

Выводы

Нормы расхода тепловой энергии выступают в качестве одного из критериев оценки совершенства технологического процесса производства, а также являются фактором, стимулирующим внедрение новых технологий и более эффективных теплоэнергетических процессов.

Актуальной остается задача разработки соответствующих методик для определения норм расхода тепловой энергии на технологические операции,

не представленные в нормативных документах по нормированию расхода топливно-энергетических ресурсов на ж.-д. транспорте.

Разработанная методика позволяет планировать расход тепловой энергии на вышеуказанные технологические процессы на любой расчетный период. С использованием разработанной методики выполнен ряд апробаций в структурных подразделениях ОАО «РЖД».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методика нормирования расхода теплоты и топлива стационарными установками железнодорожного транспорта. – М.: ВНИИЖТ, 2002. – 86 с.
2. Методика планирования расхода топлива на нетяговые нужды и тепловой энергии в ОАО «РЖД». – М.: ВНИИАС, 2007. – 97 с.
3. Нормативная база тепло- и топливотребления стационарных объектов железных дорог. – М.: ВНИИЖТ, 2001. – 112 с.
4. Вукалович М.П. Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Машиностроение, 1966. – 160 с.
5. Гува А.Я. Краткий теплофизический справочник. – Новосибирск: Сибвузиздат, 2002. – 300 с.

Поступила 21.06.2010 г.

УДК 620.165.29:620.176.16

ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ АЛГОРИТМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ УТЕЧКИ

Т.Е. Степанченко, В.Н. Шкляр

Томский политехнический университет
E-mail: stepanchenko@mail2000.ru

Исследуется влияние чувствительности датчиков давления, установленных на трубопроводе, и изменения параметров трубопровода и транспортируемой жидкости на точность определения координаты и массового расхода утечки в трубопроводах по алгоритмам на основе гидродинамических моделей. Показано, что на точность определения параметров утечки наибольшее влияние оказывает вариация плотности транспортируемой жидкости и скорости её движения.

Ключевые слова:

Магистральный трубопровод, утечка, гидродинамическая модель, датчик давления, чувствительность датчика, скорость звука, режим течения.

Key words:

Main pipeline, loss, hydrodynamic model, sensor of pressure, sensitivity of sensor, speed of sound, mode of fluid.

Введение

Ранее нами были разработаны и исследованы алгоритмы определения координаты и массового расхода утечек в магистральных трубопроводах [1, 2]. При этом не учитывались характеристики реальных датчиков давления в них, а также изменения параметров нефтепродукта (плотности, вязкости, скорости передвижения) и самого объекта – нефтепровода (толщины стенок, шероховатости), которые в реальности измеряются специальными приборами (плотность и вязкость – плотномеры, денсиметры; скорость передвижения потока жидкости – термоанемометр, толщина стенок – толщиномерами, профилограф-профилометрами, шероховатость – измерителями шероховатости) и, в зависимости от точности этих приборов, могут иметь некоторый диапазон изменения.

Постановка задачи

Как известно, на трубопроводах устанавливаются датчики давления различной точности. Для диагностики используют высокоточные датчики на базе пьезорезистивного чувствительного элемента из монокристаллического кремния. В табл. 1 приведены технические данные для некоторых типов датчиков давления, разработанных и производимых в России [3, 4].

Рассматривается вначале влияние одной из основных характеристик датчиков – погрешности измерения, на точность определения координаты утечки ξ .

Давления в местах установки датчиков могут быть рассчитаны по формулам, полученным в [1]. Там же приведены формулы для определения координаты и массового расхода утечки, которые имеют вид:

$$\xi = \frac{b_3(P_2 - b_2) - l}{b_4(P_1 - b_1) - b_3(P_2 - b_2)};$$

$$G_T = \frac{b_3(P_2 - b_2) - b_4(P_1 - b_1)}{lb_3b_4};$$

$$b_1 = P_H - \frac{P_K - P_H}{l}x_1; \quad b_2 = P_H - \frac{P_K - P_H}{l}x_2;$$

$$b_3 = \frac{\alpha x_1}{F}; \quad b_4 = \frac{\alpha(l - x_2)}{F}, \quad (1)$$

где P_1, P_2, P_H, P_K – давления на первом, втором датчиках давления, а также в начале и в конце трубопровода, соответственно, Па; ξ, x_1, x_2 – координаты утечки, первого и второго датчиков, соответственно, м; G_T – массовый расход утечки, кг/с; l – длина трубопровода, м; F – площадь сечения трубопровода, м².

Таблица 1. Технические данные датчиков давления

Свойство	Датчики давления	
	«ALPHA»	«КАРАТ»
Диапазон измерений давления	от 0 до 0,01; 0,016; 0,025; 0,04; 0,06; 0,1; 0,16; 0,25; 0,4; 0,6; 1,0; 1,6; 2,5; 4,0; 6,0; 10; 16; 25; 40; 60 МПа	от 0 до 0,16; 0,6; 2,5; 6; 16; 100 МПа
Основная погрешность	до ±0,05 % ВПИ	до ±1 % ВПИ
Максимальное давление	1,5 ВПИ	1,5 ВПИ
Суммарная погрешность	до ±0,1 % ВПИ в диапазоне -10...+50 °С; до ±0,2 % ВПИ в диапазоне -20...+80 °С	±0,6 % – при допускаемой основной погрешности датчика ±1 %
Рабочий диапазон температур	-40...+85 °С	до +80 °С
Выходной сигнал	по напряжению постоянного тока; по току 4...20 мА	по напряжению постоянного тока: 15...36 В; 15...28 В (для взрывобезопасного исполнения); 12 В, 42 В (по согласованию)

ВПИ – верхний предел измерений.

Коэффициент α учитывает изменения параметров нефтепродуктов и рассчитывается по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda w}{2d},$$

где λ – коэффициент сопротивления трубопровода; w – скорость движения нефтепродукта, м/с; d – внутренний диаметр трубопровода, м.

Коэффициент λ зависит от шероховатости трубопровода. Влияние шероховатости исследуется в дальнейшем.

При исследовании влияния погрешности датчиков коэффициент α имеет постоянное точно определенное значение.

Чтобы получить функцию чувствительности, устанавливающую связь между погрешностью датчиков

давления и погрешностью определения координаты утечки и её массового расхода, используются разложения функций (1) в ряд Тейлора [5]. Следовательно, разложив функции координаты $\xi = \xi(P_1, P_2, P_H, P_K)$ и массового расхода $G_T = G_T(P_1, P_2, P_H, P_K)$ утечки по составляющим P_1, P_2, P_H и P_K , которые измеряются датчиками давления, отбрасывая слагаемые второго и более высокого порядка малости, получаем функцию погрешности определения координаты и массового расхода утечки в виде линейного уравнения, имеющего вид:

$$\Delta \xi = \frac{\partial \xi}{\partial P_1} \Delta P_1 + \frac{\partial \xi}{\partial P_2} \Delta P_2 + \frac{\partial \xi}{\partial P_H} \Delta P_H + \frac{\partial \xi}{\partial P_K} \Delta P_K;$$

$$\Delta G_T = \frac{\partial G_T}{\partial P_1} \Delta P_1 + \frac{\partial G_T}{\partial P_2} \Delta P_2 + \frac{\partial G_T}{\partial P_H} \Delta P_H + \frac{\partial G_T}{\partial P_K} \Delta P_K, \quad (2)$$

где $\Delta P_1, \Delta P_2, \Delta P_H, \Delta P_K$ – погрешности первого и второго датчиков давления в начале и в конце трубопровода, Па.

Подставив (1) в (2) и найдя частные производные каждого слагаемого, получено выражение для функций погрешности:

$$\Delta \xi = \sum_{i=1}^4 C_i \Delta P_i, \quad \Delta G_T = \sum_{i=1}^4 D_i \Delta P_i;$$

$$C_1 = [(b_4 + b_4 l^{-1} x_1 - b_3 + b_3 l^{-1})A - b_3(1 + l^{-1})]B^{-2}, \quad (3)$$

$$C_2 = -b_4 AB^{-2},$$

$$C_3 = (b_4 P_1 - b_1^2 - l) b_3 B^{-2},$$

$$C_4 = [b_3 B - (b_4 x_1 - b_3) A] l^{-1} B^{-2},$$

$$A = b_3(P_2 - b_2) - l, \quad B = b_4(P_1 - b_1) - b_3(P_2 - b_2),$$

$$D_1 = (l - x_1) l^{-2} b_3^{-1} - (l - x_2) l^{-2} b_4^{-1},$$

$$D_2 = -l^{-1} b_3^{-1}, \quad D_3 = l^{-1} b_4^{-1},$$

$$D_4 = (b_4 x_1 - b_3 x_2) l^{-2} b_3^{-1} b_4^{-1}, \quad \Delta P_1 = \Delta P_H,$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{D1}, \quad \Delta P_3 = \Delta P_{D2}, \quad \Delta P_4 = \Delta P_K.$$

Формулы (3) являются абсолютно точными. При $\Delta P_i = 0$ имеем $\Delta \xi = 0$ и $\Delta G_T = 0$, где i – индекс соответствующего датчика давления, $i = 1, 4$.

Точность вычисления параметров утечки оценивается при использовании датчиков давления с погрешностью 0,1 и 0,5 % верхнего предела измерения от диапазона выходного сигнала.

Для исследования полученных зависимостей, представленных формулами (3), составлена имитационная модель в визуальном приложении программы MatLab 6.5 – Simulink по данным, взятым в [2]: $P_H = 2,9$ МПа, $P_K = 1,9$ МПа, $F = 0,407$ м², $C = 975$ мс⁻¹, $b = 0,018$ с⁻¹, $\xi = 18 \cdot 10^3$ м, $l = 30 \cdot 10^3$ м, $G_T = 35$ кг/с.

Для более наглядного представления результатов исследования, введена дополнительная величина Δx – расстояние между датчиками P_1 и P_2 , установленными на протяжении трубопровода, рис. 1.

Принималось начальное значение $\Delta x = \Delta x_0 = 4500$ м при $x_{01} = 13750$ м, $x_{02} = 18250$ м. При этом устанавли-

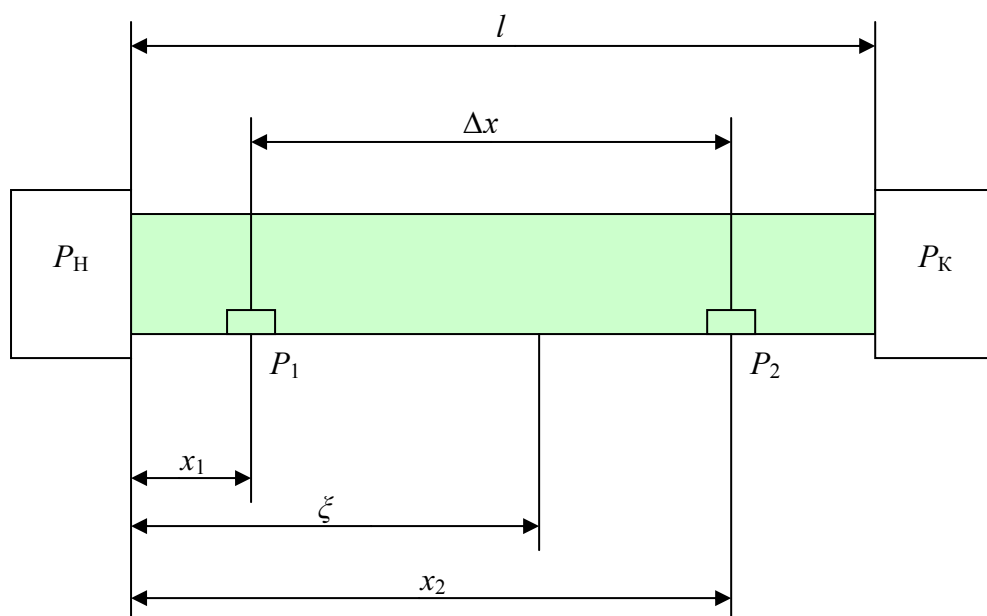


Рис. 1. Схема расположения датчиков давления на трубопроводе с утечкой

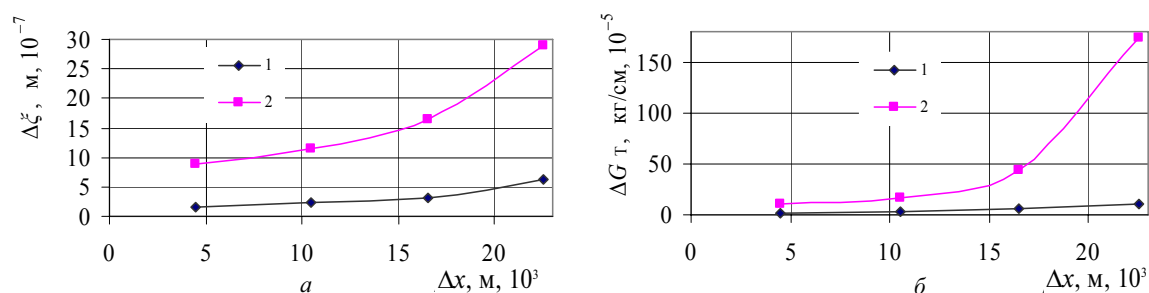


Рис. 2. Зависимости погрешности определения координаты (а) и массового расхода (б) утечки от изменения координаты установки датчиков Δx при $\xi=15 \cdot 10^3$ м, ΔP : 1) 0,1; 2) 0,5 %

вается место утечки в середине интервала Δx . Проводится вначале исследование для датчиков с погрешностями, указанными выше, т. е. 0,1 и 0,5 % ВПИ. Тогда для датчиков будем брать:

- 1) $\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_H = \Delta P_K = 4$ кПа;
- 2) $\Delta P_1 = \Delta P_2 = \Delta P_H = \Delta P_K = 20$ кПа.

Далее проводились исследования влияния взаимного расположения датчиков давления и координаты утечки. В качестве параметра выбирается Δx , рис. 2.

Из представленных графиков видно, что погрешность измерения координаты утечки $\Delta \xi$ и её массового расхода ΔG_t зависит от расстояния между контролируемыми датчиками и их точности. С уменьшением Δx и повышением точности датчиков погрешность измерения параметров утечки уменьшается.

Далее исследовано влияние местоположения утечки ξ на значение и изменение погрешности определения координаты утечки $\Delta \xi$ при различных положениях датчиков давления, рис. 3.

Графики, показывают, что погрешности вычисления параметров утечки зависят от положения датчиков, но мало зависят от координаты утечки.

Таким образом, проведённые исследования показали, что зависимость интересующих показателей от расстояния между датчиками существует нелинейная и значительная, а зависимость от местоположения утечки незначительна.

Исследовано также влияние изменения параметров нефти и нефтепровода на процесс вычисления параметров утечки — её координат и массового расхода. Полагается, что датчики давления являются абсолютно точными.

Известно, что для круглых труб в зависимости от числа Рейнольдса Re различают два режима движения жидкости по трубопроводу — ламинарный и турбулентный.

При турбулентном режиме в зависимости от величины абсолютной шероховатости внутренних стенок трубы h имеют место зоны: «гидравлически гладких» труб, доквадратичного сопротивления, квадратичного сопротивления. Таким образом, значения Re и абсолютной шероховатости трубы h определяют вид формулы для вычисления коэффициента сопротивления трубопровода λ , рис. 4.

Скорость распространения ударной волны определяется по формуле [6]:

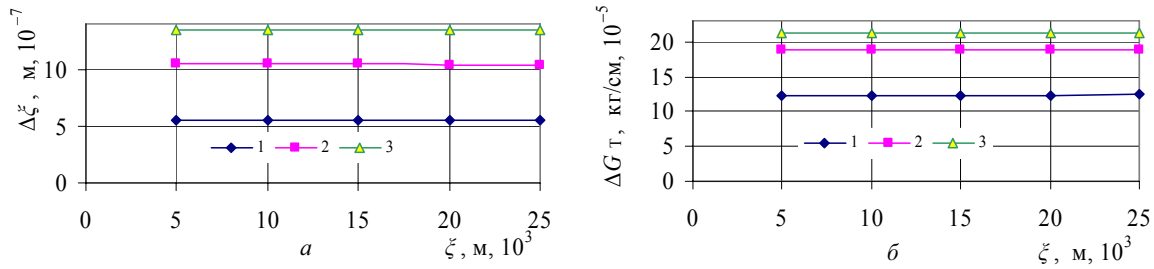


Рис. 3. Зависимости погрешности определения координаты (а) и массового расхода (б) утечки от местоположения утечки ξ при $\Delta P_i=0,1\%$, Δx : 1) $21 \cdot 10^3$; 2) $25 \cdot 10^3$; 3) $29 \cdot 10^3$ м

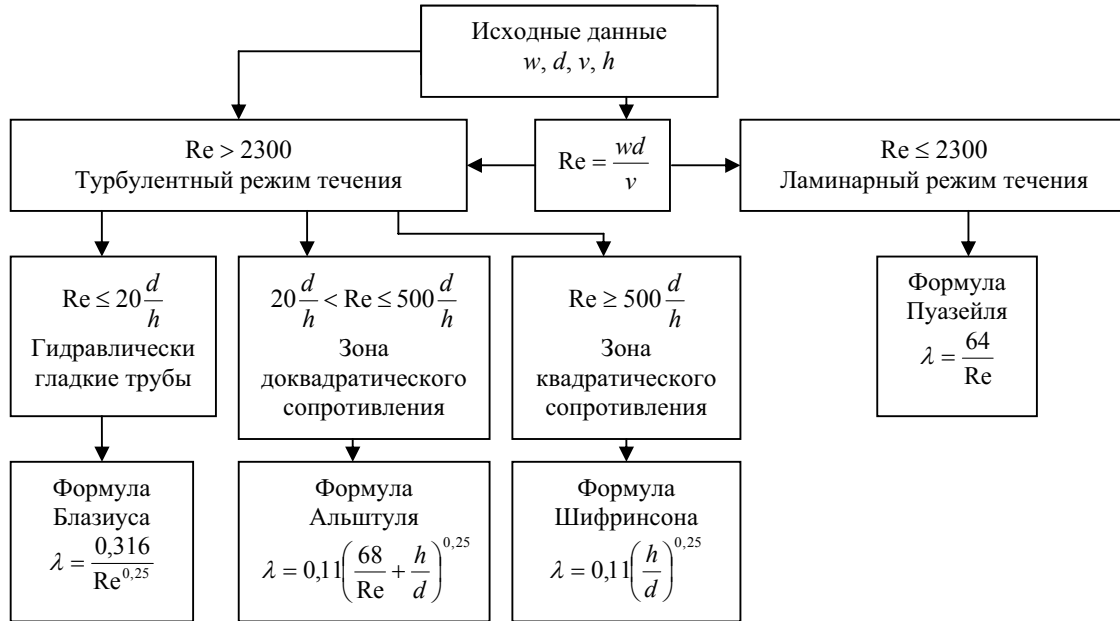


Рис. 4. Блок-схема алгоритма определения коэффициента гидравлического сопротивления трубопровода λ

$$C = \frac{1}{\sqrt{\rho\beta + \frac{\rho d}{(\delta + h)E}}}, \quad (4)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м³; β – коэффициент сжимаемости жидкости; d , δ , h – внутренний диаметр, толщина стенок и абсолютная шероховатость трубы, м; E – модуль упругости материала трубы (модуль Юнга), Па.

Тогда, в соответствии с (4) уравнения для расчёта давления, представленные в [2], примут вид:

$$P(x, t) = P_H - \frac{(P_H - P_K)x}{l} - \alpha \frac{G_T}{lF} y + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin \frac{n\pi x}{l} \exp \left[- \left(\frac{n\pi}{l} \right)^2 \left(\rho\beta + \frac{\rho d}{(\delta + h)E} \right)^{-1} \frac{t}{\alpha} \right];$$

$$\alpha = \begin{cases} 32 \frac{\nu}{d^2}, & \text{при } Re \leq 2300; \\ 0,158 \frac{w^{0,75} \nu^{0,25}}{d^{1,25}}, & \text{при } 2300 < Re \leq 20 \frac{d}{h}; \\ 0,055 \frac{w}{d} \left(\frac{68\nu}{wd} + \frac{h}{d} \right)^{0,25}, & \text{при } 20 \frac{d}{h} < Re < 500 \frac{d}{h}; \\ 0,055 \frac{wh^{0,25}}{d^{1,25}}, & \text{при } Re \geq 500 \frac{d}{h}. \end{cases} \quad (5)$$

$$y = \begin{cases} (l - \xi)x, & \text{при } 0 \leq x < \xi; \\ (l - x)\xi, & \text{при } \xi \leq x \leq l; \end{cases}$$

$$C_n = \frac{2\alpha G_T}{\pi^2 n^2 F} \sin \frac{n\pi \xi}{l},$$

где ν – динамическая вязкость, кг·с/м²; γ – кинематическая вязкость, Па·с.

Для проведения эксперимента были приняты параметры нефтепродукта и нефтепровода, табл. 2, взятые из [6–9]. Стационарные параметры [6–9]: $P_H=2,9$ МПа; $P_K=1,9$ МПа; $d=0,7$ м; $F=0,407$ м²; $l=30 \cdot 10^3$ м; $\xi=18 \cdot 10^3$ м; $G_T=35$ кг/с; $E=1,7 \cdot 10^5$ МПа; $\delta=0,02$ м; $\nu=0,25 \cdot 10^{-3}$ кг·с/м²; $h=(0,1 \dots 0,3) \cdot 10^{-3}$ м; $w=1,92 \dots 2,28$ м/с.

Как следует из (5), на процесс вычисления параметров утечки влияют как минимум три параметра – плотность нефти ρ , скорость движения нефти w и абсолютная шероховатость трубопровода h .

В зависимости от изменения перечисленных параметров изменяется коэффициент α . Как описано выше, выводятся функции чувствительности, устанавливающие связь между параметрами нефтепродукта и нефтепровода и погрешностью определения координаты утечки и её массового расхода, представленные соотношениями:

$$\Delta \xi = \frac{\alpha k_1 k_2 - k_2 (bk_1 - Fl)}{\alpha^2 k_2^2} \Delta \alpha;$$

$$\Delta G_T = \frac{k_2 F}{lx_1(l-x_2)\alpha^2} \Delta \alpha;$$

$$k_1 = x_1(P_2 - b_2), \quad k_2 = (l - x_2)(P_1 - b_1) - x_1(P_2 - b_2).$$

Таблица 2. Зависимость коэффициента сжимаемости нефти β при 15...20 °С от ее плотности ρ

ρ , кг/м ³	β
815...819	0,810
820...824	0,796
825...829	0,783
830...834	0,770
835...839	0,758

На основании этих формул проведены исследования влияния вариации параметра α на погрешности вычисления координаты и массового расхода утечки. Погрешность определения коэффициента α вычисляется по формуле:

$$\Delta \alpha = \alpha_{\text{вар}} - \alpha_0,$$

где $\alpha_{\text{вар}}$ – значение параметра α , изменяющееся в зависимости от значения параметров нефтепродукта и нефтепровода, рассчитанные по формулам (5); α_0 – начальное значение параметра α , рассчитанное при минимальных значениях параметров нефтепродукта и нефтепровода, а именно, $w=1,92$ м/с; $h=0,1 \cdot 10^{-3}$ м.

Проведено два эксперимента, в которых изменяются: 1) местоположение утечки при постоянном местоположении датчиков давления $x_1=4 \cdot 10^3$ м, $x_2=26 \cdot 10^3$ м; 2) положения датчиков давления друг

относительно друга при постоянном удалении места утечки $\xi=15 \cdot 10^3$ м; начальное положение датчиков давления было принято $x_{01}=12,5 \cdot 10^3$ м и $x_{02}=17,5 \cdot 10^3$ м. На основании проведенных экспериментов построены графики, рис. 5, 6.

Из представленных графиков наглядно видно, что величины ошибки вычисления параметров утечки не зависят от изменения координаты утечки. При удалении датчиков давления от места утечки наблюдается увеличение ошибок $\Delta \xi(\Delta \alpha)$ и $\Delta G_T(\Delta \alpha)$. Также очевидна тенденция повышения значений ошибок при повышении погрешности определения коэффициента α .

Выводы

1. Представлены алгоритмы определения параметров утечки (координаты и массового расхода), выявлен коэффициент, учитывающий изменение свойств нефтепродуктов и нефтепровода.
2. Получены функции чувствительности, устанавливающие связь между погрешностью датчиков давления и параметрами нефтепродукта и нефтепровода и погрешностью определения параметров утечки, разработана блок-схема алгоритма определения коэффициента гидравлического сопротивления трубопровода.
3. Проведены исследования влияния взаимного расположения датчиков давления и координаты утечки на чувствительность определения параметров утечки.
4. Установлено, что на погрешность вычисления координаты утечки в трубопроводе оказывает влияние местоположение датчиков измерения, а также шероховатости трубопровода, плотность и скорость движения транспортируемой жидкости.

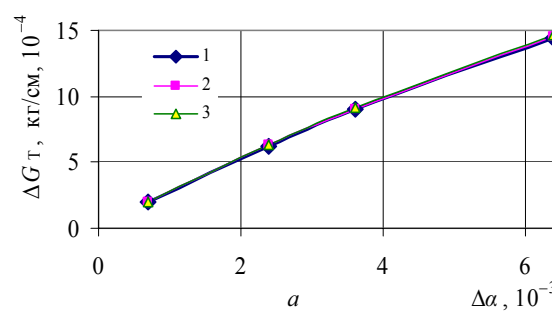
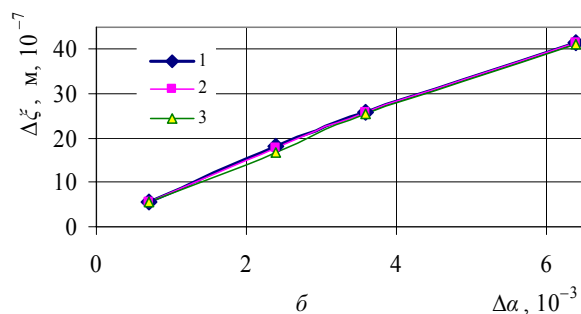


Рис. 5. Зависимости погрешности определения координаты (а) и массового расхода (б) утечки от коэффициента α при различных значениях местоположения утечки ξ : 1) $5 \cdot 10^3$; 2) $10 \cdot 10^3$; 3) $20 \cdot 10^3$ м

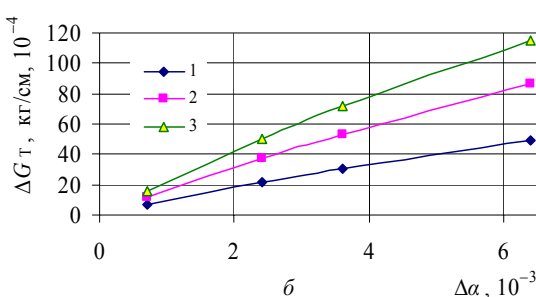
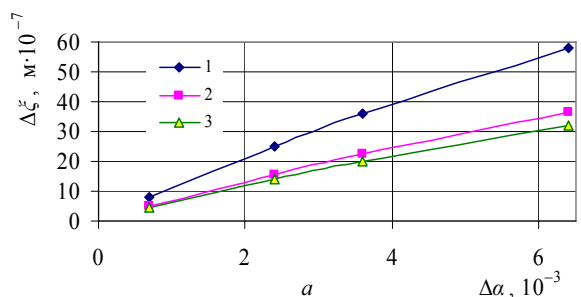


Рис. 6. Зависимости погрешности определения координаты (а) и массового расхода (б) утечки от коэффициента α при различных значениях координат датчиков давления Δx : 1) $5 \cdot 10^3$; 2) $10 \cdot 10^3$; 3) $15 \cdot 10^3$ м

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Моделирование процессов утечки жидкости в трубопроводе // Молодёжь и современные информационные технологии: Труды III Всеросс. научно-практ. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных. – Томск, 2005. – Т. 1. – С. 220–222.
2. Степанченко Т.Е., Шкляр В.Н. Разработка и исследование алгоритмов обнаружения утечек в магистральных трубопроводах на основе их гидродинамических моделей // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 7. – С. 70–73.
3. Датчики давления // Датчики давления, промышленное компрессорное и насосное оборудование. 2006. URL: <http://www.pressure.ru> (дата обращения: 18.09.2010).
4. Датчик давления серии «Карат» // Metronic. 2006. URL: www.metronic.ru (дата обращения: 19.09.2010).
5. Ким К.К., Анисимов Г.Н., Барбарович В.Ю., Литвинов Б.Я. Метрология, стандартизация, сертификация и электроизмерительная техника. – СПб.: Питер, 2006. – 368 с.
6. Явление гидравлического удара // «Petpetuum mobile». 2006. URL: <http://khd2.narod.ru/hydrodyn/ramblow.htm> (дата обращения: 23.02.2010).
7. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
8. Захарченко В.В., Морозов А.Н. Допустимые скорости движения жидкостей по трубопроводам и истечения в емкости (аппараты, резервуары) // ПТМ 6-28-007-78. 2005. URL: <http://www.simbexpert.ru/?snips/snip/9191/> (дата обращения: 10.04.2010).
9. Вайншток С.М. Трубопроводный транспорт нефти. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – Т. 1. – 407 с.

Поступила 17.09.2010 г.

УДК 66.048:533.15

ПРИБЛИЖЕННОЕ АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДИФФУЗИИ ЛЕГКОЛЕТУЧЕГО КОМПОНЕНТА ПАРОВОЙ ФАЗЫ В АППАРАТЕ ПРОСТОЙ ПЕРЕГОНКИ

Д.В. Феоктистов

Томский политехнический университет
E-mail: dmitrytpu@inbox.ru

Получено приближенное аналитическое решение задачи диффузии легколетучего компонента паровой фазы в аппарате простой перегонки. Установлены границы применимости полученного решения. На примере перегонного аппарата решена задача о распределении концентрации в паровой фазе легколетучего компонента от границы раздела фаз до патрубка, отводящего пары дистиллята.

Ключевые слова:

Массообмен, диффузия, объемная скорость потока, концентрация.

Key words:

Mass transfer, diffusion, volumetric flow rate, concentration.

Для полноты завершения описания процесса массообмена, происходящего в перегонных, ректификационных, абсорбционных и других установках, необходимо знать распределение частиц потока в аппарате по времени.

Наиболее существенные источники неравномерности распределения элементов потока по времени пребывания в промышленных аппаратах являются: 1) неравномерность профиля скоростей системы; 2) турбулизация потоков; 3) молекулярная диффузия; 4) наличие застойных областей в потоке; 5) каналобразование, байпасные и перекрестные токи в системе; 6) температурные градиенты движущихся сред; 7) тепло- и массообмен между фазами и т. п. [1].

Перечисленные причины, существующие в технологических аппаратах и действующие в различных сочетаниях, обуславливают специфический характер неравномерностей в каждом конкретном случае. Для оценки неравномерности потоков вводится ряд функций распределения, каждая из ко-

торых является результатом установления однозначного соответствия между произвольной частицей потока и некоторым характерным для нее промежутком времени.

Может оказаться, что истинное время пребывания в аппарате частиц потока будет недостаточным для осуществления процессов диффузии, а от этого будет зависеть эффективность диффузионного процесса в целом. Поэтому в настоящее время для составления математических описаний сложных процессов стали широко использовать модельные представления о внутренней структуре потоков, которые облегчают постановку граничных условий.

Для процессов массопередачи описание структуры потоков позволяет установить перемещение и распределение веществ. Поэтому все существующие гидродинамические модели потоков записываются преимущественно в виде уравнений, определяющих изменение концентрации вещества в потоке [2].