. При отсутствии стационарных утечек на участках продуктопровода и отсутствии перетоков ЦП через ОЗ, расходы по всем ЗУ остаются равными нулю, а давления постоянными:

$$\forall j \in N: W_j = 0 \wedge P_j = \text{const}. \quad (8.2)$$

Равенство (8.2) означает, что при отсутствии утечек из ПП и завершении всех переходных процессов устанавливается равенство абсолютных давлений во всех ЗУ ПП:

$$\forall i, j \in N: P_i = P_j, \quad (8.3)$$

где $P_j = \tilde{P}_j + \tilde{h}_j^\Gamma$ — абсолютное давление в j -м ЗУ; $\tilde{P}_j$ — измеренное значение избыточного давления в j -м ЗУ; $\tilde{h}_j^\Gamma$ — измеренное значение геодезической отметки j -го ЗУ.

Равенство (8.3) позволяет оценить систематическую ошибку измерения геодезической отметки j -го ЗУ:

$$\Delta \tilde{h}_j^\Gamma = P_j - \tilde{P}_j + \tilde{h}_j^\Gamma \quad (8.4)$$

и учесть ее в дальнейших расчетах.

Если между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ имеется стационарная утечка ЦП через свищи или другие нарушения герметичности участка ПП, то давление на обоих концах этого участка с течением времени будет падать. Скорость падения давления определяется величиной стационарной утечки, а численные значения абсолютных значений величин падения давления на обоих концах ПП позволяют определить ее местоположение.

Уравнение статического баланса по форме совпадает с уравнением динамического баланса, а его использование позволяет оценить величину стационарной утечки на интервале времени $[t_1, t_2]$.

8.2. Метод динамического баланса

Уравнение динамического баланса ЦП на участке ПП между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ для заданного интервала времени $[t_1, t_2]$ имеет вид:

$$M_n^{(3Y)}(t_1, t_2) - M_{n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2) + M_{n,n+1}^{(тр)}(t_1) - M_{n,n+1}^{(тр)}(t_2) - M_{n,n+1}^{(ут)}(t_1, t_2) = 0, \quad (8.5)$$

где $M_n^{(3Y)}(t_1, t_2)$, $M_{n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2)$ — массы ЦП, прошедшего соответственно через n -й и $(n+1)$ -й ЗУ за интервал времени $[t_1, t_2]$; $M_{n,n+1}^{(тр)}(t_1)$, $M_{n,n+1}^{(тр)}(t_2)$ — массы ЦП, аккумулированного внутри трубопровода между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ соответственно в моменты времени t_1 и t_2 ; $M_{n,n+1}^{(ут)}(t_1, t_2)$ — масса потерь ЦП на участке ПП между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ за интервал времени $[t_1, t_2]$. Потери ЦП могут возникать за счет технологических отборов, стационарных утечек или криминальных отборов.

Масса ЦП, прошедшего через вход или через выход n -го участка ПП за интервал времени $[t_1, t_2]$, определяется по формуле:

$$M_i^{(3Y)}(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} W_i(t) dt, \quad i = n, n+1 \quad (8.6)$$

Массу ЦП, аккумулированного на n -м участке ПП в момент времени t_j , где $(j = 1, 2)$, необходимо определять с учетом продольных и поперечных деформаций участка трубопровода по следующей формуле:

$$M_{n,n+1}^{(TP)}(t_j) = \int_{X_n}^{X_{n+1}} \rho_0(x, t_j) k_p(x, t_j) S_0(x) k_s(x, t_j) k_L(x, t_j) dx, \quad j = 1, 2, \quad (8.7)$$

где

$$k_L(x, t) = 1 + \alpha_L(x) \cdot (T(x, t) - T_0); \quad (8.8)$$

$k_L(x, t)$ — коэффициент продольного расширения участка трубопровода в точке x в момент времени t .

Результаты измерений физических параметров ЦП, полученные в ЗУ ПП, позволяют рассчитать численные оценки масс $\hat{M}_n^{(3Y)}(t_1, t_2)$, $\hat{M}_{n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2)$, $\hat{M}_{n,n+1}^{(TP)}(t_1, t_2)$, а также СКО данных оценок — $\hat{\sigma}_{M_n^{(3Y)}}(t_1, t_2)$, $\hat{\sigma}_{M_{n+1}^{(3Y)}}(t_1, t_2)$, $\hat{\sigma}_{M_{n,n+1}^{(TP)}}(t_1, t_2)$ соответственно.

Оценка дисбаланса и СКО данной оценки рассчитываются по формулам:

$$\hat{M}_{n,n+1}^{(\Delta B)}(t_1, t_2) = \hat{M}_n^{(3Y)}(t_1, t_2) - \hat{M}_{n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2) + \hat{M}_{n,n+1}^{(TP)}(t_1, t_2), \quad (8.9)$$

$$\hat{\sigma}_{M_{n,n+1}^{(\Delta B)}}^2(t_1, t_2) = \hat{\sigma}_{M_n^{(3Y)}}^2(t_1, t_2) + \hat{\sigma}_{M_{n+1}^{(3Y)}}^2(t_1, t_2) + \hat{\sigma}_{M_{n,n+1}^{(TP)}}^2(t_1, t_2). \quad (8.10)$$

Оценка дисбаланса включает в себя три составляющие:

$$\hat{M}_{n,n+1}^{(\Delta B)}(t_1, t_2) = \hat{M}_{n,n+1}^{(YT)}(t_1, t_2) + \Delta_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2) + \xi_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2), \quad (8.11)$$

где $\Delta_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2)$ — систематическая ошибка дисбаланса, обусловленная систематическими ошибками результатов измерений массового расхода и плотности, что выражается формулой

$$\Delta_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2) = (t_2 - t_1) \cdot (\Delta_{W_n} - \Delta_{W_{n+1}}); \quad (8.12)$$

$\xi_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2)$ — случайная ошибка величины дисбаланса, обусловленная суммарным влиянием случайных ошибок результатов измерений физических параметров ЦП в ЗУ, причем

$$\xi_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2) \sim N(0, \sigma_{M_{n,n+1}^{(\Delta B)}}^2(t_1, t_2)).$$

Оценка систематической ошибки дисбаланса $\hat{\Delta}_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2)$ может быть рассчитана по формуле

(8.11) при известных оценках систематических ошибок измерений массового расхода $\hat{\Delta}_{W_n}$ и $\hat{\Delta}_{W_{n+1}}$. Если же систематические ошибки измерений массового расхода неизвестны или оценены с недостаточной точностью, то в качестве оценки систематической ошибки дисбаланса $\hat{\Delta}_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2)$ можно выбрать среднее значение дисбаланса в серии экспериментов по расчету баланса на последовательных интервалах времени при отсутствии криминального отбора ЦП.

Критерий отсутствия утечек на участке ПП между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ на интервале времени $[t_1, t_2]$ имеет вид:

$$\left| \hat{M}_{n,n+1}^{(\Delta B)}(t_1, t_2) - \hat{\Delta}_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2) \right| \leq k \cdot \hat{\sigma}_{M_{n,n+1}^{(\Delta B)}}(t_1, t_2), \quad (8.13)$$

где $k > 0$ — пороговое значение критерия, численное значение которого определяется в результате обучения системы.

Если на интервале времени $[t_1, t_2]$ условие (8.13) выполняется, то булевой переменной M_1 присваивается значение, равное нулю, а если не выполняется, то M_1 присваивается значение, равное единице. Если $M_1 = 1$, то это означает, что величина дисбаланса не может быть объяснена чисто случайными совпадениями и на интервале времени $[t_1, t_2]$ появилась утечка или криминальный отбор.

Рассматривая последовательность интервалов $[t_1, t_2]$, $[t_2, t_3]$, ..., $[t_k, t_{k+1}]$ и сопоставляя ей значения логических переменных $P_1, P_2, \dots, P_k$, вычисляемые в соответствии с (8.13), можно утверждать, что, если криминальный отбор осуществлялся в течение всей последовательности интервалов от $[t_1, t_2]$ до $[t_n, t_{n+1}]$, то и значение логической переменной $M = M_1 \wedge M_2 \wedge \dots \wedge M_n$ будет равно единице.

Численное значение n зависит от длительности и стратегий осуществления криминального отбора.

Если условие (8.13) выполняется, то оценка массы потерь ЦП в результате криминального отбора на интервале времени оценивается по формуле:

$$\hat{M}_{n,n+1}^{(YT)}(t_1, t_2) = \hat{M}_{n,n+1}^{(\Delta B)}(t_1, t_2) + \hat{\Delta}_{M_{n,n+1}^{(YT)}}(t_1, t_2). \quad (8.14)$$

8.3. Метод знаков приращений расходов

Относится к прямым методам обнаружения утечек и криминальных отборов. Основан на том факте, что, если на интервале времени $[t_1, t_2]$ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ осуществляется криминальный отбор с расходом $Q_0^{(YT)}(t)$, то количество ЦП, прошедшего через n -й ЗУ, увеличивается, а через $(n+1)$ -й ЗУ — уменьшается. При этом объем потерь ЦП равен

$$V_0^{(YT)}(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} V_0^{(YT)}(t) dt,$$

а количества ЦП, прошедшего через n -й и $(n+1)$ -й ЗУ за интервал $[t_1, t_2]$, могут быть оценены по формуле

$$\hat{V}_{0j}^{(3Y)}(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} \hat{Q}_{0j}(t) dt, \quad j = n, n+1$$

где $\hat{Q}_{0j}$ — оценка приведенного объемного расхода в j -м ЗУ в момент времени t , полученная на основе прямых измерений параметров ЦП в соответствующем ЗУ.

В квазистационарном режиме с отбором имеем

$$\hat{V}_{0n}^{(3Y)}(t_1, t_2) - \hat{V}_{0n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2) \approx V_0^{(YI)}(t_1, t_2).$$

В нестационарных режимах, вызванных возникновением, изменением интенсивности или окончанием отбора, имеет место следующее неравенство:

$$0 < \hat{V}_{0n}^{(3Y)}(t_1, t_2) - \hat{V}_{0n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2) < V_0^{(YI)}(t_1, t_2).$$

Это свойство позволило построить индикаторную функцию наличия криминального отбора, достаточно устойчивую к уровню помех и характеру режима транспорта ЦП:

$$P_1 = \text{sgn}[\hat{V}_{0n}^{(3Y)}(t_1, t_2) - \hat{V}_{0n+1}^{(3Y)}(t_1, t_2)]. \quad (8.15)$$

Функция $\text{sgn}(x)$ принимает значение 1, если $x > 0$, и значение 0, если $x \leq 0$. При наличии криминального отбора аргумент этой функции в выражении (8.15) не зависит от используемой стратегии отбора и, следовательно, логическая переменная P_1 принимает значение 1, а при его отсутствии $P_1 = 0$.

Рассматривая последовательность интервалов $[t_1, t_2], [t_2, t_3], \dots, [t_k, t_{k+1}]$ и сопоставляя ей значения логической переменной $P_1, P_2, \dots, P_k$, вычисляемые в соответствии с (8.15), можно утверждать, что, если криминальный отбор осуществлялся в течение всей последовательности интервалов от $[t_1, t_2]$ до $[t_k, t_{k+1}]$, то и значение логической переменной $P = P_1 \wedge P_2 \wedge \dots \wedge P_k$ будет равно единице.

Численные значения k и длительности интервалов $[t_k, t_{k+1}]$ зависят от технических требований к ИСОКО и стратегий отбора, используемых криминальными группами, и определяются в результате обучения (настройки) системы.

8.4. Метод знаков приращений давлений

Относится к косвенным методам обнаружения утечек или криминальных отборов и основан на сравнении результатов расчета параметров газовых потоков на основе ММСННР с результатами измерений этих параметров.

Пусть в момент времени t имеем результаты измерений $\tilde{P}_n^t, \tilde{V}_n^t, \tilde{\rho}_n^t, \tilde{T}_n^t$ с n -го ЗУ и результаты измерений $\tilde{P}_{n+1}^t, \tilde{V}_{n+1}^t, \tilde{\rho}_{n+1}^t, \tilde{T}_{n+1}^t$ с $(n+1)$ -го ЗУ.

В качестве начальных условий выберем результаты расчета ММСННР в момент времени $t-1$:

$$\hat{P}(x, t-1), \hat{Q}_0(x, t-1), \hat{T}(x, t-1), x \in [X_n, X_{n+1}].$$

В качестве граничных условий выберем следующие измерения в момент времени t : $\tilde{P}_n^t, \tilde{Q}_{0n+1}^t, \tilde{T}_n^t$, где $\tilde{Q}_{0n+1}^t = \tilde{V}_{n+1}^t / \tilde{\rho}_{0n+1}^t$.

Приведенный объемный расход ЦП на n -м ЗУ вычисляем, как $\tilde{Q}_{0n}^t = \tilde{V}_n^t / \tilde{\rho}_{0n}^t$. В результате расчета ММСННР получим следующие оценки:

$$\hat{P}(x, t), \hat{Q}_0(x, t), \hat{T}(x, t), x \in [X_n, X_{n+1}].$$

Вычисляем значения индикаторных функций

$$D_0 = \text{sgn}(\hat{P}(x_{n+1}, t) - \tilde{P}_{n+1}^t), \quad (8.16)$$

$$Q_0 = \text{sgn}(\tilde{Q}_{0n}^t - \hat{Q}_0(x_n, t)). \quad (8.17)$$

Если на интервале времени $[t_1, t_2]$ между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ осуществляется криминальный отбор, то, начиная с некоторого момента времени $t_0 \in [t_1, t_2]$, аргументы функций (8.16), (8.17) будут положительными и логические переменные D_0 и Q_0 принимают значения, равные 1.

Индикатором наличия криминального отбора служит единичное значение булевой переменной $R_0 = D_0 \wedge Q_0$.

Если криминальный отбор осуществляется в последовательные моменты времени $t_0, t_1, t_2, \dots, t_l$, то и значение булевой переменной $R = R_0 \wedge R_1 \wedge R_2 \wedge \dots \wedge R_l$ будет также равно единице.

9. Процедура принятия решения о наличии криминального отбора

Полученные оценки и факты позволяют построить эффективную процедуру принятия решения о наличии криминального отбора.

Введем гипотезы: H_0 — нет отбора, при альтернативе H_1 — есть отбор.

Рассмотрим условные вероятности:

$P(H_0 / H_0)$ — вероятность правильного решения об отсутствии отбора;

$P(H_1 / H_1)$ — вероятность правильного решения о наличии отбора;

$P(H_0 / H_1)$ — вероятность ошибки второго рода, т. е. вероятность пропуска утечки: принимается гипотеза H_0 (нет отбора), в то время как верна гипотеза H_1 (есть отбор);

$P(H_1 / H_0)$ — вероятность ошибки первого рода, т. е. вероятность ложной тревоги: принимается гипотеза H_1 (есть отбор), в то время как верна гипотеза H_0 (нет отбора).

В ИСОКО в качестве критериев оценки эффективности процедуры принятия решения о наличии/отсутствии криминальных отборов используются группы критериев, включающих: минимум вероятностей ошибок первого и второго рода, т. е. минимум вероятности ложных тревог и минимум вероятности пропуска (необнаружения) криминального отбора; минимум математического ожидания времени обнаружения криминального отбора с момента его возникновения; минимум математического ожидания величины криминального отбора, обнаруживаемого системой; минимум дисперсии

ошибки определения места криминального отбора по трассе ПП.

Все рассмотренные критерии практически не имеют области «согласия» и «оптимальное решение» всегда находится в области Парето. Математическая постановка задачи принятия решения в ИСОКО и разработка формализованного метода ее решения оказались неоправданными ввиду необходимости введения большого количества допущений и предположений, которые далеко не всегда подтверждаются практикой. Поэтому в ИСОКО используется самонастраивающаяся по параметрам система принятия решений.

Принятие решения о наличии криминального отбора осуществляется в соответствии с правилом

$$KO = R \wedge P \wedge M.$$

Механизм обучения системы и оценивания (адаптации) параметров n , k , l к используемым или гипотетически возможным стратегиям криминального отбора в данной работе не излагается.

Если логическая переменная KO принимает значение, равное единице, то в ИСОКО формируется и выдается оператору звуковой сигнал и специальная форма о возникновении на участке ПП между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ утечки или криминального отбора.

10. Определение оценок параметров криминального отбора

Под параметрами криминального отбора будем понимать следующие величины: время начала, местоположение, текущая интенсивность, суммарный объем потерь, время окончания.

В ИСОКО реализованы три метода определения параметров криминального отбора:

- грубый метод, основанный на анализе информации о переходных процессах;
- метод, основанный на ММКСНР;
- метод, основанный на ММСННР.

10.1. Определение грубых оценок параметров криминального отбора

Одной из важных характеристик ИСОУ является величина задержки между временем появления и временем обнаружения криминального отбора.

В момент возникновения криминального отбора волны возмущения давления и расхода распространяются в обе стороны со скоростью звука в среде ЦП. Фиксируя моменты времени прихода фронта волны в n -й и $(n+1)$ -й ЗУ, можно получить грубые оценки местоположения утечки и времени ее начала:

$$X_{\text{ут}} = \frac{1}{2} \cdot (c \cdot (t_n - t_{n+1}) + L_{n,n+1}),$$

$$t_{\text{ст}} = \frac{1}{2} \cdot \left(t_n + t_{n+1} - \frac{L_{n,n+1}}{c} \right),$$

где c — скорость распространения звука в ЦП (устанавливается экспериментально), t_n — время прихода волны в n -й ЗУ, t_{n+1} — время прихода волны

в $(n+1)$ -й ЗУ, $L_{n,n+1}$ — длина участка ПП между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ.

Моменты t_n и t_{n+1} прихода волны возмущения давления и расхода в n -й и $(n+1)$ -й ЗУ определяем с помощью критерия отношения правдоподобия, описанного в п. 4.4.

10.2. Оценивание параметров криминального отбора на основе ММКСНР

Если в момент времени t выполняются условия квазистационарности режима в n -м и $(n+1)$ -м ЗУ (п. 4.3), то, исходя из уравнений ММКСНР (4.16), оценку расхода утечки получим по формуле

$$\dot{Q}_{\text{ут}}^t = \dot{Q}_n^t - \dot{Q}_{n+1}^t,$$

а оценка местоположения утечки $\hat{X}_{\text{ут}}^t$, вычисляемая в момент времени t , определяется в результате численного решения следующего уравнения:

$$\begin{aligned} f(X_{\text{ут}}^t) = & \left((\tilde{Q}_{0n}^t)^2 \cdot (X_{\text{ут}}^t - X_n^t) + (\tilde{Q}_{0n+1}^t)^2 \cdot (X_{n+1}^t - X_{\text{ут}}^t) \right) \times \\ & \times \frac{\lambda \hat{\rho}_{0n}^{(\text{cp})}}{2 \hat{E}^2 \hat{k}_S^{(\text{cp})^2} \hat{k}_P^{(\text{cp})} d_0 S_0^2} + \hat{\rho}_{0n}^{(\text{cp})} \hat{k}_P^{(\text{cp})} g \times \\ & \times (z(X_{n+1}^t) - z(X_n^t)) - (\tilde{P}_n^t - \tilde{P}_{n+1}^t) = 0, \end{aligned} \quad (10.1)$$

где $\tilde{P}_n^t, \tilde{P}_{n+1}^t$ — результаты измерений давления в момент времени t в n -м и $(n+1)$ -м ЗУ; $\tilde{Q}_{0n}^t, \tilde{Q}_{0n+1}^t$ — косвенные измерения (оценки) приведенного объемного расхода в момент времени t в n -м и $(n+1)$ -м ЗУ, полученные на основе результатов прямых измерений $\tilde{P}_n^t, \tilde{P}_{n+1}^t$; $\hat{\rho}_{0n}^{(\text{cp})}, \hat{k}_S^{(\text{cp})}, \hat{k}_P^{(\text{cp})}$ — оценки средних значений соответственно приведенной плотности, коэффициента сжатия ЦП и коэффициента поперечного расширения трубопровода для данного участка ПП, рассчитанные на основе результатов прямых измерений в ходе оценивания параметров ММСННР и ММКСНР (п. 5).

Уточнение местоположения криминального отбора осуществляется в течение всего времени его существования $t, t+1, t+2, t+3, \dots$ при выполнении условия квазистационарности режима в соответствии с рекуррентным соотношением:

$$\hat{X}_{\text{ут}}^{t+n-1} = \hat{X}_{\text{ут}}^{t+n-2} - \frac{1}{n [\hat{X}_{\text{ут}}^{t+n-2} - \hat{X}_{\text{ут}}^{t+n-1}]}, \quad (10.2)$$

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

где $\hat{X}_{\text{ут}}^{t+n-1}$ — уточненная оценка местоположения криминального отбора на n -м шаге; $\hat{X}_{\text{ут}}^{t+n-1}$ — текущая оценка местоположения криминального отбора, вычисленная в момент времени $t+n-1$ в результате решения уравнения (10.1).

10.3. Оценивание параметров утечки на основе ММСННР

Если криминальный отбор осуществляется на фоне существенно нестационарного режима, то оценки (10.1), (10.2) могут оказаться неэффективными, т. е. иметь завышенное значение дисперсии. Для повышения точности (уменьшения дисперсии)

оценки местоположения криминального отбора в этом случае используется ММСННР транспорта ЦП в магистральных ПП.

Перед использованием метода должен быть установлен факт наличия криминального отбора и время его возникновения $t_{\text{ут}}^{\text{нач}}$. Функцию интенсивности криминального отбора в момент времени t будем оценивать следующим образом:

$$\hat{Q}_{\text{ут}}^t = \hat{Q}_n^{t+\Delta t_n} - \hat{Q}_{n+1}^{t+\Delta t_{n+1}}, t \in [t_{\text{ут}}^{\text{нач}}, t_{\text{ут}}^{\text{кон}}],$$

где $\Delta t_n = t_n - t_{\text{ут}}^{\text{нач}}$, $\Delta t_{n+1} = t_{n+1} - t_{\text{ут}}^{\text{нач}}$, t_n — время прихода волны в n -й ЗУ, t_{n+1} — время прихода волны в $(n+1)$ -й ЗУ.

Известно, что координата точки места отбора $X_{\text{ут}}$ разбивает участок, на котором он происходит, на две части:

- участок трубопровода до местоположения отбора $[X_n, X_{\text{ут}}]$;
- участок трубопровода после местоположения отбора $[X_{\text{ут}}, X_{n+1}]$.

Тогда ММСННР с отбором на участке ПП $[X_n, X_{n+1}]$ включает в себя:

- систему дифференциальных уравнений вида (4.10) для первой части участка при $x \in [X_n, X_{\text{ут}}]$, $t \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}]$;
- систему дифференциальных уравнений вида (4.10) для второй части участка при $x \in [X_{\text{ут}}, X_{n+1}]$, $t \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}]$;
- условия согласования параметров ЦП в точке $X_{\text{ут}}$:

$$P_n(X_{\text{ут}}, t) = P_{n+1}(X_{\text{ут}}, t), T_n(X_{\text{ут}}, t) = T_{n+1}(X_{\text{ут}}, t),$$

$$Q_{0n}(X_{\text{ут}}, t) = Q_{0n+1}(X_{\text{ут}}, t) + Q_{\text{ут}}(t), t \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}];$$

- начальные условия:

$$P(x, t_{\text{нач}}) = \hat{P}^{(\text{нач})}(x), Q_0(x, t_{\text{нач}}) = \hat{Q}_0^{(\text{нач})}(x),$$

$$T(x, t_{\text{нач}}) = \hat{T}^{(\text{нач})}(x), x \in [X_n, X_{n+1}];$$

- граничные условия:

$$P(X_n, t) = \tilde{P}_n^t, T(X_n, t) = \tilde{T}_n^t, Q_0(X_{n+1}, t) = \tilde{Q}_{0n+1}^t,$$

$$t \in [t_{\text{нач}}, t_{\text{кон}}].$$

Уточненную оценку местоположения криминального отбора на участке ПП между n -м и $(n+1)$ -м ЗУ получаем в результате решения следующей оптимизационной задачи:

$$F(X_{\text{ут}}) = \sum_{t_{\text{нач}} \leq t \leq t_{\text{кон}}} \frac{1}{\hat{\sigma}_{Q_{0n}}^2} \left(\hat{Q}_{0n}^t - \hat{Q}_{0n}^t(X_{\text{ут}}) \right)^2 + \frac{1}{\hat{\sigma}_{P_{n+1}}^2} \left(\tilde{P}_{n+1}^t - \hat{P}_{n+1}^t(X_{\text{ут}}) \right)^2 \rightarrow \min_{X_n \leq X_{\text{ут}} \leq X_{n+1}},$$

где $\hat{Q}_{0n}^t(X_{\text{ут}})$ и $\hat{P}_{n+1}^t(X_{\text{ут}})$ — модельные значения параметров ЦП, полученные на основе вышеизложенной ММСННР с криминальными отборами.

11. Оценка эффективности функционирования ИСОКО

Оценка эффективности функционирования ИСОКО была проведена на одном из конденсаторов ДК «Укргазвидобування» НАК «Нафтогаз України».

Результаты работы ИСОКО после обучения на специально санированных и проведенных натурных экспериментах с отборами приведены в таблице 1.

Таблица 1

№	Участок (длина, км)	Оценки параметров отбора			Фактич. погрешность оценки места отбора, км
		Расстояние от начала участка, км	Средняя интенсивность отбора, т/ч (%)	Объем отбора, т	
1	ЗУ2—ЗУ3 (29,03)	0,01	0,81 (1,2)	0,33	0,01
2	ЗУ2—ЗУ3 (29,03)	0,01	0,75 (1,1)	0,24	0,01
3	ЗУ2—ЗУ3 (29,03)	10,20	13,50 (19,6)	4,98	0,40
4	ЗУ2—ЗУ3 (29,03)	9,98	2,60 (3,8)	0,26	0,18
5	ЗУ3—ЗУ4 (35,93)	1,10	1,38 (2,0)	0,32	1,10
6	ЗУ3—ЗУ4 (35,93)	0,10	0,54 (0,8)	0,09	0,10
7	ЗУ4—ЗУ5 (56,12)	37,57	2,20 (3,2)	0,15	1,23
8	ЗУ4—ЗУ5 (56,12)	40,04	0,79 (1,2)	0,11	1,24
9	ЗУ2—ЗУ3 (29,03)	29,04	38,20 (61,1)	4,91	0,01

Задержка по времени при обнаружении экспериментальных отборов не превышала длительность цикла опроса замерных узлов (2,5 мин).

На рис. 1–4 представлены графики измерений физических параметров стабильного конденсата в смежных ЗУ при различных стратегиях проведения криминальных отборов, которым ИСОКО в состоянии эффективно противодействовать.

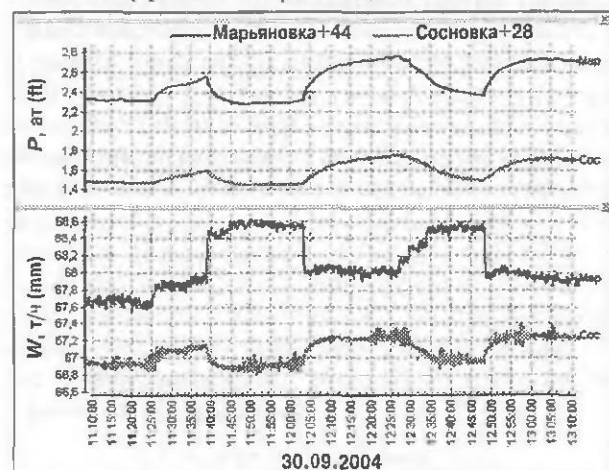


Рис. 1. Графики изменения давления (P) и массового расхода (W) в ближайших ЗУ при отборе с резким и с плавным открытием/закрытием вентиля на врезке

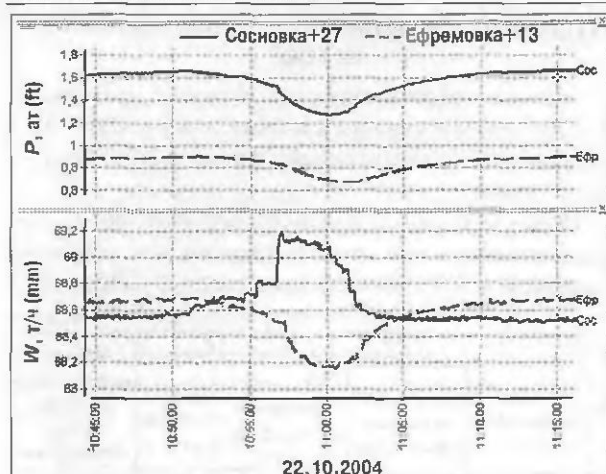


Рис. 2. Графики изменения давления (P) и массового расхода (W) в ближайших ЗУ при кратковременном отборе

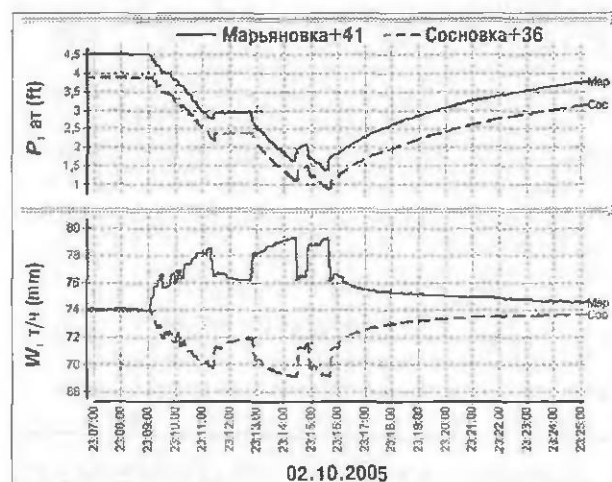


Рис. 3. Графики изменения давления (P) и массового расхода (W) в ближайших ЗУ при отборе с переменной интенсивностью

12. Заключение

Рассмотрена интеллектуальная система обнаружения критических отборов из продуктопроводов, в основу которой положены интеллектуальные алгоритмы автоматической обработки, анализа и принятия решений по оперативным данным с замерных узлов продуктопровода в режиме реального времени. Предлагаемые методы обнаружения критических отборов и оценивания их параметров базируются на использовании разработанной математической мо-

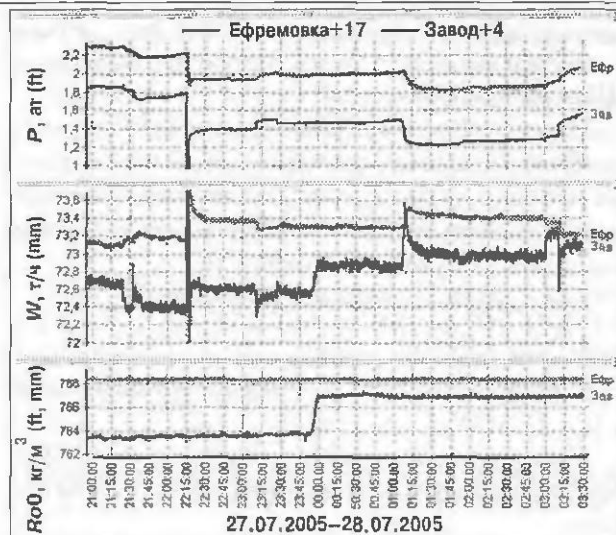


Рис. 4. Графики изменения давления (P), массового расхода (W) и приведенной плотности ($Ro0$) в ближайших ЗУ при длительном отборе малой интенсивности на фоне различных технологических возмущений (изменения положения регулирующей задвижки, плотности поступающего ЦП)

дели квазистационарных и существенно нестационарных неизоэнтальных режимов транспорта жидких продуктов по магистральным продуктопроводам. Анализ результатов работы ИСОКО при проведении экспериментальных отборов позволяет сделать вывод, что метрологические характеристики ИСОКО не только соответствуют, но и превышают заявленные.

Список литературы. 1. Евдокимов А. Г., Дубровский В. В., Тевяшев А. Д. Потокораспределение в инженерных сетях. – М.: Стройиздат, 1979. – 199 с. 2. Карелин В. Я., Минаев А. В. Насосы и насосные станции. – М.: Стройиздат, 1986. – 280 с. 3. Чарный И. А. Неустойчивое движение реальной жидкости в трубах. – М.: Недра, 1975. – 296 с. 4. Лурье М. В. Математическое моделирование процессов трубопроводного транспорта нефти, нефтепродуктов и газа. – М.: Изд-во «Нефть и газ» РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2003. – 336 с. 5. Самарский А. А. Теория разностных схем. – М.: Наука, 1989. 6. Обнаружение изменения свойств сигналов и динамических систем: Пер. с англ. / Под ред. М. Бассвилля, А. Баивениста. – М.: Мипр, 1989. – 278 с.

Поступила в редакцию 12.05.2006