

3. Методика подсчёта убытков, причинённых государству нарушением водного законодательства: утв. Мин-вом природных ресурсов и охраны окружающей среды Респ. Беларусь 6 января 1995 г.
4. Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах. Сер. 27, вып. 1 / колл. авт. – М.: Гос. предпр. науч.-техн. центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России, 2000. – 96 с.
5. Балльная оценка возможных последствий аварий на нефтепроводах / В.К. Липский [и др.] // Надежность и безопасность трубопроводного транспорта: сб. науч. тр. Вып. 3. – Новополоцк: ПГУ, 2003. – С. 148 – 160.
6. Оценка эффективности системы защиты окружающей среды при авариях на магистральных нефтепроводах / В.К. Липский [и др.] // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. В. Прикладные науки. – 2006. – № 3. – С. 155 – 162.

**УДК 519.673**

## **ВОПРОСЫ РЕАЛИЗАЦИИ ВОЛНОВОГО МЕТОДА ЛОКАЛИЗАЦИИ УТЕЧЕК**

**Ю.Г. Кузьминский<sup>1</sup>, В.И. Вьюн<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>ГНУ «Институт механики металлополимерных систем им. В.А. Белого  
НАН Беларуси», Гомель, Беларусь

<sup>2</sup>УО «Гомельский государственный  
технологический университет им. П.О. Сухого», Гомель, Беларусь

*Рассмотрены вопросы сбора данных, методов расчетов и повышения точности при реализации волнового метода локализации утечек.*

**Введение.** Стоимость нефти в 20-кубовой автоцистерне достигает 10 000 USD и будет возрастать. Данный факт является мотивом несанкционированных отборов нефти из магистральных трубопроводов. Объем отдельного отбора находится в пределах погрешности суточного баланса нефти (0,04 %) и вычисляемые объемы отборов не могут быть вычтены из баланса по отсутствию юридических основ. Для избежания ответственности правонарушители предпринимают маскирующие действия – максимальное снижение скорости отбора, придание отбираемому потоку нестационарного характера и т.д. Отборы характеризуются краткостью периода, ограниченностью мест по подъездным дорогам, фиксированным количеством точек, малой амплитудой волн давления, маскировочной нестабильностью скачков давления. Технических средств предотвращения отборов не существует. Предотвращение отборов возможно только правоохранитель-

ными силами при существенном ужесточении законодательства, однако краткость периода отбора затрудняет применение административных мер пресечения в реальном времени. Локализация мест отбора в реальном времени не актуальна и затруднена в реализации на фиксированном алгоритме волнового метода. Достаточно отложенной экспертной локализации и последующих поисковых операций.

**Основная часть.** Локализация места отбора нефти может быть выполнена на основе таймерных операций (точного определения времени понижающих скачков давления на линейных пунктах трубопровода), волнового метода (точного определения амплитуд скачков давления и применения формулы гашения волны), техническими методами (изотопная радиология, дистанционная пирометрия и т.д.).

Для применения таймерных методов автоматика АСУ ТП должна быть дополнена средствами синхронизации времени и повышения точности измерения времени на линейных пунктах, что требует значительных капитальных вложений и затрат на поддержание таймерных операций. Автоматика нефтепроводов 40-летнего срока эксплуатации не обеспечивает таких возможностей.

Волновая локализация места отбора требует расчета плотности и вязкости по температуре, скорости звука, гидравлического уклона, степени гашения волны давления по формуле Жуковского с поправочным коэффициентом. Для определения амплитуд волн давления требуется осреднение значений давления за период перед прохождением волны и в начальный период прохождения волны. Локализуется место отбора только в случае, если оно между точками замера давления, поэтому давления на границах НПС обязательно участвуют в локализации. Выбор точек замера для сжатия вокруг места отбора можно выполнять автоматически или экспертно.

**Описание метода.** Расстояние до места отбора  $x$ , находящегося между точками замеров  $x_1$  и  $x_2$ , определяется в волновом методе из уравнения, полученного на основании формулы Жуковского [1] для гашения амплитуды волны в трубопроводе:

$$\Delta p_1 k_{gash}^{x_1-x} = \Delta p_2 k_{gash}^{x-x_2},$$

где  $\Delta p_1$  и  $\Delta p_2$  – амплитуды скачков давления в точках замеров;  $k_{gash}$  – коэффициент гашения из формулы Жуковского:

$$k_{gash} = e^{-k_p \frac{1}{c}}.$$

Поправочный коэффициент  $k_p$  определяется из подборки данных о волне падения давления при пуске или остановке насоса [2, 3]. Гидравли-

ческий уклон в преобладающей в магистральных нефтепроводах зоне гладкого трения определяется по обобщенной формуле Лейбензона:

$$i = 0,0247 \frac{q^{2-0,25} \nu^{0,25}}{d^{5-0,25}},$$

или формуле Альтшуля:

$$i = \frac{0,11 \cdot \left( \frac{k}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25} \left( \frac{q}{\pi \cdot d^2} \right)^2}{g \cdot d}.$$

В этих формулах  $\Delta p$  – амплитуды скачков давления;  $q$  – объемная скорость исходного стационарного течения;  $d$  – внутренний диаметр трубопровода с учетом отложений;  $\nu$  – кинематическая вязкость нефти;  $Re$  – число Рейнольдса;  $k$  – относительная шероховатость труб.

Скорость звука в трубопроводе определяется по формуле:

$$c = \left[ \rho \left( \frac{1}{K_o} + \frac{(d_y - 2\delta)}{2\delta K_r} \right) \right]^{-\frac{1}{2}},$$

использующей плотность нефти  $\rho$ , наружный диаметр трубы  $d_y$ , толщину стенки трубы  $\delta$ , модули упругости стали и нефти.

**Исходные данные.** Модули сжатия, наружные диаметры и толщины стенок труб, расстояния и геодезические высоты точек замера давлений являются постоянными константами из справочных баз данных. Плотность и вязкость нефти восстанавливается по температуре от ультразвуковых расходомеров на основании известных формул. Объемные скорости течения, давления вычисляются осреднением за автоматически или экспертно определяемые нефиксированные отрезки времени.

**Констатация отбора.** До начала отбора расхождение объемных скоростей потоков по показаниям расходомеров на выходе подающей и входе принимающей станций незначительно. Отбор приводит к увеличению дисбаланса за счет роста расхода на выходе первой и падения расхода на приеме второй станции. Этот дисбаланс остается заметным во время всего отбора.

Анализ фоновых колебаний расхода (рис. 1) дал следующую оценку интервала амплитуд скачков:  $1 < \Delta Q < 20 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Степень скачков расхода в начале и конце перегона трубопровода зависит от того, к какой границе ближе место отбора. Данные расходомеров

служат основой для определения интервала времени отбора и **осредненной** разницы расходов во время отбора.

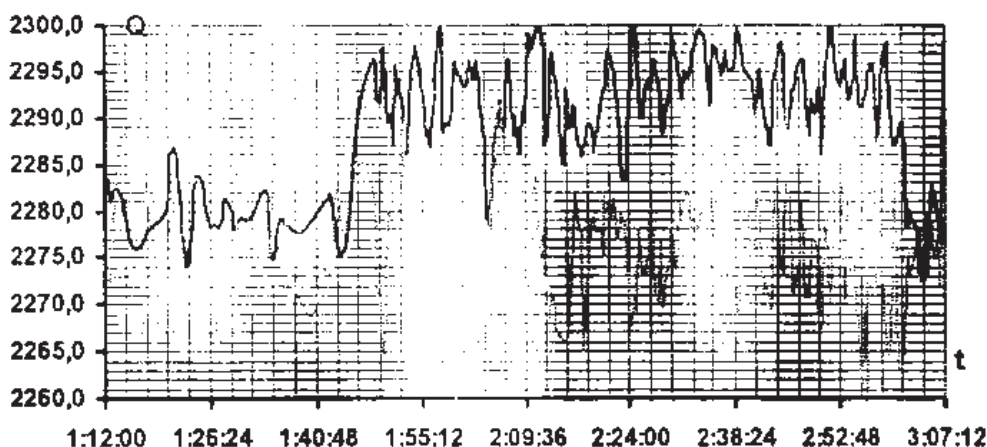


Рис. 1. Пример изменений расхода 28.12.2006

**Алгоритм** локализации включает следующие этапы:

1) по данным расходомеров фиксируется факт отбора; определяется интервал времени, средний дисбаланс расходов, интегральный объем отбора;

2) по данным давлений на площадках очистных устройств граничных станций отрезка трубопровода определяется *исходное* место отбора:

- определяется среднее давление *до начала* отбора в начале и конце отрезка;

- вычисляется средняя скорость потока до отбора, плотность и вязкость нефти, эквивалентный диаметр трубопровода, гидравлический уклон с привлечением геодезических параметров контрольных точек, скорость звука, основание степени гашения волны;

- определяется среднее давление *в начале* отбора на границах отрезка;

- вычисляются скачки давления в момент начала отбора; место отбора, исходное давление в точке отбора, диаметр отверстия;

3) для уточнения места отбора выбираются ближайшие к исходному месту отбора контрольные точки замеров давления. Повторяется процедура определения *уточненного* места отбора по изложенному во втором пункте алгоритму.

**Осреднение давлений.** Основная проблема – выбор интервалов времени для осреднения давлений.

На рисунке 2 приведен пример немаскируемого скачка давления при отборе, а на рисунке 3 – маскируемый скачок давления.

При выборе интервалов для осреднения давлений должны быть соблюдены следующие правила:

1) в интервал входит четное количество точек;

2) интервал имеет длительность не более 10 мин. Предпочтительна длительность в две минуты;

3) при распространении волна давления становится более пологой (рис. 4). Чем дальше от места отбора контрольная точка, тем больше временное расстояние между интервалом осреднения давления до начала скачка и интервалом в начале скачка.

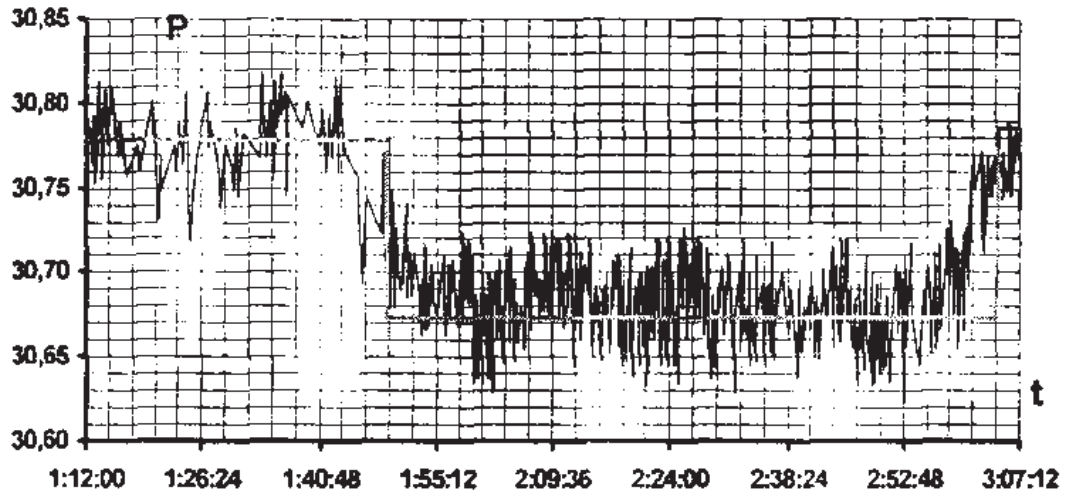


Рис. 2. Пример устойчивого скачка давления 28.12.2006

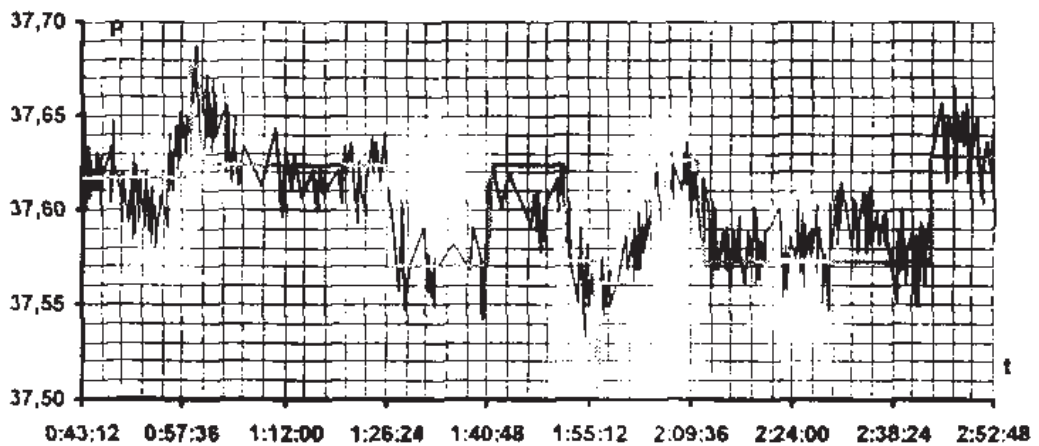


Рис. 3. Пример маскируемого скачка давления 25.12.2006

Анализ фоновых колебаний давлений в трубопроводах РУП «Гомельтранснефть Дружба» выявил следующие факты:

- частота колебаний давлений на стационарной части значительно превосходит частоту колебаний на линейной части трубопроводов (см. рис. 4) приведены частоты колебаний давлений на НПС и трассе);
- интервал амплитуд колебаний  $0,02 < \Delta p < 0,05$  бар;
- скачки давления при отборе на значительном расстоянии от места отбора  $\Delta p > 0,05$  бар.

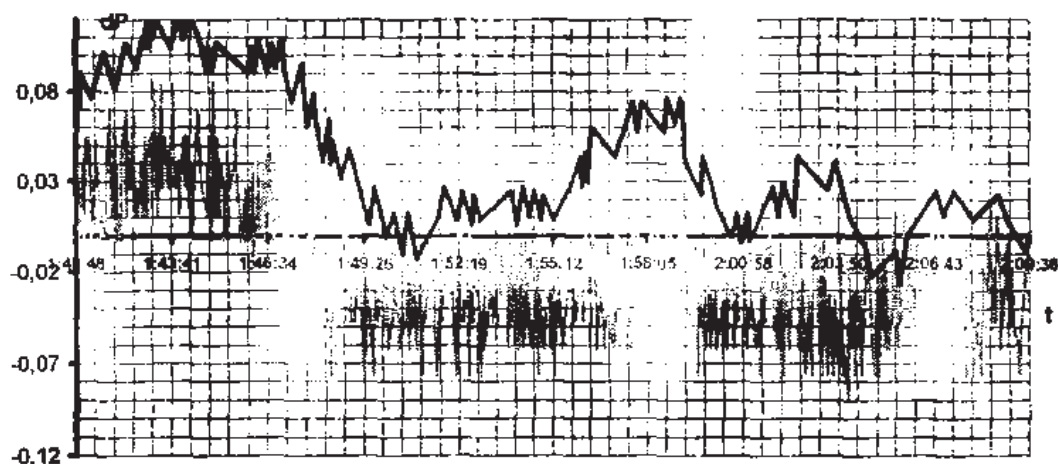


Рис. 4. Скачки давления на выходе станции и на трассе 04.05.2007 за вычетом среднего давления

Идентификация эквивалентного диаметра трубопровода между контрольными точками на трассе влияет на точность вычисления гидравлического уклона и впоследствии на определение места отбора. Существенное влияние на идентификацию диаметров оказывают геодезические высоты точек замера давления. Также при идентификации должно учитываться наличие дросселирования на принимающей станции [4].

**Оценка погрешностей.** В таблице 1 приведены оценки изменений влияющих параметров, приводящие к изменению места отбора, на 0,5 км по данным за 28.12.2006 г. при протяженности отрезка между контрольными точками в 35 км.

Таблица 1

Изменения параметров, ведущие к погрешности

Параметр	Изменение
Высота в одной контрольной точке	8 м
Отдельное осредненное давление	0,01 бар

Альтернативный потоковый подход основан на второй формуле Жуковского, связывающей изменение давления и скорости потока:

$$\Delta p = k_q \Delta v_{рс},$$

где коэффициент поправки  $k_q$  зависит от направления распространения волны ( $k_q^{\leftarrow}$  – против потока и  $k_q^{\rightarrow}$  – по потоку).

Для локализации отбора важно их соотношение  $k_q = k_q^+ / k_q^-$ , которое по фактическим данным [4] изменяется в интервале [3 – 6] и дает удовлетворительные результаты при  $k_q = 4,5$ . В таблице 2 приведены результаты экспериментального определения отбора по давлению и расходу нефти, скачки которого приведены на рисунке 5.

Таблица 2

Определение отбора по давлениям  $x_p$  и скорости потока  $x_q$

21.03.07 14:45						
L	0	0	120	120	Результат	
$\Delta Q_p$	-21,1	0,065	0,278	19,6	$x_p$	105,6
$Q_{p1}$	3142,2	42,763	8,758	3166,4	$\Delta p_x$	0,349
$Q_{p2}$	3163,3	42,698	8,480	3146,8	$q_{out}$	40,7
$t_{strt}^1$	14:24:44	14:43:11	14:31:45	14:24:44	$\Delta q$	11,1
$t_{fin}^1$	14:38:48	14:44:08	14:38:09	14:38:48	d	1,7
$t_{strt}^2$	14:42:33	14:45:21	14:44:40	14:42:33	$x_q$	105
$t_{fin}^2$	15:01:05	14:46:11	14:47:05	15:01:05	$k_q$	4,5
h		158	126			
$P_{дросс}$				1,2		

$E_o$	$E_s$	$\sigma_c$
1,3E+09	2,1E+11	5,1E+08
$t_{max}$	$p_{min}$	$v_{min}$
26	860	11
$t_{min}$	$p_{max}$	$v_{max}$
11	870	18
a	0,667	0,033
t	p	v
15	867,3	15,8
d	b	$b_p$
820	9	4,4
c	I	Q
979	3,715E-03	3154,3
$k_{уст}$ 0,98419	Лейбензон i	$\Delta Q$
Альт-шуль i	3,706E-03	-24,2
Поправка гашения $k_p$	4,2	

*Примечание.* Давления приведены в барах; скорости – в м<sup>3</sup>/ч; расстояния – в км; высоты – в м; диаметры – в мм; плотность – в кг/м<sup>3</sup>; вязкость – в сСт.

Из таблицы видно:

- скачок давления на станции 120 км  $\Delta p_2 \approx 0,3$  бара находится в пределах, которые регистрируются АСУТП, в отличие от станции на 0 км, скачек на которой  $\Delta p_1 \approx 0,05$  бара не регистрируется;

- скачки расхода нефти на обеих станциях находятся в пределах регистрации изменений  $\approx 20$  м<sup>3</sup>/ч, что является следствием разных значений поправочного коэффициента для связи волн давления и скорости;

- поправочные коэффициенты для волн давления 4,2 и волн скорости 4,5 достаточно близки.

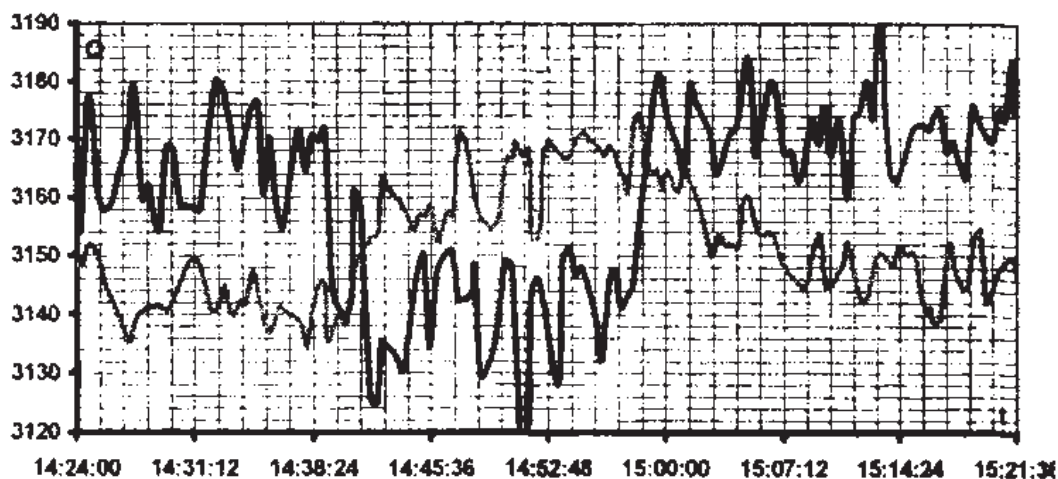


Рис. 5. Скачки объемной скорости потока на принимающей и подающей станции

**Выводы.** Локализация мест отбора нефти согласно нормативным документам Российской Федерации по трубопроводному транспорту должна базироваться на комбинации таймерных и волновых методов. Полноценная реализация таймерных методов требует значительных вложений. Волновой метод локализации допускает три подхода – контроль амплитуд скачков давления, контроль скачков объемного расхода нефти и контроль скорости изменения давлений. Современные датчики давлений и ультразвуковые расходомеры обеспечивают необходимую точность, поскольку важны не абсолютные значения параметров, а их изменения.

Применение известных зависимостей Жуковского для распространения волн в трубопроводах потребовало введения поправочных коэффициентов, учитывающих как направление распространения ударной волны, так и её причину.

Не существует фиксированного алгоритма определения интервала времени для осреднения давлений. При маскируемых отборах нефти необходимо применение знаний экспертов и серьезного математического аппарата.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Вайншток, С.М. Трубопроводный транспорт нефти / С.М. Вайншток. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2002. – Т. 1; 2004. – Т. 2.
2. Кузьминский, Ю.Г. Идентификация модели переходных процессов течения нефти в магистральных трубопроводах (реальный масштаб времени) / Ю.Г. Кузьминский, С.В. Шилько, В.И. Вьюн // Материалы. Технологии. Инструменты. – 2006. – Т. 11, № 2. – С. 15 – 21.



3. Кузьминский, Ю.Г. Гидравлическое взаимодействие систем защит магистрального нефтепровода в переходных процессах / Ю.Г. Кузьминский, В.И. Вьюн // Безопасность и надежность трубопроводного транспорта: сб. науч. тр. – Новополоцк. – 2003. – № 3. – С. 56 – 67.
4. Вьюн, В.И. Идентификация эквивалентных диаметров магистральных трубопроводов / В.И. Вьюн, Ю.Г. Кузьминский // Нефтяное хозяйство. – 2002. – № 3. – С. 87 – 89.

УДК.628.16:665.6

## ТЕХНОЛОГИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕФТЯНЫХ ЗАГРЯЗНЕНИЙ НА ВОДОТОКАХ ВО ВРЕМЯ ЛЕДОХОДА

В.Е. Савенок<sup>1</sup>, В.Р. Измайлович<sup>1</sup>, Д.В. Габелев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк, Беларусь,

<sup>2</sup>УО «Витебский государственный университет им. П.М. Машерова»

*Разработана технология локализации нефтяных загрязнений на водотоках во время ледохода, которой предусмотрено изменение направления движения льдин, для чего на водотоке устанавливается клиновидная рама. На малых реках прибитые к берегу льдины задерживаются поворотной секцией, затем затягиваются на берег, где происходит их механическое измельчение, а осколки битого льда и снежной массы, загрязненные нефтью направляются в заранее подготовленный отстойник, где после обработки их паром, происходит отстаивание воды с отделением нефти и последующей откачкой нефти нефтесборным устройством. Нефть улавливается боновым заграждением, расположенным ниже по течению от рамы, с последующим ее сбором нефтесборным устройством.*

**Введение.** Загрязнение нефтью и нефтепродуктами объектов окружающей среды ухудшает экологическую обстановку в регионе. Нефтяное загрязнение водотоков особенно опасно, так как возможен его трансграничный перенос, который приводит к увеличению масштабов экологической чрезвычайной ситуации, и как следствие, к значительному росту затрат на ликвидацию последствий этого загрязнения.

Существуют различные технологии ликвидации аварийных разливов нефти в зимних условиях на водотоках, покрытых льдом, и в летних условиях при отсутствии ледяного покрова на них. Однако реализация этих технологий в весенний (осенний) период во время ледохода крайне затруднена, и применение их малоэффективно.