

## Практическое задание № 1

### Расчет количества нефти, вылившейся из нефтепровода вследствие аварии

Расчет количества нефти, вылившейся из трубопровода, производится в три этапа, определяемых разными режимами истечения:

- истечение нефти с момента повреждения до остановки перекачки;
- истечение нефти из трубопровода с момента остановки перекачки до закрытия задвижек;
- истечение нефти из трубопровода с момента закрытия задвижек до прекращения утечки.

**Стадия 1.** Объем  $V_1$  нефти, вытекшей из нефтепровода с момента возникновения аварии до момента остановки перекачки, определяется соотношением:

$$V_1 = Q_1 \cdot \tau_1 = Q_1 \cdot (\tau_0 - \tau_a), \quad (8.1)$$

где  $Q_1$  – расход нефти через место повреждения с момента возникновения аварии до остановки перекачки, м<sup>3</sup>/ч;  $\tau_1$  – продолжительность истечения нефти из поврежденного нефтепровода при работающих насосных станциях, ч;  $\tau_0$  – время остановки насосов после повреждения, ч;  $\tau_a$  – время повреждения нефтепровода, ч. Время повреждения  $\tau_a$  и остановки  $\tau_0$  насосов фиксируется системой автоматического контроля режимов перекачки.

Расход нефти через место повреждения с момента возникновения аварии до остановки перекачки, м<sup>3</sup>/ч [14]:

$$Q_1 = Q' - Q_0 \cdot \left\{ \frac{1}{l - x^*} \cdot \frac{Z_1 - Z_2 + \frac{(P' - P'')}{\rho g} - i_0 \cdot x^* \cdot \left( \frac{Q'}{Q_0} \right)^{2-m_0}}{i_0} \right\}^{\frac{1}{2-m_0}}, \quad (8.2)$$

где  $Q'$  – расход нефти в нефтепроводе в поврежденном состоянии, м<sup>3</sup>/ч;  $Q_0$  – расход нефти в нефтепроводе при работающих насосных станциях в исправном состоянии, м<sup>3</sup>/ч;  $Z_1$  – геодезическая отметка начала участка нефтепровода, м;  $Z_2$  – геодезическая отметка конца участка нефтепровода, м;  $P'$  – давление в начале участка нефтепровода в поврежденном состоянии, Па;  $P''$  – давление в конце участка нефтепровода в поврежденном состоянии, Па;  $\rho$  – плотность нефти, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $i_0$  – гидравлический уклон при перекачке нефти по исправному нефтепроводу;  $x^*$  – протяженность участка нефтепровода от насосной станции до места повреждения, м;  $m_0 = 0,25$  – показатель режима движения нефти по нефтепроводу в исправном его состоянии [15];  $l$  – протяженность участка нефтепровода, заключенного между двумя насосными станциями, м.

Расход  $Q_0$  нефти в исправном нефтепроводе при работающих нефтеперекачивающих станциях (НПС) определяется режимом загрузки нефтепровода и фиксируется по показаниям приборов на НПС.  $Z_1, Z_2, l, x^*$  определяются по профилю трассы нефтепровода (рис. 8.1). Расход  $Q'$ , давление  $P'$  в начале и  $P''$  в конце поврежденного нефтепровода при работающих НПС определяются по показаниям приборов на НПС на момент аварии.

Частные случаи определения  $Q_1$ :

а) при  $Q_1 \cong Q_0$  (когда величина утечки настолько мала, что не фиксируется приборами на НПС):

$$Q_i = \mu \cdot \omega \sqrt{2g \cdot h^*}, \quad (8.3)$$

где  $\mu$  - коэффициент расхода нефти через место повреждения;  $\omega$  - площадь дефектного отверстия,  $m^2$ ,  $h^*$  - перепад напора в точке истечения через место повреждения при работающих НПС, м.

Коэффициент расхода  $\mu$  через дефектное отверстие диаметром  $d_{омв}$  определяется в зависимости от числа Рейнольдса  $Re$  в соответствии с табл. 8.1.

Таблица 8.1

Коэффициент расхода

Показатели при $Re$	<25	25...400	400...10000	10000...300000	>300000
Коэффициент расхода $\mu$	$Re/48$	$Re/(1,5+1,4Re)$	$0,29 + 0,27 / \sqrt[6]{Re}$	$0,592 + 5,5 / \sqrt{Re}$	0,595

Число Рейнольдса определяется по формуле:

$$Re = \frac{d_{омв} \sqrt{2g \cdot h^*}}{\nu}, \quad (8.4)$$

$d_{омв}$  - диаметр дефектного отверстия, м;  $\nu$  - кинематический коэффициент вязкости нефти,  $m^2/c$ .

Для определения коэффициента расхода нефти через отверстие, форма которого отличается от круглой, рассчитывается эквивалентный диаметр:

$$d_{экр} = \sqrt{\frac{4\omega}{\pi}}. \quad (8.5)$$

В этом случае в формуле определения  $Re$   $d_{отв} = d_{экр}$ .

Перепад напора в точке истечения нефти определяется из выражения:

$$h^* = \frac{P'}{\rho \cdot g} - i' \cdot x^* - h_T, \quad (8.6)$$

где  $i'$  - гидравлический уклон при перекачки нефти по поврежденному нефтепроводу до места повреждения;  $h_T$  - глубина заложения нефтепровода (от поверхности земли до нижней образующей), м.

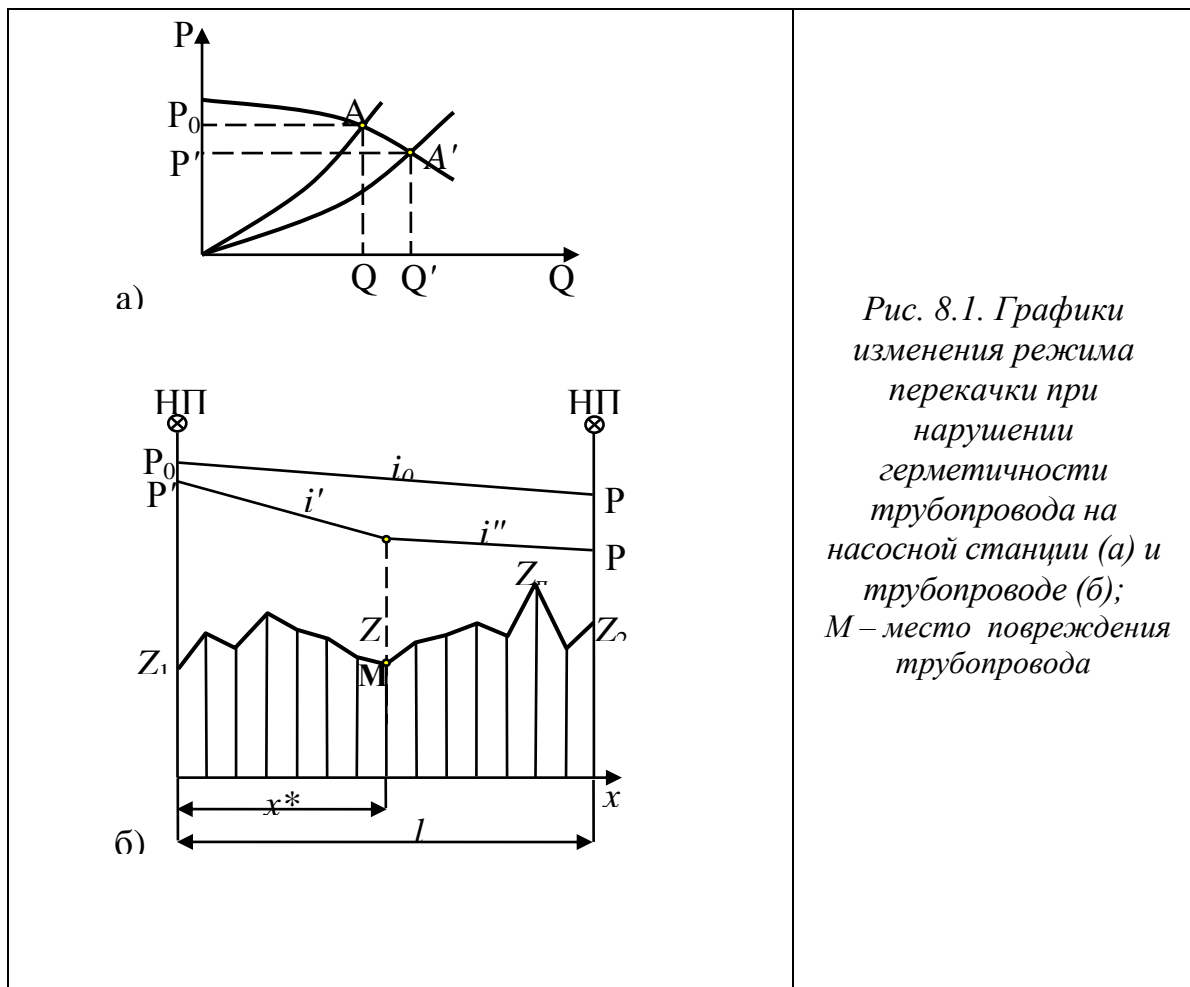


Рис. 8.1. Графики изменения режима перекачки при нарушении герметичности трубопровода на насосной станции (а) и трубопроводе (б); М – место повреждения трубопровода

б) Если  $P'' = 0$

$$\text{или } P'' < (Z_n - Z_2) \cdot \rho \cdot g \text{ или } P'' < (Z_m - Z_2) \cdot \rho \cdot g, \quad (8.7)$$

то  $Q_1 = Q'$ , где  $Z_n$  – геодезическая отметка перевальной точки, м;

$Z_2$  – геодезическая отметка конца участка нефтепровода, м;

$Z_m$  – геодезическая отметка места повреждения нефтепровода, м.

**Стадия 2.** После отключения насосных станций происходит опорожнение расположенных между двумя ближайшими НПС возвышенных и обращенных к месту повреждения участков, за исключением понижений между ними. Истечение нефти определяется переменным во времени напором, уменьшающимся по мере освобождения нефтепровода столбом нефти над местом истечения. Для выполнения расчетов продолжительность  $\tau_2$  истечения нефти с момента остановки перекачки  $\tau_0$  до закрытия задвижек  $\tau_3$  разбивается на элементарные интервалы  $\tau_i$ , внутри которых режим истечения (напор и расход) принимается неизменным. Для практического применения  $\tau_i$  принимают равным 0,25 ч, для более точных расчетов значения  $\tau_i$  можно уменьшить до 0,01...0,1 ч. Общий объем нефти, вытекший из нефтепровода за время  $\tau_2 = (\tau_0 - \tau_3)$ , определяется как сумма объемов  $V_i$  нефти, вытекшие за элементарные промежутки времени  $\tau_i$ :

$$V_2 = \Sigma V_i = \Sigma(Q_i \cdot \tau_i). \quad (8.8)$$

Для каждого  $i$ -го элементарного интервала времени определяется соответствующий расход  $Q_i$  нефти через дефектное отверстие:

$$Q_i = \mu \cdot \omega \sqrt{2g \cdot h_i}. \quad (8.9)$$

Напор в отверстии, соответствующий  $i$ -му элементарному интервалу времени, рассчитывается по формуле:

$$h_i = Z_i - Z_M - h_T - h_a, \quad (8.10)$$

где  $Z_i$  – геодезическая отметка самой высокой точки профиля рассматриваемого участка нефтепровода, заполненного нефтью на  $i$ -й момент времени, м;  $Z_M$  – геодезическая отметка места повреждения, м;  $h_T$  – глубина заложения нефтепровода, м;  $h_a$  – напор, создаваемый атмосферным давлением, м.

За элементарный промежуток времени  $\tau_i$  освобождается объем нефтепровода  $V_i$ , что соответствует освобождению  $\ell_i$  участка нефтепровода:

$$\ell_i = \frac{4V_i}{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2}, \quad (8.11)$$

где  $D_{\text{вн}}^2$  – внутренний диаметр нефтепровода, м.

Освобожденному участку  $l_i$  соответствуют значения  $x_i$  и  $Z_i$ , определяющие статический напор в нефтепроводе в следующий расчетный интервал времени  $\tau_{i+1}$ . Значение  $Z_i$  подставляется в формулу (8.10), и далее расчет повторяется полностью для интервала времени  $\tau_{i+1}$ . Операция расчета повторяется до истечения времени  $\tau_2 = (\tau_0 - \tau_3)$ .

**Стадия 3.** Основной объем нефти, вытекающей после закрытия задвижек до прекращения самопроизвольного истечения нефти через место повреждения,  $m^3$ , определяется по формуле:

$$V_3 = \frac{\pi \cdot D_{\text{вн}}^2 \cdot l'}{4}, \quad (8.12)$$

где  $l'$  – суммарная длина участков нефтепровода между двумя перевальными точками или двумя смежными с местом повреждения задвижками, возвышенных относительно места повреждения  $M(x^*, Z_M)$  и обращенных к месту повреждения, за исключением участков, геодезические отметки которых ниже отметки повреждения, м.

Общий объем (общая масса  $M$ ) вылившейся при аварии нефти определяется суммой объемов истечения нефти с момента возникновения аварии до прекращения утечки:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (8.13)$$

$$\text{или } M = \rho \cdot V. \quad (8.14)$$

**Пример 8.1.** На нефтепроводе произошел порыв. Рассчитать объем нефти, вытекший через место повреждения до момента выключения насосов.

Таблица 8.2.

*Исходные данные*

$\tau_A = 8 \text{ ч } 15 \text{ мин}$	Время повреждения нефтепровода
$\tau_0 = 8 \text{ ч } 30 \text{ мин}$	Время останова насосов
$Q_0 = 0,8 \text{ м}^3/\text{с}$	Расход нефти в неповрежденном нефтепроводе при работающих насосных станциях
$Q' = 1,0 \text{ м}^3/\text{с}$	Расход нефти при работающих насосах в поврежденном нефтепроводе
$l = 100 \text{ км} = 100000 \text{ м}$	Протяженность аварийного участка нефтепровода между двумя насосными станциями
$x^* = 50 \text{ км} = 50000 \text{ м}$	Расстояние от насосной станции до места повреждения
$Z_1 = 160 \text{ м}$	Геодезическая отметка начала аварийного участка
$Z_2 = 120 \text{ м}$	Геодезическая отметка конца аварийного участка
$P' = 40 \cdot 10^5 \text{ Па}$	Давление в начале участка
$P'' = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$	Давление в конце участка
$g = 9,81 \text{ м/с}^2$	Ускорение силы тяжести
$\rho = 860 \text{ кг/м}^3$	Плотность нефти
$m_0 = 0,25$	Показатель режима движения нефти по нефтепроводу
$i_0 = 0,006$	Гидравлический уклон

**Решение.**

Расход нефти через место повреждения определяем по формуле 8.2:

$$Q_1 = 1,0 - 0,8 \cdot \left\{ \frac{1}{100000 - 50000} \cdot \frac{160 - 120 + \frac{(40 - 4) \cdot 10^5}{860 \cdot 9,81} - 0,006 \cdot 50000 \cdot \left(\frac{1,0}{0,8}\right)^{2-0,25}}{0,006} \right\}^{0,5-0,25} =$$

$$= 1,0 - 0,8 \cdot \left\{ 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{40 + 427 - 300 \cdot 1,25^{1,75}}{0,006} \right\}^{0,25} = 1,0 - 0,8 \cdot \{0,0033 \cdot (40 + 427 - 443)\}^{0,25} =$$

$$= 1,0 - 0,8 \cdot 0,53 = 0,58 \text{ м}^3/\text{с}$$

$$V_1 = Q_1 \cdot \tau_1 = 0,58 \cdot 15 \cdot 60 = 522 \text{ м}^3.$$

**Пример 8.2.** На нефтепроводе произошел порыв. Величина утечки не фиксируется приборами на НПС. Рассчитать расход через место повреждения. Площадь отверстия  $\omega = 1 \text{ см}^2$ , кинематический коэффициент вязкости нефти  $\nu = 1 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ , давление в начале участка  $P' = 40 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , гидравлический уклон  $i = 0,006$ , глубина заложения нефтепровода  $h_T = 3 \text{ м}$ , плотность нефти  $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ , расстояние от НПС до места повреждения  $x^* = 30 \text{ км}$ .

**Решение.**

Вычисляем эквивалентный диаметр отверстия:

$$d_{\text{эkv}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \omega}{\pi}} = 1,13 \text{ см}.$$

Перепад напора в точке истечения:

$$h^* = 40 \cdot 10^5 / (900 \cdot 9,81) - 0,006 \cdot 30000 - 3 = 453 - 180 - 3 = 270 \text{ м}.$$

Вычисляем число Рейнольдса:

$$Re = 1,13 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{(2 \cdot 9,81 \cdot 270) / 10^{-5}} = 8,22 \cdot 10^4.$$

Коэффициент расхода по табл. 8.1:

$$\mu = 0,592 + 5,5 \cdot \sqrt{(8,22 \cdot 10^4)} = 0,61.$$

Расход через отверстие:

$$Q_1 = 0,61 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{(2 \cdot 9,81 \cdot 270)} = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}.$$

**Пример 8.3.** Рассчитать объем нефти, вытекшей через место повреждения нефтепровода от момента остановки перекачки  $\tau_0=8$  ч 30 мин до закрытия задвижек  $\tau_3=9$  ч 10 мин.  $Z_1=125$  м – геодезическая отметка самой высокой точки профиля аварийного участка нефтепровода,  $Z_M=100$  м – геодезическая отметка места повреждения, на аварийном участке нефтепровод имеет постоянный гидравлический уклон  $i=0,005$ , напор, создаваемый атмосферным давлением  $h_a=11$  м, внутренний диаметр трубопровода  $D_{ВН}=150$  мм, площадь отверстия  $\omega=10$  см<sup>2</sup>, элементарный интервал времени 10 минут, принять коэффициент расхода  $\mu = 0,62$ .

**Решение.**

Напор в отверстии:

$$h_1 = 125 - 100 - 3 - 11 = 11 \text{ м}.$$

Расход через отверстие:

$$Q_1 = 0,62 \cdot 10 \cdot 10^{-4} \cdot \sqrt{(2 \cdot 9,81 \cdot 11)} = 9,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}.$$

Объем нефти, вытекшей за элементарный интервал:

$$V_1 = 9,11 \cdot 10^{-3} \cdot 10 \cdot 60 = 5,46 \text{ м}^3.$$

Длина опорожненного участка нефтепровода:

$$l_1 = 4 \cdot 4,66 / 3,14 / 0,15^2 = 309 \text{ м}.$$

$$h_2 = h_1 - l_1 \cdot i = 11 - 309 \cdot 0,005 = 9,45 \text{ м}.$$

$$Q_2 = 8,44 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}, V_2 = 5,07 \text{ м}^3, l_2 = 287 \text{ м}.$$

$$h_3 = 8,02 \text{ м}, Q_3 = 7,78 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}, V_3 = 4,67 \text{ м}^3, l_3 = 264 \text{ м}.$$

$$h_4 = 6,70 \text{ м}, Q_4 = 7,11 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 / \text{с}, V_4 = 4,27 \text{ м}^3.$$

Общий объем вылившейся при аварии нефти:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 = 5,46 + 5,07 + 4,67 + 4,27 = 19,46 \text{ м}^3.$$