

ОЦЕНКА АВАРИЙНЫХ УТЕЧЕК НЕФТИ ИЗ ТРУБОПРОВОДОВ

А.Б. Корниенко

АННОТАЦИЯ

Для целей оценки потенциального воздействия на окружающую среду при авариях на трубопроводном транспорте предлагается методика, реализующая прогнозную модель расчета объема нефти, вытекающей из нефтепровода вследствие аварии. Методика соответствует требованиям российских нормативных документов РД «Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах» и «Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах». Предлагаемая методика включает теоретическое и численное решения задачи определения объема утечки нефти из трубопроводов.

ВВЕДЕНИЕ

В современный период значение нефтедобывающей отрасли промышленности неуклонно растет. Осваиваются новые территории месторождений углеводородов, трубопроводные сети для их доставки охватывают все большие территории, загрязнение окружающей среды вследствие разливов нефти приобретает особую остроту. Для принятия наиболее эффективных мер, направленных на предупреждение и ликвидацию последствий аварий, необходимо иметь расчетные данные о величине утечки на различных участках нефтепроводов.

При выполнении расчетов, связанных с определением объема утечек, и при проведении оценки степени риска (в том числе экологического) аварий на магистральных нефтепроводах применяются различные модели и методики, при этом приоритетными являются методические документы, утвержденные федеральными органами власти. Применительно к магистральным нефтепроводам можно выделить руководящие документы: РД «Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах» (РД, 1999) и «Методика определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах» (Методика, 1995).

Отмеченные методики имеют очевидный приоритет для использования в расчетах аварийных утечек. Однако они не предлагают реальную конкретизированную методику расчета прогнозной оценки утечки, что позволяет использовать различные существующие решения этой задачи и получать оценки в довольно широких пределах.

Данная статья является результатом теоретической проработки прогнозной модели по оценке утечек нефти из трубопроводов, максимально соответствующей требованиям РД (1999).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

При движении нефти в трубе в некоторый момент времени поверхность трубопровода повреждается, образуется дефектное отверстие. В соответствии с РД (1999) общий объем вытекшей нефти V складывается из объемов, вытекших на трех этапах:

$$V = V_1 + V_2 + V_3, \quad (1)$$

где V_1 — напорный режим, работают насосные станции (далее НПС);

V_2 — безнапорный режим, насосы отключены, но задвижки еще открыты;

V_3 — безнапорный режим, насосы отключены, задвижки закрыты.

В напорном режиме контролирующая аппаратура, расположенная в крайних точках участка трубопровода, не фиксирует утечку нефти до некоторого момента времени. Когда утечка установлена, происходит остановка работы насосов. Расход нефти в единицу времени на этом этапе считается постоянной величиной, поэтому объем нефти в этом случае определяется формулой (2) (Методика, 1995):

$$V_1 = Q_1 \cdot \tau_1, \quad (2)$$

где Q_1 — разница расходов слева и справа (рис. 1а);

τ_1 — определено в РД (1999) для трех типов отверстий, и по сути задача сводится к определению Q_1 :

$$Q_1 = Q' - Q'', \quad (3)$$

где Q' — расход нефти слева;

Q'' — расход нефти справа.

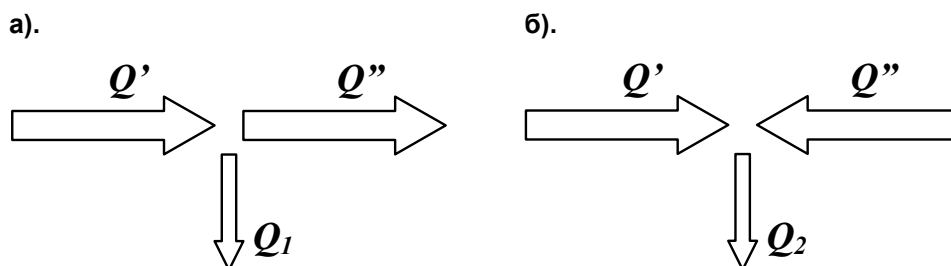


Рисунок 1. Схема распределения потоков нефти при наличии утечки в напорном (а) и безнапорном (б) режимах

В безнапорном режиме при открытых задвижках насосы не создают дополнительный напор, нефть вытекает через дефектное отверстие в соответствии с существующими в данный момент времени расходами нефти слева и справа (рис. 1б), создаваемыми давлением насыщенных паров и силой тяжести:

$$Q_2 = Q' + Q'' \quad (4)$$

Расход нефти через дефектное отверстие на этом этапе считается переменной во времени величиной, поэтому решение задачи рассматривается на небольших интервалах времени, в течение которых расход нефти Q_2 считается постоянной величиной. Величина элементарного интервала времени может находиться в пределах от 0,01 до 0,25 ч. в зависимости от требуемой точности расчетов (Методика, 1995).

В безнапорном режиме при закрытых задвижках так же, как и при открытых, нефть в условиях существующего профиля трассы под воздействием силы тяжести может вытекать как из левой части трубопровода относительно отверстия, так и с правой части или одновременно:

$$Q_3 = Q' + Q'' \quad (5)$$

Если учесть направление потоков нефти в трубе при движении к дефектному отверстию, то на всех трех этапах задачи сводятся к одной — определение расхода нефти через дефектное отверстие при определенных исходных данных, включающих начальное и конечное давление, создаваемый насосами расход нефти в единицу времени, существующий профиль трассы трубопровода, внутренний диаметр трубопровода и другие.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

За основу гидравлических расчетов на участке трубопровода в РД (1999) предлагается рассматривать систему уравнений (6, 7, 8), включающую условие неразрывности, законы сохранения массы и импульса потока ньютоновской жидкости, а также формулу связи давления и плотности:

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} = - \frac{\partial(\rho u)}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau} = - \frac{\partial}{\partial x}(\rho u^2 + P) - \lambda(\text{Re}) \cdot \frac{\rho u^2}{2D} + \rho g \beta, \quad (7)$$

$$P - P_0 = c^2(\rho - \rho_0), \quad (8)$$

где ρ — усредненная по сечению трубы плотность нефти;

u — усредненная по сечению трубы скорость движения нефти;

x — координата, проходящая вдоль трубы;

P — усредненное по сечению трубы давление;

τ — время;

$\lambda(\text{Re})$ — коэффициент трения, зависящий от режима течения в трубе (от числа Рейнольдса Re);

D — внутренний диаметр трубопровода;

g — ускорение свободного падения;

β — локальный угловой коэффициент трассы нефтепровода: $\beta = \frac{dz}{dx}$;

z — координата, проходящая вертикально;

P_0 — давление нефти в некоторый начальный момент времени;

c — скорость распространения звука в нефти;

ρ_0 — плотность нефти в некоторый начальный момент времени.

Для расчета c^2 будем пользоваться хорошо зарекомендовавшей себя на практике формулой Н.З. Френкеля (Френкель, 1956), известной также как формула Н.Е. Жуковского:

$$c^2 = \frac{1}{b\rho\left(\frac{1}{K} + \frac{D}{E\delta}\right)}, \quad (9)$$

где b — коэффициент, характеризующий деформацию трубопровода;

K — модуль сжимаемости жидкости;

E — модуль Юнга материала, из которого изготовлен трубопровод;

δ — толщина стенки трубопровода.

Мы также используем зависимость Коулбрука–Уайта для определения величины λ , связывающую ее с числом Рейнольдса и характеристиками трубопровода (10), и формулу, определяющую объемный расход жидкости по трубопроводу (12):

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left[\frac{2,51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} + \frac{A}{3,71 \cdot D} \right], \quad (10)$$

$$\text{Re} = \frac{uD}{\nu}, \quad (11)$$

где ν — кинематический коэффициент вязкости;

A — шероховатость внутренней поверхности трубопровода.

$$Q = \frac{\pi D^2}{4} u. \tag{12}$$

Для расчета объема вылившейся через дефектное отверстие нефти используем формулы из РД (13, 14) (РД, 1999), формулу расчета эквивалентного диаметра дефектного отверстия (15) (Методика, 1995), а также таблицу для расчета коэффициента расхода μ из (13) (табл. 1) (Методика, 1995):

$$u_0 = \sqrt{2 \frac{P - P_{OC}}{\rho}}, \tag{13}$$

$$M = \mu S_j u_0 \rho, \tag{14}$$

- где M — поток массы через отверстие;
 P_{OC} — давление окружающей среды;
 u_0 — скорость истечения нефти через отверстие;
 μ — коэффициент расхода нефти;
 S_j — площадь дефектного отверстия для варианта j .

Следует заметить, что для наземных трубопроводов в качестве ρ в формулах (13) и (14) используется плотность нефти при нормальных условиях ρ_0 (Методика, 1995), соответственно для морских трубопроводов необходимо учитывать, что плотность нефти на морском дне может отличаться от значения ρ_0 и увеличиваться под давлением окружающей среды, создающимся суммой атмосферного давления и давления столба морской воды в соответствии с требованием РД (1999).

$$D_{эkv.} = \sqrt{\frac{4S_j}{\pi}}. \tag{15}$$

Таблица 1. Определение коэффициента расхода μ

Re	<25	25...400	400...10 000	10 000...300 000	>300 000
μ	$\frac{Re}{48}$	$\frac{Re}{1,5 + 1,4Re}$	$0,592 + \frac{0,27}{Re^{1/6}}$	$0,592 + \frac{5,5}{\sqrt{Re}}$	0,595
Примечание: Re определяется в соответствии с (11) и (13)					

РАСЧЕТ РАСХОДА ЖИДКОСТИ Q ПРИ ДВИЖЕНИИ ПО ТРУБОПРОВОДУ

Для оценки объема вылившейся нефти необходимо решить задачу для участка трубопровода с началом в условной точке x_1 до произвольной точки x . Исходными данными являются длина трубопровода $L = x - x_1$, отметки высот на концах участка Z_1 и Z , давления на концах участка P_1 и P .

Необходимо найти

$$Q = f(L, Z_1, Z, P_1, P). \quad (16)$$

Рассмотрим уравнение (7). Частная производная $\frac{\partial(\rho u)}{\partial \tau}$ показывает изменение массы переносимой нефти в единицу времени. Главным образом, изменения процесса течения по времени происходят в начале аварии, затем характер течения становится установившимся. Принимая во внимание, что продолжительность начального неустановившегося процесса невелика и практически составляет одну или несколько минут, а также, что момент начала аварии выбирается довольно условно, для оценки вылившейся жидкости будем считать, что процесс течения является установившимся, и частную производную по времени можно исключить.

Проинтегрируем оставшуюся часть уравнения (7) для участка трассы от точки x_1 до точки x :

$$-\int_{x_1}^x \frac{\partial}{\partial x} \rho u^2 dx - \int_{x_1}^x \frac{\partial}{\partial x} P dx - \int_{x_1}^x \lambda(\text{Re}) \frac{\rho u^2}{2D} dx + \int_{x_1}^x \rho g \beta dx = 0. \quad (17)$$

Если принять во внимание, что в соответствии с (6), (8) и условием сохранения массы $\rho u = \rho_1 u_1$, u , ρ и P связаны между собой линейными зависимостями, то уравнение (17) примет вид:

$$-\hat{\rho} \hat{u} (u - u_1) + (P_1 - P) - \frac{\hat{\rho} \hat{u}}{2D} \int_{x_1}^x \lambda(\text{Re}) u dx + \hat{\rho} g (Z_1 - Z) = 0, \quad (18)$$

где $\hat{\rho}$ и \hat{u} — средние значения ρ и u на участке от x_1 до x .

Рассмотрим зависимость $\lambda(\text{Re})u$ от u . На рис. 2 изображен график зависимости $\lambda(\text{Re})u$ от x в достаточно широком интервале возможных скоростей при движении жидкости от 0,1 до 5 м/с. Для сравнения: в действующем нормативном федеральном документе РД 153-39.4-113-01 «Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов» приводится максимальное значение скорости перекачки 3,2 м/с. Серым цветом изображена прямая, проходящая через крайние точки $\lambda(\text{Re})\hat{u}$. Для расчета $\lambda(\text{Re})\hat{u}$ использовались значения: шероховатость 0,2 мм, внутренний диаметр 1000 мм.

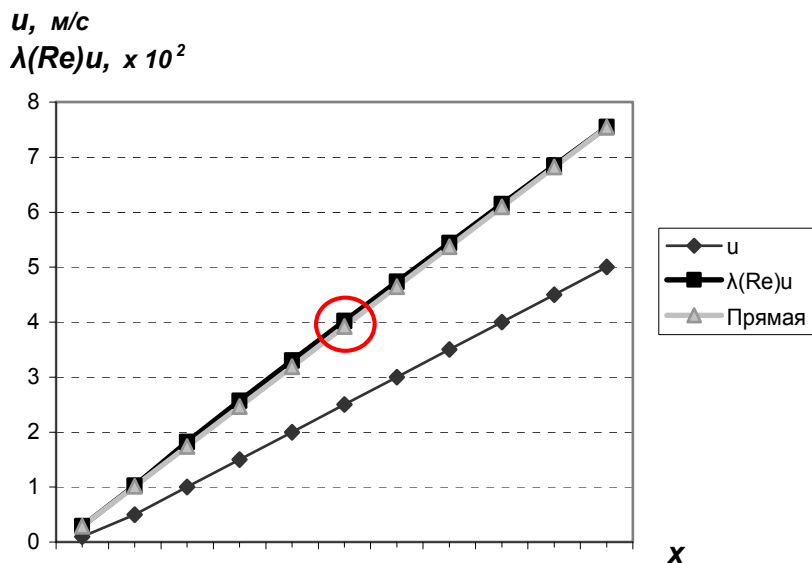


Рисунок 2. График изменения $\lambda(Re)u$ от x
(кругом обведено среднее значение)

С учетом того, что $\int_{x_1}^x \lambda(Re)u dx$ геометрически означает площадь под графиком $\lambda(Re)u$ на интервале $L = x - x_1$, можно принять, что $\int_{x_1}^x \lambda(Re)u dx = L \cdot \lambda(\hat{Re})\hat{u}$, тогда уравнение (18) примет вид:

$$-\hat{u}(u - u_1) + \frac{P_1 - P}{\hat{\rho}} - \frac{L}{2D} \lambda(\hat{Re})\hat{u}^2 + g(Z_1 - Z) = 0, \quad (19)$$

где $\hat{u} = \frac{1}{2}(u_1 + u)$, $\hat{\rho} = \frac{1}{2}(\rho_1 + \rho)$. (20)

Заметим, что из формулы $\rho u = \rho_1 u_1 = \hat{\rho} \hat{u}$ следует, что:

$$u = \frac{\rho_1}{\rho} u_1 = \frac{\hat{\rho}}{\rho} \hat{u}, \quad (21)$$

тогда первый член уравнения (19)

$$-\hat{u}(u - u_1) = -\frac{\hat{u}^2}{2} \left(\frac{\rho_1}{\rho} - \frac{\rho}{\rho_1} \right) \quad (22)$$

можно выразить отношением произвольных плотностей ρ_i и ρ_j , используя связь плотности и давления (8), формулу Н.Е. Жуковского для c^2 и условие $b = 1$, характерное для современных высокопрочных трубопроводов, как:

$$k(P_i, P_j) = \frac{\rho_i}{\rho_j} = \frac{1 - (P_j - P_0) \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{E\delta} \right)}{1 - (P_i - P_0) \left(\frac{1}{K} + \frac{D}{E\delta} \right)}. \quad (23)$$

Тогда первый член (22) уравнения (19) представим как:

$$-\hat{u}(u - u_1) = -\frac{k(P_1, P) - k(P, P_1)}{2} \hat{u}^2. \quad (24)$$

Второй член уравнения (19) содержит $\hat{\rho}$, который тоже можно выразить через P и P_1 , используя (23):

$$\hat{\rho} = \hat{\rho}(P, P_1) = \frac{\rho_0}{2} (k(P, P_0) + k(P_1, P_0)). \quad (25)$$

Уравнение (19) с учетом (24) и (25) будет иметь следующий вид:

$$-\frac{k(P_1, P) - k(P, P_1)}{2} \hat{u}^2 + \frac{2(P_1 - P)}{\rho_0 (k(P, P_0) + k(P_1, P_0))} - \frac{L}{2D} \lambda(\hat{Re}) \hat{u}^2 + g(Z_1 - Z) = 0. \quad (26)$$

Для решения поставленной задачи достаточно решить это уравнение относительно \hat{u} , которое необходимо для вычисления Q в соответствии с (12) и (20). Следует иметь в виду, что λ рассчитывается с помощью трансцендентного уравнения (10) и, в свою очередь, в соответствии с (11) тоже зависит от \hat{u} . Однако существуют методы поиска решения такого уравнения на некотором интервале значений. В табл. 2 приведен итерационный расчет λ . В зависимости от разных начальных данных, 5 точных знаков λ достигает за 5—8 итераций. Более быстрая сходимость результата наблюдается при больших значениях Re .

Решим уравнение (26) относительно $\lambda(\hat{Re}) \cdot \hat{u}^2$:

$$\lambda(\hat{Re}) \hat{u}^2 = \frac{2D}{L} \left(-\frac{k(P_1, P) - k(P, P_1)}{2} \hat{u}^2 + \frac{2(P_1 - P)}{\rho_0 (k(P, P_0) + k(P_1, P_0))} + g(Z_1 - Z) \right). \quad (27)$$

Таблица 2. Расчет λ по формуле Коулбрука–Уайта (РД, 1999)

Начальные данные				
Re	D (см)	A (мм)	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}}$	λ
20000	100	0,1	7,071067812	0,02
Итерация				
1			6,077753034	0,027071599
2			6,205062323	0,025972138
3			6,187664593	0,026118394
4			6,190021661	0,026098507
5			6,189701947	0,026101203
6			6,189745306	0,026100837
7			6,189739426	0,026100887
8			6,189740223	0,02610088
9			6,189740115	0,026100881
10			6,18974013	0,026100881
11			6,189740128	0,026100881
12			6,189740128	0,026100881
13			6,189740128	0,026100881
14			6,189740128	0,026100881
15			6,189740128	0,026100881

Введем переменную \mathcal{G} , имеющую размерность скорости:

$$\mathcal{G} = \sqrt{\frac{2D}{L} \left(-\frac{k(P_1, P) - k(P, P_1)}{2} \hat{u}^2 + \frac{2(P_1 - P)}{\rho_0(k(P, P_0) + k(P_1, P_0))} + g(Z_1 - Z) \right)}, \quad (28)$$

тогда решение (26), используя (10) и (28), можно представить как:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \frac{\nu \text{Re}}{D \mathcal{G}}. \quad (29)$$

Подставив (29) в уравнение Коулбрука–Уайта (10), получим уравнение для расчета Re, не зависящее от λ :

$$\text{Re} = -2 \frac{D}{\nu} \mathcal{G}(\text{Re}) \cdot \lg \left[\frac{2,51\nu}{\mathcal{G}(\text{Re}) \cdot D} + \frac{A}{3,71D} \right]. \quad (30)$$

Вычисление Re с помощью уравнения (30) итерационным методом дает решение с точностью 5 знаков уже на первой итерации (табл. 3).

Таблица 3. Расчет Re по трансцендентному уравнению (30)

Начальные данные					
D (см)	A (мм)	ρ_0 (кг/м ³)	ν (10 ⁻⁶ м ² /с)	g (м ² /с)	P_0 (бар)
100	0,1	860	7,6	9,81	0,95
L (км)	c (м/с ²)	P1 (бар)	P (бар)	Z1-Z (м)	Re
10	958	10,2	9	-9	130000
Итерация					
1					97527,34988
2					97527,41815
3					97527,41815
4					97527,41815
5					97527,41815
6					97527,41815
7					97527,41815
8					97527,41815
9					97527,41815
10					97527,41815

При расчете среднего значения Re для напорного режима следует учесть ограничение на максимально возможное Re , связанное с ограничением мощности насосов, которые могут обеспечить подачу нефти Q_{max} . Расчет Re_{max} можно произвести из условия сохранения массы $\rho Q = \rho_0 Q_{max}$, из которого с учетом (11), (12), (21) и (23) получим:

$$Re_{max} = \frac{4 \cdot k(P_0, P) \cdot Q_{max}}{\pi D \nu} \quad (31)$$

Рассчитав в соответствии с (11), (12), (21), (23) и (30) \hat{Re} , получим решение задачи (16):

$$Q = f(L, Z_1, Z, P_1, P) = \frac{\pi D^2}{4} u = \frac{\pi}{4} D \nu \cdot k\left(\frac{P_1 + P}{2}, P\right) \cdot \hat{Re}(L, Z_1, Z, P_1, P) \quad (32)$$

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА АВАРИЙНОЙ УТЕЧКИ НЕФТИ V_1 В НАПОРНОМ РЕЖИМЕ

На участке нефтепровода от НПС₁ до НПС₂ в точке М на расстоянии x от НПС₁ находится дефектное отверстие. Необходимо рассчитать объем нефти V_1 , вытекший из отверстия с начала аварии до момента остановки перекачки.

Для определения Q_1 в соответствии с (3), (13), (14), (21), (23), (32) решается система уравнений:

$$\begin{cases} Q' - Q'' - Q_1 = 0 \\ Q' = f(x, Z_1, Z_m, P_1, P_m) \\ Q'' = k(P_2, P_m) f(L - x, Z_m, Z_2, P_m, P_2) \\ Q_1 = \mu S_j \sqrt{2 \frac{P_m - P_{OC}}{\rho}} \end{cases} \quad (33)$$

где $f()$ — функция, определенная в (16) и (32);

ρ — плотность нефти при давлении окружающей среды.

В системе из 4 уравнений (33) рассматриваются в качестве неизвестных 4 переменные: Q' , Q'' , Q_1 и P_m . Для наземных трубопроводов в качестве P_{OC} выступает атмосферное давление P_A , для морских $P_{OC} = \rho_{OC} \cdot gh + P_A$, где ρ_{OC} — плотность морской воды, h — глубина в месте нахождения трубопровода.

Для решения системы уравнений (33) методами численного анализа вводим функцию $\Delta Q(P_m) = Q'(P_m) - Q''(P_m) - Q_1(P_m)$ и производим поиск значения давления P_m на возможном интервале давлений, при котором значение функции $\Delta Q(P_m)$ будет с заданной точностью близко к нулю. Верхнее значение интервала возможных давлений в месте аварии можно определить, решив систему уравнений (33) для нулевого дефектного отверстия. Определив P_m , вычисляем Q_1 в соответствии с четвертым уравнением системы уравнений (33).

Определив Q_1 для трех типов дефектных отверстий (РД, 1999) в соответствии с формулой $V_1 = Q_1 \tau_1$, вычисляем V_1 для каждого отверстия.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА АВАРИЙНОЙ УТЕЧКИ НЕФТИ V_2 В БЕЗНАПОРНОМ РЕЖИМЕ ДО МОМЕНТА ЗАКРЫТИЯ ЗАДВИЖЕК

В некоторый условный момент времени насосы отключаются, но задвижки еще остаются открытыми. Необходимо рассчитать объем нефти V_2 , вытекший из отверстия с момента остановки перекачки до момента закрытия задвижек.

V_2 равно сумме объемов вытекающей из трубопровода нефти слева и справа от места аварии на каждом элементарном интервале времени. Возможны две ситуации: одновременное опорожнение двух участков и опорожнение одного участка.

Система уравнений для решения задачи на элементарном интервале времени аналогична системе уравнений для напорного режима и соответственно решается таким же методом:

$$\begin{cases} Q' + Q'' - Q_2 = 0 \\ Q' = f(x, Z_1, Z_M, P_1, P_M) \\ Q'' = f(L - x, Z_2, Z_M, P_2, P_M) \\ Q_2 = \mu S_j \sqrt{2 \frac{P_M - P_{OC}}{\rho}} \end{cases} \quad (34)$$

Величины P_1 и P_2 определяются суммой давления насыщенных паров P_S и давлением, соответствующим напору разности высот Z_1 и Z_2 (Методика, 1995).

Для варианта профиля, изображенного на рис. 3, когда одна из НПС находится выше другой, скорость течения нефти в крайней верхней точке $u_{нов}$ нижнего участка будет равна нулю, т.к. напор, создаваемый разницей уровней $Z_2 - Z_1$, направлен в противоположную сторону. Совершенно очевидно, что процесс течения будет стремиться уравновесить давление в крайних точках слева и справа, что возможно в соответствии с (19) для левого и правого участка при равенстве высот Z_1 и Z_2 . Для расчета объема нефти, вытекшей через дефектное отверстие, достаточно полагать, что при неравенстве высот Z_1 и Z_2 будет иметь место истечение с одного участка.

При одновременном истечении с левого и правого участков давление в точках 1 и 2 принимается за P_S .

Решение задачи на следующем элементарном интервале времени аналогично решению на предыдущем интервале, но в качестве начальных значений Re_1 и Re_2 берутся значения, полученные на предыдущем интервале времени, а также рассчитываются новые значения высот Z_1 , Z_2 и длин x , L . Длина опорожнившегося участка трубопровода за элементарный интервал времени $\Delta\tau$ будет равна:

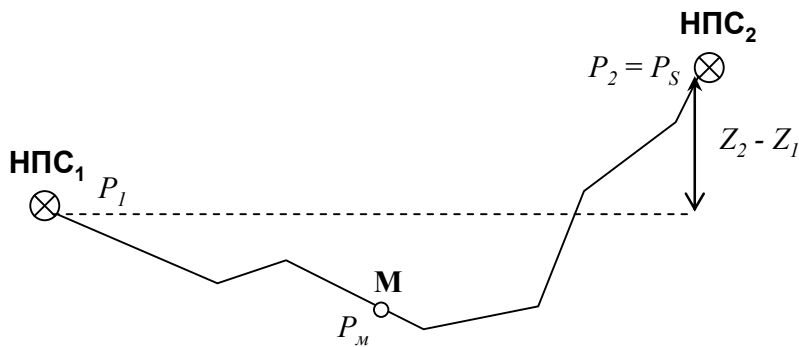


Рисунок 3. Вариант профиля трассы трубопровода
(М — место повреждения трубопровода)

$$\Delta x = u_{нов} \cdot \Delta \tau = \frac{\nu Re_{нов}}{D} \Delta \tau, \quad (35)$$

где $u_{нов}$ и $Re_{нов}$ — значения u и Re в крайних верхних точках, т.е. для левого участка это u_1 и Re_1 , а для правого — u_2 и Re_2 .

В общем случае $Re_{нов} = 2 \hat{Re} - Re$.

Суммирование элементарных объемов производится в соответствии с рекомендацией РД (1999) согласно (Методика, 1995).

В соответствии с РД (1999) время истечения τ_2 определяется техническими характеристиками срабатывания задвижек. По достижению времени τ_2 расчет на этом этапе прекращается.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕМА АВАРИЙНОЙ УТЕЧКИ НЕФТИ V_3 В БЕЗНАПОРНОМ РЕЖИМЕ С МОМЕНТА ЗАКРЫТИЯ ЗАДВИЖЕК

На этом этапе необходимо рассчитать объем нефти V_3 , вытекший из дефектного отверстия после закрытия задвижек для двух сценариев (РД, 1999):

1. с момента закрытия задвижек до прибытия аварийно-восстановительных бригад;
2. с момента закрытия задвижек до полного возможного опорожнения отсеченного задвижками участка трубопровода.

Данная задача эквивалентна задаче по определению утечки в безнапорном режиме с момента остановки перекачки до момента закрытия задвижек, за исключением изменившейся длины левого и правого участков. Время прекращения расчета в соответствии с сценарием ограничивается временем прибытия аварийно-восстановительных бригад τ_3 или не ограничивается вообще.

Для второго сценария объем вытекшей нефти определяется как:

$$V_3 = \frac{\pi D^2 l'}{4}, \quad (36)$$

где l' — находится как сумма длин участков нефтепровода между перевальными точками или 2-мя смежными с местом повреждения М и обращенных к месту повреждения, за исключением участков, геодезические отметки которых ниже отметки места повреждения (Методика, 1995).

Заметим, что объем вытекшей нефти V_3 (36) соответствует полному опорожнению участка трубопровода, что возможно в соответствии с (13) и (19) при P_1 и P_2 равными P_0 , что означает полную разгерметизацию оставшегося участка трубопровода.

Однако, если использовать уравнение (36), то продолжительность истечения не будет определена. Поэтому для обоих сценариев можно использовать приведенный выше алгоритм для безнапорного режима, суммируя элементарные

утечки за каждый элементарный интервал времени до момента устранения утечки или до полного вытекания нефти.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ОБЪЕМА АВАРИЙНОЙ УТЕЧКИ НЕФТИ V_1 В НАПОРНОМ РЕЖИМЕ

Для верификации предлагаемой модели в напорном режиме использовался пример задачи №85 М.В. Лурье (Лурье, 2003), где определяется объем вытекающей нефти в указанном режиме. Исходные данные примера:

$\rho = 870 \text{ кг/м}^3$	$\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$\tau_1 = 6 \text{ часов}$	$D = 700 \text{ мм}$
$\delta = 10 \text{ мм}$	$L = 120 \text{ км}$	$Z_1 = 150 \text{ м}$	$Z_2 = 100 \text{ м}$
$x = 80 \text{ км}$	$Z_m = 50 \text{ м}$	$S_j = 25 \text{ см}^2$	$P_1 = 4,5 \text{ МПа}$
$P_2 = 0,3 \text{ МПа}$			

Для проверяемой модели к расчету были приняты следующие дополнительные данные:

$K = 1,35 \times 10^9 \text{ Па}$, $E = 1,9 \times 10^{11} \text{ Па}$, Q_{\max} не ограничивается.

Ответ задачи по (Лурье, 2003) — 2285 м^3 . Значение, рассчитанное по предлагаемой модели для шероховатости внутренней поверхности трубопровода $A = 0,4 \text{ мм}$ — $2146,5 \text{ м}^3$, для $A = 0 \text{ мм}$ — 2161 м^3 . Разница значений (погрешность до 6%) объясняется тем, что в задаче М.В. Лурье предполагается, что нефть является идеальной несжимаемой жидкостью, поэтому рассчитанное значение вполне заслуживает доверия.

ПРИМЕР РАСЧЕТА ОБЪЕМА АВАРИЙНОЙ УТЕЧКИ НЕФТИ V_2 В БЕЗНАПОРНОМ РЕЖИМЕ

Для верификации предлагаемой модели в части расчета утечек в безнапорном режиме использовался пример задачи №90 М.В. Лурье (Лурье, 2003), где определяется объем утечки авиационного керосина, вытекающего в указанном режиме. Исходные данные примера:

$\rho = 780 \text{ кг/м}^3$	$\nu = 2 \times 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	$\tau_2 = 2 \text{ часа}$	$D = 207 \text{ мм}$
$\delta = 6 \text{ мм}$	$x = 20 \text{ км}$	$P_s = 0 \text{ МПа}$	
Профиль трубопровода задан в табл. 4.			

Таблица 4. Профиль трубопровода

X, км	10,0	12,0	13,0	14,0	20,0	22,0	25,0
Z, м	50	56	52	60	72	45	60

Примечание:

X — координата сечения, Z — высота отметки сечения

Для проверяемой модели к расчету были приняты следующие дополнительные данные:

$K = 1,35 \times 10^9$ Па, $E = 1,9 \times 10^{11}$ Па, $\Delta \tau = 10$ мин.

Ответ задачи по (Лурье, 2003) — 44 м^3 . Значение, рассчитанное по предлагаемой модели для шероховатости внутренней поверхности трубопровода $A = 0,2 \text{ мм}$ — $41,7 \text{ м}^3$, для $A = 0 \text{ мм}$ — $42,6 \text{ м}^3$. Рассчитанное значение близко к ожидаемому результату (погрешность $\sim 5\%$) и вполне заслуживает доверия.

ВЫВОДЫ

В данной работе:

1. предлагается теоретическое решение задачи по определению величины аварийной утечки нефти, в основе которого лежат материалы российских нормативно-технических документов, где в качестве нефти рассматривается ньютоновская жидкость, что предусматривает возможность ее сжатия и изменения физических свойств при течении по трубопроводу;
2. разработана математическая модель, позволяющая оценить величину аварийной утечки нефти;
3. предлагается методика, предназначенная для расчета количества вытекшей нефти из наземного или морского трубопровода в напорном и безнапорных режимах.

В качестве окружающей среды, в которой пролегает трубопровод, рассматривается как атмосферный воздух, так и водная среда, что позволяет использовать данную методику для расчетов объемов утечек нефти. Методика также может быть использована для расчета продолжительности утечек нефти из наземных и морских трубопроводов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Лурье** М.В. Задачник по трубопроводному транспорту нефти, нефтепродуктов и газа: Учебное пособие для вузов. — М.: Недра-Бизнесцентр, **2003**.
- Методика** определения ущерба окружающей природной среде при авариях на магистральных нефтепроводах / А.Г. Гумеров, Р.С. Гумеров, Х.А. Азметов и др. — утв. Минтопэнерго РФ 01.11.95. — **1995**.
- РД** «Методическое руководство по оценке степени риска аварий на магистральных нефтепроводах». — Утв. ОАО АК «Транснефть», пр. от 30.12.99 №152, согл. Госгортехнадзором России 07.07.99 №10-03/418. — **1999**.
- Френкель** Н.З. Гидравлика. — М.: Госэнергоиздат, **1956**.