

**ОБНАРУЖЕНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ НА ТРАССЕ
МАГИСТРАЛЬНЫХ ПРОДУКТОПРОВОДОВ
НА ОПТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ: ВВЕДЕНИЕ В ПРОБЛЕМУ**

Епифанцев Б.Н.

*Сибирская государственная автомобильно - дорожная академия (СибАДИ)
email: epifancev_bn@sibadi.org*

Сформулирована задача по обнаружению локальных изменений на трассе магистрального трубопровода на оптических изображениях и обоснованы пути ее решения.¹

Ключевые слова: магистральный трубопровод, несанкционированная врезка, тепловая разведка, параметры обнаружения

Нефтегазовый комплекс в настоящее время является источником половины валютных доходов государства. Жилищно-коммунальное хозяйство составляет треть всех фондов страны, состояние которых влияет на психологическое восприятие населением сложившегося в государстве общественного строя.

Ключевым звеном транспортных систем в указанных сферах экономики являются трубопроводы. Ввиду завершения нормативного срока службы излишне большой части транспортной инфраструктуры следует ожидать увеличения прироста потерь транспортируемого продукта. По опубликованным данным потери нефти и нефтепродуктов при перекачке по магистральным трубопроводам оцениваются от 1 до 1,2 % от объема перекачки и только по Тюменской области составляют 2,5 млн. тонн [1].

Крайне тревожной представляется складывающаяся в последние годы в стране ситуация с несанкционированным отбором перекачиваемых продуктов. По данным ежегодного доклада Правительства РФ, в 2003 г. отбор нефтепродуктов оценивался 3 % от транспортируемых с приростом 2 % в год.

Приведенные цифры говорят о наличии просчетов в организации безопасности трубопроводных систем и ухудшении нравственного здоровья населения страны. Обратит внимание на эту сторону проблемы важно также и по причине появления интереса к трубопроводным системам со стороны определенной группы лиц, именуемых террористами. Примеры подрывов магистральных трубопро-

¹ Работа выполнена в рамках реализации программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009-2013 годы», контракт № П215 от 22.07.09г.

водов имеются и, учитывая масштабы ущерба от такого рода диверсионных актов, можно предположить рост числа таких преступлений в будущем.

Снизить потери перекачиваемого продукта – задача служб контроля (мониторинга) состояния продуктопроводов. В идеале от них требуется фиксировать начало зарождения утечки продукта с определением ее координаты.

Еще более жесткие требования к обнаружению несанкционированных подключений к трубе: регистрируются время начала работ и координаты точки ожидаемого подключения. Требования к обнаружению установленного боеприпаса не сформулированы.

Опубликовано большое число работ по методам и средствам контроля и поиска мест утечек продукта. Не все они удовлетворяют требованиям по желаемой чувствительности и оперативности обнаружения, непрерывности контроля, точности локализации утечек (подключений). Изменение скорости расходов, а также метод отрицательных ударных волн можно отнести к методам, обеспечивающим обнаружение появления аварийной ситуации в реальном масштабе времени. Однако пороговая чувствительность этих методов ($\geq 100 \text{ м}^3/\text{ч}$) позволяет без труда решать вопросы нерегистрируемого несанкционированного отбора перекачиваемого продукта.

Анализ задачи создания технологии обнаружения «канала кражи» на стадии подключения к магистральным трубопроводам приводит к выводу об отсутствии альтернатив акустическому виду контроля. Известная в мире технология контроля утечек нефти LASP (LeskSystem for Pipelines) базируется на использовании специального шланга, проложенного вдоль трубопровода. Известны варианты ее усовершенствования: установка виброакустических датчиков на оболочке трубопровода с передачей данных по каналу телемеханики. Недостатки: большое число датчиков выводит задачу в плоскость экономической целесообразности, кроме того избежать ложных решений в такой системе не удастся (они могут быть симитированы злоумышленниками). Потребуется периодически прибегать к услугам, например, авиации для проверки достоверности решений. Используемый для этих целей визуальный метод оценки состояния трассы характеризуется высокой вероятностью «пропуска цели»: отводы продукта маскируются в видимом ди-

апазоне волн, выход вытекающего продукта может произойти на значительном удалении от продуктопровода.

Усовершенствования системы «патрульного контроля» возможны на пути использования тепловизионных средств разведки. Тепловизионные приборы последнего поколения позволяют получить тепловые изображения трассы пролегания трубопроводов отличного качества. Но чтобы вести речь о технологии тепловизионной (оптической) разведки рассматриваемого назначения, следует при этом оценить риск принимаемых решений.

Основные задачи визуальной разведки сводятся к поиску изменений на трассе трубопровода за истекший после предыдущего осмотра промежуток времени и их интерпретации. Типичные задачи: обнаружение выходов нефти на поверхность (при образовании утечек), регистрация факта проведения на трассе несанкционированных работ.

Пятно округлой или вытянутой формы, выделяемое на фоне подстилающей поверхности, может трактоваться как выход вытекающей из трубопровода жидкости на границу раздела «почва – атмосфера». Если изображение построено в отраженном излучении, физическим признаком утечки является изменение коэффициента отражения в локальной зоне трассы. Тепловой контраст определяется большим числом факторов: указанным градиентом коэффициента отражения, локальным изменением теплофизических параметров почвогрунтов, скачками коэффициента излучения и температуры в области утечки продукта. Основываясь на физике формирования тепловых изображений в среде с нестационарными потоками энергии, следует предположить, что системы тепловидения должны регистрировать фронт распространяющейся в почве жидкости еще до выхода ее на поверхность раздела сред. Указанное обстоятельство поддерживает интерес практиков к использованию собственного излучения земных покровов к оценке состояния трубопроводного транспорта.

Другая задача – обнаружение мест несанкционированного отвода перекачиваемого продукта. У злоумышленника достаточно времени, чтобы за время между осмотрами трассы подключиться к трубопроводу, проложить канал для отвода продукта и замаскировать его. Требуется продолжительное время появления оптического контраста в месте залегания отводной трубы (за счет подсыхания

маскирующего дерна, более быстрого высыхания песчаного грунта над отводной трубой и т.д.). В то же время факт нарушения естественной плотности грунта неизбежно изменяет температурное поле подстилающей поверхности; на тепловом снимке регистрируется слабоконтрастная полоса, формирующаяся практически в реальном масштабе времени вдоль полосы отвода продукта. Достаточен ли тепловой контраст «объект – фон», чтобы обнаружить его на фоне сопутствующих в реальном масштабе времени?

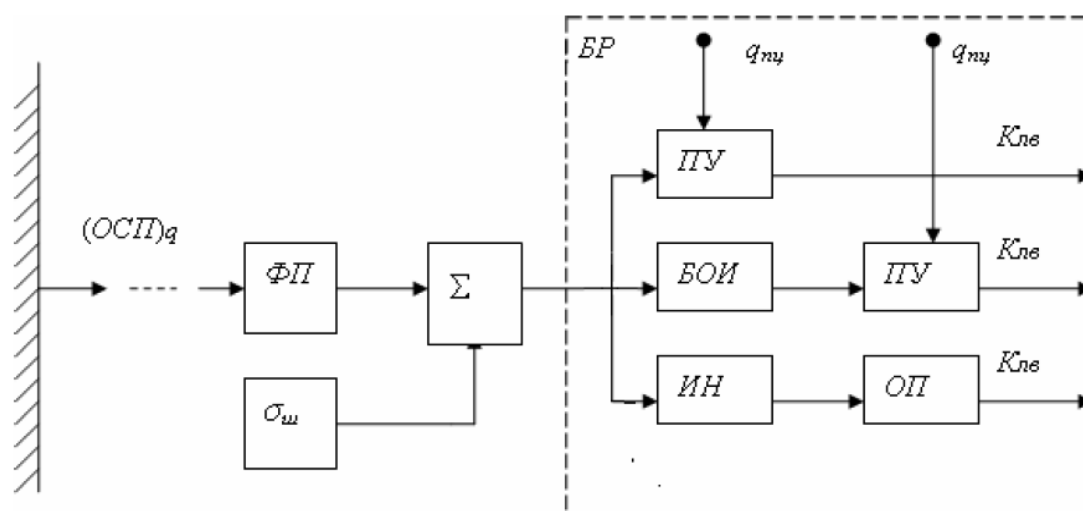


Рисунок 1. Структурная схема системы оптико-электронной разведки трассы пролегания трубопровода: $q_{ны}$ – порог принятия решений

На рис. 1 приведена схема преобразований информации в оптико-электронной системе обнаружения нарушений «нормального» состояния трубопровода. Важнейшей характеристикой исходного изображения является отношение «сигнал/помеха» $OCTq$. При распространении оптического излучения в атмосфере наблюдается его поглощение. Однако вследствие использования небольших высот (~ 300 м) такое поглощение незначительно и не скажется на результатах, полученных ниже.

Преобразователь плотности потока излучения в электрический сигнал можно представить в виде не шумящего фотоприёмника $\Phi\Pi$, источника шума $\sigma_{ш}$ и сумматора Σ . Современные приёмники характеризуются уровнем шумов, соответствующим перепаду температур ниже $0,05$ К. При работе в области реальных сигналов ($> 0,1$ К) шумами приёмника пренебрегают.

Блок принятия решений *БР* может быть построен по одному из следующих вариантов. Наиболее простой из них – пороговое устройство *ПУ* – находит применение, если *ОСП_q* на его входе достаточно велико, чтобы обеспечить приемлемое значение числа ложных решений *К_{лв}*. В противном случае необходимо искать способы повышения либо исходного *ОСП_q* (например, подбором диапазона длин волн), либо увеличивать его за счёт специальной обработки в блоке *БОИ* (преимущественно за счет использования априорных сведений о различии пространственных спектров сигнала и флуктуаций фона).

При обработке полутоновых изображений подстилающей поверхности известные структурные схемы *БОИ* достаточно сложны. Есть и простые технические решения, обеспечивающие увеличение *ОСП_q* до приемлемого уровня. Однако такие примеры единичны, а успех достигается за счёт удачных предложений по использованию специфических особенностей конкретных типов сигналов и фонов. Поэтому блок *БР* часто встречается в виде индикатора изображений *ИН*, функции принятия решений возлагаются на оператора *ОП*.

Три обобщённых параметра характеризуют оптико-электронную систему обнаружения обозначенных выше изменений на трассе пролегания трубопровода: *К_{лв}*, *ОСП_q*, *q_{nc}*.

Плотность потока ложных решений *К_{лв}* зависит от мощности флуктуации помех $\sigma_{q\phi}^2$, вида функции корреляции $x_{qq}(x,y)$, выбранного порога принятия решений q_{nc} [2]:

$$K'_{лв} = \left(\frac{K_{лв}}{l_{зак}} \right) = \frac{\eta_{лв}(q_{nc} - \bar{q}_{\phi})}{\sqrt{2\pi}\sigma_{q\phi}} \exp \left[\frac{-(q_{nc} - \bar{q}_{\phi})^2}{2\sigma_{q\phi}^2} \right], \quad (1)$$

где \bar{q}_{ϕ} – средняя плотность потока излучения фона; $l_{зак}$ – ширина полосы наблюдения системы;

$$\eta_{лв} = \left[\frac{\partial^2 x_{qq}(x,0)}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 x_{qq}(0,y)}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 x_{qq}(x,y)}{\partial x \partial y} \right)^2 \right]_{x=0, y=0}^{0,5} \cdot (2\pi\sigma_{q\phi}^2)^{-1}. \quad (2)$$

По физическому смыслу член $\frac{(q_{m_i} - \bar{q}_\phi)}{\sigma_{q\phi}}$ есть минимальное отношение «сигнал/помеха» $(OСП)_{\min}$. Для его оценки рассмотрим фоны со спектральной плотностью мощности флуктуаций по пространственным частотам вида

$$G_1(\omega_x, \omega_y) = C_{1,m} \cdot (1 + \rho_{1x}^2 \omega_x^2 + \rho_{1y}^2 \omega_y^2)^{-3/2}; \quad (3)$$

$$G_2(\omega_x, \omega_y) = C_{2,m} \cdot \exp(-\rho_{2x}^2 \omega_x^2 - \rho_{2y}^2 \omega_y^2), \quad (4)$$

являющиеся своего рода «граничными», так как реальные их описания представляют собой комбинации из выражений (3), (4);

ω_x, ω_y – пространственные частоты; ρ_x, ρ_y – протяженности выбросов по осям координат; $C_{1,m}, C_{2,m}$ – постоянные.

Для получения сопоставимых результатов необходимо провести нормировку (3), (4) – обеспечить выполнение условий $C_{1,m} = C_{2,m} = C_m$ и

$$\begin{aligned} \sigma_{q\phi 1}^2 &= \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_1(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y = \frac{C_{1,m}}{2\pi\rho_{1x}\rho_{1y}} = \\ &= \sigma_{q\phi 2}^2 = \frac{1}{(2\pi)^2} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G_2(\omega_x, \omega_y) d\omega_x d\omega_y = \frac{C_{2,m}}{4\pi\rho_{2x}\rho_{2y}} = \sigma_{q\phi}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Первое условие нормировки означает, что при $\rho_x \rightarrow 0, \rho_y \rightarrow 0$; $G_1(\omega_x, \omega_y) = G_2(\omega_x, \omega_y)$, т.е. при «вырождении» флуктуаций в белый шум спектральные плотности мощности должны быть равны. Необходимость выполнения второго условия очевидна.

Определим область корреляции пространственных помех поля излучения как $\pi\rho_{\phi x}\rho_{\phi y}$. Тогда $\rho_{1x} = \rho_{\phi x}/\sqrt{2}$; $\rho_{1y} = \rho_{\phi y}/\sqrt{2}$; $\rho_{2x} = 0,5\rho_{\phi x}$; $\rho_{2y} = 0,5\rho_{\phi y}$.

Для изотропного фона $\rho_{\phi x} = \rho_{\phi y} = \rho_k$, и если для обобщения задачи ввести операцию преобразования (3), (4) апертурой (фильтром), характеризующейся распределением прозрачности в виде гауссоидальной двумерной функции с условным радиусом ρ_a , то

$$G_{a1}(\omega_x, \omega_y) = \sigma_{q\phi}^2 \pi \rho_k^2 \left[1 + 0,5 \rho_k^2 (\omega_k^2 + \omega_y^2) \right]^{-3/2} \exp(-\rho_a^2 (\omega_x^2 + \omega_y^2)); \quad (6)$$

$$G_{a2}(\omega_x, \omega_y) = \sigma_{q\phi}^2 \pi \rho_k^2 \exp\left[-\left(\frac{\rho_k^2}{4} + \rho_a^2\right)(\omega_x^2 + \omega_y^2)\right]. \quad (7)$$

Для вычисления $\sigma_{aq\phi}^2$ и производных корреляционной функции в (2) воспользуемся соотношением из [3]

$$\int_0^{\infty} \exp(-c_k z_k) z_k^{v-1} (1+z_k)^{\mu_k} dz_k = \Gamma(v) \cdot u(v, \mu_k + v + 1, z_k), \quad (8)$$

где $u(\dots)$ – вырожденная гипергеометрическая функция Куммера,

$$\begin{aligned} u(1; 0,5; \frac{\rho_a^2}{\rho_k^2}) &= 2 \exp(\frac{\rho_a^2}{\rho_k^2}) \cdot D_{-2}\left(\frac{\sqrt{2}\rho_a}{\rho_k}\right); \\ u(2; 1,5; \frac{\rho_a^2}{\rho_k^2}) &= 4 \exp(\frac{\rho_a^2}{\rho_k^2}) \cdot D_{-3}\left(\frac{\sqrt{2}\rho_a}{\rho_k}\right), \end{aligned} \quad (9)$$

D_{-2}, D_{-3} – функции параболического цилиндра, равные [3]:

$$\begin{aligned} D_{-1}(z_\mu) &= \exp(\frac{z_\mu^2}{4}) \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z_\mu}{\sqrt{2}}\right) \right], \\ D_{-2}(z_\mu) &= -\exp(\frac{z_\mu^2}{4}) \cdot \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \left\{ z_\mu \left[1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z_\mu}{\sqrt{2}}\right) \right] - \left(\frac{\sqrt{2}}{\pi}\right) \exp\left(-\frac{z_\mu^2}{2}\right) \right\}, \\ D_{-3}(z_\mu) &= 0,5 \cdot [D_{-1}(z_\mu) - z_\mu \cdot D_{-2}(z_\mu)]. \end{aligned} \quad (10)$$

Интеграл вероятностей с относительной погрешностью $2,5 \cdot 10^{-5}$ аппроксимируется выражением [4]:

$$\begin{aligned} \operatorname{erf}(z_f) &\approx 1 - F(z_f) \exp(-z_f^2). \\ F(z_f) &= 0,348 (1 + 0,47 z_f)^{-1} - 0,095879 (1 + 0,47 z_f)^{-2} + \\ &+ 0,74785 (1 + 0,47 z_f)^{-3}. \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом (2), (5) – (11) получаем

$$\begin{aligned} \sigma_{aq\phi 1}^2 &= \sigma_{q\phi}^2 \left[1 - \sqrt{2\pi} \frac{\rho_a}{\rho_k} F\left(\frac{\sqrt{2}\rho_a}{\rho_k}\right) \right]; \\ \eta_{\text{лв}1} &= \frac{1}{\pi \rho_k^2} \cdot \frac{\rho_a}{\rho_k} \cdot \left[\frac{0,5 \sqrt{\frac{\pi}{2}} \left(\frac{\rho_k}{\rho_a}\right) F\left(\frac{\sqrt{2}\rho_a}{\rho_k}\right)}{1 - \sqrt{2\pi} \left(\frac{\rho_a}{\rho_k}\right) F\left(\frac{\sqrt{2\pi}\rho_a}{\rho_k}\right)} - 1 \right]; \\ \sigma_{aq\phi 2}^2 &= \sigma_{q\phi}^2 \frac{\rho_k}{\rho_k + 4\rho_a}; \quad \eta_{\text{лв}2} = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{1}{\rho_k^2 + 4\rho_a^2}. \end{aligned} \quad (12)$$

Чтобы исключить эффект апертурной фильтрации флуктуаций фона и перейти к анализу пространства изображений, примем минимальный радиус обнаруживаемых объектов $\rho_{цн} = 100\rho_a$. Тогда, используя (1), (12), несложно рассчитать интересующие нас зависимости $K'_{лв} = f[(ОСП)_{\min}]$.

На рис. 2 приведены графики, отражающие связь $\lg K'_{лв} \pi \rho_{ц}^2$ с $ОСП_{\min}$ для различных отношений радиуса корреляции флуктуаций фона к радиусу искомых «образований» на трассе $\rho_k / \rho_{ц}$.

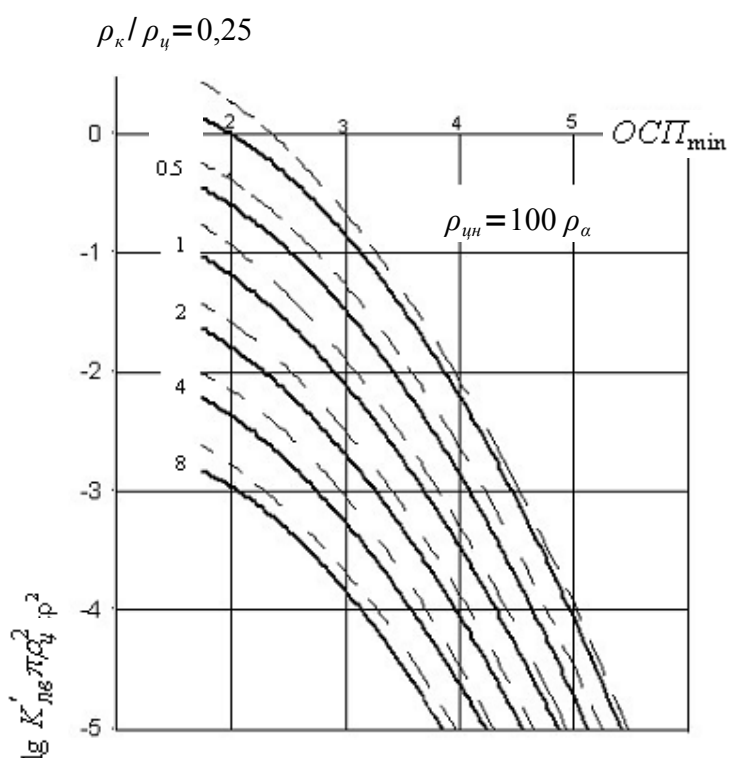


Рисунок 2. Графики для оценки $ОСП_{\min}$ по заданному числу ложных выбросов при обнаружении объектов на фонах с гауссовой (штриховые линии) и экспоненциальной (сплошные линии) корреляционными функциями

Из графиков следует, что простейший вариант блока принятия решений *БР* – пороговое устройство будет эффективен в использовании при $ОСП_q$ на его входе не менее пяти. В противном случае следует искать решения (вводить дополнительную обработку сигналов в блоке *БОИ*) для повышения отношения «сигнал/помеха».

Вторая задача, с которой приходится сталкиваться при облётах трассы пролегания трубопроводов с целью фиксации малоконтрастных образований,

состоит в замене оператора в части решения задач принятия решений автоматическим устройством. Человек – сравнительно инерционная опознающая и исполняющая принятые решения система. Основываясь на результатах многочисленных опубликованных работ, можно сделать вывод: основными факторами, устанавливающими время обнаружения интересующего образования на экране полутонного дисплея $\tau_{оц}$, являются его контраст $\mu_{ц}$, угловые размеры $\gamma_{ц}$, визуально воспринимаемое отношение сигнала к помехе $(ОСП)_{\beta}$, вероятность обнаружения $\rho_{оц}$, яркость экрана B_{β} и его угловые размеры β_{β} :

$$\rho_{оц} = \left\{ 1 - \exp \left[\frac{c_{p1} \cdot \mu_{ц}^2 \cdot \gamma_{ц}^3 \cdot B_{\beta}^{0,3} \cdot \tau_{оц}}{2 \cdot \beta_{\beta}^2} \right] \right\} \left\{ 1 - \exp \left[0,15 \left((ОСП)_{\beta} - 1 \right)^2 \right] \right\},$$

где $c_{p1} = 16 \text{ град}^2 \cdot \text{угл} \cdot \text{мин}^{-3} \cdot (\text{кд/м}^2)^{-0,3} \cdot \text{с}^{-1}$ – эмпирический коэффициент, соответствующий среднему наблюдателю, $\tau_{оц} = L_k / v_{up}$, L_k – размер наблюдаемого на экране изображения местности в направлении полёта; $(ОСП)_{\beta} = (ОСП) \cdot \sqrt{c_{p2} \cdot f_k (S_{ц} / S_{ш})}$; $f_k = D_{ц} \cdot f_{kc} / v_{up}$; c_{p2} – постоянная времени глаза; f_k – частота обновления информации; f_{kc} – частота кадров системы визуализации; $D_{ц}$ – размер искомого образования; $S_{ц}$ – его площадь; $S_{ш}$ – площадь корреляции шумов на мониторе; v_{up} – скорость полета.

Для получения численных оценок с использованием приведённой формулы примем диаметр разрешаемого на подстилающей поверхности пикселя равным 0,1 м (при худшем разрешении отличить неподвижного человека от булыжника становится проблематичным). Тогда при стандартном разложении изображения на 600 строк, представляемого на экране монитора, получим $L_k = 60$ м. Принимая $(ОСП)_{\beta} = 5$; $D_{ц \text{ min}} = 0,1$ м; $B_{\beta} = 50 \text{ кд/м}^2$; размер экрана 0,3 x 0,3 м; $\rho_{оц} = 0,99$; расстояние «экран - глаз оператора» 1 м, получим следующие оценки: если $\mu_{ц} = 0,05$, то $v_{up} \leq 30 \text{ км/ч}$; при $\mu_{ц} = 0,1$ $v_{up} \leq 100 \text{ км/ч}$. Это неприемлемые ограничения по скорости полёта.

Следует подчеркнуть, что приведённые оценки предельной скорости полёта при решении задач обнаружения известных объектов на фоне шумов на движущемся изображении согласуются с экспериментальными данными. Эти оценки позволяют понять суть рассматриваемой проблемы.

Маскировка несанкционированных подключений к продуктопроводам вынуждает переходить для их обнаружения в диапазон невидимых излучений (для увеличения $\mu_{ц}$). Требование оперативности обнаружения следов проводимых (проведённых) работ делает неэффективной технологию записи изображения пролегаемой трассы на магнитный (фотографический) носитель с последующей расшифровкой «на наземном пункте». Использование системы «преобразователь излучения - монитор - оператор» возможно на неприемлемо низких скоростях полёта. Анализ перечисленных составляющих рассматриваемой проблемы приводит к следующему заключению.

Современная технология контроля состояния трассы пролегания продуктопровода с летательного аппарата, основанная на записи «видеоизображения» пролетаемой местности с последующей его расшифровкой в наземных условиях, должна быть дополнена операцией автоматического обнаружения «ненормативных» отклонений на объекте контроля с передачей результатов расшифровки на диспетчерский пункт в реальном масштабе времени.

Возможно ли надёжно зарегистрировать указанные отклонения «от нормы» и автоматизировать процесс обнаружения в рассмотренном выше варианте контроля трассы? Ответы на эти вопросы даны в следующих статьях.

Литература

1. Эксплуатация магистральных трубопроводов. Трубопроводный транспорт нефти: Учебное пособие / В.Н.Антипов, Ю.Д.Земенков, Н.А.Малюшин и др./ Под ред. Ю.Д.Земенкова. – Омск: Изд-во ОмГТУ, 2001. – 344 с.
2. Свешников А.А., Хабалов В.Д. Оценка среднего числа выбросов двумерного случайного поля // Кибернетика. – 1973. – №3. – С. 94–99.
3. Градштейн С., Рыжик И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений. – М.: Физматгиз, 1963. – 1100 с.